

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δυνατότητες Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο με έμφαση σε Επάκτιες Τεχνολογίες Ακτογραμμής.



**ΛΟΥΜΙΤΗΣ ΚΟΣΜΑΣ (ΑΜ 5894)**

**ΠΑΤΡΑ 2021**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας γίνεται αναφορά σε μια σχετικά νέα (ως προς τη γνώση) μορφή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ) με σημαντικές προοπτικές εκμετάλλευσης στο άμεσο μέλλον σε ολόκληρο το κόσμο. Πρόκειται για την ενέργεια που περιέχεται στα θαλάσσια κύματα. Αυτό το είδος ΑΠΕ θα μπορούσε στο άμεσο να συμβάλλει ως πηγή παραγωγής ενός μεγάλου ποσοστού της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Τα στάδια εξέλιξης των διάφορων τεχνολογιών ποικίλουν. Για παράδειγμα, μερικές από αυτές έχουν αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να έχουν προχωρήσει στο στάδιο της εμπορευματοποίησης με εγκαταστάσεις πολλών διασυνδεδεμένων μετατροπών να έχουν προγραμματιστεί για το άμεσο μέλλον, ενώ άλλες βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο σχεδιασμού ή δοκιμής.

Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα οικονομική και πληθυσμιακή αύξηση είναι λογικό να προβλεφθεί ότι στο μέλλον η ζήτηση ενέργειας θα αυξηθεί σημαντικά. Έχει υπολογιστεί ότι το ο παγκόσμιος πληθυσμός θα επεκταθεί με ποσοστό 25% μέχρι το 2040 πλησιάζοντας σχεδόν τα 9 δις. Αυτή τη στιγμή, σημαντική ποσότητα ενέργειας λαμβάνεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία για παράδειγμα το 2009 θεωρήθηκε η κύρια πηγή για παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (84%). Επομένως στο πλαίσιο της αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου και της συνακόλουθης κλιματικής αλλαγής, για το μέλλον θα πρέπει να εξετάζονται νέες στρατηγικές προκειμένου να εδραιωθεί ένα χαρτοφυλάκιο βιώσιμης ενέργειας.

Ανάμεσα στις λύσεις του προβλήματος είναι η χρήση των ΑΠΕ σε όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του ενεργειακού μίγματος. Μέχρι σήμερα η ηλιακή (φωτοβολταϊκά πάρκα) και η αιολική (πάρκα ανεμογεννητριών) είναι οι κύριες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται ευρέως. Αυτή τη στιγμή υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση φυσικών πόρων, η παγκόσμια δυναμικότητα το 2012 ξεπέρασε τα 1,47 GW κυρίως λόγω έργων που προέρχονται από ανεμογεννήτριες (39%), υδροηλεκτρικά και φωτοβολταϊκά με περίπου 26% το καθένα).

Από αυτή την προοπτική, σε μεγάλη κλίμακα το ωκεάνιο περιβάλλον υπόσχεται μια ακόμα πηγή την ωκεάνια – κυματική ενέργεια που είναι μια σημαντική πηγή ενέργειας που οφείλεται στη μεγάλη επιφάνεια του νερού, την ποικιλία των πόρων (άνεμος, κύμα ή παλίρροιες) και τη σχετικά υψηλή ενεργειακή της πυκνότητα. Η συμπλήρωση του ενεργειακού μίγματος με την κυματική θα συμβάλλει στην μεγαλύτερη ενεργειακή αυτάρκεια και επάρκεια, ειδικά σε απομονωμένα νησιωτικά συμπλέγματα τα οποία η χώρα μας διαθέτει σε μεγάλο βαθμό.

Η υπεράκτια αιολική βιομηχανία έχει ήδη γίνει ένας σημαντικός παίκτης στην αγορά των ΑΠΕ, ειδικά σε ευρωπαϊκό επίπεδο, όπου στο πρώτο εξάμηνο του 2013 αποκτήθηκε συνολική ισχύς 6 GW από 58 αιολικά πάρκα συνδέονται πλήρως με το δίκτυο. Από τους διαφορετικούς τύπους των θαλάσσιων πόρων, μεταξύ άλλων (όπως ο άνεμος και οι παλίρροιες), η κυματική ενέργεια παρέχει την υψηλότερη ενέργεια με τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας. Τα κύματα γεννιούνται στους ωκεανούς και μπορούν να ταξιδεύουν πολύ μεγάλες αποστάσεις χάνοντας πολύ μικρό ποσό της αρχικής τους ενέργειας μέχρι να φτάσουν κοντά στην ακτή, όπου αυτή η ενέργεια διαχέεται λόγω της αλληλεπίδρασης με τον βυθό.

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



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

Οι σπουδαστές

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διαπραγματεύεται τις δυνατότητες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα με έμφαση σε επάκτιες τεχνολογίες ακτογραμμής ως μια πιο οικονομική λύση – επένδυση λόγω και του πολύ μεγάλου μήκους ακτογραμμής που διαθέτει η χώρα μας. Η δομή της εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο καταγράφονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των κυμάτων και ο υπολογισμός της παραγόμενης κυματικής ενέργειας. Υλικό έχει αντληθεί από τεχνικές εκθέσεις του ΕΛΚΕΘΕ και από διπλωματικές εργασίες που εκπονήθηκαν (Μανάλης 2012, Μουστάσος, Προσκεφαλάς 2019). Δίνεται έτσι το βασικό υπόβαθρο για τη μελέτη της κυματικής ενέργειας μέσα από θεωρητική ανάλυση με τα συνακόλουθα μαθηματικά μοντέλα υποστήριξης. Πιο σημαντικά το φαινόμενο του κυματισμού βασίζεται στη στατιστική περιγραφή του φαινομένου με το κύμα να αντιμετωπίζεται ως στοχαστικό σήμα, το οποίο επιδέχεται στατιστική ανάλυση για την εξαγωγή πληροφορίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων, περιγράφονται μορφές κυματικής τεχνολογίας και γίνεται η κατηγοριοποίηση των βασικών μηχανισμών – μετατροπών (WEC's – Wave Energy Converters) που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τις μέρες μας για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική. Επίσης οι τεχνολογίες κυματικής διαχωρίζονται ως προς τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ως προς τηναπόσταση από την ακτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση ως προς τη διαδικασία επιλογής του τύπου που θα μπορούσε να εγκατασταθεί μια φάρμα μετατροπών (WECs) για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας. Αναλύονται εργασίες που σχετίζονται με παράκτιες – επάκτιες εγκαταστάσεις που δυνητικά θα μπορούσαν να υλοποιηθούν, ως μορφές προμελέτης προς υλοποίηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται τα χαρακτηριστικά του κυματικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών όπως έχουν καταγραφεί από το ΕΛΚΕΘΕ και έχουν αναπαραχθεί και σε αρκετές εργασίες με σκοπό μια μελλοντική εκμετάλλευση των πόρων που διαθέτει η χώρα μας. Αναπτύσσεται εν συντομία ο τρόπος συλλογής δεδομένων τόσο πειραματικών όσο και υπολογιστικών προκειμένου να χαρακτηριστεί το κυματικό δυναμικό. Δίνεται περιληπτική περιγραφή των διατάξεων συλλογής πειραματικών δεδομένων ενώ επισημαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου υπολογισμού και επαλήθευσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται σύντομα επιλεγμένες εφαρμοσμένες διατάξεις ακτογραμμής με τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εντοπίζονται κατά την εφαρμογή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο έκτο κεφάλαιο δίνεται το ιστορικό και η τρέχουσα κατάσταση ως προς την εκμετάλλευση της κυματικής στην Ελλάδα και περιγράφεται πιο αναλυτικά η προσπάθεια που γίνεται τα τελευταία χρόνια στην Κρήτη σε συνεργασία του Λιμένα με το Πολυτεχνείο και το Μεσογειακό Πανεπιστήμιο και εταιρία. Περιγράφονται



κατασκευαστικά στοιχεία μιας υβριδικής φάρμας που έχει ήδη εγκατασταθεί για συνεκμετάλλευση κυματικής και ηλιακής ενέργειας.

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



## Περιεχόμενα

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>iv</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Χαρακτηριστικά Κυματικής Ενέργειας</b> .....	<b>5</b>
1.1 Κυματική Ισχύς. ....	6
1.2 Η συμβολή των ανέμων στη δημιουργία θαλασσίων κυμάτων. ....	7
1.3 Η δημιουργία των κυμάτων. ....	8
1.3.1 Θεωρία γραμμικών κυμάτων του Airy. ....	12
1.3.2 Θεωρία του Stokes. ....	13
1.3.3 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων.....	14
1.3.4 Στοχαστική θεώρηση των κυμάτων.....	15
1.3.5 Τροποποίηση των κυμάτων. ....	16
1.4 Στατιστική Ανάλυση του φαινομένου κύματος. ....	18
1.5 Φασματική Ανάλυση Κυματισμών. ....	20
1.6 Βραχυπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών. ....	24
1.7 Μακροπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών. ....	26
<b>2. Εκμετάλλευση Ενέργειας των Κυμάτων</b> .....	<b>27</b>
2.1 Μορφές Κυματικής Τεχνολογίας.....	32
2.2 Κατηγορίες Μετατροπέων WEC's (Wave Energy Converters). ....	34
2.2.1 Εξασθενητής κυμάτων (Attenuator). ....	35
2.2.2 Αξονοσυμμετρικός Σημειακός Απορροφητής – (Point absorber). ....	36
2.2.3 Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (Oscillating Wave Surge Converter).....	36
2.2.4 Παλλόμενη υδάτινη στήλη (ΠΥΣ - OWC) .....	37
2.2.5 Συσκευή υπερακόντισης– υπερύψωσης (overtopping devices).....	38
2.2.6 Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης.....	39
2.3 Τεχνολογίες Μετατροπής ενέργεια κυμάτων.....	40
2.3.1 Τεχνολογίες Ακτογραμμής: .....	40
2.3.2 Παράκτιες Τεχνολογίες:.....	40
2.3.2 Υπεράκτιες Τεχνολογίες (Ανοιχτής Θαλάσσης).....	40
<b>3. Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b> .....	<b>41</b>
<b>4. Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό</b> .....	<b>50</b>
4.1 Δεδομένα του μοντέλου WAM. ....	51



4.2	Δεδομένα μετρήσεων συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.....	54
4.2.1	Πλωτοί Σταθμοί Μέτρησης.....	55
4.3	Παράδειγμα μελέτης κυματικού δυναμικού (Σκύρος).....	56
<b>5.</b>	<b>Εφαρμοσμένες Διατάξεις Ακτογραμμής.....</b>	<b>62</b>
5.1	Σύστημα LIMPET (Σκωτία).....	62
5.2	Σύστημα WECA (Ελλάδα).....	64
5.4	Σύστημα LabBouoy (Ελλάδα).....	65
5.5	Σύστημα SDE (Ισραήλ).....	68
6.2	Σύστημα WETEnGen (Καναδάς).....	69
6.5	Σύστημα WaveStar (Δανία).....	70
6.6	Σύστημα Power Buoy (ΗΠΑ).....	72
6.7	Σύστημα AquaBuoy (ΗΠΑ).....	73
<b>6.</b>	<b>Κυματική Ενέργεια στην Ελλάδα.....</b>	<b>76</b>
6.2	Χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα του μετατροπέα.....	78
6.3	Λιμένας Ηρακλείου – Τοποθέτηση μετατροπέα.....	79
6.4	Κατασκευαστικά Στοιχεία Φάρμας.....	83
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα - Ανασκόπηση.....</b>	<b>86</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>89</b>
	<b>Ιστοσελίδες σχετικές.....</b>	<b>90</b>



## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Παγκόσμια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα.....	4
Εικόνα 2: Αθροιστική εικόνα κυματικής ενέργειας [Μανάλης 2012]. .....	5
Εικόνα 3: Μέσες τιμές κυματικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα. [Μανάλης 2012] .....	6
Εικόνα 4: Κατανομή ανέμων στις γεωγραφικές ζώνες. [Μανάλης 2012].....	7
Εικόνα 5: Ακτογραμμές υψηλού κυματικού δυναμικού.[Ντάβαλης 2016].....	8
Εικόνα 6: Δημιουργία και διάδοση κυμάτων. [Μανάλης 2012].....	8
Εικόνα 7: Χαρακτηρισμός κυμάτων ως προς την περίοδο. [Κούρτζης 2013].....	9
Εικόνα 8: Υπέρθυση (ενισχυτική και αποσβεστική) κυμάτων. [Κούρτζης 2013].....	10
Εικόνα 9: Υπολογισμός Feff στο σημείο Α. [Σουκισιάν 2007] .....	11
Εικόνα 10: Μορφή γραμμικών κυμάτων του Airy.[Μανάλης 2012].....	12
Εικόνα 11: Εξέλιξη κυμάτων κατά τη θεωρία Stokes. [3].....	14
Εικόνα 12: Χρονοσειρά σήματος περιγραφής ύψους κύματος. ....	15
Εικόνα 13: Ακολουθία κυμάτων ποικίλου ύψους και περιόδων. [3] .....	16
Εικόνα 14: Κατάσταση "Τυχαίας" Θάλασσας.....	16
Εικόνα 15: Περίπτωση Θραύσης Κύματος. [Μανάλης 2012] .....	17
Εικόνα 16: Εικόνα ανακλώμενου κύματος. [Μανάλης 2012].....	17
Εικόνα 17: Εικόνα διαθλώμενου κύματος. ....	18
Εικόνα 18: Εικόνα περιθλώμενου κύματος. ....	18
Εικόνα 19: Υπόδειγμα χρονοσειράς $\eta(t)$ καταγραφής κυματισμών. (Σουκισιάν 2007). .....	19
Εικόνα 20: Τυπικό φάσμα JONSWAP για $H_s=1m$ , $T_p=6.0s$ (Σουκισιάν 2007) .....	22
Εικόνα 21: Φασματική Κατανομή Κυμάτων. [Κούρτζης 2013] .....	23
Εικόνα 22: Εκμετάλλευση ενέργειας κυμάτων σε στροβίλους.....	27
Εικόνα 23: Σχηματική ερμηνεία δημιουργία και μεταφοράς ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων. [Program Aquaret].....	29
Εικόνα 24: Σχηματική περιγραφή των δομών που μεταφέρουν ενέργεια στη θάλασσα ως προς το βάθος από τον πυθμένα. [Program Aquaret].....	29
Εικόνα 25: Εικόνα των ετήσιων πόρων <a href="#">[11]</a> .....	30
Εικόνα 26: Κατανομές έντασης κυμάτων στον ευρωπαϊκό χώρο <a href="#">[12]</a> .....	30
Εικόνα 27: Δυνατότητες Κινήσεων Πλωτών Διατάξεων. [Μανάλης 2012].....	33
Εικόνα 28: Πλωτή συσκευή με τον άξονά της ευθυγραμμισμένο στο μέτωπο του κύματος. ....	36
Εικόνα 29: Πλωτή κατασκευή απορρόφησης κυματικής ενέργειας. ....	37
Εικόνα 30: Παλλόμενος συλλέκτης κυματικών κλυδωνισμών. ....	37
Εικόνα 31: Κίνηση παλλόμενης στήλης (ΠΥΣ). ....	38
Εικόνα 32: Διάταξη Υπερακόντισης (Νορβηγία).....	39
Εικόνα 33: Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης και σχηματική αναπαράσταση. 39	
Εικόνα 34: Περιοχή μελέτης εγκατάστασης κυματικής φάρμας στη ΒΔ Γαλικία (Iglesias 2011). ....	43
Εικόνα 35: Δεδομένα βαθυμετρίας για την περιοχή ΒΔ Γαλικίας (Iglesias2011). ....	43
Εικόνα 36: Περιοχή - Στόχος στην περιοχή Αγ. Γεωργίου στις εκβολές του Δούναβη. .....	44
Εικόνα 37: Πεδίο εφαρμογής μοντέλου SWAN (Zanarol et al. 2014). ....	45
Εικόνα 38: Περιοχή μελέτης και συντεταγμένες πηγών δεδομένων [Rusu 2016]. ....	47





Εικόνα 39: Σταθμοί - Σενάρια του μοντέλου προσομοίωσης (Rusu 2016).....	49
Εικόνα 40: Διαδικασία μοντέλου hindcast.....	51
Εικόνα 41: Η περιοχή ανάλυσης – μελέτης του μοντέλου [Σουκισιάν 2007]. ....	52
Εικόνα 42:Χωρική Κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας στις 4 εποχές ξεκινώντας από Χειμώνα έως φθινόπωρο [Σουκισιάν 2007]. ....	53
Εικόνα 43:Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες (Ντάβαλης 2016) .....	54
Εικόνα 44:Οι πλωτοί σταθμοί Wavescan,Seawatch και Seawatch Deep Sea Module (SDSM).....	55
Εικόνα 45:Οι σταθμοί μετρήσεων του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Ντάβαλης 2016).....	56
Εικόνα 46: Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).....	57
Εικόνα 47:Ροδόγραμμα ανέμου θαλασσίου χώρου Σκύρου (Ντάβαλης 2016). ....	57
Εικόνα 48: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα ανέμου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).....	58
Εικόνα 49: Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος (Ντάβαλης 2016).....	58
Εικόνα 50: Ροδόγραμμα κύματος σταθμού Σκύρου (Ντάβαλης 2016) .....	58
Εικόνα 51: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα κύματος (Ντάβαλης 2016).....	59
Εικόνα 52: Συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος - ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016) . ....	59
Εικόνα 53: Ποσοστιαία κατανομή σημαντικού ύψους ως προς την ταχύτητα ανέμου. .....	59
Εικόνα 54: Χρονοσειρά τιμών περιόδου κορυφής $T_p$ . ....	60
Εικόνα 55: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας $T_p$ (Ντάβαλης 2016) .....	60
Εικόνα 56: Κατανομή μέσης ετήσιας παραγωγής κυματικής ενέργειας (Ντάβαλης 2016). ....	61
Εικόνα 57:Η εγκατάσταση LIMPET (Σκωτία). ....	62
Εικόνα 58: Τμηματική περιγραφή της διάταξης LIMPET.....	63
Εικόνα 59:Διαδικασίες – στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET.....	64
Εικόνα 60: Προτεινόμενη εφαρμογή μετατροπής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστη WECA.....	65
Εικόνα 61: Τμήματα της διάταξης WECA. ....	65
Εικόνα 62: Βασικά μέρη εγκατάστασης LabBouoy κοντά σε κυματοθραύστη.....	66
Εικόνα 63:Σχηματική απεικόνιση των κινούμενων τμημάτων LabBouoy. ....	67
Εικόνα 64:Λειτουργία δοκιμαστικού μοντέλου κλίμακας 1:15 (ΕΜΠ). ....	67
Εικόνα 65: Εγκατάσταση συστήματος SDE στο Ισραήλ. ....	68
Εικόνα 66:Διαδοχή σταδίων παλινδρομικής κίνησης πτερυγίου. ....	69
Εικόνα 67: Τμήματα που αποτελούν τη διάταξη WETEnGen. ....	70
Εικόνα 68: Εγκατάσταση διάταξης WaveStar.....	71
Εικόνα 69: Συστοιχία διάταξης WaveStar σε λειτουργία.....	71
Εικόνα 70: Σύστημα WaveStar σε θέση ασφαλείας.....	72
Εικόνα 71: Διάταξη PowerBouoy σε λειτουργία - διάγραμμα.[05 <sup>A</sup> ] .....	73
Εικόνα 72: Διαστασιολόγηση συσκευής PB150.....	73
Εικόνα 73: Μοντέλο AquaBouoy με ενσωματωμένες ΑΠΕ. ....	74
Εικόνα 74:Η λειτουργία του AquaBouoy και η προετοιμασία καθελκυσμού. ....	75
Εικόνα 75: Συστοιχία μετατροπών για υψηλότερου βαθμού εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.....	79
Εικόνα 76: Η διαδικασία της τοποθέτησης δομοστοιχείων μετατροπής κυματικής ενέργειας. ....	80



Εικόνα 77: Εικονογράφηση της εγκατάστασης πέντε δομοστοιχείων στον κυματοθραύστη του λιμένα Ηρακλείου.....	80
Εικόνα 78: Φάρμα - Συστοιχίες μετατροπών (WEC's). ....	81
Εικόνα 79: Δοκιμές σε κλίμακα Εργαστηρίου στη Φλωρεντία. ....	81
Εικόνα 80: Εγκατάσταση πρότυπης μονάδας WEC στο λιμάνι του Ηρακλείου.....	82
Εικόνα 81: Το δομοστοιχείο εγκατεστημένο - Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (on board). ....	83
Εικόνα 82: Σκαρίφημα εγκατάστασης στήριξης των WECs. ....	84
Εικόνα 83: Κατασκευή πλωτής φάρμας 4 στοιχείων (WECs). ....	84
Εικόνα 84: Δυνατότητα συστοιχίας πλωτών σωμάτων. ....	84
Εικόνα 85: Θέση γεννήτριας μετατροπέα ή συστοιχίας πολλών πλωτών τμημάτων. ....	85
Εικόνα 86: Δυνατότητα υβριδικής φάρμας συνεκμετάλλευσης κυματικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας. ....	85
Εικόνα 87: Εφαρμογή υβριδικής φάρμας συνεκμετάλλευσης κυματικής ηλιακής ενέργειας στο λιμάνι του Ηρακλείου.....	85



## Εισαγωγή

Σύμφωνα με στοιχεία του 2020, στον ευρωπαϊκό χώρο περίπου το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ο στόχος για το 2030 προσαυξάνεται σημαντικά κυρίως λόγω της απαιτούμενης μείωσης ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μείωσης του ενεργειακού αποτυπώματος σε παγκόσμια κλίμακα. Η υψηλή διαθεσιμότητα πλέον των πολλών μορφών ΑΠΕ συνεισφέρει προς το σκοπό αυτό.

Η ενέργεια αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την παραγωγική διαδικασία. Σε καθημερινή βάση σε πλήθος διαδικασιών ενέργεια δεσμεύεται, παράγεται, καταναλώνεται, μετατρέπεται, αποθηκεύεται και υποβαθμίζεται. Με την τεχνολογική πρόοδο έχουν αναπτυχθεί πολλοί μηχανισμοί μετατροπής σημαντικών ενεργειακών ποσοτήτων ώστε όλο και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας να είναι διαθέσιμα με όλο και πιο οικονομικό τρόπο.

Προς το σκοπό της μείωσης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων (κυρίως λιγνίτη) η χρήση των ΑΠΕ προβάλλει ως ο μοναδικός τρόπος στη μείωση των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη και γενικότερα σε αυτό που ονομάζουμε σήμερα κλιματική αλλαγή.

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

Η εκμετάλλευση της ωκεάνιας ή κυματικής ενέργειας και η αξιοποίηση στο άμεσο μέλλον θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά στο ενεργειακό μείγμα της χώρας. Το πλεονέκτημα που διαθέτει η Ελλάδα είναι το πολύ μεγάλο μήκος ακτογραμμής που φθάνει περίπου τα 16,000Km. Επίσης δεδομένης της σύνδεσης της αιολικής με την κυματική ενέργεια η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας συνδέεται με το υψηλό αιολικό δυναμικό στο Αιγαίο Πέλαγος και όχι μόνο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αρκετά έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή. Σύμφωνα με τις έως σήμερα λιγοστές μελέτες εκτιμάται ότι η μέση ετήσια κυματική ισχύς είναι της τάξης (4 – 11) kW/m (Clement Alain et al. 2002).

Στον ευρωπαϊκό χώρο τα πρώτα βήματα στην ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων έγιναν κατά την περίοδο της πετρελαϊκής κρίσης το 1973. Εκείνη τη χρονική στιγμή (με τον τετραπλασιασμό της τιμής του πετρελαίου) οδήγησε σε στροφή των ανεπτυγμένων χωρών προς την εκμετάλλευση των ΑΠΕ. Δόθηκε τότε και ο ορισμός των ΑΠΕ ως μορφές ενέργειας οι οποίες μπορούν να είναι διαθέσιμες μακροπρόθεσμα χωρίς η χρήση τους να μειώνει τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη και χωρίς την πρόκληση περιβαλλοντικής βλάβης τέτοιας που η φύση να αδυνατεί να επιδιορθώσει χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων συγκεντρώνει πλεονεκτήματα, όπως ότι

- Ως μορφή ΑΠΕ είναι ανεξάντλητη, προσφέρει ανεξαρτησία από εισαγωγές καυσίμων και συμβάλλει στην δημιουργία θέσεων εργασίας.
- Η εκμετάλλευση της προκαλεί μηδαμινή επιβάρυνση (μόλυνση) του περιβάλλοντος. Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτες για κάθε MWh ηλεκτρικού



- ρεύματος που παράγεται από μετατροπή της κυματικής ενέργειας εξοικονομούνται κατά μέσο όρο 136 megatons CO<sub>2</sub>.
- Οι επιπτώσεις από την εγκατάσταση κατασκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας στην χλωρίδα και την πανίδα θεωρούνται ήπιες, ενώ μικρές θεωρούνται η οπτική και ακουστική ενόχληση.
  - Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα όμως της κυματικής ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που παρουσιάζει η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών.

Από το 1990 άρχισαν να εμφανίζονται εταιρίες δραστηριοποιούμενες στην ανάπτυξη μηχανισμών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Οι κυματικές συσκευές χαρακτηρίζονται ως προς την τοποθεσία εγκατάστασης και διαχωρίζονται σε επάκτιες (ακτογραμμής), παράκτιες ή υπεράκτιες.

Μια βασική παράμετρος για τον υπολογισμό της ενέργειας των κυματισμών είναι το κυματικό δυναμικό και η εκτίμηση αυτού με βάση θεωρητικά μοντέλα. Η θεωρητική εκτίμηση του κυματικού δυναμικού αφορά δύο περιπτώσεις. Καταρχήν ο απλός αρμονικός κυματισμός αποτελεί την πιο απλή μαθηματική προσέγγιση για τη μελέτη των δισδιάστατων επιφανειακών κυματισμών (γραμμική θεωρία κυματισμών του Airy). Πέρα όμως από τη θεωρητική ανάλυση υπάρχουν οι ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας, για τη μελέτη των οποίων εισάγεται η έννοια του μοντέλου τυχαίας φάσης.

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

Considering the current economic and population growth it is logic to anticipate that in the near future the demand for energy will increase substantially [1,2]. It has been estimated that the global population will expand with a rate of 25% during the time interval 2010-2040 reaching almost 9 billion. At this moment, a significant amount of energy is obtained from burning fossil fuels, which for example in 2009 were considered the main source of the global greenhouse gas emissions (84%)

Although this issue can be considered a serious threat for the future, it is possible to consider new strategies in order to consolidate a sustainable energy portfolio [5e9]. One solution may be found in the use of various renewable energy sources like wind or sunlight, which are naturally replenished [10e12]. Considering only the electricity generation sector for the year 2008, the global technical potential was evaluated to be in the range of 260e2072 EJ/yr [13].

There is currently an increasing interest in the use of natural resources, the world wide capacity in 2012 exceeded 1.47 GW (up with 8.5% from 2011) mainly due to projects coming from the wind power sector (39%), hydropower and photovoltaic (with about 26% each) [14]

From this perspective, on a large scale level the marine environment promises to be an important source of energy due to the large water surface, the diversity of the resources (wind, wave or tides) and their relatively high energy density. The offshore wind industry has already become an important player in this market [15], especially on a European level, where in the first half of 2013 a total capacity of 6 GW was obtained from 58 wind farms fully grid connected [16]. From the different types of

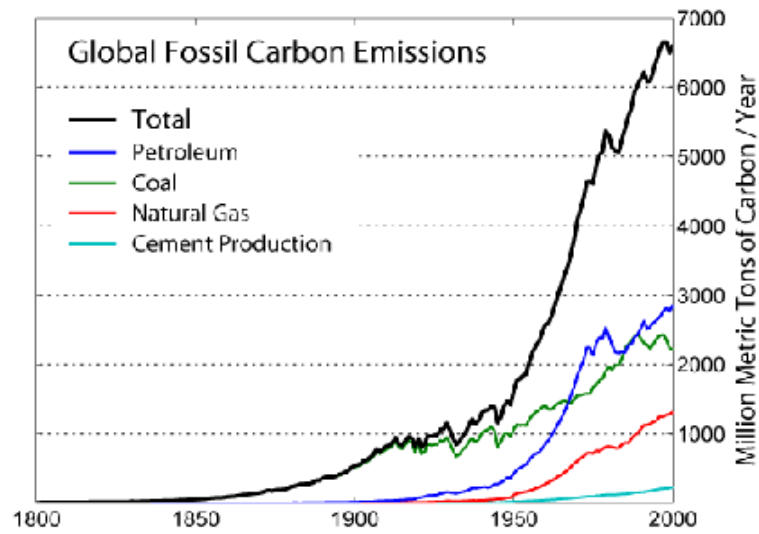
**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΛΟΥΜΙΤΗΣ ΚΟΣΜΑΣ**

Δυνατότητες Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο με έμφαση σε  
Επτάκιτες Τεχνολογίες Ακτογραμμής.

*ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών*



marine resources, the wave energy provides the highest energy concentration being also more predictable than solar or wind. From their generation areas, the waves can travel over large distances with very little energy losses until they arrive in the nearshore, where this energy is dissipated due to the interaction with the seabed [17].



Εικόνα 1: Παγκόσμια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα.

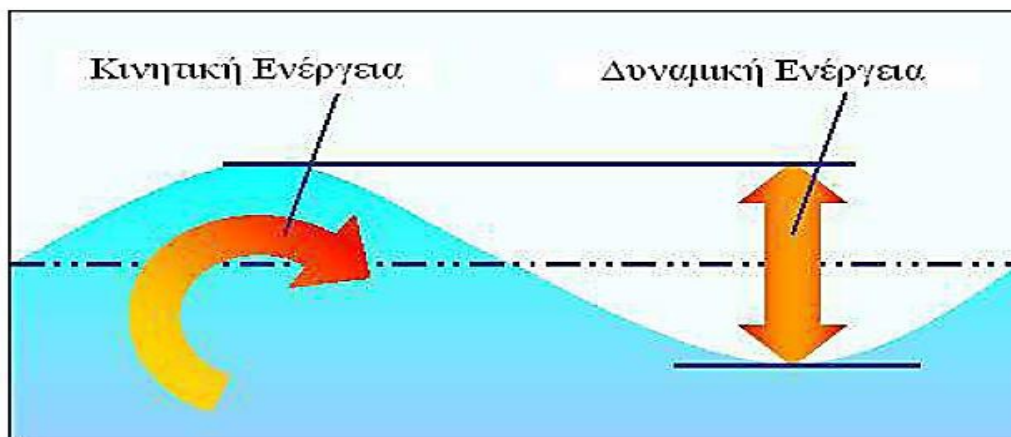


## 1. Χαρακτηριστικά Κυματικής Ενέργειας.

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

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

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



Εικόνα 2: Αθροιστική εικόνα κυματικής ενέργειας [Μανάλης 2012].

Η συνολική ενέργεια των κυμάτων υπολογίζεται από την σχέση:

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



όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού ( $\text{kg/m}^3$ ),

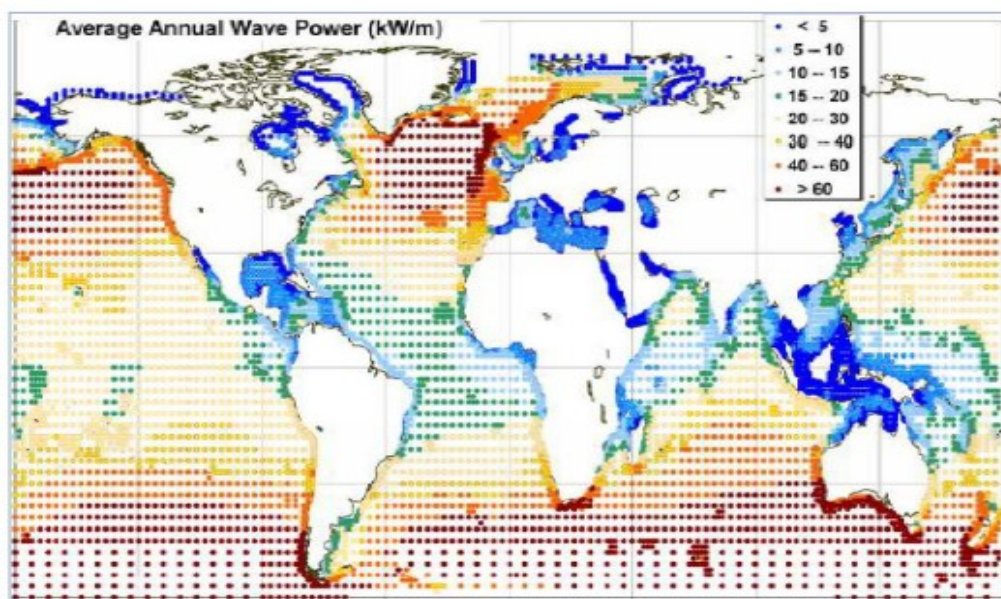
$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{m/s}^2$ )

$H$ : το ύψος του κύματος (m),

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

## 1.1 Κυματική Ισχύς.

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



Εικόνα 3: Μέσες τιμές κυματικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα. [Μανάλης 2012]

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

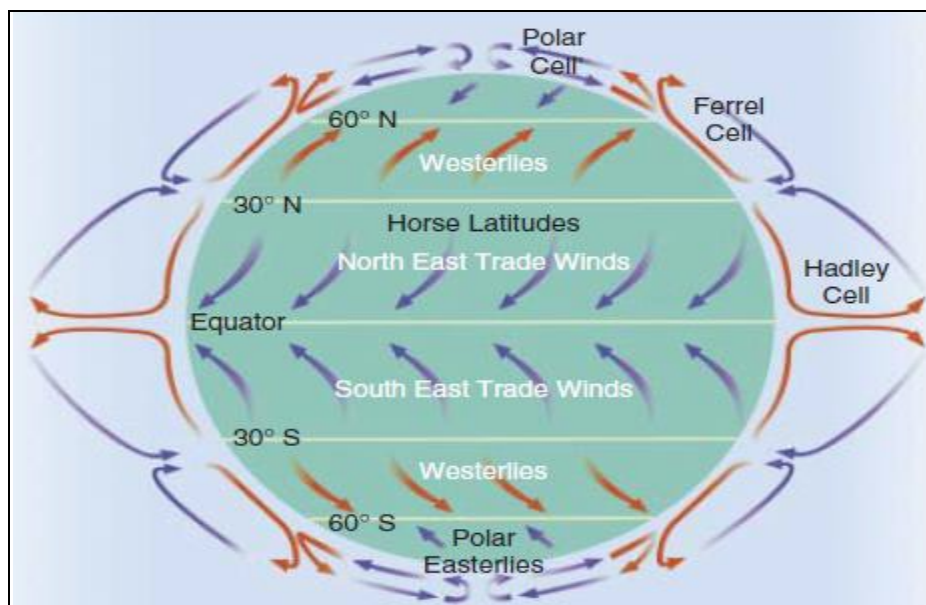




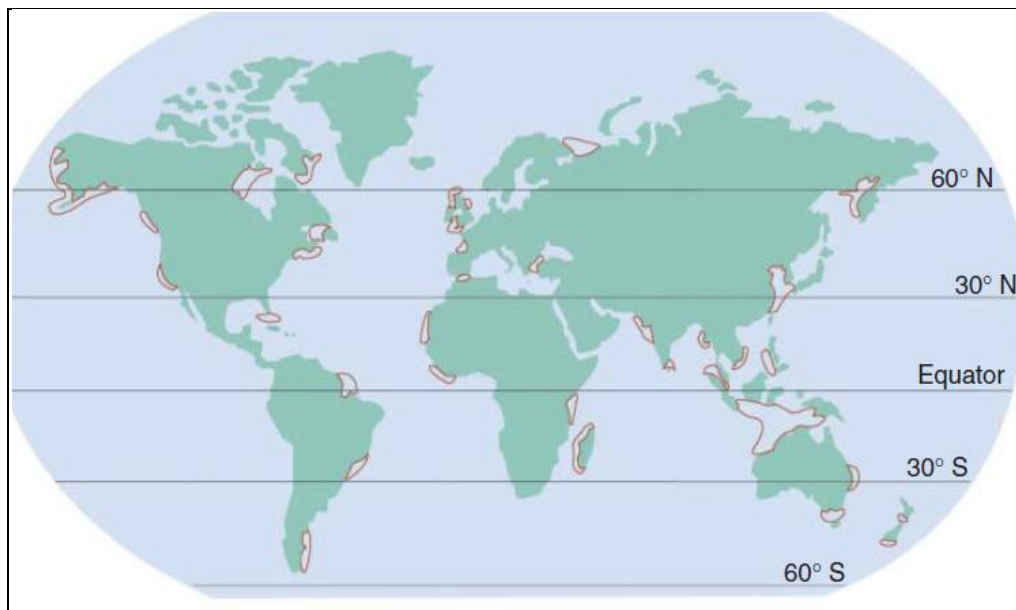
## 1.2 Η συμβολή των ανέμων στη δημιουργία θαλασσίων κυμάτων.

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

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



Εικόνα 4: Κατανομή ανέμων στις γεωγραφικές ζώνες. [Μανάλης 2012]



Εικόνα 5: Ακτογραμμές υψηλού κυματικού δυναμικού. [Ντάβαλης 2016]

### 1.3 Η δημιουργία των κυμάτων.

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



Εικόνα 6: Δημιουργία και διάδοση κυμάτων. [Μανάλης 2012]

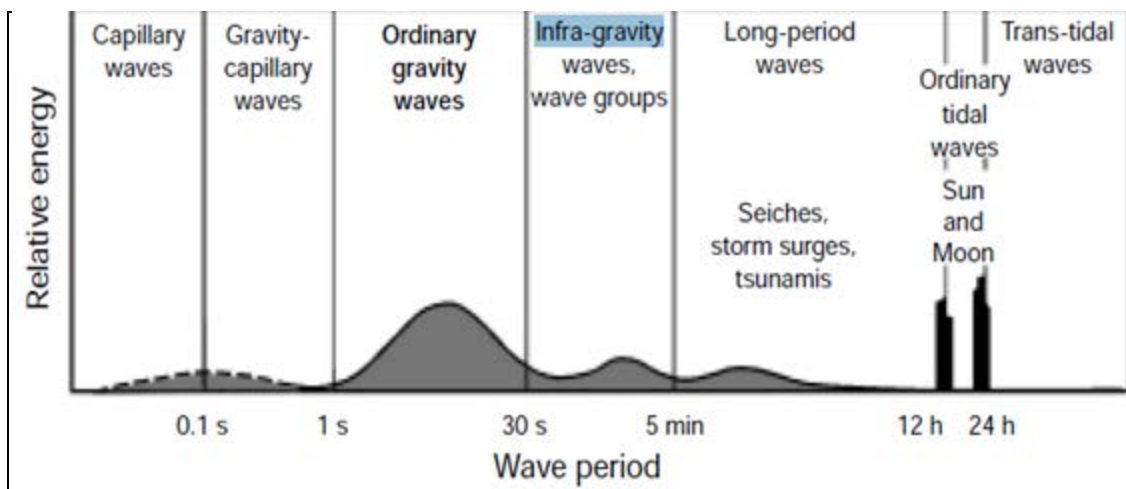


Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στα κύματα και επομένως το μέγεθος αυτών των κυμάτων εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάρκεια πνοής του ανέμου και από την απόσταση πάνω από την οποία πνέει ο άνεμος. Ισχύς συγκεντρώνεται σε κάθε στάδιο σχηματισμού των κυμάτων με αποτέλεσμα ηλιακή ισχύς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

Κάθε κύμα χαρακτηρίζεται από τέσσερις κύριες παραμέτρους:

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

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



Εικόνα 7: Χαρακτηρισμός κυμάτων ως προς την περίοδο. [Κούρτζης 2013]

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

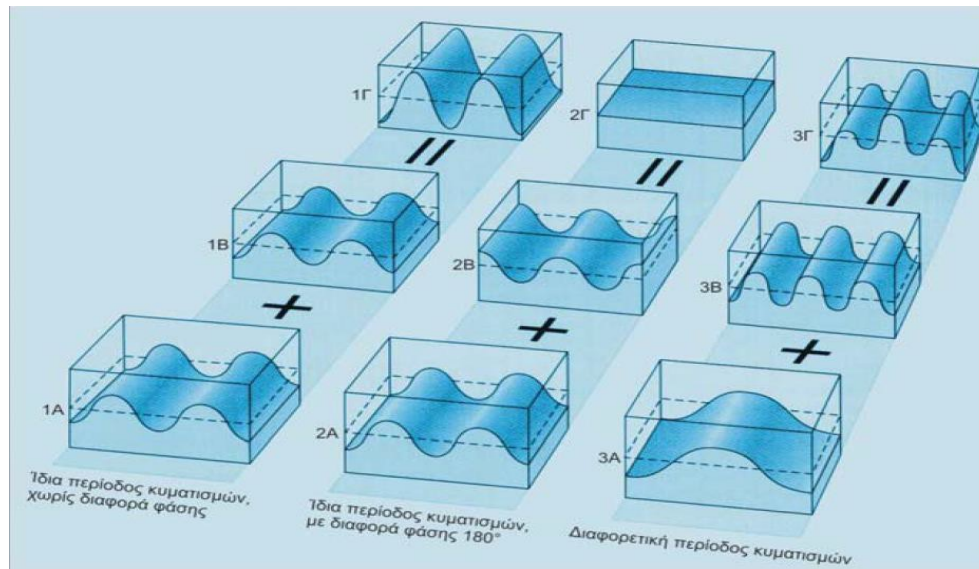
Τα κύματα βαρύτητας που στην βιβλιογραφία αναφέρονται και ως ανεμογενή κύματα παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση και είναι τα πιο σημαντικά από την άποψη των επιπτώσεων τους στον άνθρωπο.

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

Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ομοιογένεια στις μορφές των κυμάτων. Αντίθετα δημιουργούνται διάφοροι κυματισμοί που συμβάλλουν μεταξύ τους με



διάφορους συνδυασμούς διαφοράς φάσης και έτσι η μορφή της θαλάσσιας επιφάνειας είναι αποτέλεσμα μιας υπέρθεσης κυμάτων.



Εικόνα 8: Υπέρθεση (ενισχυτική και αποσβεστική) κυμάτων. [Κούρτζης 2013]

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

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

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

- $F$  = μήκος αναπτύγματος. Είναι η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση του θαλάσσιου πεδίου από ακτή σε ακτή κατά μήκος της οποίας δρα ο κυματισμός. Με βάση την αναφερθείσα επίδραση του ανέμου σε τομέα  $\pm 45^\circ$  στην περίπτωση πολύπλοκης τοπογραφίας ακτών και πλευρικού περιορισμού του πεδίου ανάπτυξης κυματισμών, το ισοδύναμο (effective) μήκος ανάπτυξης ορίζεται σύμφωνα με τους συμβολισμούς (Εικ.5) ως εξής:



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

Όπου

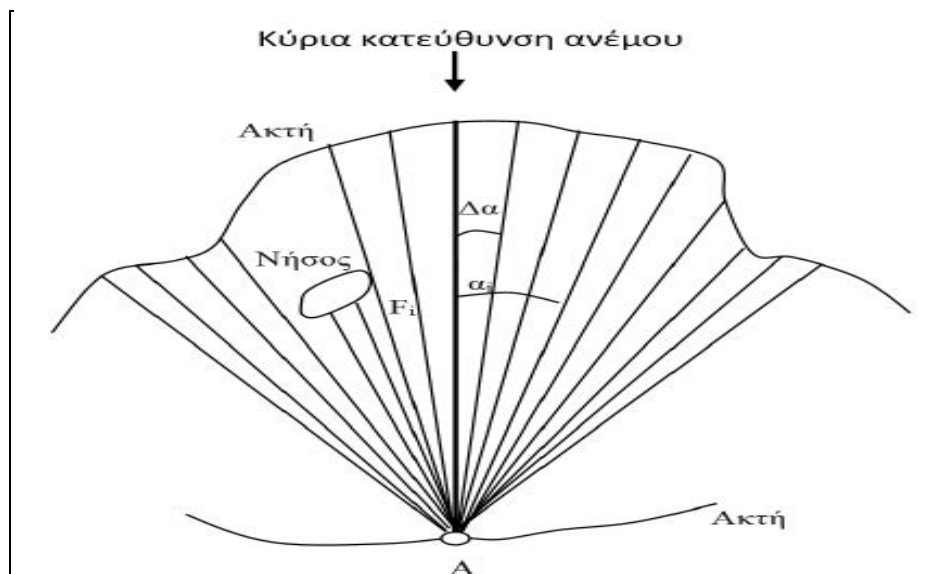
$i$  ακέραιος που περιγράφει την κατεύθυνση ακτίνων ανά  $\Delta\alpha=5$  ή  $10$  μοίρες, εκατέρωθεν της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου,  $\alpha_i$  η γωνία που σχηματίζεται από την κύρια κατεύθυνση πνοής και την εκάστοτε ακτίνα ( $\alpha_i=i \Delta\alpha$ ),  $2N+1$  ο αριθμός των ακτίνων (συνήθως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

$t_D$  η διάρκεια πνοής του ανέμου,

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

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

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



Εικόνα 9: Υπολογισμός  $F_{\text{eff}}$  στο σημείο A. [Σουκισιάν 2007]

Η ταχύτητα αυτή ως παράγοντας κυματογένεσης επηρεάζεται από τη θερμική ευστάθεια της κατώτερης ατμόσφαιρας που περιγράφεται από τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα/νερού. Λόγω της μη γραμμικής μορφής της σχέσης ταχύτητας ανέμου και διατμητικής τάσης που ασκείται στην επιφάνεια, χρησιμοποιείται συνήθως η ταχύτητα τριβής  $u_{w^*}$  που ορίζεται:

$$u_{w^*}^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.3)$$



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

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

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

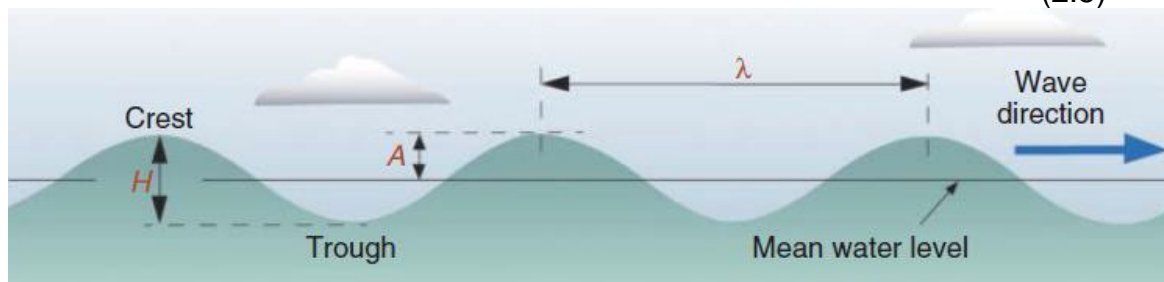
Οι πιο σύγχρονες διατάξεις, γνωστές και σαν «πλωτήρες ιππείς κυμάτων» (wave riding buoys), διασπείρονται ή αγκυροβολούνται στην ανοιχτή θάλασσα, επιπλέον, καταγράφουν τις τρισδιάστατες, επιταχύνσεις λόγω των κυματισμών και τηλεμεταδίδουν ή αποθηκεύουν στη μνήμη τους, τις ψηφιοποιημένες πληροφορίες τους.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

### 1.3.1 Θεωρία γραμμικών κυμάτων του Airy.

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

Η εξίσωση που περιγράφει τα γραμμικά κύματα είναι:

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



Εικόνα 10: Μορφή γραμμικών κυμάτων του Airy. [Μανάλης 2012]

όπου  $h$  το ύψος του κύματος τη χρονική στιγμή  $t$  σε οριζόντια απόσταση  $x$ .



Οι γενικές εξισώσεις της ταχύτητας και του μήκους κύματος είναι:

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

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

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

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

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

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

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

Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από τα κύματα είναι

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

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

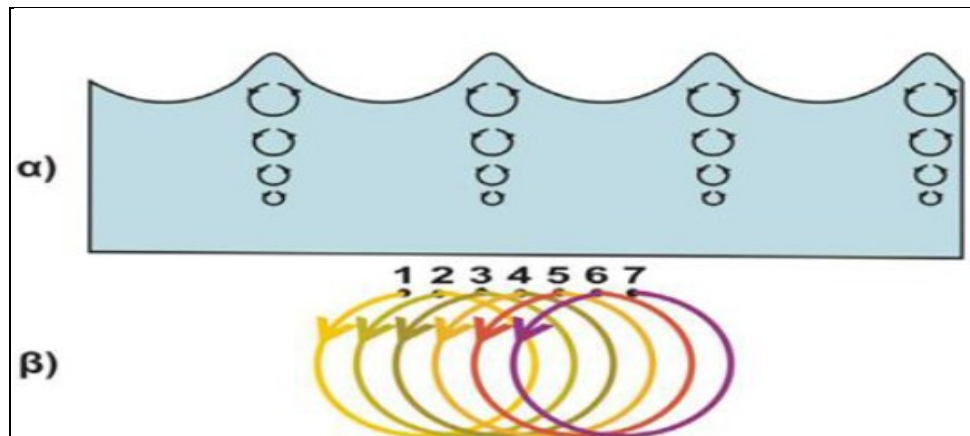
### 1.3.2 Θεωρία του Stokes.

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



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

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



Εικόνα 11: Εξέλιξη κυμάτων κατά τη θεωρία Stokes. [3]

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

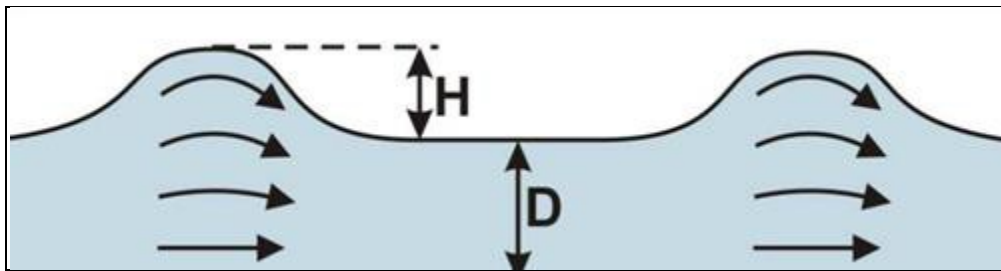
$$C_m = \frac{\pi H^2}{\lambda^2} C \quad (2.11)$$

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

### 1.3.3 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων.

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





Η απόσταση των κυμάτων που κινούνται προς τα εμπρός είναι:

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

Η ταχύτητα του μεμονωμένου κύματος είναι:

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

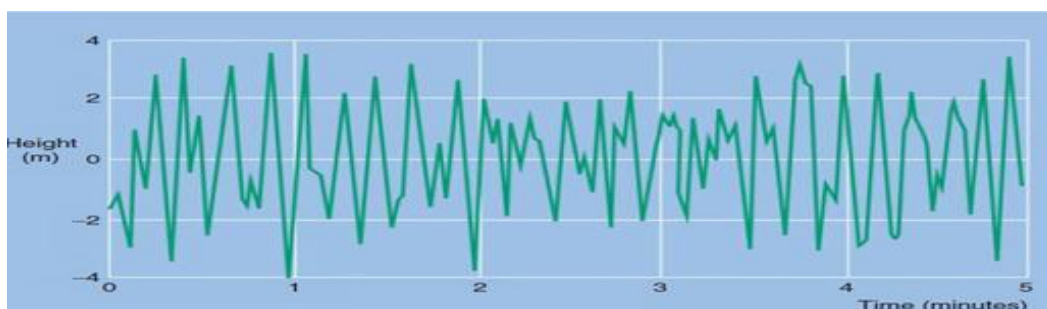
Τα μεμονωμένα κύματα δεν συναντώνται συχνά στην φύση όμως μπορούν να θεωρηθούν σαν μεμονωμένα κύματα που βρίσκονται σε πολύ ρηχά νερά και οικουρφές τους απέχουν περισσότερο από απόσταση  $s$ , όπου:

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

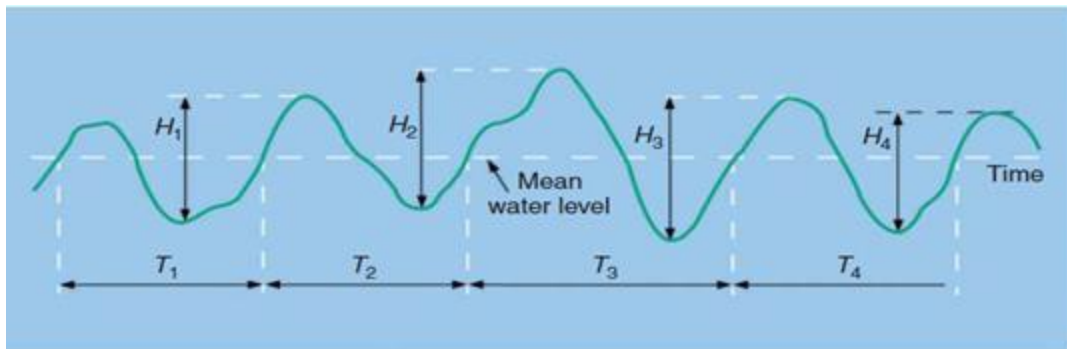
### 1.3.4 Στοχαστική θεώρηση των κυμάτων.

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

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

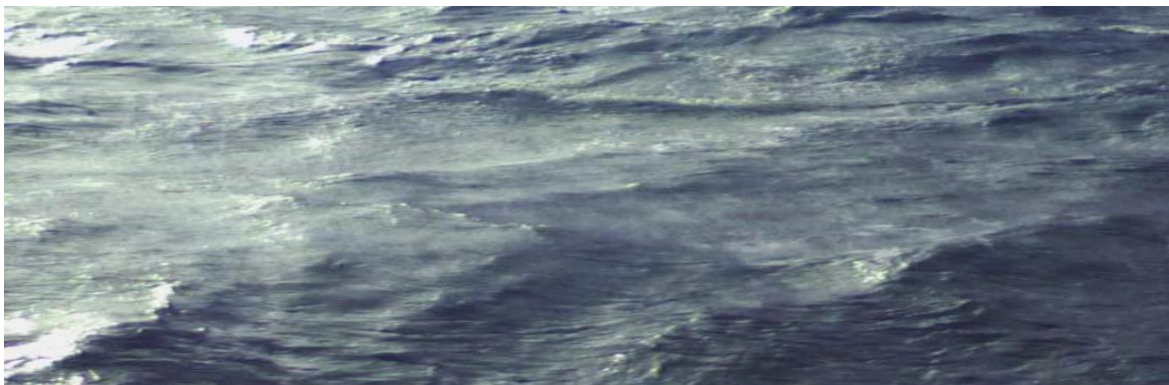


Εικόνα 12: Χρονοσειρά σήματος περιγραφής ύψους κύματος.



Εικόνα 13: Ακολουθία κυμάτων ποικίλου ύψους και περιόδων. [3]

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

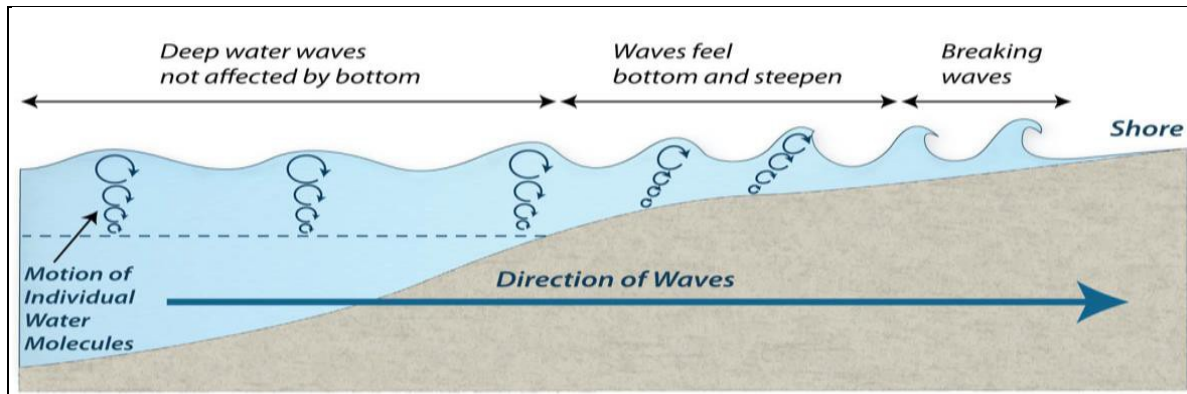


Εικόνα 14: Κατάσταση "Τυχαίας" Θάλασσας.

### 1.3.5 Τροποποίηση των κυμάτων.

Ένα συχνά εμφανιζόμενο φαινόμενο που παρατηρείται στα χιλιόμετρα ακτογραμμών της χώρας μας είναι η θραύση των κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί στις 3 ακόλουθες περιπτώσεις:

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

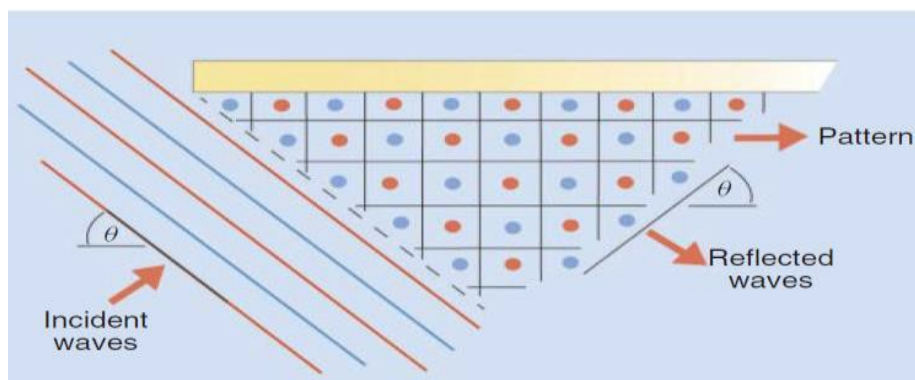


Εικόνα 15: Περίπτωση Θραύσης Κύματος. [Μανάλης 2012]

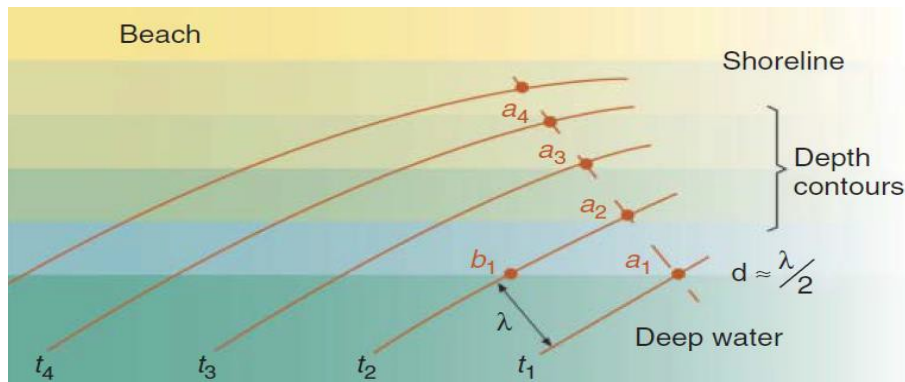
- Σε βαθιά νερά όταν η κλίση του κύματος, η οποία ορίζεται ως το λόγος του ύψους  $h$  και του μήκους του κύματος  $\lambda$ , υπερβεί την τιμή 0.17.
- Σε συνθήκες ισχυρών ανέμων είναι πιθανό ο αέρας να ρίξει την κορυφή του κύματος από την βάση της. Κατά την θραύση τους τα κύματα χάνουν σημαντικό μέρος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

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

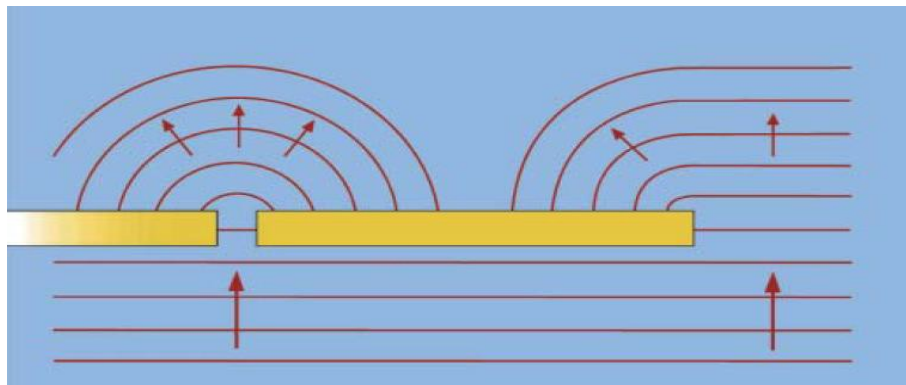
- Η ανάκλαση του κύματος: όπου το κύμα αλλάζει πορεία και στρέφεται πίσω στην πηγή του.
- Η διάθλαση του κύματος: όπου προκαλεί αλλαγή στην κατεύθυνση των κυμάτων εξαιτίας αλλαγής στην ταχύτητα τους.
- Η περίθλαση του κύματος: όπου προκαλεί την εξάπλωση των κυμάτων όταν αυτά συναντούν στενωπούς με μήκος ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος τους.



Εικόνα 16: Εικόνα ανακλώμενου κύματος. [Μανάλης 2012]



Εικόνα 17: Εικόνα διαθλώμενου κύματος.



Εικόνα 18: Εικόνα περιθλώμενου κύματος.

#### 1.4 Στατιστική Ανάλυση του φαινομένου κύματος.

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

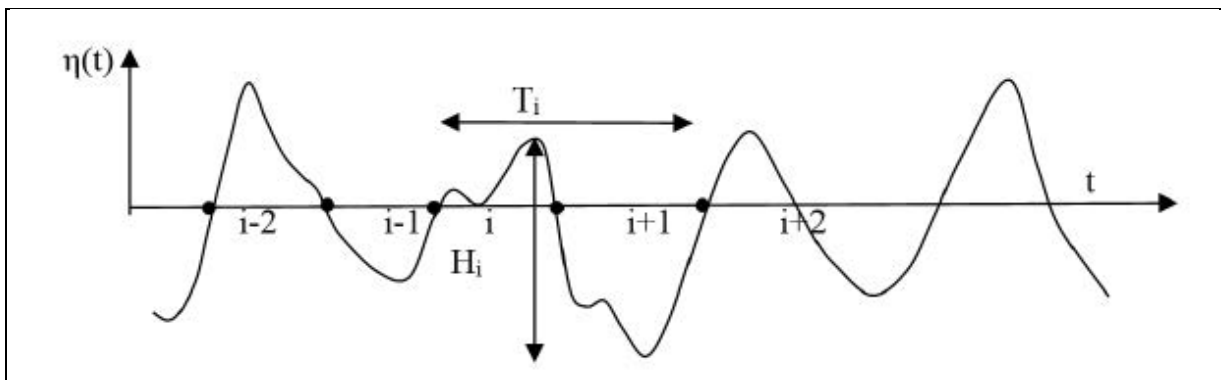
- Οι ανά χρονικές αποστάσεις  $\Delta t$  τιμές του  $\eta$  αποτελούν ένα στοχαστικό μέγεθος που ακολουθεί κατανομή Gauss.
- Η εφαρμογή της τεχνικής «μηδενικής προς τα άνω διάβασης» (zero up crossing), δηλαδή της αποτίμησης ύψους κύματος σαν διαφοράς διαδοχικών ελάχιστων και μέγιστων τιμών της στιγμιαίας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



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

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

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



Εικόνα 19: Υπόδειγμα χρονοσειράς  $\eta(t)$  καταγραφής κυματισμών. (Σουκισιάν 2007).

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

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

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

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

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



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

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

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

όπου  $\eta$  διάρκεια της καταγραφής.  $T'$

Καθώς η δυναμική ενέργεια είναι το μισό της συνολικής κυματικής ενέργειας ισχύει

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

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

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

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

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

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

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

## 1.5 Φασματική Ανάλυση Κυματισμών.

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

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



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

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

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

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

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

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

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

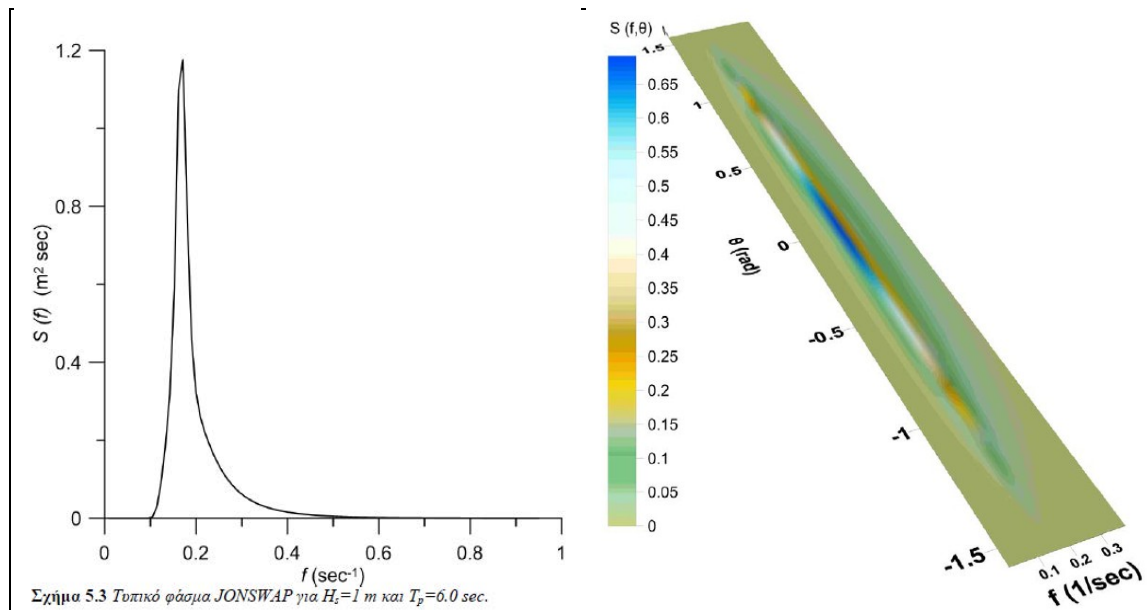
$$S(f) = E(f) / \rho g \quad (2.29)$$

έχει διαστάσεις  $m^2 \cdot sec$ .

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

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

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



Εικόνα 20: Τυπικό φάσμα JONSWAP για  $H_s=1m$ ,  $T_p=6.0s$  (Σουκισιάν 2007)

Όπου:

$\gamma_J$  είναι ο παράγοντας εξέλιξης της κορυφής με μέση τιμή 3.3 και

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

$a_{ph}$  είναι ο συντελεστής Phillips

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

$p$  είναι η κυκλική συχνότητα της μέγιστης φασματικής πυκνότητας που δίνεται

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

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

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

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





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

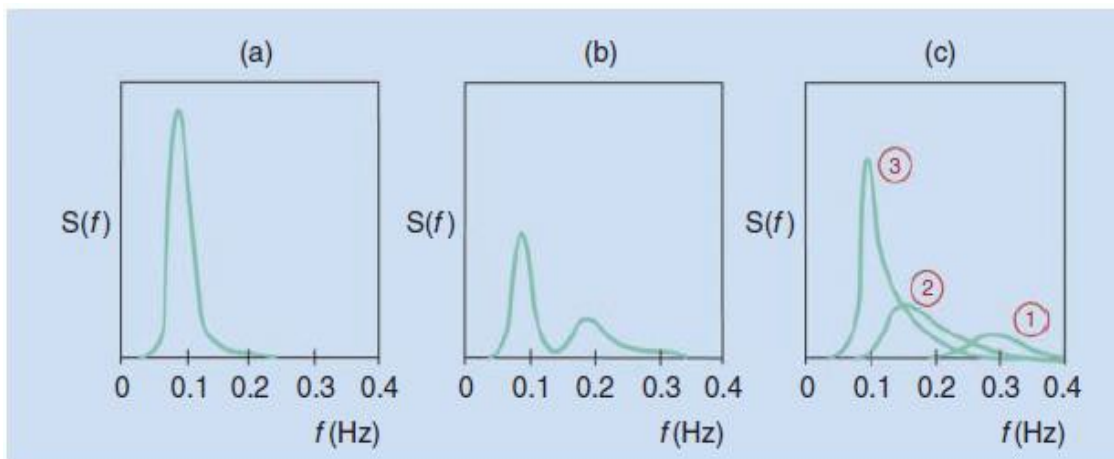
Όπου η γωνία  $\theta$  μεταβάλλεται στο εύρος  $(-\pi/2, \pi/2)$ . Επίσης θα ισχύει:

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

Στην Εικ. 24 δίνεται ένα τυπικό κατευθυντικό φάσμα JONSWAP με  $H_s=1\text{m}$ ,  $\rho=6.0\text{s}$  και μέση γωνία κατευθυντικότητας  $\theta=0^\circ$  όπου  $G(\theta) = (2/\pi)\cos^2(\theta)$

Με ανάλυση Fourier διαπιστώνεται ότι μια τυχαία θάλασσα μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από την υπέρθεση ενός μεγάλου αριθμού κυμάτων με διαφορετικά ύψη και συχνότητες, τα οποία διαδίδονται σε διάφορες κατευθύνσεις. Έτσι μια περίπλοκη κυματομορφή μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων κατάλληλου πλάτους, συχνότητας και φάσης, το οποίο λέγεται φάσμα της κυματομορφής. Το φάσμα δίνει πληροφορίες για το ποσό ενέργειας που μεταφέρεται από τις διάφορες συχνότητες σε μια τυχαία θάλασσα. Συχνά το κυματικό φάσμα συμβολίζεται ως  $S(f, \theta)$  δηλ. είναι συνάρτηση τόσο της συχνότητας όσο και της κατεύθυνσης. Αν θεωρηθεί μια μόνο κατεύθυνση το φάσμα του κύματος συμβολίζεται με  $S(f)$  και με ολοκλήρωση αυτής της συνάρτησης σε όλες τις συχνότητες του φάσματος προκύπτει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται:

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



Εικόνα 21: Φασματική Κατανομή Κυμάτων. [Κούρτζης 2013]

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



## 1.6 Βραχυπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.

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

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

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

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

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

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

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

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



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

τότε εφαρμόζονται οι σχέσεις:

$$\frac{gH_{s0}}{u_*^2} = 211.5 \quad \frac{gT_p}{u_*} = 239.8 \quad (2.40)$$

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

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

όπου

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

Οι όροι του δεξιού μέλους περιγράφουν πηγές και απώλειες ενέργειας:

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

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

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

Από την περιοχή γένεσης, μέσα στην οποία η συσχέτιση κυματικών και ανεμολογικών στοιχείων περιγράφηκε πιο πάνω, οι κυματισμοί έχουν τη δυνατότητα να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις, εφόσον υπάρχει θαλάσσια έκταση (π.χ. στους ωκεανούς). Οι απώλειες ενέργειας οφείλονται σε εσωτερικές τριβές (κυρίως δράση του μοριακού ιξώδους, καθώς σε βαθιά νερά η ροή παραμένει ουσιαστικά αστρόβιλη και σε ρηχά νερά διαμορφώνεται μικρού πάχους οριακή στιβάδα πυθμένα).

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



συνεπάγεται διαφοροποίηση και του ύψους κύματος και της περιόδου (ελάττωση ύψους και αύξηση περιόδου).

## 1.7 Μακροπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.

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

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

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

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

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

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



## 2. Εκμετάλλευση Ενέργειας των Κυμάτων.

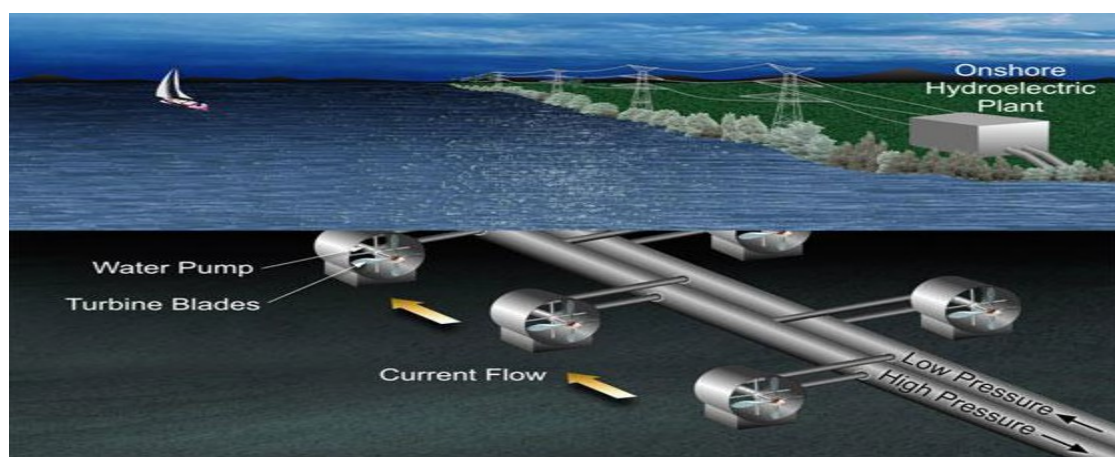
Κυματική Ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων. Το φαινόμενο της πνοής των ανέμων έχει ως συνέπεια το σχηματισμό κυμάτων τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων και σε ακτές ωκεανών.

Η εντατική έρευνα για την κυματική ενέργεια άρχισε τη δεκαετία του 1970 παράλληλα με την πετρελαϊκή κρίση. Παρά τις προτάσεις για διάφορες διατάξεις κυματικής ενέργειας, η επιτυχία υπολειπόταν των προσδοκιών. Οι πρώιμες συσκευές μετατροπής ενέργειας των κυμάτων δεν είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

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

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνολογίες για τις επτάκιες, παράκτιες και υπεράκτιες εφαρμογές. Ειδικότερα οι υπεράκτιες εφαρμογές αποτελούν σημαντικό πόλο ενδιαφέροντος για τη δοκιμή νέων συσκευών, λόγω των υψηλότερων επιπέδων αποδιδόμενης ενέργειας σε μεγάλα βάθη.

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



Εικόνα 22: Εκμετάλλευση ενέργειας κυμάτων σε στροβίλους.



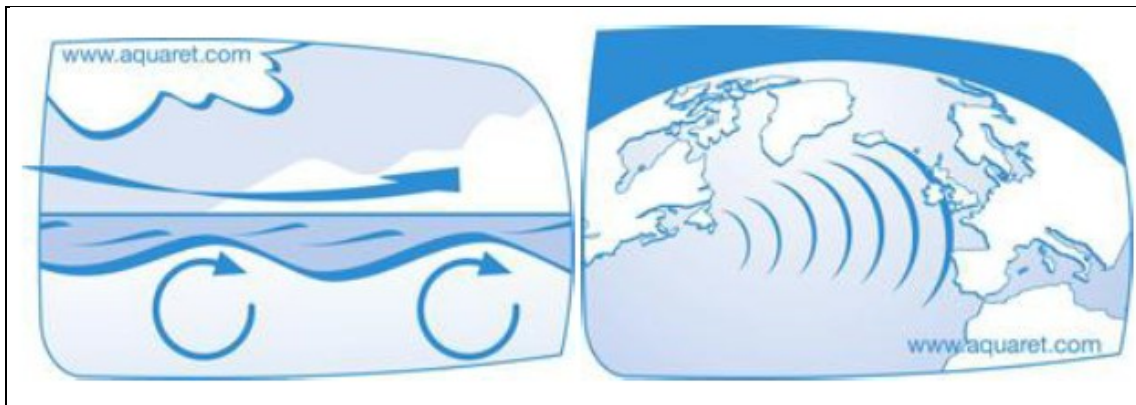
Τα κύματα ταξιδεύουν στα βαθιά ύδατα των ωκεανών σχεδόν χωρίς καμιά απώλεια ενέργειας, και αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που οι πλωτές τεχνολογίες αγκύστρωσης σε μεγάλα βάθη αναμένεται να έχουν το μεγαλύτερο δυναμικό για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα. Τα τυπικά βάθη νερού για τις υπεράκτιες τεχνολογίες είναι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

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

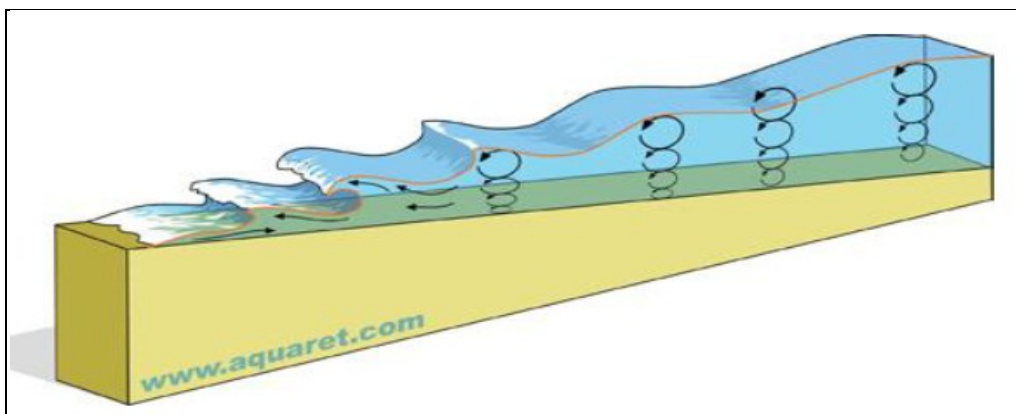
Οι καλύτεροι κυματικοί πόροι εμφανίζονται σε περιοχές όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι οι οποίοι διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις. Στον ευρωπαϊκό χάρτη για παράδειγμα οι σημαντικότεροι κυματικοί πόροι εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών ακτών της, που βρίσκονται στο τέλος μιας μεγάλης ανεμπόδιστης διαδρομής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

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

Η πυκνότητα ενέργειας του κύματος ορίζεται ως ο διαθέσιμος πόρος ανά μονάδα επιφάνειας, ( $\text{kW/m}^2$ ) είναι δεκαπλάσια από αυτήν της αιολικής ενέργειας και εκατονταπλάσια της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά τα δεδομένα ενισχύουν το αναμφισβήτητο ενεργειακό δυναμικό των ωκεάνιων κυμάτων. Έτσι προκύπτει ότι ο πόρος για την παραγωγή κυματικής ενέργειας είναι η πυκνότητα ενέργειας που σχετίζεται με τον προσανατολισμό της ακτής προς την ανοιχτή θάλασσα καθώς και με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης. Η εκμετάλλευση της ενέργειας μπορεί να γίνει σε οικονομικά συμφέρουσα βάση όταν τα επίπεδα αυτής είναι μεγαλύτερα από  $15\sim 20 \text{ kW/m}^2$  (η συνήθης μονάδα μέτρησης των επιπέδων κυματικής ισχύος είναι η μέση ετήσια ισχύς ανά μέτρο πλάτους της κορυφής του κύματος που είναι παράλληλη στην ακτή).



Εικόνα 23: Σχηματική ερμηνεία δημιουργία και μεταφοράς ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων. [Program Aquaret]



Εικόνα 24: Σχηματική περιγραφή των δομών που μεταφέρουν ενέργεια στη θάλασσα ως προς το βάθος από τον πυθμένα. [Program Aquaret]

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

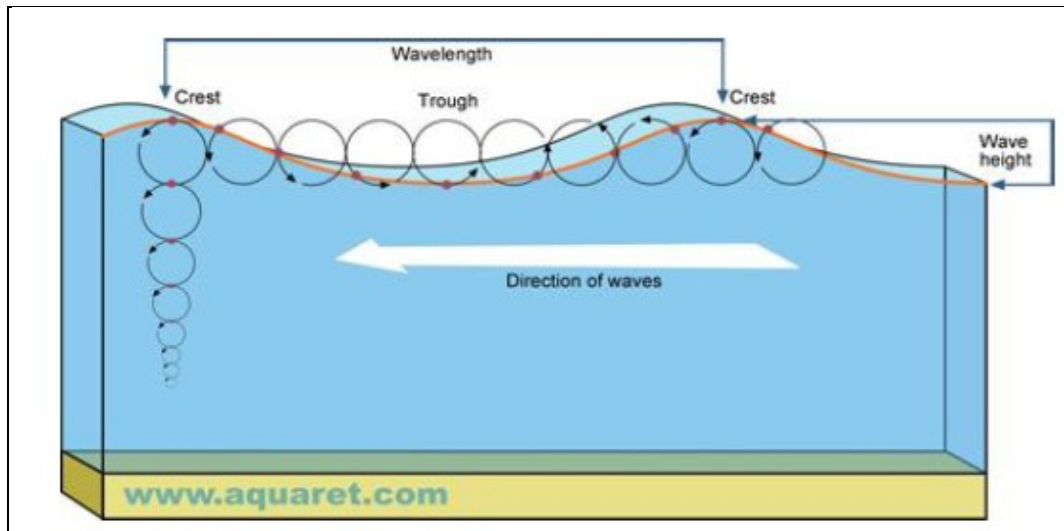
Παράλληλα με την περίοδο αιχμής **T<sub>p</sub>** ή την ενεργειακή περίοδο **T<sub>e</sub>**, η μέση ενέργεια μιας συγκεκριμένης κατάστασης της θάλασσας που χαρακτηρίζεται από τις **H<sub>s</sub>** και **T<sub>p</sub>** ή **T<sub>e</sub>**, υπολογίζεται συνήθως από τη σχέση: **E = 1/8 ρgH<sub>s</sub><sup>3</sup>**.

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

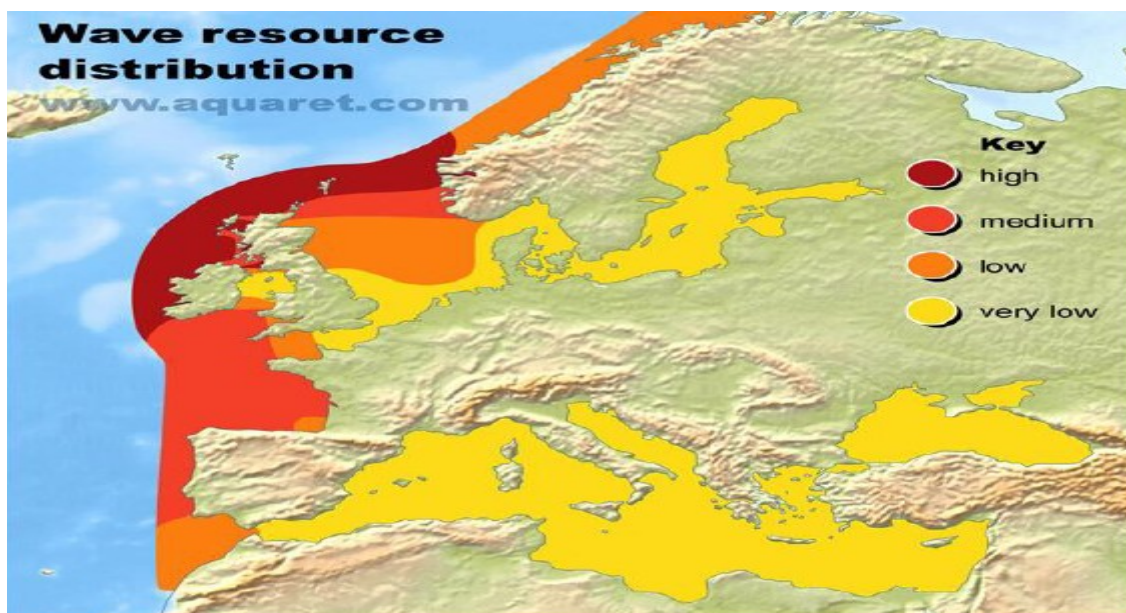
ρ η πυκνότητα του θαλασσίου νερού,

g η σταθερά της επιτάχυνσης της βαρύτητας και,

H<sub>s</sub> το σημαντικό ύψος κύματος.



Εικόνα 25: Εικόνα των ετήσιων πόρων [1]



Εικόνα 26: Κατανομές έντασης κυμάτων στον ευρωπαϊκό χώρο [2].

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

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





νότια Αυστραλία, καθώς και η Χιλή ακολουθούμενες από την Ισπανία και την Πορτογαλία, τις ακτές της Βορείου και Νοτίου Αμερικής και τη Νότια Αφρική.

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

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

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

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

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

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



Σε έργα μεγάλης κλίμακας, το σημαντικότερο εμπόδιο είναι η δυνατότητα και η διαθεσιμότητα του δικτύου διανομής. Αυτό διότι οι ευνοϊκοί πόροι κυματικής ενέργειας μπορεί να βρίσκονται σε περιοχές με σχετικά αδύνατο δίκτυο. Το μέλλον της υλοποίησης της κυματικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα θα καθοριστεί εν μέρει από το βαθμό στον οποίο οι θαλάσσιοι ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι αποτελούν προτεραιότητα σε διακρατικό επίπεδο.

Η πρόταση [SUPERGRID](#) που έγινε από την Airtricity, μια επιχείρηση κοινής ωφέλειας, εισηγείται τη δημιουργία ισχυρών πλεγμάτων υπεράκτιων διεθνών δικτύων για τη σύνδεση των πολλών πάρκων θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας που θα εγκατασταθούν. Μολονότι η πρόταση αυτή εστιάζεται στα υπεράκτια αιολικά, η μαζική εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας μπορεί με τον ίδιο τρόπο να ωφεληθεί από τέτοιες υποδομές.

## 2.1 Μορφές Κυματικής Τεχνολογίας.

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

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

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

Αρκετές τεχνολογίες WEC είναι πλωτές διατάξεις που βρίσκονται είτε υπεράκτια είτε παράκτια, με δυνατότητα κίνησης κατά πολλούς τρόπους. Είναι σημαντική η μελέτη και κατανόηση της κίνησης των πλωτών διατάξεων για τον σχεδιασμό των WEC. Οι κινήσεις αυτές χωρίζονται σε α) περιστροφικές και β) μη περιστροφικές και είναι οι ακόλουθες:

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



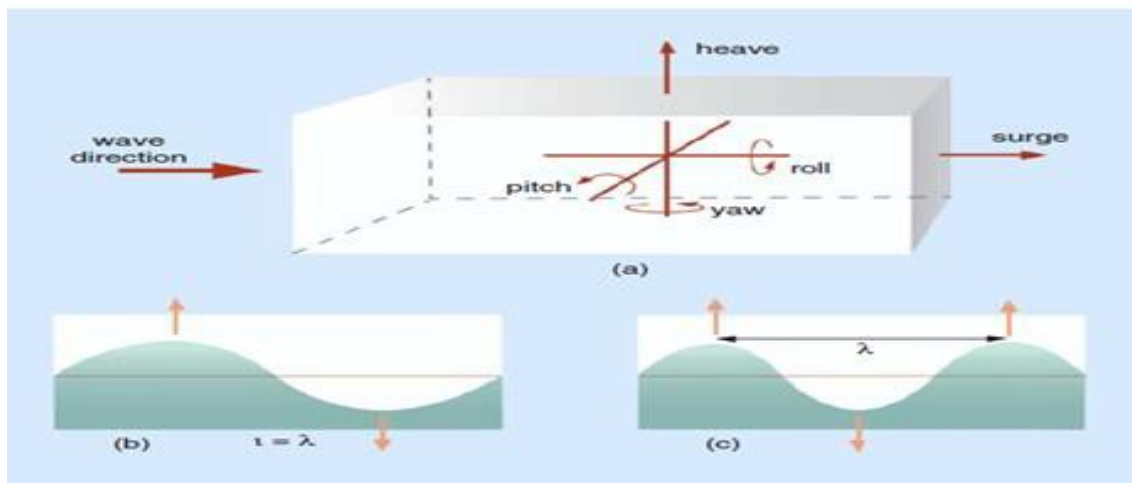
- Περιστροφή (**yaw**): κίνηση γύρω από τον κάθετο άξονα.

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

Για παράδειγμα κλυδωνισμός συμβαίνει στην περίπτωση που το μήκος της συσκευής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους του κύματος, δηλαδή:  $l = N\lambda$ , όπου  $N=1,2,3,\dots$ . Ανύψωση παρατηρείται όταν το μήκος της διάταξης είτε είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του κύματος ή ισούται με περιττό πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος, δηλαδή:  $l = N(\lambda/2)$ , όπου  $N=1,3,5$ .

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

Μέχρι σήμερα, η τεχνολογία που έχει ερευνηθεί περισσότερο, και εγκαθίσταται συχνότερα, είναι η ταλαντευόμενη στήλη νερού (OWC). Πρωτότυπα σε πλήρη κλίμακα της ταλαντευόμενης στήλης νερού, με εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των αρκετών δεκάδων κιλοβάτ (kW), κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν υπό πραγματικές συνθήκες θαλάσσης στη Νορβηγία (Toftehallen, 1985), την Ιαπωνία (Sanze, Niigata, Kujukuri, Sakata, ~1985-90), την Ινδία (Vizhinjam, ~1990), την Πορτογαλία (Pico/Azores, 1999) και το HB (Islay, 1986; LIMPET, 2000, Islay island, Scotland).



Εικόνα 27: Δυνατότητες Κινήσεων Πλωτών Διατάξεων. [Μανάλης 2012]

Από την έρευνα της βιβλιογραφίας φαίνεται ότι ήδη έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες και εφαρμόζονται διατάξεις εκμετάλλευσης υπεράκτιας κυματικής σε πάρα πολλούς κλίμακας όπως είναι η διάταξη Pelamis (Σκωτία, Πορτογαλία) WaveDragon (Δανία). Άλλες σχεδιάσεις που πρόσφατα έφτασαν στο στάδιο της



πραγματικής θαλάσσιας δοκιμής είναι αυτές του τύπου του πλωτού σημειακού απορροφητή, π.χ. η OPT PowerBuoy (OceanPower Technologies, ΗΠΑ/ΗΒ), η WaveBob (WaveBobLtd, Ιρλανδία), η Aquabuoy (FinaveraLtd, Ιρλανδία) και η OE Buoy (OceanEnergyLtd, Ιρλανδία) (η οποία είναι μια πλωτή OWC του τύπου Αγωγού Οπίσθιας Κλίσης). Επιπλέον, έχουν δοκιμαστεί σε μεγαλύτερη κλίμακα πλωτές μικρές σχεδίες σημειακού απορροφητή στηριζόμενες σε πλατφόρμες, όπως π.χ. η FO3 (FredOlsen, Νορβηγία) και η Wavestar (Δανία). Υπεράκτιες συσκευές – παλλόμενα, πλωτά ή πλήρως βυθισμένα σώματα, μπορούν να εκμεταλλευτούν τους ισχυρότερους κυματισμούς των θαλασσών στα μεγάλα βάθη και αρκετές βρίσκονται στο στάδιο δοκιμής στη θάλασσα ή έχουν ολοκληρώσει τις σχετικές δοκιμές.

Τα προβλήματα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας σχετίζονται με το αρχικά υψηλό κόστος της εγκατάστασης σε ένα απαιτητικό υπεράκτιο περιβάλλον και τα ακραία φορτία που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη λειτουργία, με τα υλικά και τη συντήρηση των μηχανικών αλλά και ηλεκτρικών τμημάτων των συσκευών – διατάξεων.

Αναζητούνται έτσι οικονομικότερες λύσεις με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες όπως η θέση το βάθος της θάλασσας, η ένταση του κύματος που μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές βέλτιστες λύσεις, επομένως δεν υπάρχει μοναδική συσκευή – εξοπλισμός για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας στο μέλλον. Αυτό αποδεικνύεται και από την πληθώρα διατάξεων και την κατηγοριοποίηση ως προς τις παραμέτρους ενδιαφέροντος.

Τα συστήματα σηματοδούρας αποτελούν οικονομικότερες λύσεις σε εμπορική κλίμακα. Μεταξύ αυτών είναι:

- Η **AquaBuOY**, που προέκυψε από ένα συνδυασμό της σουηδικής σωληνωτής αντλίας και του κλασσικού σημειακού απορροφητή και σήμερα βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης από μια θυγατρική της FinaveraRenewablesLtd.
- Η **OPT Powerbuoy** – που προωθείται από την αμερικανική/βρετανική εταιρεία OceanPowerTechnology, και
- Η **Wavebob**, η οποία αναπτύσσεται από την ομώνυμη εταιρεία Wavebobσυμφερόντων Ιρλανδίας.
- Η **WaveDragon** μπορεί να είναι μία ακόμη υποψήφιος για να βρεθεί μεταξύ των πρώτων συντελεστών μεγάλης κλίμακας της μετατροπής της κυματικής ενέργειας.

## 2.2 Κατηγορίες Μετατροπέων WEC's (Wave Energy Converters).

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

Πριν την ανάλυση των τύπων WEC που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα θα πρέπει να επισημανθεί ότι έχει παρατηρηθεί ότι τα WEC αυξάνουν την απόδοση τους όταν συντονίζονται στην συχνότητα των διερχόμενων κυμάτων. Ειδικότερα **κάθε**



**συσκευή έχει την δική της φυσική συχνότητα η οποία εξαρτάται από τη μάζα και την άνωσή της.** Μειώνοντας την μάζα του WEC ή/και αυξάνοντας την άνωση της η φυσική συχνότητα μεγαλώνει. Όταν η συσκευή συναντά κύματα με συχνότητα παραπλήσια της φυσικής συχνότητάς της, τότε η κίνηση της συσκευής γίνεται πιο έντονα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συντονισμός και δεν εξαρτάται από το μέγεθος του κύματος. Η κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής για να επιτευχθεί ο συντονισμός αποτελεί είναι μια από τις βασικές αρχές σχεδιασμού μετατροπένων κυματικής ενέργειας.

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

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

Με βάση την αρχή λειτουργίας, οι διατάξεις εκμετάλλευσης - μετατροπής της κυματικής ενέργειας η ταξινόμηση γίνεται με βάση την πρόταση του Ευρωπαϊκού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC). Δίνονται παρακάτω τύποι WEC η αναλυτική περιγραφή τους γίνεται στον EMEC και στις εργασίες των Μανάλη 2012, Μουτσάτσου – Προσεκφαλά 2019)

### 2.2.1 Εξασθενητής κυμάτων (Attenuator).

Είναι μια πλωτή συσκευή που τείνει να στρέφεται έτσι ώστε να ευθυγραμμίζεται παράλληλα προς το μέτωπο του κύματος με τη μεγαλύτερή της διάσταση. (Εικ.31). Η μεγαλύτερη διάσταση τείνει να είναι παράλληλη στην κατεύθυνση των κυμάτων. Η διάταξη μπορεί να είναι είτε πλωτή, που είναι και το συνηθέστερο, είτε πλήρως βυθισμένη. Είναι αρθρωτή διάταξη και μπορεί να αποτελείται από ένα πλήθος τμημάτων τα οποία κάμπτονται και στρέφονται σύμφωνα με την κίνηση των κυμάτων. Οι εξασθενητές χρησιμοποιούν την ενέργεια των επερχόμενων κυμάτων για να προκαλέσουν ταλάντωση των γειτονικών τμημάτων της διάταξης. Σε αυτή την ταλάντωση αντιστέκονται τα υδραυλικά έμβολα που είναι εγκατεστημένα στην συσκευή και ωθούν υψηλής πίεσης υδραυλικά υγρά σε κινητήρα ώστε να παραχθεί ηλεκτρισμός. Η συσκευή αυτή επιπλέει των διερχόμενων κυμάτων και αποσπά την ενέργεια τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο της το μήκος.

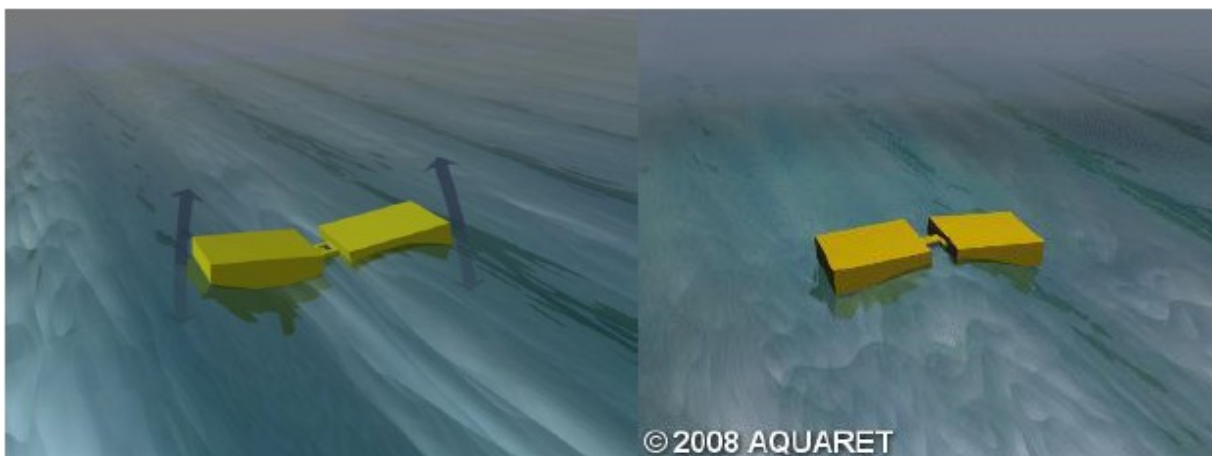


### 2.2.2 Αξονοσυμμετρικός Σημειακός Απορροφητής – (Point absorber).

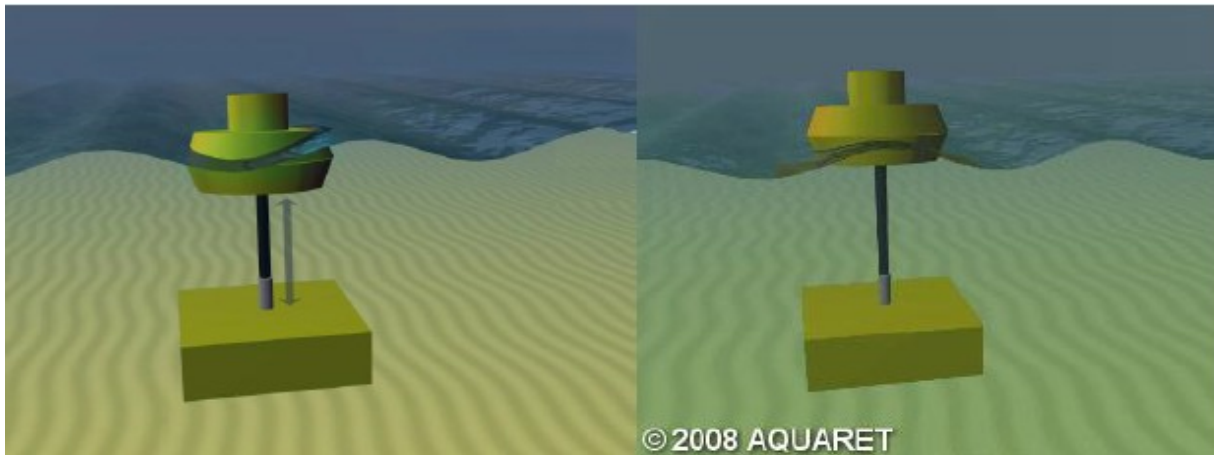
Αυτού του τύπου οι διατάξεις σχεδιάζονται ώστε να εκμεταλλεύονται την κίνηση της μάζας τους, που προκαλείται από τα διερχόμενα κύματα. Η διάταξη αποτελείται από δύο συμπαγή μέρη, το κινούμενο μέρος που αλληλεπιδρά με τα κύματα και το σταθερό μέρος το οποίο είτε είναι αγκυροβολημένο είτε συγκρατείται στον πυθμένα λόγω της βαρύτητας. Διατάξεις αυτού του τύπου συνήθως τοποθετούνται μερικώς βυθισμένες. Το κινούμενο άνω μέρος επιζητείται να έχει σχετικά μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος των κυμάτων ώστε να απορροφάται η ενέργεια ανεξαρτήτως της κατεύθυνσής τους. Συνήθως ρυθμίζονται ώστε η φυσική τους συχνότητα να είναι παραπλήσια της συχνότητας των κυμάτων της περιοχής που εγκαθίσταται και έτσι να προκύπτει συντονισμός (Εικ.32). Έχει μικρές διαστάσεις σε σχέση με το τυπικό μήκος κύματος, με διάμετρο συνήθως της τάξης των λίγων μέτρων. Έχει την ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Ο τρόπος δέσμευσης «φαινόμενο κεραίας». Τυπικά, όχι όμως κι απαραίτητα, οι πλωτοί αυτοί σχεδιασμοί είναι αξονοσυμμετρικοί. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η απορρόφηση κυματικής ενέργειας από κάθε διεύθυνση πρόσπτωσης του κύματος μέσω της ελεύθερης κίνησης επί της επιφάνειας του νερού.

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

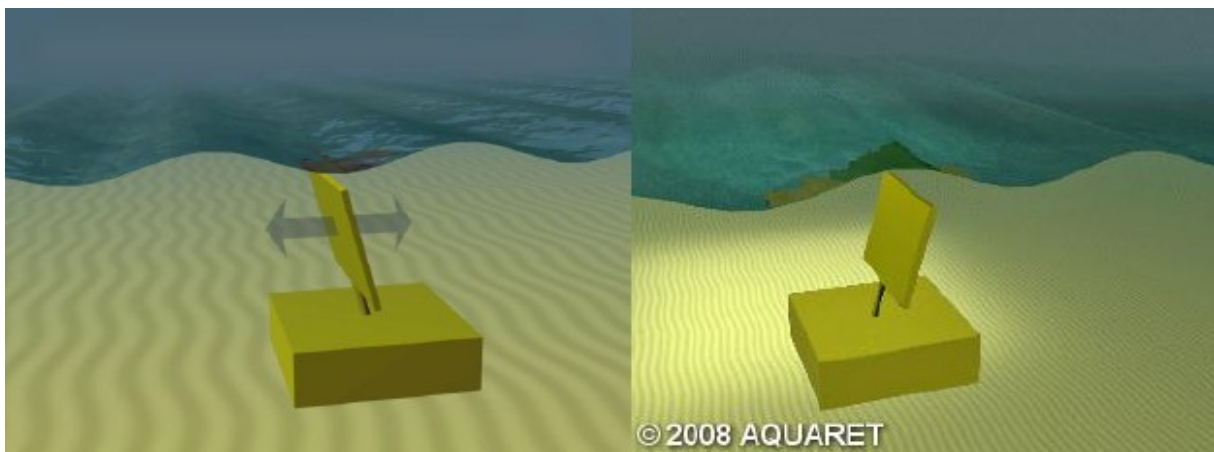
Η λειτουργία αυτής της διάταξης βασίζεται στην κίνηση της μάζας του νερού. Λόγω της προσβολής από κύματα, εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ρήχωσης κατά το οποίο οι τροχιές κίνησης των μορίων του νερού γίνονται ελλειπτικές. Για αυτό το λόγο εγκαθίστανται σε παράκτιες περιοχές όπου το βάθος της θάλασσας είναι μικρό. Στοιχίζονται κάθετα στα επερχόμενα κύματα. Κατά κανόνα έχουν έναν βραχίονα ή ένα πτερύγιο, που ταλαντώνεται καθώς περνούν τα κύματα. Οι διατάξεις αυτές συνήθως είναι πακτωμένες στον βυθό, ενώ πλωτές συσκευές αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Ο βραχίονας εκτελεί ταλάντωση ως ανάστροφο εκκρεμές λόγω της κίνησης των σωματιδίων νερού των κυμάτων (Εικ.33). Παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι η υποβρύχια συσκευή Waveroller και το διατρητικό επιφάνειας Oyster.



Εικόνα 28: Πλωτή συσκευή με τον άξονά της ευθυγραμμισμένο στο μέτωπο του κύματος.



Εικόνα 29: Πλωτή κατασκευή απορρόφησης κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 30: Παλλόμενος συλλέκτης κυματικών κλυδωνισμών.

#### 2.2.4 Παλλόμενη υδάτινη στήλη (ΠΥΣ - OWC)

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

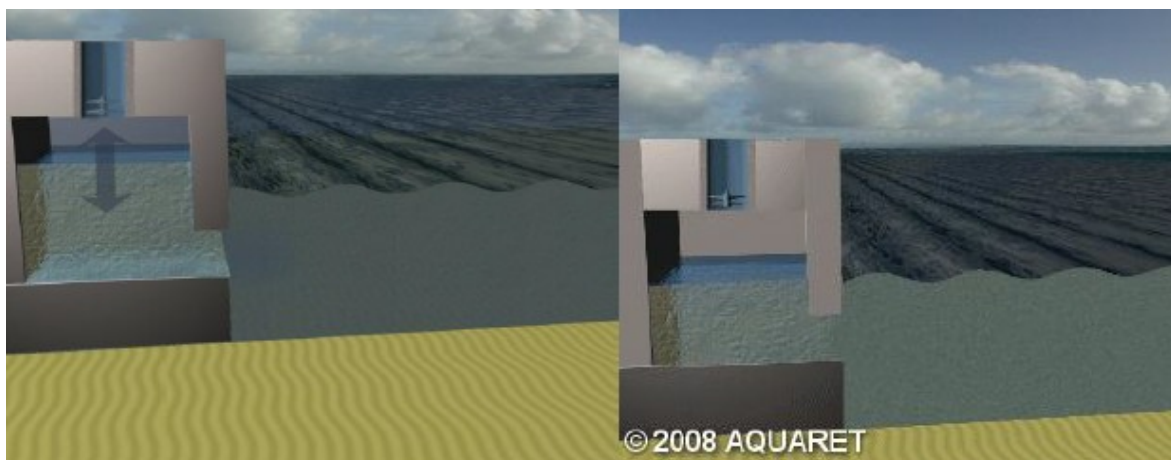
Οι διατάξεις αυτού του τύπου αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη: Ένα θάλαμο μερικώς βυθισμένο στο νερό στον οποίο υπάρχει νερό και παγιδευμένος αέρας, ένα άνοιγμα στο μέρος του θαλάμου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και έναν αεριοστρόβιλο.

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



την περιστροφή του στροβίλου λόγω της συμπίεσης -αποσυμπίεσης του αέρα εντός του θαλάμου.

Η τεχνολογία των συσκευών ταλαντευόμενης στήλης νερού μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατασκευές κατά μήκος της ακτογραμμής, αλλά και σε τεχνητούς κυματοθραύστες ή σε πλωτές κατασκευές αγκυροβολημένες σε υπεράκτιες κατασκευές. Για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των διατάξεων για την επικρατούσα κατάσταση θαλάσσης, οι OWC ρυθμίζονται κατάλληλα για το επικείμενο μήκος κύματος ώστε να υπάρχει συντονισμός τους. Μεταξύ των προτεινόμενων σήμερα συσκευών είναι η Spherboy, η MRC και η τύπου αγωγού Οπίσθιας Κλίσης OE Buoy. Οι κλασσικές OWC είναι επάκτιες συσκευές που κατασκευάζονται επί της ακτής (Pico OWC, Limpet OWC) ή ενσωματώνονται σε κυματοθραύστες (Mutriko OWC).



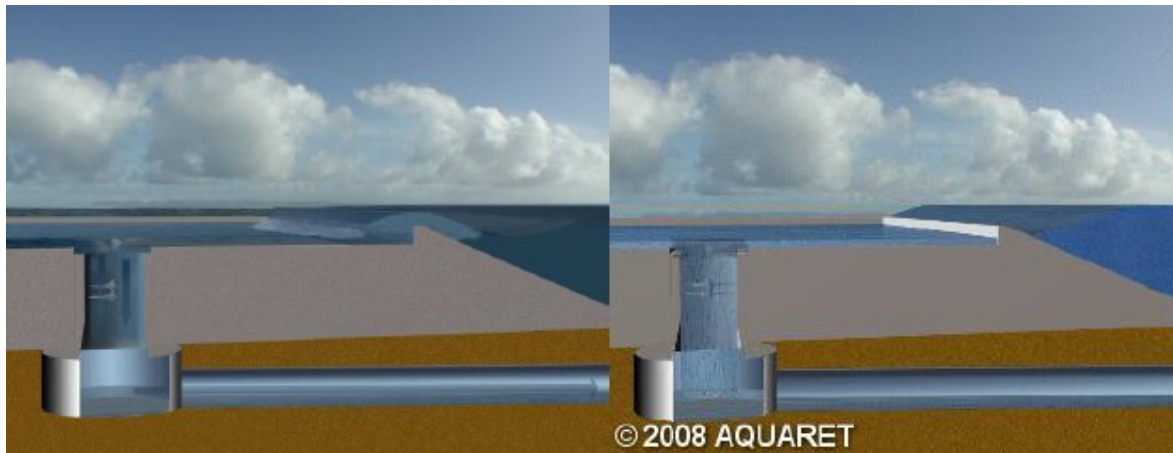
Εικόνα 31: Κίνηση παλλόμενης στήλης (ΠΥΣ).

### 2.2.5 Συσκευή υπερακόντισης– υπερύψωσης (overtopping devices).

Η συσκευή αποτελείται από ένα τοίχωμα πάνω στο οποίο σπάνε τα κύματα και το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Τα προσκρούοντα κύματα δημιουργούν ένα ύψος πτώσης το οποίο ελευθερώνεται πίσω στη θάλασσα μέσω συμβατικών στροβίλων χαμηλής πίεσης που είναι εγκατεστημένοι στον πυθμένα της δεξαμενής (Εικ.36). Είναι συνήθως μεγάλες κατασκευές λόγω του απαιτούμενου χώρου για τη δεξαμενή, η οποία χρειάζεται να εξασφαλίζει μια ελάχιστη χωρητικότητα αποθήκευσης. Οι συσκευές μπορεί να είναι πλωτές, όπως η Wave Dragon, που επί του παρόντος είναι ο μεγαλύτερος μετατροπέας κυματικής ενέργειας που αναπτύσσεται., Παράδειγμα πρώιμης συσκευής υπερακόντισης είναι η συσκευή TAPChan στο Toftestallen της Νορβηγίας, όπου ένας αγωγός με σταδιακή μείωση της διαμέτρου του προκαλούσε την υπερχείλιση του νερού σε μία επίγεια δεξαμενή.

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



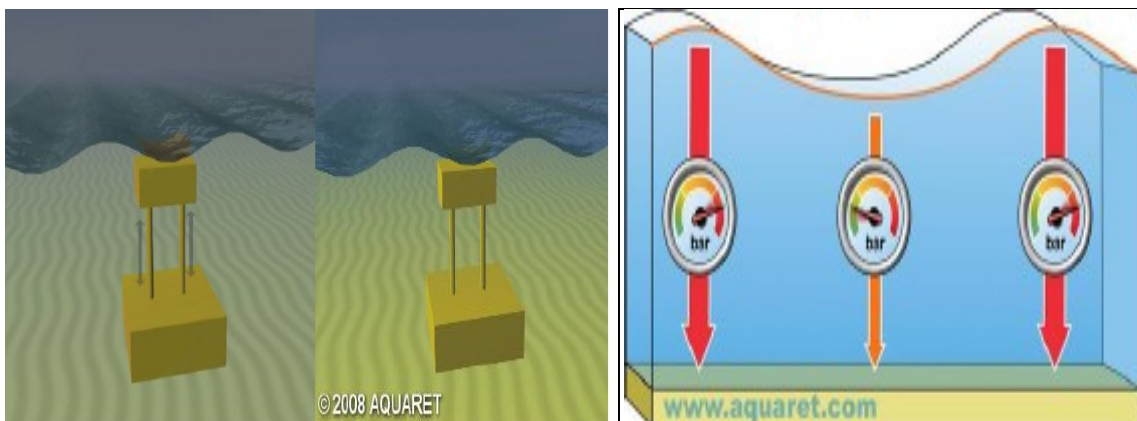


Εικόνα 32: Διάταξη Υπερακόντισης (Νορβηγία).

### 2.2.6 Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης.

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

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



Εικόνα 33: Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης και σχηματική αναπαράσταση.



## 2.3 Τεχνολογίες Μετατροπής ενέργεια κυμάτων.

Για την καλύτερη κατανόηση των διαφόρων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σήμερα, όλες οι διατάξεις - μετατροπείς της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων χωρίζονται επίσης σε τρεις βασικές κατηγορίες με παράμετρο την απόσταση από την ακτή. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

### 2.3.1 Τεχνολογίες Ακτογραμμής:

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

### 2.3.2 Παράκτιες Τεχνολογίες:

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

### 2.3.2 Υπεράκτιες Τεχνολογίες (Ανοιχτής Θαλάσσης).

Οι υπεράκτιες τεχνολογίες εκμεταλλεύονται τα πιο ισχυρά κυματικά κλίματα που συναντώνται σε μεγάλο βάθος υδάτων (μεγαλύτερο από 40m). Ο σχεδιασμός των πιο πρόσφατων υπεράκτιων τεχνολογιών επικεντρώνεται κυρίως σε μικρές αρθρωτές συσκευές, που δίνουν συνολική παραγόμενη έξοδο μεγάλης ισχύος όταν παρατάσσονται σε μεγάλο αριθμό. Επίσης λόγω του μεγάλου αριθμού των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, κάθε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες υποδιαιρείται στις πέντε υποκατηγορίες που προαναφέρθηκαν ανάλογα με τον τύπο της κάθε τεχνολογίας, και εφόσον υπάρχει κάποια τεχνολογία τέτοιου τύπου σε κάθε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες. Αρκετές από τις διατάξεις ανήκουν σε περισσότερες από μία εκ των πέντε υποκατηγοριών, αφού για παράδειγμα μπορεί να εκμεταλλεύονται ταυτόχρονα τη κατακόρυφη ταλάντωση (τύπος 3) και την οριζόντια κίνηση (τύπος 5) των θαλάσσιων κυμάτων.



### 3. Σύντομη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.

Σύμφωνα με την ΕΕ στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «Γαλάζια Ανάπτυξη» (Blue Growth) εκτιμάται ότι η ανάπτυξη του αναδυόμενου τομέα της κυματικής, εκτός του ότι θα συνεισφέρει στο ενεργειακό μείγμα των ΑΠΕ, με παράλληλη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, θα μπορούσε να συμβάλει στην τόνωση της οικονομίας μέσω της καινοτομίας και της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας υψηλής εξειδίκευσης. Η αξιοποίηση αυτού του πόρου θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης της ΕΕ από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας. Ειδικότερα μια τέτοια εξέλιξη θα ήταν πολύ σημαντική για νησιωτικές χώρες όπως η Ελλάδα, όπου η κυματική ενέργεια μπορεί να συμβάλει στην ενεργειακή επάρκεια και να αντικαταστήσει τη δαπανηρή ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ντίζελ. Η κυματική ενέργεια μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμη με τη δέσμευσή της επάκτια ειδικά σε χώρες με μεγάλο μήκος ακτογραμμής όπως η Ελλάδα (~16.000 χλμ). Επιπλέον με την ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας θα υπάρξει η δυνατότητα δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας υψηλής ποιότητας όσον αφορά την ανάπτυξη σχεδίων, τη βιομηχανία παραγωγής υλικών - εξοπλισμού και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναφορικά με τις επιπτώσεις στην απασχόληση εκτιμά ότι θα μπορούσαν να δημιουργηθούν χιλιάδες θέσεις εργασίας μέχρι το 2035.

Οι ωκεανοί είναι απαραίτητοι για την ανθρωπότητα ως ρυθμιστές του κλίματος, ως πηγή θρεπτικών και υγιεινών τροφίμων και ως κινητήρας ανάπτυξης. Ο ΟΟΣΑ εκτιμά ότι οι βιομηχανίες που βασίζονται σε ωκεανούς συνεισφέρουν περίπου 1,3 τρισεκατομμύρια ευρώ στην παγκόσμια ακαθάριστη προστιθέμενη αξία. Οι ωκεανοί φιλοξενούν επίσης μια πλούσια, εύθραυστη και ακόμη ανεξερεύνητη βιοποικιλότητα, η οποία παρέχει μια ποικιλία σημαντικών υπηρεσιών οικοσυστήματος. Για παράδειγμα, οι ωκεανοί παράγουν το μισό οξυγόνο στην ατμόσφαιρα της Γης και απορροφούν το 25% των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία προκύπτει σημαντική συνεισφορά αναφορικά με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας μέχρι σήμερα. Καταρχήν για την περίπτωση επάκτιας ή παράκτιας διάταξης θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη τοποθεσία. Υπενθυμίζεται ότι μια τέτοια εγκατάσταση είναι οικονομικότερη λύση γιατί προϋποθέτει μικρότερο κόστος διασύνδεσης στο δίκτυο και ευκολότερη πρόσβαση για λόγους συντήρησης των διατάξεων. Κατά αυτή την έννοια επάκτιες ή παράκτιες εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της κυματικής αποτελούν προσφορότερη λύση για χώρες νησιωτικές όπως η Ελλάδα. Πολύ νωρίτερα αυτό έχει αναγνωριστεί από χώρες όπως Ισπανία, Πορτογαλία, Αγγλία, Σκωτία οι οποίες έχουν προχωρήσει πολύ στην κυματική που εκμεταλλεύονται το μεγάλο εύρος ακτογραμμής προς τον Ατλαντικό που φέρει υψηλό κυματικό δυναμικό. Πέρα από αυτή τη διαπίστωση Ισπανία και Πορτογαλία έχουν προχωρήσει και σε μελέτες για φάρμες και εντός της Μεσογείου όπου το κυματικό δυναμικό μπορεί να είναι πολύ χαμηλότερο αλλά η εκμετάλλευση σημείων συγκέντρωσης κυματικής (hotspots) μπορεί να αποβεί επίσης αρκετά αποδοτική και με μικρότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας μονάδων.

Έτσι για παράδειγμα οι **Iglesias Carballo (2011)** αναφέρουν ότι ο πρώτος θεμελιώδης στόχος είναι η εκτίμηση και ο καθορισμός των περιοχών υψηλότερης συγκέντρωσης κυματικής ενέργειας λόγω διάθλασης (reflection) και συρρίκνωσης (shoaling). Αυτές οι περιοχές (hotspots) αποτελούν πιθανές τοποθεσίες για την εγκατάσταση μιας φάρμας WECs. Η συνήθης διαδικασία για τον προσδιορισμό



αυτών των περιοχών είναι ο υπολογισμός της ισχύος σε δύο ή τρεις τυπικές θαλάσσιες καταστάσεις κοντά στην ακτή. Δεδομένα μπορούν να προσφέρονται από αγκυροβολημένους σταθμούς που θα δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος και την κατεύθυνση του ανέμου καθώς και προσαρμοσμένοι κυματομετρητές μπορούν να δίνουν πληροφορίες για το ύψος κύματος. Οι ερευνητές πρότειναν μια προσέγγιση που δεν εξετάζει απλώς δύο ή τρεις, αλλά πολλές διαφορετικές θαλάσσιες καταστάσεις, καλύπτοντας έτσι ένα μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ετήσιας ενέργειας και χρόνου. Προχώρησαν σε μια διακριτοποίηση του καθεστώτος υπεράκτιων κυμάτων μέσω ενεργειακών υποομάδων – διαστημάτων (bins) δηλ. τριμεταβλητά διαστήματα σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου ενέργειας και κατεύθυνση μέσου κύματος. Στη συνέχεια μοντελοποίησαν τη διάδοση του πεδίου υπεράκτιων κυμάτων για τον υπολογισμό του αντίστοιχου μοτίβου ισχύος κύματος κοντά στην ακτή. Τα αποτελέσματα σταθμίζονται με τις αντίστοιχες πιθανότητές τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι τότε (2011) δεν υπήρχε ήδη εγκατεστημένη φάρμα και η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για την περιοχή της Γαλικίας στα ΒΔ της Ισπανίας στις ακτές του Ατλαντικού. Κατά τους ερευνητές η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε θα μπορούσε να εφαρμοστεί και για οποιαδήποτε μελέτη σε άλλη υποψήφια περιοχή για εγκατάσταση φάρμας εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.

Επίσης οι ερευνητές σημειώνουν ότι για την εγκατάσταση μιας φάρμας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν πέρα από τους διαθέσιμους πόρους (κυματική ισχύς) περιβαλλοντικοί παράγοντες, αλιευτικές δραστηριότητες, τα κανάλια πλοήγησης (διαδρομές πλοίων), η διάταξη του χερσαίου ηλεκτρικού δικτύου και η δυνατότητα συνδεσιμότητας στο δίκτυο της περιοχής. Επίσης η βαθυμετρία, η μεταβλητότητα του κλίματος υπεράκτιων κυμάτων, το σχήμα και ο προσανατολισμός της ακτογραμμής της περιοχής ενδιαφέροντος παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση της εγκατάστασης. Κατά αυτή την έννοια προκύπτει ότι οι συμβατικές αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη δύο ή τρία τυπικά σενάρια, ανεξάρτητα από το ενδιαφέρον τους, δεν μπορούν να θεωρηθούν επαρκείς για την επιλογή του τόπου για την τοποθέτηση μιας φάρμας κυμάτων σε μια περιοχή.

Οι μελέτες εγκατάστασης πριν την επένδυση βασίζονται σε υπολογιστικά εργαλεία (SWAN) τα οποία λαμβάνουν ως είσοδο δεδομένα από σηματοδούρες – κυματομετρητές που είναι βυθισμένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την ακτογραμμή. Στη συνέχεια τα μοντέλα τρέχουν το πεδίο σε συνάρτηση και με άλλα δεδομένα όπως ανεμολογικά και βαθυμετρίας για την εκτίμηση της κυματικής ισχύος που θα φτάσει στην ακτή. Για παράδειγμα δεδομένα βαθυμετρίας ελήφθησαν από ναυτικούς χάρτες του Ισπανικού Ναυτικού Υδρογραφικού Ινστιτούτου και του Υδρογραφικού Ινστιτούτου της Πορτογαλίας.

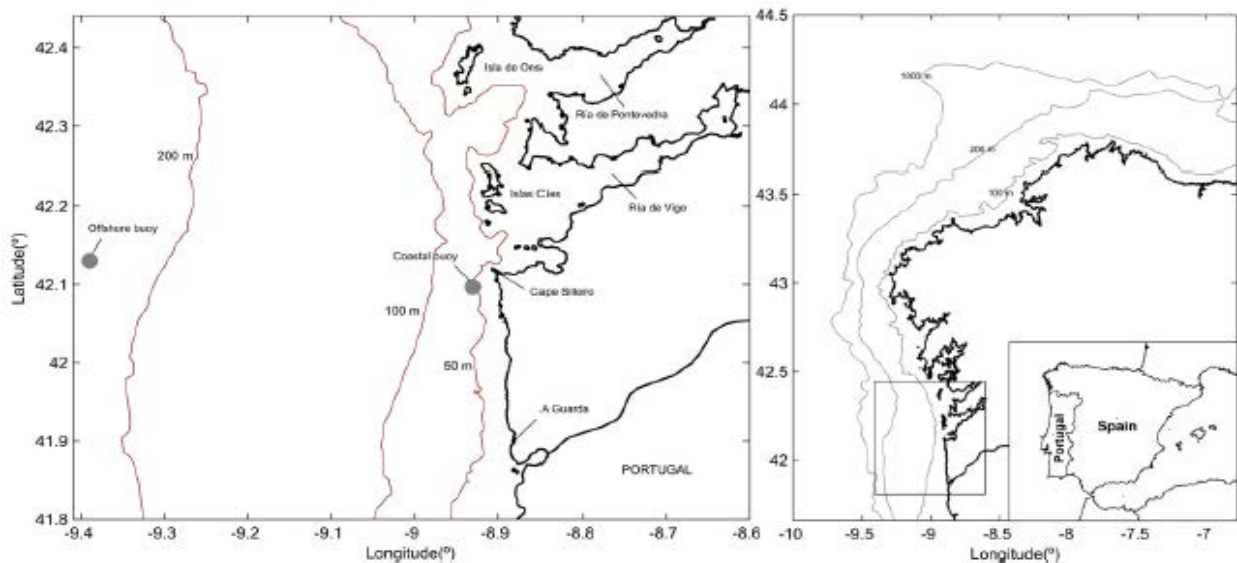
Έτσι και στην Εργασία των Iglesias et al. (2011) τα δεδομένα κυμάτων ήταν παρατηρήσεις από δύο κυματομετρητές που βρίσκονταν περίπου στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος, αλλά διαφορετικά βάθη και αποστάσεις από την ακτογραμμή. Οι συντεταγμένες και το βάθος του νερού, καθώς και οι μέσες παράμετροι κύματος, φαίνονται στον Πίνακα. Αυτοί οι κυματομετρητές - σηματοδούρες λειτουργούν από το 1998, καταγράφουν το φασματικό κύμα πεδίου με ωριαία συχνότητα. Το σύνολο δεδομένων που αναλύθηκε για αυτήν την εργασία καλύπτει την περίοδο από 14.11.1998 έως 2.11.2010. Από τον Πίνακα προκύπτει ότι το κλίμα κυμάτων στην υπεράκτια σηματοδούρα είναι πολύ ενεργητικό, με ετήσια ενέργεια κύματος 300MWh/m. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα στατιστικά στοιχεία για την παράκτια



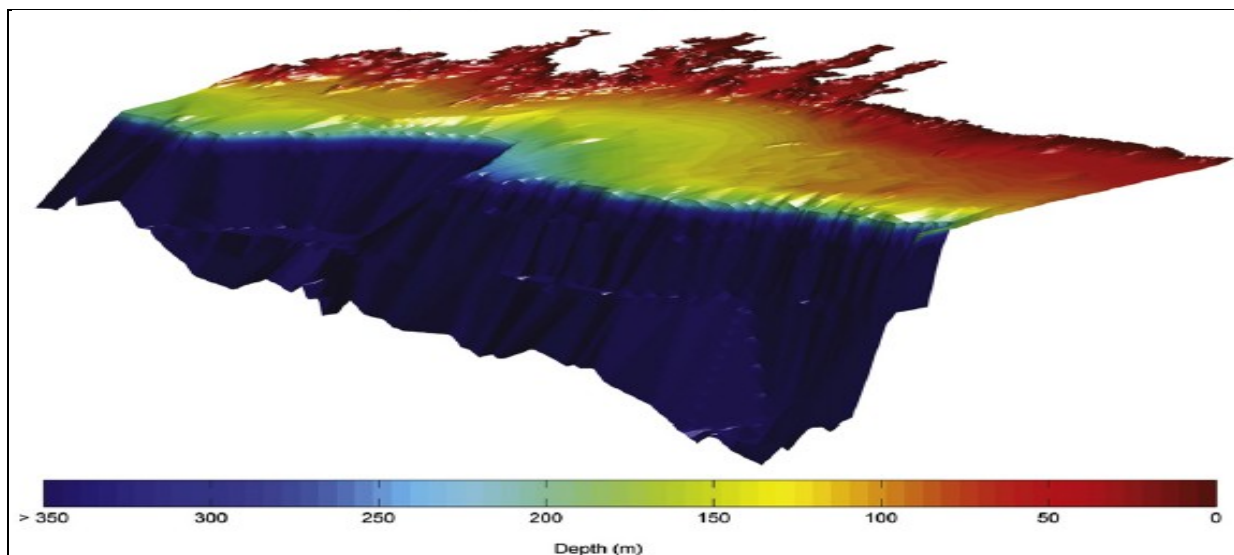
σημαδούρα αντικατοπτρίζουν έναν ελαφρώς μικρότερο, αλλά παρόλα αυτά πολύ σημαντικό, ενεργειακό πόρο που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί.

Πίνακας δεδομένων σημαντικού ύψους ( $H$ ) και κυματικής ισχύος ( $E$ ) σε ετήσια βάση.

Name	Location	Depth (m)	$(H_{m0})_{\text{mean}} \pm \text{std. dev.}$ (m)	$(H_{m0})_{\text{max}}$ (m)	$J_{\text{mean}}$ (kW/m)	$J_{\text{max}}$ (kW/m)	$(E)_{\text{annual}}$ (MW h/m)
Offshore buoy	42.12°N, -9.40°W	323	2.31 ± 1.25	11.1	34.22	870.44	300.04
Coastal buoy	42.10°N, -8.93°W	70	1.84 ± 1.05	8.9	25.42	792.89	222.85



Εικόνα 34: Περιοχή μελέτης εγκατάστασης κυματικής φάρμας στη ΒΔ Γαλικία (Iglesias 2011).



Εικόνα 35: Δεδομένα βαθυμετρίας για την περιοχή ΒΔ Γαλικίας (Iglesias 2011).

Στην εργασία των **Zanopol et al. (2014)** μια ομάδα ρουμάνων ερευνητών προσπάθησε να αναγνωρίσει τις δυνατότητες εκμετάλλευσης κυματικής στη Μαύρη

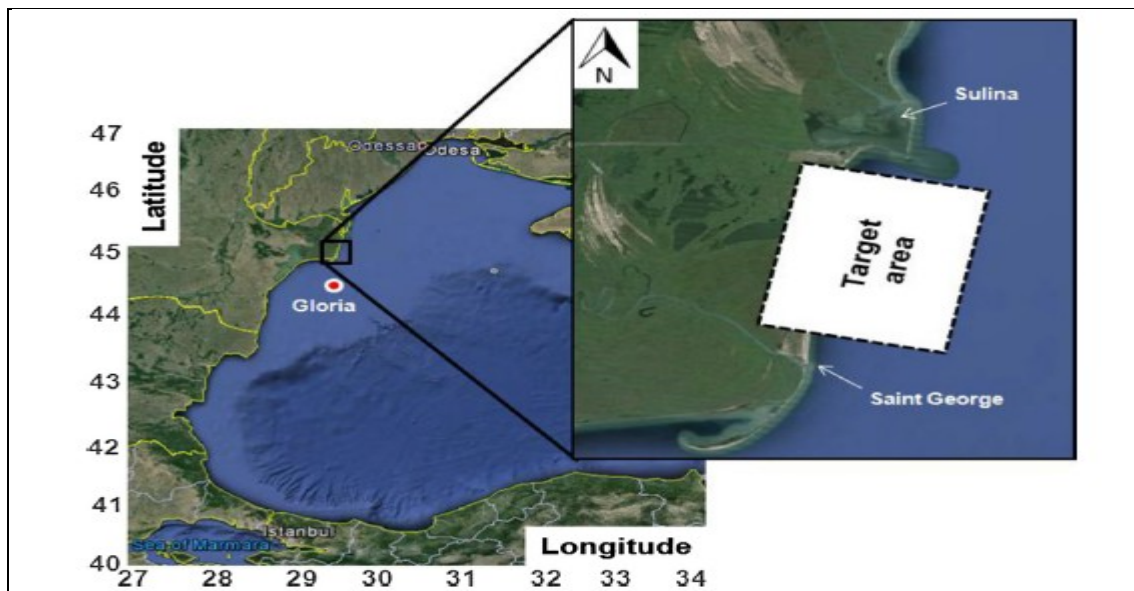


Θάλασσα. Η εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση των παράκτιων επιπτώσεων μιας γενικής φάρμας κυμάτων (generic) που θα μπορούσε να λειτουργεί στις ακτές της Ρουμανίας. Η περιοχή στόχος που εξετάζεται για ανάλυση βρίσκεται στη Μαύρη Θάλασσα, στο ακρωτήριο του Αγίου Γεωργίου στις εκβολές του ποταμού Δούναβη. Πρόκειται για μια περιοχή όπου η διάβρωση είναι σημαντική.

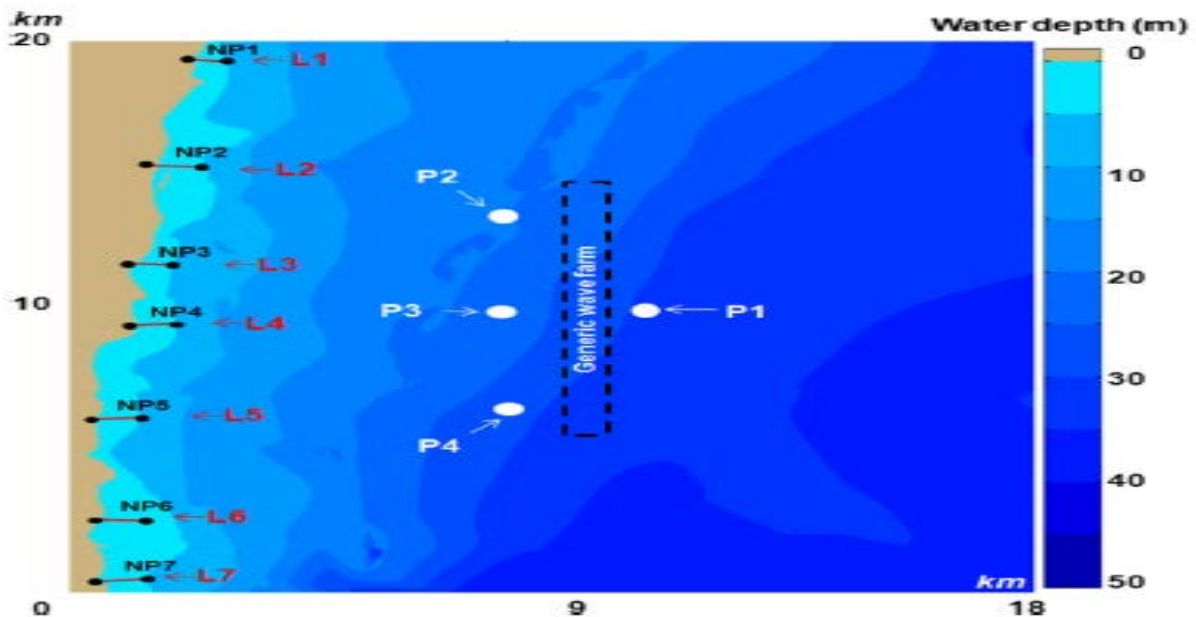
Σε μια πρώτη ανάλυση σχετικά με τις συνθήκες κυμάτων κοντά σε αυτό το παράκτιο περιβάλλον, πληροφορίες και δεδομένα ελήφθησαν από επιτόπιες μετρήσεις που προέρχονται από μια μονάδα κυματομετρητή (Gloria). Σε επόμενο βήμα, εκτιμήθηκε η επίδραση μιας γενικής φάρμας κυμάτων στο κοντινό της κλίμα, με βάση ορισμένα σενάρια που λαμβάνουν υπόψη τις μέσες, ενεργητικές και ακραίες συνθήκες κυμάτων.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με το φασματικό μοντέλο SWAN (Simulating Waves Nearshore), όπου όλη η φάρμα διαμορφώθηκε ως ένα εμπόδιο (obstacle) που ορίζεται από μια ακολουθία σημείων μιας γραμμής. Η εξέλιξη της εκμετάλλευσης του πεδίου κυμάτων συμβαίνει με την αύξηση της απορρόφησης της ενέργειας, από το μηδέν (φάρμα χωρίς κυματισμό) μέχρι ένα σενάριο ολικής απορρόφησης. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, μια αξιολόγηση των υπεράκτιων ρευμάτων πραγματοποιήθηκε εξετάζοντας ένα μονοδιάστατο μοντέλο επιφάνειας.

Οι ερευνητές σημειώνουν ότι οι ακτογραμμές είναι ιδιαίτερα δυναμικά περιβάλλοντα που αλλάζουν συνεχώς την ισορροπία μεταξύ διάβρωσης και συσσώρευσης υλικού (επιχωματώσεων) υπό την επίδραση φυσικών παραγόντων. Αυτές οι διαδικασίες καθορίζουν τη σταθερότητα της ακτογραμμής σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Οι ερευνητές θεωρούν ότι ίσως το πιο σημαντικό ζήτημα είναι η δράση των σπαστικών κυμάτων (breaking waves), τα οποία φθάνουν και σπάνε στην ακτή με μια διαδικασία μηχανικής λείανσης που απομακρύνουν φερτά και τα μεταφέρουν στη θάλασσα.



Εικόνα 36: Περιοχή - Στόχος στην περιοχή Αγ. Γεωργίου στις εκβολές του Δούναβη.



Εικόνα 37: Πεδίο εφαρμογής μοντέλου SWAN (Zanapol et al. 2014).

Ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο στις παράκτιες περιοχές σχετίζεται με τα μεγάλα ρεύματα που παράγονται από τα προσπίπτοντα κύματα που πλησιάζουν την παραλία σε μια συγκεκριμένη γωνία. Μετατοπίζουν μεγάλη ποσότητα ιζημάτων κατά μήκος της ακτογραμμής με σταθερό ρυθμό, αλλάζοντας την όψη των διαφόρων τομέων της παραλίας. Κατά τη διάρκεια υψηλών ή ακραίων γεγονότων, ένας πολύ μεγαλύτερος όγκος ιζημάτων μετατοπίζεται και η παραλία εκτίθεται σε μια έντονη διαδικασία υποβάθμισης.

Στην εργασία αυτή οι ερευνητές σταθμίζουν την εγκατάσταση μιας φάρμας εκμετάλλευσης της κυματικής ως ένα μέτρο ανάσχεσης της γεωμορφολογικών μεταβολών (είτε αποχέρσωσης είτε επιχωματώσεων) στις εκβολές του Δούναβη. Αυτή η οπτική δίνει μια επιπλέον δυνατότητα εκμετάλλευσης της κυματικής ως έναν τρόπο διατήρησης του φυσικού περιβάλλοντος, αφού οι WECs που θα απαρτίζουν μια φάρμα θα μπορούσαν να λειτουργήσουν επιπλέον ως αποσβεστήρες και έτσι πέρα από την εκμετάλλευση ενέργειας μπορούν να λειτουργούν θετικά και για την ανάσχεση γεωμορφολογικών μεταβολών.

Έτσι οι ερευνητές σημειώνουν ότι πέρα από την εξαγωγή ενέργειας μια φάρμα WECs μπορούν να μειώσουν κατά σχεδόν (60 - 70%) το ύψος των υπεράκτιων κυμάτων, ενώ στην περιοχή της κοντινής ακτής μπορεί να υπάρξει εξασθένηση περίπου 30%.

**Πίνακας Σενάρια μετάδοσης ενέργειας που θεωρήθηκαν για μια φάρμα.**

Reference	Wave transmission	Details
T1	100%	No wave farm
T2	75%	A spaced WEC layout – realistic scenario
T3	50%	A narrow spaced WEC layout
T4	25%	A highly absorber wave farm – optimistic scenario
T5	0%	Ideal wave farm (total absorption) – WEC system distributed on multiple lines

**Πίνακας Συμπεριφορά συστημάτων WECs ως προς τις συνθήκες του σταθμού Gloria.**



Time period	WEC type	AquaBuoy	AWS	Pelamis	Wave Dragon
	Principle → Performance ↓	Point absorber	Point absorber	Attenuator	Terminator
Total	P (kW)	15.61	74.87	58.75	384.94
	D <sub>e</sub> (MWh)	0.37	1.79	1.41	9.23
	Load factor (%)	6.24	3.27	7.83	5.49
Winter	P (kW)	23.76	119.94	88.43	574.64
	D <sub>e</sub> (MWh)	0.57	2.87	2.12	13.79
	Load factor (%)	9.5	5.24	11.79	8.20

Κατά την εργασία δοκιμάστηκαν 5 σενάρια απορρόφησης κυματικής ενέργειας και στη συνέχεια εκτιμήθηκε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από συγκεκριμένους μετατροπείς που εφαρμόζονται τόσο υπεράκτια όσο και παράκτια – επτάκτια. Τα αποτελέσματα δίνονται τόσο σε ετήσια βάση όσο και ειδικότερα σε συνθήκες χειμώνα. Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται η ηλεκτρική ισχύς P(kW), η ημερήσια παραγωγή ενέργειας D<sub>e</sub>(MWh). Επίσης η αποτελεσματικότητα (Efficiency) δίνεται ως προς τις ονομαστικές τιμές ισχύος κάθε συσκευής.

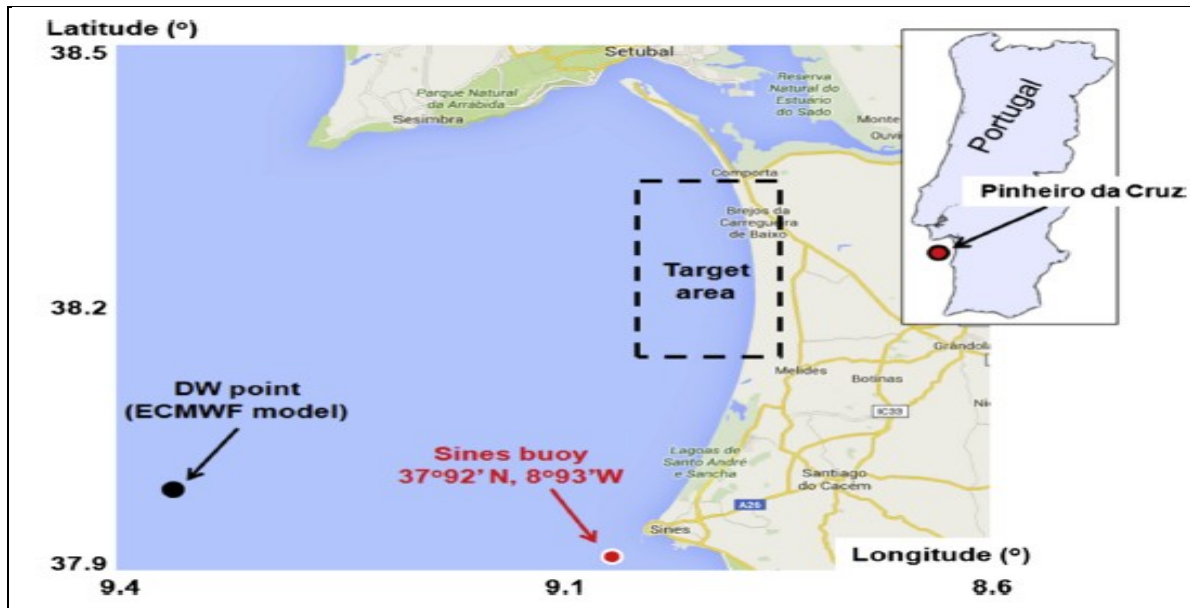
Σε μια επόμενη εργασία των **Rusu και Onea (2016)**, οι ερευνητές επαναλαμβάνουν μια προσπάθεια πρόβλεψης για την περιοχή της Λισαβώνας στην Πορτογαλία. Επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν δύο σύνολα δεδομένων. Το πρώτο σύνολο δεδομένων αποτελείται από τις «επί τόπου» μετρήσεις (in situ) που παρέχονται από τον κυματομετρητή - σηματοδότη Sines, ο οποίος λειτουργεί σε άμεση γεινίαση νότια της περιοχής στόχου. Το δεύτερο σύνολο δεδομένων κυμάτων προέρχεται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μετεωρολογικών Προβλέψεων Καιρού, σε σημείο που βρίσκεται ανοικτά της ακτής ως προς την περιοχή στόχο.

Τρία σενάρια εξετάστηκαν για τις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ορίστηκε μια γενική φάρμα κυμάτων (generic) λαμβάνοντας υπόψη διάφορες αποστάσεις από την ακτή: 1 χλμ., 4 χλμ. και 7 χλμ., αντίστοιχα. Στην εργασία αξιολογήθηκαν τα χαρακτηριστικά τοπικών κυμάτων στην περιοχή - στόχο και την αναλύθηκαν παράμετροι κυμάτων, όπως για παράδειγμα η ισχύς και το ύψος κύματος, και η μέση κατεύθυνση κύματος. Σε ένα δεύτερο επίπεδο εκτιμήθηκε η παρουσία μιας φάρμας μετατροπένων στην κοντινή κυκλοφορία των ρευμάτων. Τα αποτελέσματα της εργασίας συνάδουν στο συμπέρασμα ότι ο αντίκτυπος στην περιοχή της ακτογραμμής από μια τέτοια φάρμα μπορεί να θεωρηθεί σημαντικός. Οι ερευνητές τέλος επισημαίνουν ότι εκτός από την παραγωγή ενέργειας, η παρουσία μιας φάρμας κυμάτων διασφαλίζει αποτελεσματική προστασία των ακτών.

Το κυματικό κλίμα – δυναμικό στις ακτές της Πορτογαλίας, κατά τη διάρκεια του χειμώνα δίνει ένα ύψος κύματος περίπου 3m που αντιστοιχεί σε μια κυματική ισχύ 36kW/m, ενώ κατά τη διάρκεια των χειμερινών καταιγίδων, το ηπειρωτικό τμήμα της Πορτογαλίας μπορεί να αντιμετωπίσει κύματα με σημαντικά ύψη κύματος περίπου 9,5m ή περισσότερο [10]. Η Ιβηρική Χερσόνησος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα hot spot από την άποψη ότι η κυματική ενέργεια, ειδικά όσον αφορά τη δυτική ακτή βρίσκεται υπό την επίδραση των κυμάτων του Βόρειου Ατλαντικού (Carballo et al. 2015).

Οι ερευνητές θεωρούν ότι μέχρι το 2016 είναι γενικά αποδεκτό ότι δεν υπάρχει εμπορική φάρμα κυμάτων, παρά μόνο μερικές πιλοτικές εγκαταστάσεις τεχνολογιών σε ένα «προ-εμπορικό» στάδιο, αλλά θεωρούν επίσης ότι στην επόμενη δεκαετία αναμένεται ένα ξέσπασμα εμπορικής χρήσης.





Εικόνα 38: Περιοχή μελέτης και συντεταγμένες πηγών δεδομένων [Rusu 2016].

Στην παραπάνω εικόνα δίνεται η περιοχή μελέτης καθώς και οι συντεταγμένες των τοποθεσιών των πηγών δεδομένων. Δίνονται οι συντεταγμένες της σηματοδούρας Sines και η θέση άντλησης δεδομένων από το Ευρωπαϊκό Κέντρο μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης καιρού (European Center for Medium range Weather Forecasts - ECMWF).

Η Πορτογαλία έχει μακρά παράδοση στην αξιολόγηση και την αξιοποίηση της κυματικής ισχύος, και μάλιστα είναι η πρώτη χώρα όπου υλοποιήθηκε εγκατάσταση φάρμας για εμπορική χρήση. Αξίζει να σημειωθεί ότι 3 διατάξεις Pelamis εγκαταστάθηκαν το 2008 ήταν στη θάλασσα για λίγους μόνο μήνες όμως το έργο εγκαταλείφθηκε λόγω δυσλειτουργίας των μετατροπέων Pelamis. Η εταιρεία προχώρησε σε μηχανισμούς δεύτερης γενιάς που δοκιμάστηκαν στη Σκωτία.

Από την άλλη πλευρά, οι ερευνητές επισημαίνουν τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στη σταθερότητα των παράκτιων τομέων, καθώς τα ιζήματα μπορούν να μεταφέρονται περαιτέρω στις υπεράκτιες περιοχές με τη συνδυασμένη δράση της διαδικασίας αντίστροφης πλύσης κυμάτων (backwash process) και των ρευμάτων ριπής (rip currents) (Hamid et al. 1994). Κατά συνέπεια, το παράκτιο περιβάλλον της Πορτογαλίας είναι ευάλωτο στη διάβρωση των ακτών, γεγονός που αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τις τοπικές αρχές, καθώς σχεδόν το 76% του πληθυσμού ζει σε αυτές τις περιοχές. Σύμφωνα με τον προσανατολισμό της ακτής, υπάρχουν δύο συστήματα τρόποι προστασίας των ακτών είτε με θαλάσσια τοιχώματα είτε με ομάδες από ράβδους (groins) που χρησιμοποιούνται συχνά στο πορτογαλικό παράκτιο περιβάλλον.

Ειδικότερα η τοπική διαμόρφωση της ακτογραμμής επηρεάζεται επίσης από τη μακρόχρονη μεταφορά ιζημάτων που προκαλείται από τα κύματα. Η μεταφορά ιζημάτων εκτιμάται σε 1–2 εκατομμύρια  $m^3$ /έτος. Έτσι, οι πορτογαλικοί παράκτιοι τομείς υπόκεινται σε ισχυρή διάβρωση. Από αυτή την άποψη, οι τοπικές συνθήκες κυμάτων θεωρούνται κατάλληλες για δοκιμές και ανάπτυξη διαφόρων μετατροπέων ενέργειας κύματος (WEC). Το 2007 πλήρους κλίμακας WaveRoller σύστημα (ονομαστικής ισχύος 10–15 kW) αναπτύχθηκε στην περιοχή Peniche (βόρεια της



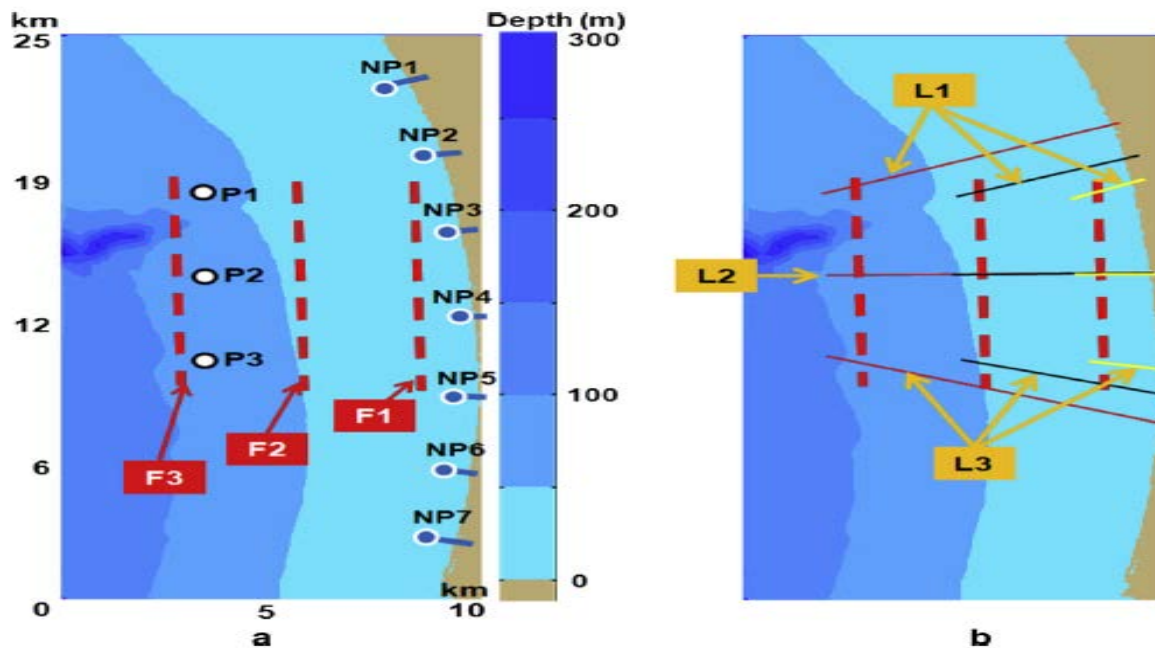
Λισαβόνας) με την επιτυχή λειτουργία ενός πρωτοτύπου κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα εκτεταμένο έργο θαλάσσιας ενέργειας. Ένα άλλο σημαντικό έργο είναι το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας Pico, όπου ένα εγκαταστάθηκε μετατροπέας στήλης ταλάντωσης νερού (ονομαστικής ισχύος 400 kW) στην ακτογραμμή του νησιού Pico στις Αζόρες. Αν και τα παραπάνω το έργο ξεκίνησε το 1992 και ολοκληρώθηκε η κατασκευή 1999, το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας Pico λειτουργεί μόνο το 2005.

Η επίδραση των διατάξεων απορρόφησης κυματικής ενέργειας (WECs) ποικίλει ανάλογα με την απόσταση από την ακτογραμμή. Αυτή η παράμετρος έχει διερευνηθεί για την ίδια περιοχή μελέτης θεωρώντας μια φάρμα σε διαφορετικές αποστάσεις στα 2 km, 4 km και 6 km, από την ακτή (Abanades et al. 2015).

Αν και η εστίαση του θέματος της εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας γίνεται για ακτές που «βλέπουν ωκεανούς» υπάρχει ενδιαφέρον για την κάλυψη περικλειστων θαλασσών όπως π.χ για τη Μαύρη Θάλασσα και τη Μεσόγειο, όπου οι φάρμες θα μπορούσαν να αποδειχθούν αποτελεσματικές στην προστασία των ακτών από τη διάβρωση.

Αναφορικά με το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο κύματος SWAN παράλληλα με το NSSM (ή SURF) που είναι σε θέση να υπολογίσει διάφορες παραμέτρους στη ζώνη επιφάνειας πάνω από μια μονοδιάστατη γραμμή κάθετη στο ακτογραμμή. Το μοντέλο SURF μπορεί να λύσει την εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου που ορίζεται από τις τριβές, τις αναταράξεις και τις αλληλεπιδράσεις κύματος -ρευμάτων. Δεδομένου ότι πρόκειται για μονοδιάστατο μοντέλο, λαμβάνονται υπόψη αρκετές προσεγγίσεις. Ακολουθείται η θεωρία των γραμμικών κυμάτων. οι κατώτερες γραμμές του βυθού είναι ευθείες και παράλληλες, τα ρεύματα δεν διαφοροποιούνται ως προς το βάθος. τα φάσματα κατευθυντικών κυμάτων είναι στενής ζώνης σε συχνότητα και κατεύθυνση [36]. Σε αυτό το σημείο οι ερευνητές τονίζουν ότι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα στη μεθοδολογία που εξετάζεται σε σχέση με άλλες πιθανές προσεγγίσεις είναι η ισορροπία μεταξύ απλότητας και ακρίβειας των αποτελεσμάτων που παρέχονται σε παράκτιες περιοχές, όταν δεν υπάρχουν σημαντικές βαθυμετρικές κλίσεις. Σε προηγούμενες εργασίες έχει διαπιστωθεί ότι για ήπιες κλίσεις του βυθού και όταν η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης των κυμάτων και της ακτογραμμής είναι μικρότερη των 20°, το 1-D surf μοντέλο μπορεί να φανεί αξιόπιστο σε παράκτιες εφαρμογές (Silva et al. 2004, Gomes et al. 2004).

Η περιοχή εξέτασης ορίζεται από μια ορθογώνια περιοχή με μέγεθος 10 χιλιόμετρα στην κατεύθυνση κάθετη στην ακτή και τα αποτελέσματα αφορούν μήκος ακτογραμμής 25 χιλιομέτρων. Για την περιοχή που επιλέχθηκε το μέγιστο βάθος νερού μπορεί να φθάνει περίπου 300 m και εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής. Η διακριτοποίηση κατά την προσομοίωση με το μοντέλο SWAN ήταν στα 50m και στις 2 διευθύνσεις στο επίπεδο. Λόγω της υψηλής ανάλυσης το υπολογιστικό πεδίο ήταν σχετικά μικρό και έτσι η επίδραση του τοπικού ανέμου δεν ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη.



Εικόνα 39: Σταθμοί - Σενάρια του μοντέλου προσομοίωσης (Rusu 2016).

Στην Εικόνα δίνεται το υπολογιστικό πεδίο που θεωρήθηκε για τις προσομοιώσεις. Τα σενάρια που εξετάστηκαν ήταν τα F1, F2, F3 σε διαφορετικές αποστάσεις από την ακτή (2km, 4km, 6km). Σημεία αναφοράς P1, P2, P3 και γραμμές L1, L2, L3 θεωρήθηκαν για να αναγνωριστούν οι μεταβολές των παραμέτρων των κυμάτων στην μακρυνή περιοχή της ακτής (offshore) για κάθε σενάριο ενώ για την περιοχή της ακτής (nearshore) οι ομάδες σημείων NP σχετίζονται με τα αποτελέσματα – πληροφορία των κυμάτων που φθάνουν στην ακτή.

Σε γενικές γραμμές, η εφαρμογή μιας κυματικής φάρμας μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις τοπικές ανάγκες όσον αφορά την προστασία των ακτών [26]. Ετσι, εάν είναι απαραίτητο να καλυφθεί μια μεγάλη παραλία, φαίνεται πιο βιώσιμη η τοποθέτηση των συστημάτων σε βαθύτερα νερά (π.χ. σενάριο F3). Σε περιοχές με υψηλότερα κύματα, θα ήταν πιο λογικό να αναπτυχθεί μια γραμμή από μετατροπείς WECs που να βρίσκονται πιο κοντά στην ακτή (σενάρια F1 και F2). Σχετικά με την επιλογή συσκευής δέσμευσης της κυματικής ενέργειας, εάν η περιοχή προς κάλυψη είναι μεγάλη, θα είναι απαραίτητη η διαμόρφωση μιας φάρμας με μικρά κενά μεταξύ των συσκευών.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, το πιο ρεαλιστικό σενάριο εκμετάλλευσης είναι αυτό που αντιστοιχεί σε μια απορρόφηση ενέργειας σε ποσοστό 20% της συνολικής ενέργειας των κυμάτων από μια συσκευή μετατροπέα (WEC), με ένα μέσο ύψος κύματος 2m, περίοδο κύματος 7s και διεύθυνση στις 285°.

Average total time conditions (TT)	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	Dir (°)
Average winter time conditions (WT)	2	7	285
High non-storm conditions	2.5	8	285
	4	11	285
<i>(b) Scenarios</i>			
F1 – scenario	Wave farm located at: 20 m water depth/1 km from the shoreline		
F2 – scenario	Wave farm located at: 40 m water depth/4 km from the shoreline		
F3 – scenario	Wave farm located at: 90 m water depth/7 km from the shoreline		
<i>(c) Absorption scenarios</i>			
No farm	Wave absorption	Wave reflection	Details
Moderate absorption (MA)	20%	5%	– Realistic scenario
High absorption (HA)	40%	8%	– Ideal scenario



#### 4. Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό.

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

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

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

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

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

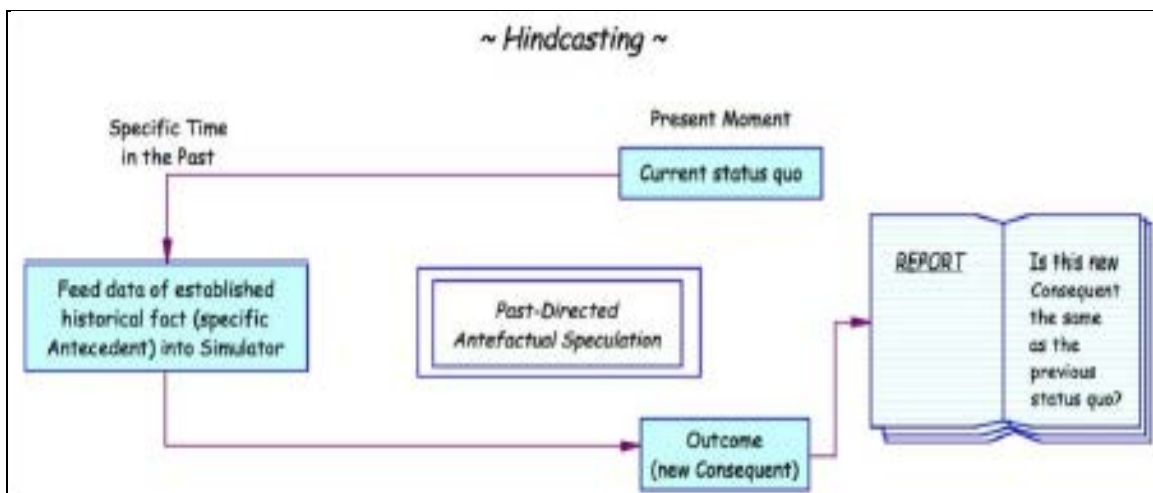
Για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, τα αιολικά και κυματικά δεδομένα προέρχονται:



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

#### 4.1 Δεδομένα του μοντέλου WAM.

Με τον όρο hindcast νοούνται τα αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται τόσο στη μετεωρολογία όσο και την ωκεανογραφία. Ουσιαστικά με μια διαδικασία ανατροφοδότησης δεδομένων και εξαγόμενων ελέγχεται το μαθηματικό μοντέλο. Ειδικότερα γνωστά δεδομένα παλαιότερων γεγονότων εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο και εξετάζεται αν επιβεβαιώνεται το ήδη γνωστό αποτέλεσμα. Το μοντέλο [WAM](#) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στο Αιγαίο πέλαγος, καλύπτοντας μια έκταση 240,000 km<sup>2</sup>. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του Αιγαίου είναι η δαιδαλώδης τοπογραφική δομή της ακτογραμμής και η ύπαρξη περισσότερων από 2000 νησιών διαφόρων μεγεθών με συνέπεια η μορφολογία του βυθού να παρουσιάζει απότομες και συχνές μεταβολές. Λόγω της πολύπλοκης βαθυμετρίας του Αιγαίου, η χρήση hindcast δεδομένων που προέρχονται από αριθμητικά μοντέλα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης είναι ο μόνος τρόπος να παρουσιασθούν με ακρίβεια τα κύρια χαρακτηριστικά του αιολικού και κυματικού κλίματος των ελληνικών θαλασσών.



Εικόνα 40: Διαδικασία μοντέλου hindcast.

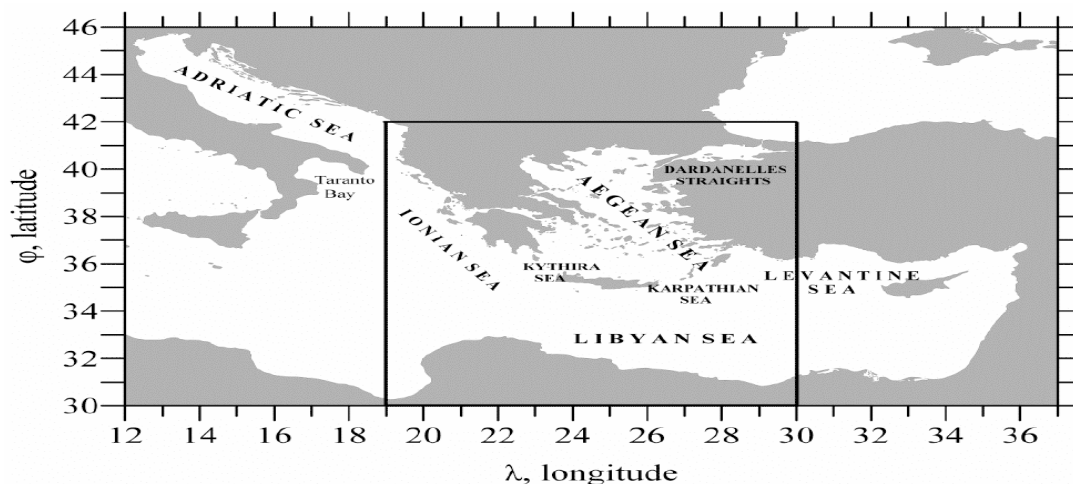
Τα κυματικά δεδομένα hindcast προέρχονται από το 3ης γενιάς κυματικό μοντέλο WAM-Cycle 4, (Max Planck-Institute) με χωρική ανάλυση 0.1°x0.1° (περίπου 9x11 km<sup>2</sup>) και χρονική ανάλυση 3 ωρών. Τα αιολικά δεδομένα hindcast προέρχονται από το μη υδροστατικό μοντέλο καιρού SKIRON-ETA. Το κυματικό μοντέλο WAM-Cycle 4 υπολογίζει την χωρική και χρονική εξέλιξη του κυματικού φάσματος λαμβάνοντας υπόψη την δημιουργία κύματος λόγω ανέμου, τη διάθλαση του κύματος λόγω αλλαγής βάθους και της παρουσίας ρευμάτων, καθώς και την απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης του κύματος ή τριβής με τον πυθμένα. Η βαθυμετρία είναι προσαρμοσμένη στην χωρική ανάλυση του πλέγματος χωρική ανάλυση των 2' (κάθε 1' αντιστοιχεί σε 1852m στον Ισημερινό) και κατακόρυφη ακρίβεια 1m. Σε



περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητο γίνονται διορθώσεις με βάση τους ναυτικούς χάρτες της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού. Η φασματική συχνότητα ανάλυσης του μοντέλου ορίστηκε σε ένα εύρος (0.05 – 0.793 Hz) με διακριτοποίηση 30 συχνοτήτων συνολικά.

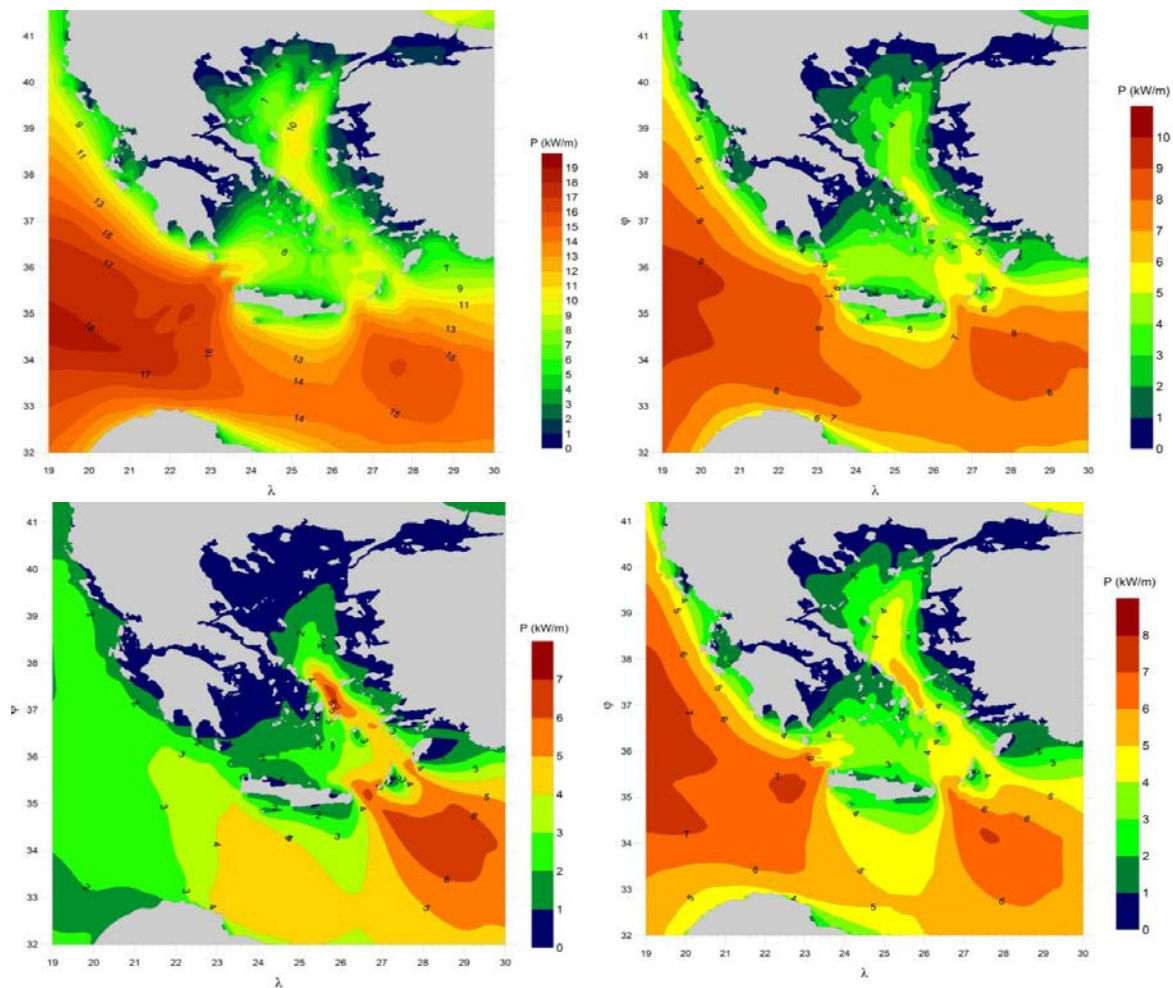
Το σημαντικό ύψος κύματος και η μέση κατεύθυνση κύματος λαμβάνονται ως εξαγόμενα ολοκλήρωσης από τα φάσμα του κύματος ενώ η περίοδος κορυφής προέρχεται από την κατανομή του φάσματος. Τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου διορθώνονται με συνδυασμό δεδομένων από επιτόπιες κατάλληλα επεξεργασμένες μετρήσεις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

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



Εικόνα 41: Η περιοχή ανάλυσης – μελέτης του μοντέλου [Σουκισιάν 2007].

Η περιοχή μελέτης που αφορά όλο τον ελλαδικό χώρο έχει διακριτοποιηθεί μέσω ενός πλέγματος διαστάσεων  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (περίπου  $9 \times 11 \text{ km}^2$ ) όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Σε κάθε κόμβο του πλέγματος έχει υπολογιστεί μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε μέγεθος ανά 3 ώρες και για μια συνολική χρονική περίοδο 10 ετών (1995-2004). Από το σύνολο αυτών των δεδομένων σχεδιάζονται οι ισοϋψείς ενεργειακές καμπύλες των ελληνικών θαλασσών. Χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι του σημαντικού ύψους κύματος ( $H_s$ ) και της περιόδου ( $T_p$ ) που προκύπτουν διορθωμένες από το μοντέλο καθώς και δεκαετείς μετρήσεις και υπολογίζεται η τιμή της κυματικής ενέργειας σε  $\text{kW/m}$ . Η χωρική κατανομή της κυματικής ενέργειας των ελληνικών θαλασσών γίνεται τόσο σε εποχιακή όσο και σε ετήσια βάση. Η διάρκεια του έτους χωρίζεται στις τέσσερις εποχές. Για κάθε εποχή υπολογίζεται ο μέσος όρος του σημαντικού ύψους κύματος ( $H_s$ ) και της περιόδου ( $T_p$ ) και προκύπτει η μέση κυματική ενέργεια. Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνεται η χωρική κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας σε  $\text{kW/m}$  με τις ισοενεργειακές καμπύλες.



Εικόνα 42:Χωρική Κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας στις 4 εποχές ξεκινώντας από Χειμώνα έως φθινόπωρο [Σουκισιάν 2007].

Παρατηρώντας τις ισοενεργειακές στάθμες προκύπτει ότι η μέση κυματική ενέργεια φθάνει τις μέγιστες τιμές της κατά τη διάρκεια του χειμώνα γενικά. Βόρεια των Κυκλάδων η κυματική ισχύς φθάνει τα 10 kW/m ενώ νότια των Κυκλάδων η τιμή της μειώνεται στα 6-8 kW/m. Στο νοτιανατολικό Αιγαίο ανάμεσα στην Κρήτη και την Κάρπαθο η κυματική ισχύς είναι περίπου 10-12 kW/m ενώ στο νοτιοδυτικό Αιγαίο η τιμή της κυματικής ισχύος είναι περίπου 8-10 kW/m. Μεταξύ των νησιών Κρήτης και Κυθήρων εμφανίζεται το υψηλότερο κυματικό δυναμικό του Αιγαίου Πελάγους της τάξης των 12-14 kW/m.

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

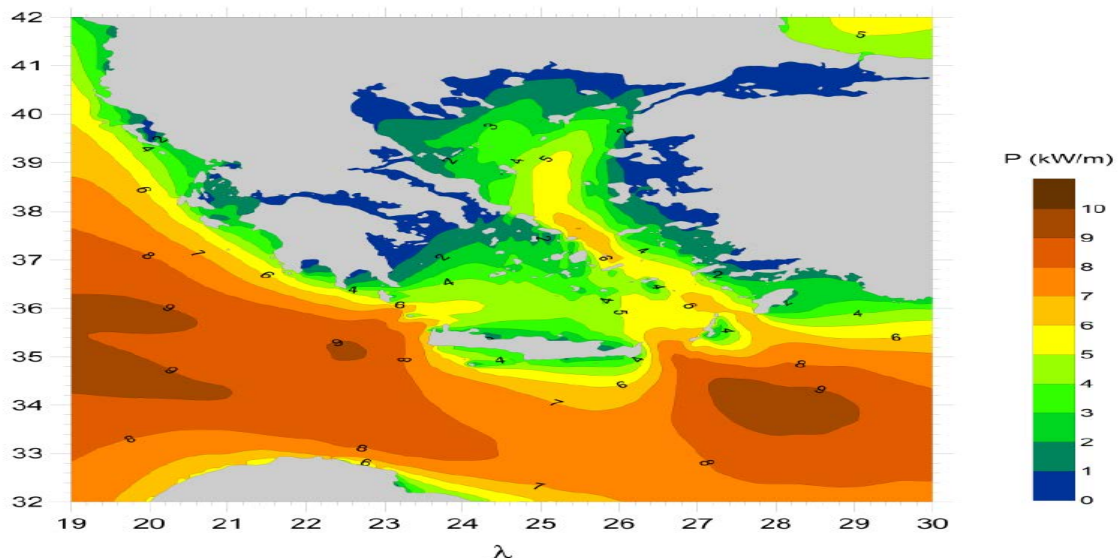
Το καλοκαίρι εμφανίζονται χαμηλότερες τιμές κυματικής ενέργειας στις ελληνικές θάλασσες από τις αντίστοιχες της άνοιξης. Ωστόσο στο κεντρικό Αιγαίο βόρεια των Κυκλάδων και στο νοτιοανατολικό Αιγαίο εμφανίζεται μια τοπική σημαντική αύξηση της κυματικής ισχύος η οποία φθάνει τα 5-6kW/m. Οι υψηλές τιμές της κυματικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες οφείλονται στην επίδραση των



Ετησίων Ανέμων (τα λεγόμενα μελτέμια) που πνέουν από βόρεια– βορειοδυτικά προς νότια- νοτιοανατολικά στο Αιγαίο Πέλαγος.

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

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



Εικόνα 43:Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες (Ντάβαλης 2016) .

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

- στο βόρειο Αιγαίο η ισχύς των κυμάτων είναι περίπου 3-5 kW/m ενώ
- στο βόρειο-κεντρικό Αιγαίο μέχρι το σύμπλεγμα των Κυκλάδων η κυματική ισχύς φθάνει τα 6kW/m.
- στο νοτιοδυτικό Αιγαίο η κυματική ισχύς είναι χαμηλότερη (4-5 kW/m).
- Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ισχύος(6-8 kW/m) παρουσιάζονται στα στενά μεταξύ Κρήτης- Κυθήρων και Κρήτης-Κάσου.
- στο στενό Καρπάθου-Ρόδου η κυματική ισχύς είναι περίπου 6 kW/m.

## 4.2 Δεδομένα μετρήσεων συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

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

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





#### 4.2.1 Πλωτοί Σταθμοί Μέτρησης.

Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ χρησιμοποιεί δύο τύπους πλωτών σταθμών μέτρησης.

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

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

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

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



Εικόνα 44: Οι πλωτοί σταθμοί *Wavescan*, *Seawatch* και *Seawatch Deep Sea Module (SDSM)*.



Εικόνα 45: Οι σταθμοί μετρήσεων του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Ντάβαλης 2016)

Το δίκτυο πλωτών σταθμών βρίσκεται σε λειτουργία από το 1999 και κάθε 3-4 μήνες γίνεται συντήρηση από το ωκεανογραφικό σκάφος «Αιγαίο». Τα δεδομένα των πλωτών σταθμών μεταφέρονται μέσω του δορυφορικού συστήματος Inmarsat-C και με χρήση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων GPRS. Συλλέγονται και αποστέλλονται στο ΕΛΚΕΘΕ όπου επεξεργάζονται και αξιοποιούνται για την πρόγνωση της κατάστασης θαλασσών με χρήση αριθμητικών μοντέλων. Οι μετρήσεις από τους πλωτούς σταθμούς είναι χρονοσειρές φασματικών μεγεθών που καλύπτουν μια χρονική περίοδο. Οι μετρήσεις εμφανίζονται με βήμα 3 ωρών και στην πραγματικότητα κάθε τιμή βασίζεται σε καταγραφές διάρκειας 17min που διενεργούνται με περίοδο δειγματοληψίας συνήθως 1Hz.

### 4.3 Παράδειγμα μελέτης κυματικού δυναμικού (Σκύρος).

Στην εργασία του Ντάβαλη (2016) δίνονται παραδείγματα υπολογισμού του κυματικού δυναμικού από 3 σταθμούς (Ρόδος, Μύκονος, Σκύρος), από πλωτούς μετρητικούς σταθμούς (τύπου Seawatch) του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ του ΕΛΚΕΘΕ που έχουν ποντιστεί σε μεγάλα βάθη. Στην παραπάνω εργασία περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία εξαγωγής του κυματικού δυναμικού των υπό μελέτη περιοχών. Στη συγκεκριμένη εργασία δίνονται διαγράμματα που απεικονίζουν μετρήσεις φασματικών παραμέτρων όπως το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  και η περίοδος κορυφής  $T_p$  για χρονική περίοδο που κυμαίνεται από 1-4 χρόνια. Ο υπολογισμός της ισχύος γίνεται από τις παρακάτω σχέσεις με βάση τα πρωτογενή δεδομένα:

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

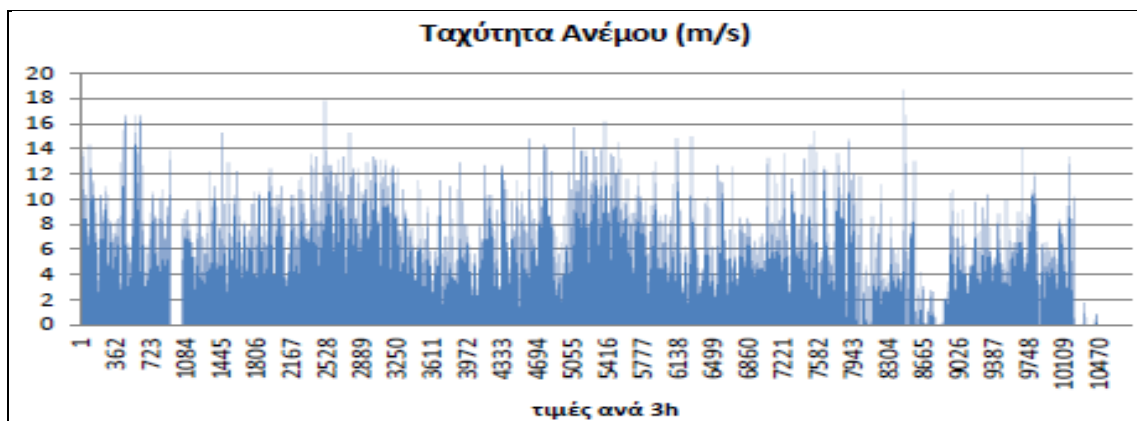


Από τις καταγεγραμμένες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής κύματος θα προκύψει η τιμή της κυματικής ισχύος της περιοχής. Οι σχέσεις που δίνονται παραπάνω αναφέρονται στην περίπτωση τυχαίας θάλασσας. Η ολοκλήρωση δίνει τη μέση κυματική ισχύ για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, δηλ.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

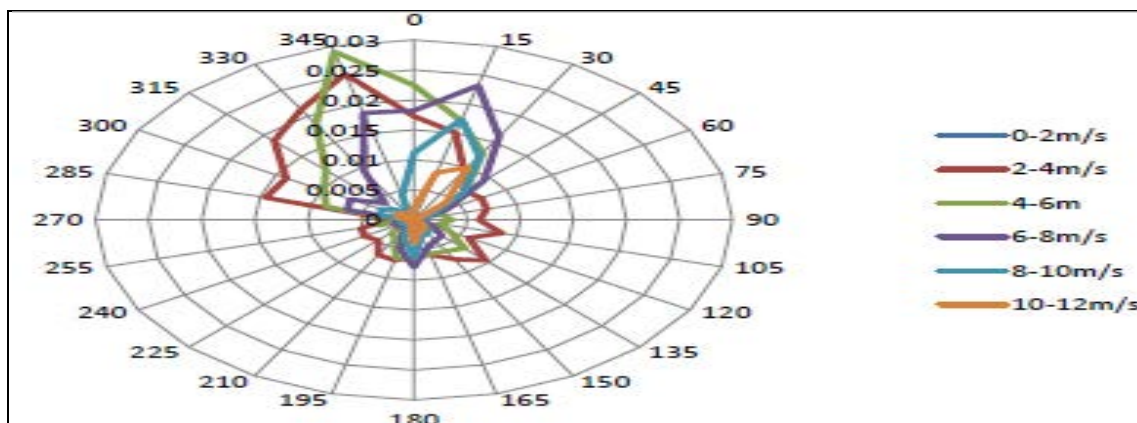
Στη συνέχεια αναπαράγεται για λόγους πληρότητας της παρούσας εργασίας και μόνο το παράδειγμα της Σκύρου (Ντάβαλης 2016). Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται καλύπτουν μια χρονική περίοδο 4 χρόνων ( από τις 01/12/2007 έως τις 31/11/2011).

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

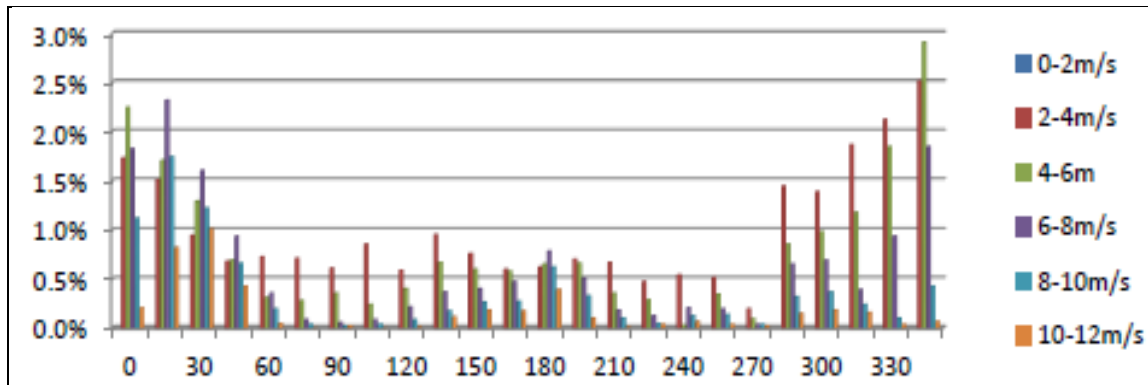
Το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης του ανέμου που γίνεται με τη βοήθεια ροδογράμματος που φαίνεται παρακάτω (Εικ.45). Πέρα από την κατεύθυνση του ανέμου ενδιαφέρει και η ισχύς αυτού που δίνεται στην εικ.46. Από το ροδόγραμμα ανέμου φαίνεται ότι οι άνεμοι που πνέουν με μεγαλύτερη ένταση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



Εικόνα 46: Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).



Εικόνα 47:Ροδόγραμμα ανέμου θαλασσίου χώρου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).



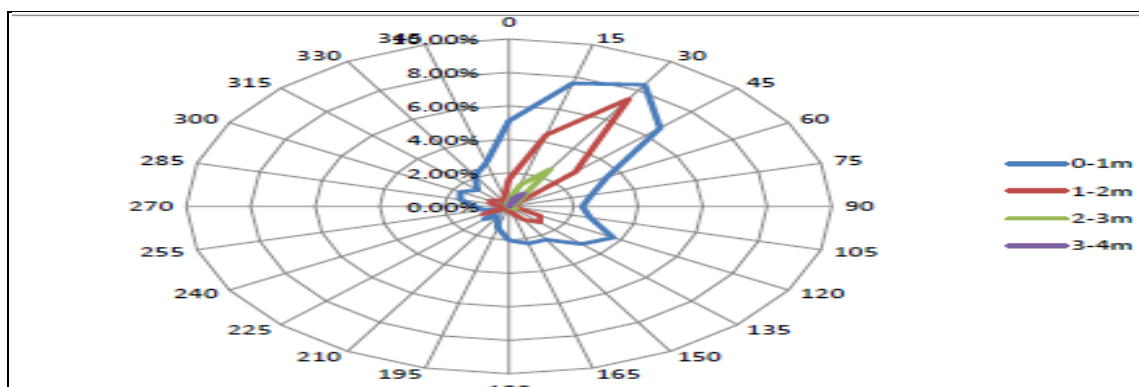
Εικόνα 48: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα ανέμου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).

Το τρίτο βήμα της μελέτης είναι η καταγραφή της χρονοσειράς του σημαντικού ύψους κύματος. Από τη χρονοσειρά προκύπτει το εύρος σημαντικού ύψους (0,05 - 5,39)m, ενώ η μέση τιμή του  $H_s$  κύματος είναι στα 0,875m (Εικ.47).

Το τέταρτο βήμα είναι η καταγραφή του ροδογράμματος κύματος (Εικ.48). Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η κατεύθυνση των κυμάτων όπως αυτή καταγράφεται από των πλωτό σταθμό. Κατά παρόμοιο τρόπο με το ροδόγραμμα ανέμου από το ροδόγραμμα κύματος προκύπτει και το ανεπτυγμένο ροδόγραμμα.



Εικόνα 49: Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος (Ντάβαλης 2016).

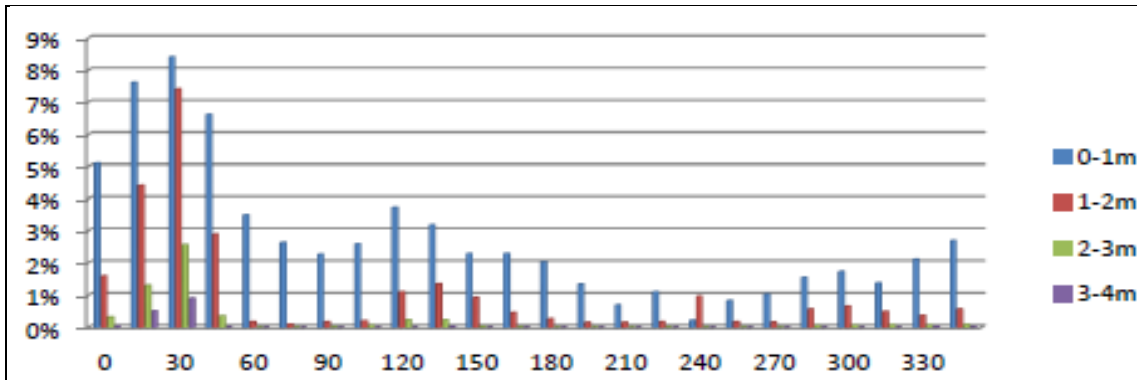


Εικόνα 50: Ροδόγραμμα κύματος σταθμού Σκύρου (Ντάβαλης 2016) .

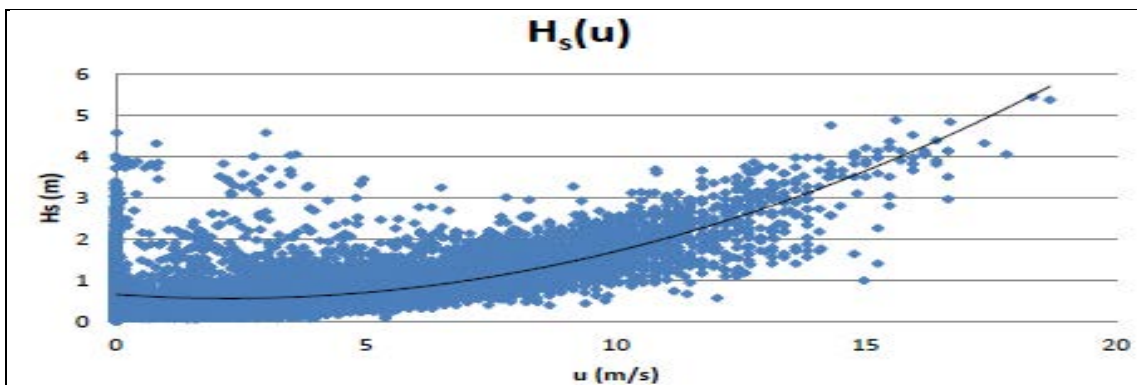
Παρατηρείται από το ροδόγραμμα κύματος ότι τα κύματα φθάνουν στην Σκύρο από βόρεια- βορειοανατολικά. Συγκρίνοντας το ροδόγραμμα κύματος με το αντίστοιχο για



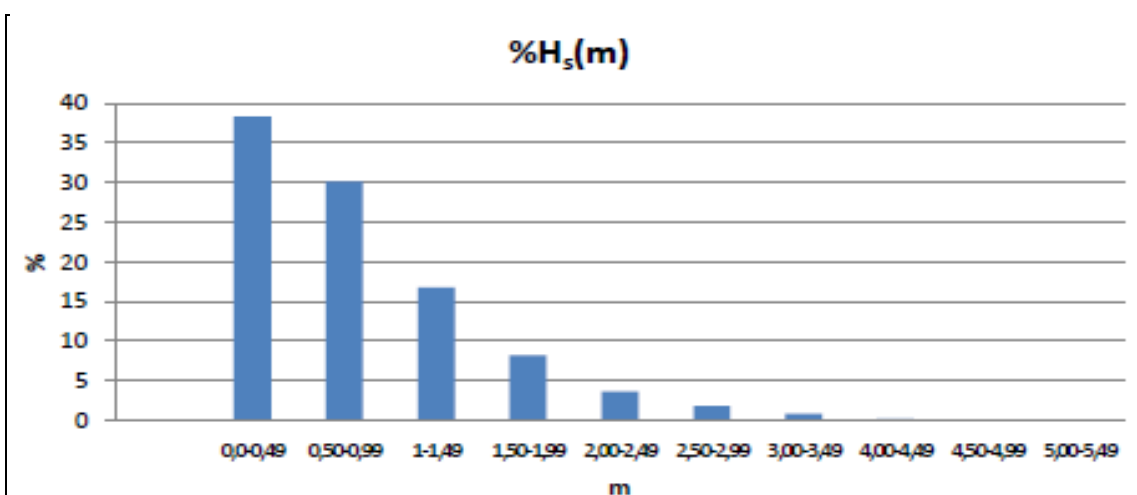
την ταχύτητα του ανέμου γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα αλλά και υψηλότερου σημαντικού ύψους κύματα δημιουργούνται από τους ανέμους με την μεγαλύτερη ταχύτητα, οι οποίοι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι βόρειοι-βορειανατολικοί.



Εικόνα 51: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα κύματος (Ντάβαλης 2016).



Εικόνα 52: Συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος - ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).



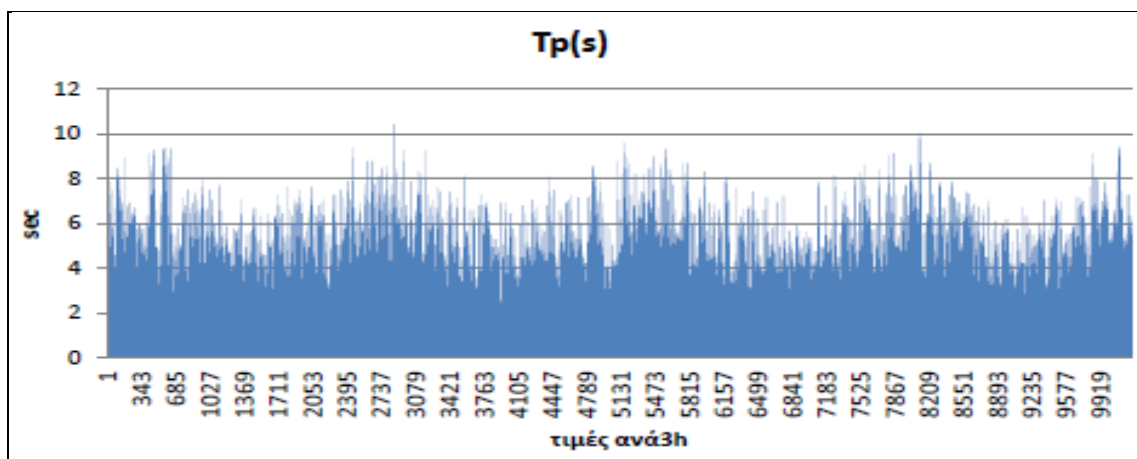
Εικόνα 53: Ποσοστιαία κατανομή σημαντικού ύψους ως προς την ταχύτητα ανέμου.



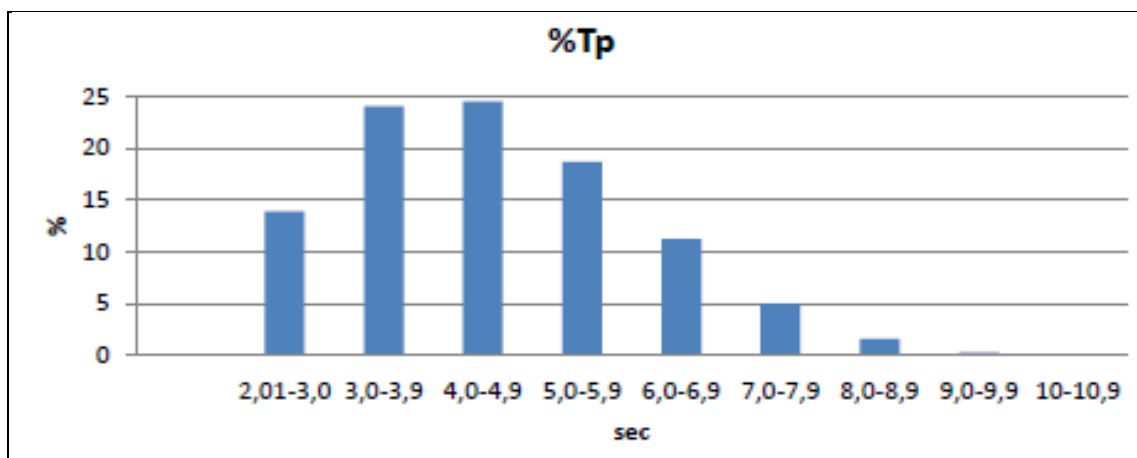
Το πέμπτο βήμα της μελέτης είναι η δημιουργία γραφήματος που περιγράφει τη συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$ , με την ταχύτητα του ανέμου. Από τη συσχέτιση αυτή προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο υψηλότερα είναι τα κύματα που καταγράφονται. Όμως και σε αυτή την περίπτωση κυματισμός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

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

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



Εικόνα 54: Χρονοσειρά τιμών περιόδου κορυφής  $T_p$ .



Εικόνα 55: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας  $T_p$  (Ντάβαλης 2016) .

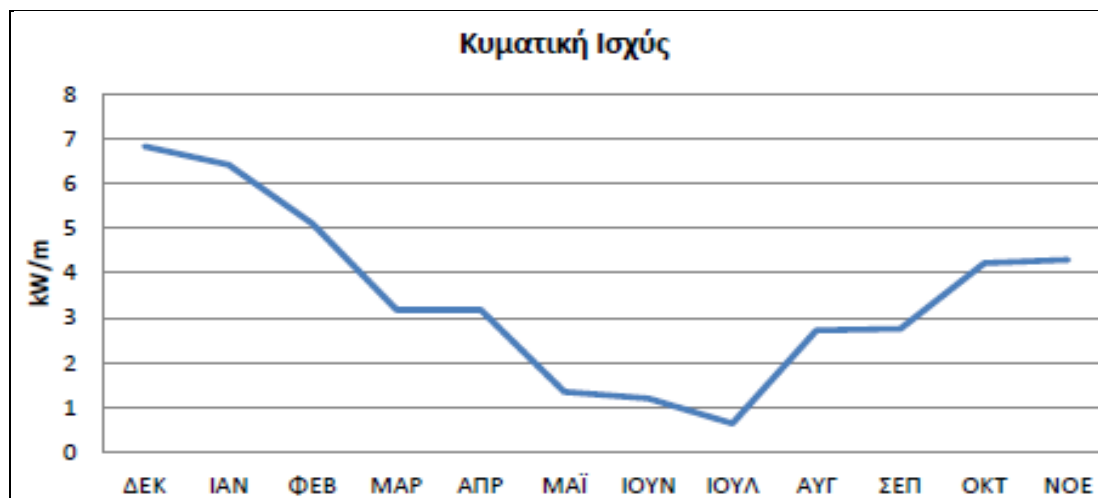


Από την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των τιμών της περιόδου κορυφής προκύπτει ότι περίπου το 37% των καταγεγραμμένων κυμάτων έχει περίοδο κορυφής μεγαλύτερη των 5sec. Περίπου σε ποσοστό 50% των κυμάτων έχει περίοδο (3-5)sec. Η μικρότερη τιμή της περιόδου είναι 1.99 sec και η μέγιστη 10.43sec.

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

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

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



Εικόνα 56: Κατανομή μέσης ετήσιας παραγωγής κυματικής ενέργειας (Ντάβαλης 2016).



## 5. Εφαρμοσμένες Διατάξεις Ακτογραμμής.

Στα επόμενα δίνονται παραδείγματα διατάξεων που έχουν ήδη εφαρμοστεί τουλάχιστον σε πειραματικό στάδιο δοκιμών ανά τον κόσμο. Στα επόμενα δίνονται σύντομα χαρακτηριστικά διατάξεων ακτογραμμής.

### 5.1 Σύστημα LIMPET (Σκωτία).

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

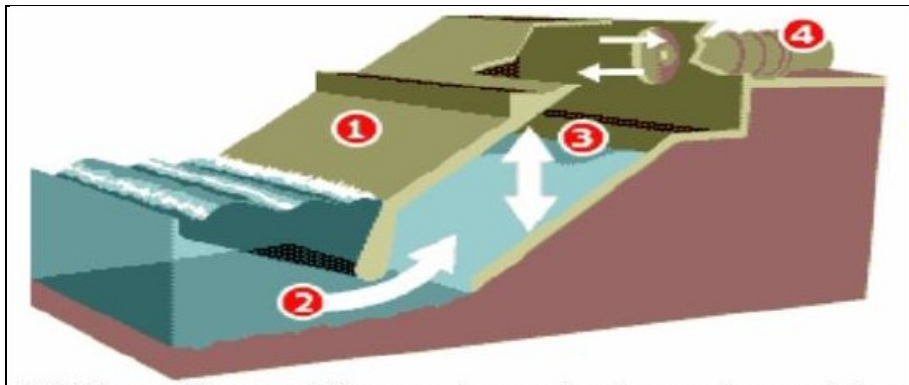
Το σύστημα αυτό που είναι γνωστό ως LIMPET (Last Installed Marine Power Energy Transmitter), εγκαταστάθηκε στη νήσο Islay έξω από τα δυτικά παράλια της Σκωτίας και η έναρξη της λειτουργίας του πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Η εγκατάσταση λειτουργεί και ελέγχεται από απόσταση (remote), ενώ τροφοδοτεί το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου με ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα - χωρίς επίβλεψη έχει τη δυνατότητα να συνεισφέρει στο απόθεμα ενέργειας.

Η βάση λειτουργίας είναι η παλλόμενη υδάτινη στήλη. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν 3 διαμερίσματα νερού που ταλαντώνονται μέσα σε θαλάμους από μπτετόν με εσωτερικές διαστάσεις 6m x 6m και σε κλίση 40° ως προς την οριζόντιο. Το τελευταίο άνω διαμέρισμα συνδέεται με μία μόνο στροβιλογεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στον μεσαίο αγωγό. Οι στήλες ύδατος έχουν εξωτερικό πλάτος 21m και βρίσκονται 17m εσωτερικά της φυσικής ακτογραμμής σε ένα προκατασκευασμένο βάθος νερών 6m. Στην εγκατάσταση αυτή η κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση των κυμάτων λειτουργεί ως έμβολο που πιέζει τον αέρα ενός θαλάμου, η ροή του οποίου περιστρέφει ένα στρόβιλο. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε απόκρυμα βράχια απαιτώντας όμως αρκετές εργασίες πολιτικού μηχανικού. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο Wells αντίστροφης περιστροφής, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο πτερωτής 2.6m. Κάθε επίπεδη επιφάνεια με πτερύγια του στροβίλου Wells είναι ενσωματωμένη απευθείας στον άξονα μιας τροποποιημένης επαγωγικής γεννήτριας των 250 kW, δίνοντας έτσι συνολική εγκατεστημένη ισχύ 500 kW.



Εικόνα 57: Η εγκατάσταση LIMPET (Σκωτία).





Εικόνα 58: Τμηματική περιγραφή της διάταξης LIMPET.

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

Η έξοδος των γεννητριών συνδέεται με κύκλωμα εξομάλυνσης και αντιστροφής πριν από τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης LIMPET μπορούν να ελέγχονται και να μεταβάλλονται από ειδικό λογισμικό. Ο θόρυβος που παράγεται από την ροή του αέρα διαμέσου του στρόβιλου μειώνεται σε ένα ειδικό ακουστικό θάλαμο πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

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

Στην Εικ.57 δίνονται τα βασικά στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET. Ειδικότερα στην πάνω αριστερά φαίνεται αρχικά η εκσκαφή της επιλεγμένης τοποθεσίας εγκατάστασης, πάνω δεξιά η κατασκευή των 3 τσιμεντένιων αεροθαλάμων, κάτω αριστερά η συναρμολόγηση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον στρόβιλο Wells και τις επαγωγικές γεννήτριες και κάτω δεξιά η τελική μορφή της πρόσοψης της εγκατάστασης.



Εικόνα 59: Διαδικασίες – στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET.

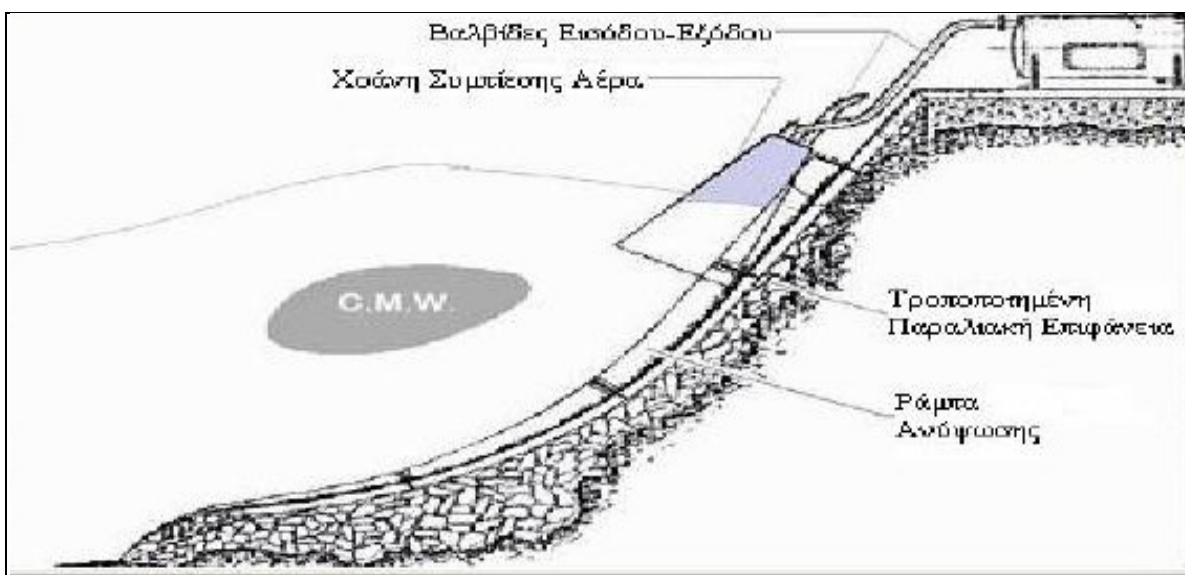
## 5.2 Σύστημα WECA (Ελλάδα).

Το WECA (Wave Energy Conversion Activator) της ελληνικής εταιρίας DAEDALUS Informatics Ltd αποτελεί έναν μετατροπέα της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων σχεδιασμένο κυρίως για εγκατάσταση ακτογραμμής, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ανοιχτής θαλάσσης. Η βασική αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη συμπίεση του εγκλωβισμένου αέρα κατά την πρόσκρουση του θαλάσσιου κύματος. Πιο συγκεκριμένα, ένα είδος ανεστραμμένης κωνοειδούς χοάνης λειτουργεί ως αεροθάλαμος συμπίεσης που χρησιμοποιεί την ορμή του ερχόμενου κύματος (CMW – Critical Momentum Wedge principle). Το προτεινόμενο μοντέλο WECA πλήρους κλίμακας είναι από χάλυβα, κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κυματοθραύστες. Τα υλικά κατασκευής αποτελούν πάντα πρόκληση σε επίπεδο ανάπτυξης μιας οικονομικότερης λύσης αφού το υλικό κατασκευής δεν είναι ανάγκη να είναι ο χάλυβας.

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



Εικόνα 60: Προτεινόμενη εφαρμογή μετατροπής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστη WECA.



Εικόνα 61: Τμήματα της διάταξης WECA.

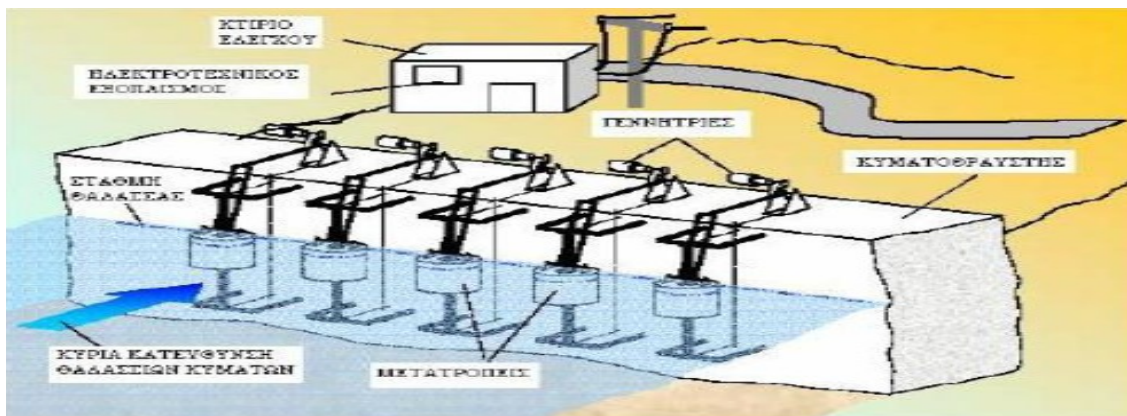
#### 5.4 Σύστημα LabBouoy (Ελλάδα).

Το LabBouoy είναι μια τεχνολογία ακτογραμμής. Η πρώτη φάση της δοκιμής του μαθηματικού και φυσικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη συνεργασία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES), του ΕΜΠ, της Athena SA, της Ramboll (DK), του Queen's University Belfast UK) και του University College Cork (IE). Ο μετατροπέας LabBouoy είναι πλωτού τύπου, ενώ τα συστήματα μετάδοσης και μετατροπής βρίσκονται εγκατεστημένα σε στερεά θεμέλια (κυματοθραύστης ή αποβάθρα). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται λόγω της ανάκλασης των



θαλάσσιων κυμάτων στην πρόσοψη του κυματοθραύστη, Οι βασικοί στόχοι του πειραματικού έργου ήταν:

- Η ανάπτυξη επιβεβαίωση και επαλήθευση αξιόπιστων μαθηματικών μοντέλων για το σχεδιασμό συστημάτων και την πρόβλεψη φορτίων.
- Η εφαρμογή της τεχνολογίας με πειράματα – δοκιμές μικρής κλίμακας σε δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων για τη μέγιστη απορρόφηση, εκμετάλλευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών αποτελεσμάτων και των περιβαλλοντικών επιδράσεων της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας σε αντιπροσωπευτικές θαλάσσιες συνθήκες στην Ευρώπη.



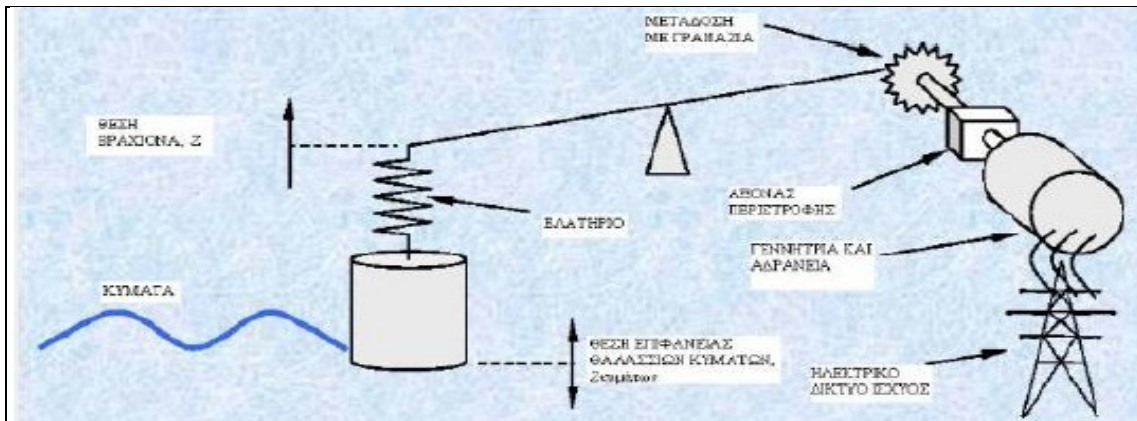
Εικόνα 62: Βασικά μέρη εγκατάστασης LabΒουου κοντά σε κυματοθραύστη.

Στην Εικ.64 δίνεται σχηματικά μια εγκατάσταση LabΒουου όπου διακρίνονται 5 μετατροπείς κυματικής ενέργειας σε σειρά.

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

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

Επίσης τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης υποδεικνύουν μια έντονη αλληλεπίδραση της αδράνειας του συστήματος και της απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης της μετατροπής ισχύος, ως προς την απόδοση του μετατροπέα. Με κατάλληλη ρύθμιση αυτών ιδιοτήτων στις τοπικές κυματικές συνθήκες, το σύστημα μπορεί να συντονιστεί για τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 63: Σχηματική απεικόνιση των κινούμενων τμημάτων LabBuoy.

Ένα μοντέλο κλίμακας 1:15 αποτελούμενο από 5 μετατροπείς εγκαταστάθηκε σε δεξαμενή κυμάτων (ΕΜΠ), με τους απαραίτητους αισθητήρες:

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

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



Εικόνα 64: Λειτουργία δοκιμαστικού μοντέλου κλίμακας 1:15 (ΕΜΠ).



Οι βασικές επιδράσεις της τεχνολογίας είναι η οπτική και ακουστική ρύπανση, η όχληση των ψαριών και των θαλάσσιων θηλαστικών και η αναδιαμόρφωση της ακτής εγκατάστασης. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της διάταξης είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μηδενικές εκπομπές ρύπων, και τα κοινωνικά οφέλη.

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

## 5.5 Σύστημα SDE (Ισραήλ).

Το σύστημα SDE είναι ένας παράκτιος μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων που χρησιμοποιεί την κίνηση των κυμάτων για να παράγει υδραυλική πίεση, που με την σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα εκμεταλλεύεται ένα πλήθος χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος όπως την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος, καθώς και τη ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ενέργεια. Το μοντέλο πλήρους κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί στο Ισραήλ, όπου είχε την ικανότητα παραγωγής και παρήγαγε 40 kW/h σε ετήσια βάση. Η ενέργεια που παράγεται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι προφανώς καθαρή μορφή χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Όπως φαίνεται και στην Εικ.68 η παλινδρομική κίνηση ενός πτερυγίου συνδέεται με άρθρωση. Η άρθρωση έχει συμπεριφορά εμβόλου με δυνατότητα οδήγησης του άξονα ενός στροβίλου – γεννήτριας ο οποίος στη συνέχεια ακολουθείται από κύκλωμα μετατροπής της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 65: Εγκατάσταση συστήματος SDE στο Ισραήλ.



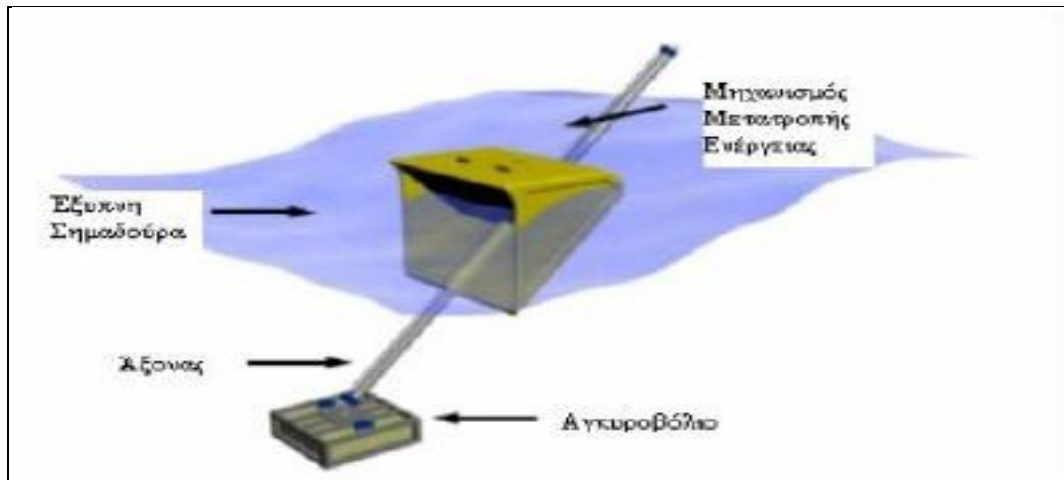
Εικόνα 66: Διαδοχή σταδίων παλινδρομικής κίνησης πτερυγίου.

## 6.2 Σύστημα WETEnGen (Καναδάς).

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

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι η συνεχής κίνηση του άξονα με ευχέρεια στην ευθυγράμμιση με την διεύθυνση των κυμάτων. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς μετατροπής και παραγωγής ενέργειας με κινήσεις τόσο κατά τα όρη όσο και τις κοιλάδες των κυμάτων.

Η συγκεκριμένη διάταξη διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής με χαμηλότερο κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και είναι οικονομικά αποδοτικό ακόμα και σε σχετικά ήπια κυματικά κλίματα (15 kW/m). Επίσης η συσκευή έχει χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, κυρίως λόγω της απλής κατασκευής αφού περιλαμβάνει ελάχιστα κινούμενα τμήματα, ενώ η τοποθέτηση και απόσυρση της εγκατάστασης γίνεται εύκολα. Στην παρούσα φάση εμπορευματοποίησης περιλαμβάνονται κατασκευή και δοκιμή μοντέλων επίδειξης, με την εγκατεστημένη ισχύ να φθάνει πλέον τα 40 kW.



Εικόνα 67: Τμήματα που αποτελούν τη διάταξη WETEnGen.

## 6.5 Σύστημα WaveStar (Δανία).

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

Με το πέρασμα των κυμάτων οι σηματοδούρες ανυψώνονται διαδοχικά και θα σταλθεί υδραυλικό υγρό υπό πίεση στο σύστημα μετάδοσης. Με τον τρόπο αυτό τίθεται σε κίνηση ένας υδραυλικός κινητήρας συνδεδεμένος με μια ηλεκτρογεννήτρια για τη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Το κάθε πλωτό σώμα είναι τοποθετημένο στη βάση του δικού του υδραυλικού κυλίνδρου. Όταν ένα πλωτό ανυψώνεται, ένα πιστόνι στο κύλινδρο πρεσάρει λάδι μέσα στο κοινό σύστημα μετάδοσης της μηχανής με πίεση μέχρι και 200 bar. Η πίεση αυτή θέτει σε κίνηση έναν υδραυλικό κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Λόγω του ότι η διάταξη έχει μήκος όσο αρκετά μήκη κύματος, η διπλή συστοιχία των πλωτών τμημάτων (σηματοδούρες) θα συλλέγει συνεχόμενα ενέργεια. Τα πιο σημαντικά τμήματα της συσκευής στεγάζονται στο περίβλημα της γεννήτριας πάνω στη πλατφόρμα. Η γεννήτρια, το σύστημα μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας στεγάζονται σε χώρους πάνω στην πλατφόρμα προστατευμένα από το αλάτι της θάλασσας, μειώνοντας όσο το δυνατόν αποτελέσματα της διάβρωσης. Η όλη συστοιχία στηρίζεται σε βυθισμένους πυλώνες.

Η διάταξη μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό από συνολικά 40 ανεξάρτητα πλωτά σώματα. Στην περίπτωση αστοχίας ενός ή περισσοτέρων η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συνεχίζεται έστω και μειωμένη. Ακόμα και στην περίπτωση που το 75% των πλωτών σωμάτων τεθεί εκτός λειτουργίας, η ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να συνεχίζεται..

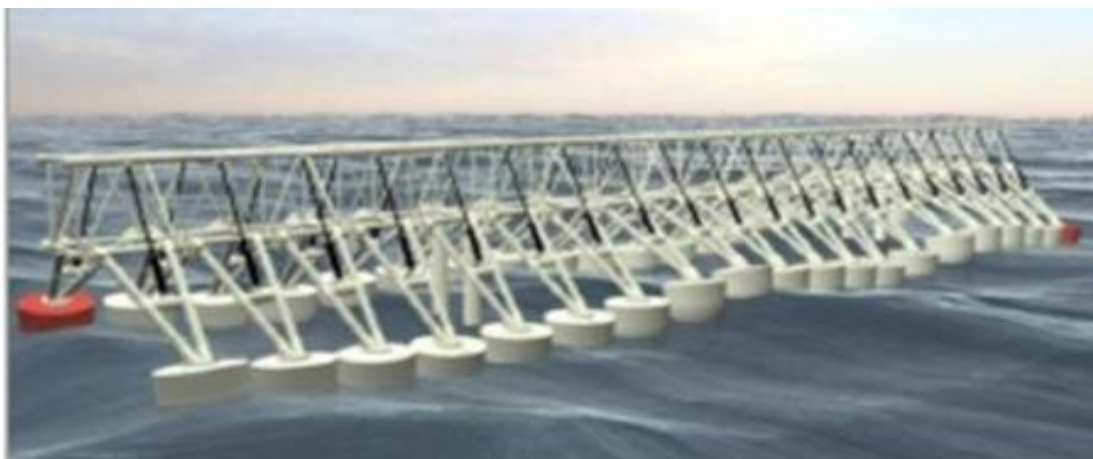




Εικόνα 68: Εγκατάσταση διάταξης WaveStar.

Η συγκεκριμένη διάταξη – συστοιχία διαθέτει πλεονεκτήματα όπως:

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



Εικόνα 69: Συστοιχία διάταξης WaveStar σε λειτουργία.



Εικόνα 70: Σύστημα WaveStar σε θέση ασφαλείας.

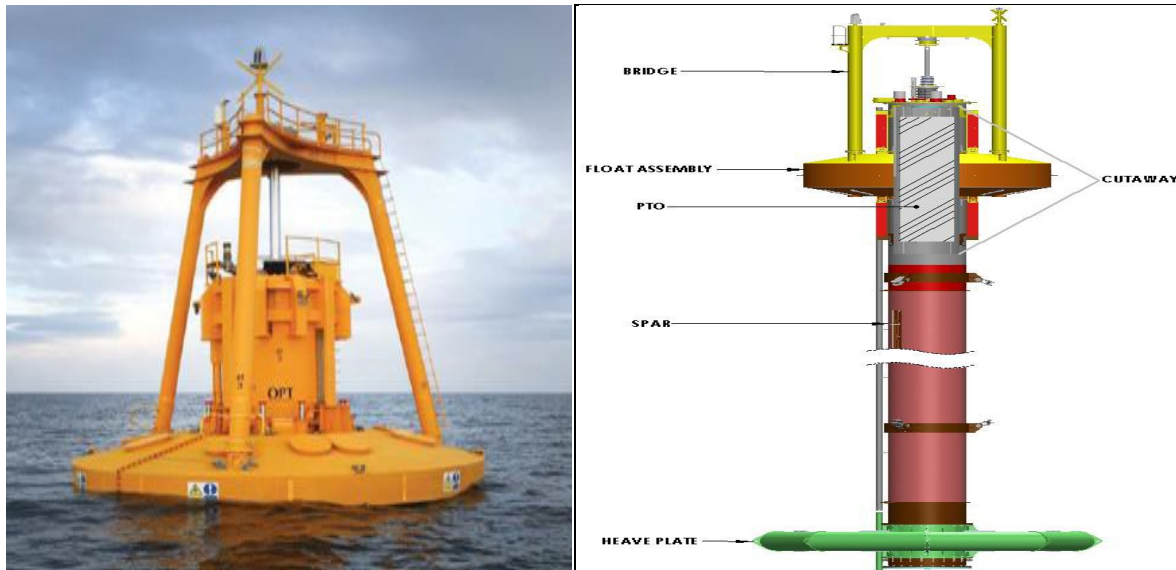
Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάταξη μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό ακόμα και από πολύ μικρά κύματα. Αυτό το μοντέλο χρειάζεται κύματα με ελάχιστο ύψος μόνο 10 εκατοστών. Κατά αυτή την έννοια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως τεχνολογία ακτογραμμής. Κατά τις δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες προέκυψε ότι η μηχανή κυμάτων παράγει ενέργεια στο 90% του χρόνου και ότι λειτουργεί με μέγιστη ισχύ το 30% του χρόνου.

## 6.6 Σύστημα Power Buoy (ΗΠΑ).

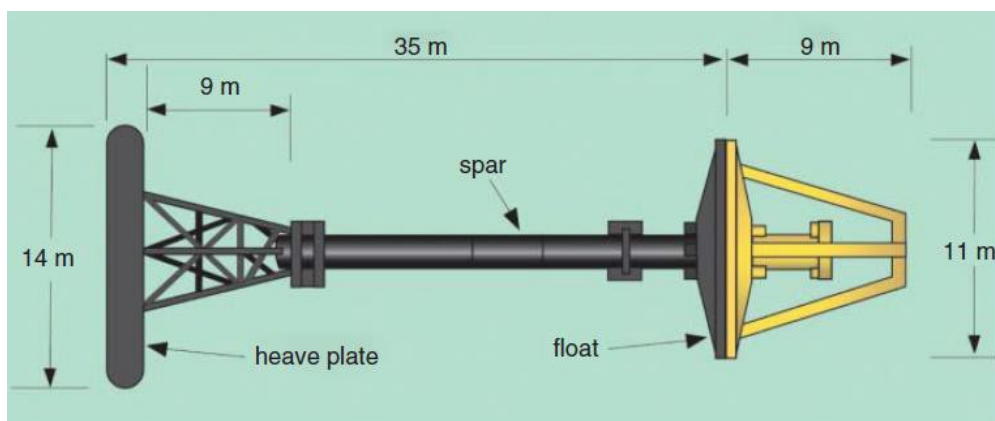
Η συγκεκριμένη διάταξη ανήκει στην κατηγορία των σημειακών απορροφητών. Οι συσκευές αυτές στην πραγματικότητα λειτουργούν ως πλωτές σημαδούρες αγκυροβολημένες στον πυθμένα που κινούνται υπό την επίδραση των κυμάτων. Αποτελούνται από ένα πλωτό μέρος, έναν στύλο και μια πλάκα. Το πλωτό μέρος ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την ισχύ των κυμάτων. Η σχετική κίνηση ανάμεσα στην πλωτή σημαδούρα και το στύλο ο οποίος παραμένει σταθερός λόγω των δυνάμεων που του ασκεί η ανυψωτική πλάκα, οδηγεί ένα μηχανικό σύστημα που είναι εγκατεστημένο στο στύλο. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια που του προσδίδεται από την προσβολή των κυμάτων και τη μετατρέπει σε μηχανική εκ περιστροφής αρχικά. Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή σε ηλεκτρική μέσω οδήγησης μιας ηλεκτρογεννήτριας.

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

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



Εικόνα 71: Διάταξη PowerBuoy σε λειτουργία - διάγραμμα. [05<sup>Α</sup>]



Εικόνα 72: Διαστασιολόγηση συσκευής PB150.

## 6.7 Σύστημα AquaBuoy (ΗΠΑ).

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



Εικόνα 73: Μοντέλο AquaBuoy με ενσωματωμένες ΑΠΕ.

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

Η όλη διάταξη αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη που είναι η πλωτή σημαδούρα, ο σωλήνας επιτάχυνσης, το έμβολο και η αντλία. Ο σωλήνας επιτάχυνσης είναι ένας κάθετος κύλινδρος, στερεωμένος κάτω από το σώμα της σημαδούρας, είναι ανοικτός και στα δύο άκρα του ώστε να επιτρέπει την ανεμπόδιστη είσοδο και έξοδο του νερού της θάλασσας προς κάθε φορά. Το έμβολο είναι τοποθετημένο στο μέσο του σωλήνα επιτάχυνσης και πρόκειται για έναν πλατύ δίσκο ουδέτερης πλευστότητας. Όταν η σημαδούρα είναι σε στάση, το πιστόνι συγκρατείται στο μέσο λόγω της εξισορροπημένης έντασης δύο αντλιών που είναι τοποθετημένες στις αντίθετες πλευρές του εμβόλου ( στο πάνω και στο κάτω μέρος του ) και εκτείνονται μέχρι το πάνω και το κάτω μέρος του σωλήνα επιτάχυνσης αντίστοιχα.



Εικόνα 74: Η λειτουργία του AquaBuoy και η προετοιμασία καθελκυσμού.

Το νερό της θάλασσας υπό πίεση αποβάλλεται συνεχώς σε έναν αποταμιευτή υψηλής πίεσης και στη συνέχεια τροφοδοτείται σε ένα στρόβιλο Pelton που οδηγεί μια γεννήτρια. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός μεταφέρεται στην ακτή με τη βοήθεια ενός τυπικού υποθαλάσσιου καλωδίου. Αυτά τα τρία βασικά τμήματα, δηλαδή ο σωλήνας επιτάχυνσης, το πιστόνι και οι 2 αντλίες, αποτελούν το σύστημα PTO (PowerTake-Off) του AquaBuOY.



## 6. Κυματική Ενέργεια στην Ελλάδα.

Στην Ελλάδα η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας και συνακόλουθα η ανάπτυξη κυματικής τεχνολογίας αναφορικά με διατάξεις μετατροπένων που δυνητικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την απορρόφηση ενέργειας βρίσκεται σε θέση πολύ χαμηλού ενδιαφέροντος. Αυτό συμβαίνει παρά το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που παρουσιάζει η κυματική ενέργεια και η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών. Ειδικότερα, στην επιφάνεια της θάλασσας η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την αιολική ενέργεια που εμφανίζεται σε ύψος 20 μέτρων και 20-30 φορές μεγαλύτερη από την ηλιακή ενέργεια στην ίδια περιοχή. Αυτό το πολύ θετικό στοιχείο οφείλεται στο μέσο μεταφοράς που είναι το νερό με πυκνότητα που είναι 800 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αέρα.

Οι παγκόσμιοι πόροι κυματικής ενέργειας εκφρασμένοι ως ισοδύναμο ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται σε 2TW και είναι τάξης μεγέθους της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Με μια αξιοποίηση μόνο του 10-25% της κυματικής ισχύος κατά μετριοπαθείς εκτιμήσεις, θα μπορούσε στο μέλλον η κυματική ενέργεια με τη βοήθεια και κατάλληλων πολιτικών να συμβάλλει σημαντικά ενεργειακό μίγμα εκμετάλλευσης των ΑΠΕ.

Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν στραφεί ήδη από πολύ νωρίς στη δεκαετία του 2000 αρκετές χώρες με ερευνητικά προγράμματα που υλοποιήθηκαν και πιλοτικές διατάξεις – εγκαταστάσεις που κατασκευάστηκαν ακόμα και σε εμπορική κλίμακα. Αντίθετα στην Ελλάδα στις μέρες μας πιστεύεται ότι το υδρογόνο ως μορφή ΑΠΕ θα συμβάλλει στο ενεργειακό μίγμα στην πορεία για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων και την λεγόμενη απολιγνιτοποίηση της χώρας. Ως προς την εκμετάλλευση της κυματικής πέρα από μια αξιόλογη υπολογιστική μελέτη ενός μοντέλου που θα μπορούσε να λειτουργήσει σε ελληνικές θάλασσες, εφαρμοσμένες προσπάθειες δεν έχουν επιτευχθεί ακόμα (Κούρτζης 2013).

Παρόλα αυτά στη βιβλιογραφία αναγνωρίζεται σημαντική συνεισφορά από ερευνητικές ομάδες και ινστιτούτα (Ισπανία, Πορτογαλία, Δανία, Ρουμανία) που έχουν προχωρήσει πολύ στον άξονα της εκμετάλλευσης της κυματικής. Μάλιστα πέρα από διατάξεις που μπορούν να τεθούν σε θέσεις απόμακρες από τις ακτές (offshore) όπως η Βόρεια Θάλασσα (Δανία, Σκωτία), ή ο Ατλαντικός (Ισπανία, Πορτογαλία) τα τελευταία χρόνια γίνεται λόγος και για εκμετάλλευση σε περικόλειστες θάλασσες όπως η Μαύρη θάλασσα (Ρουμανία) και η Μεσόγειος.

Προφανώς η ωκεάνια ενέργεια διαθέτει πολύ μεγαλύτερη ισχύ στα ανοικτά του Ατλαντικού ή στη Βόρεια Θάλασσα όπου μεγάλες εγκαταστάσεις έχουν ήδη υλοποιηθεί. Από την άλλη πλευρά αξίζει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία υπάρχουν και εργασίες που αναφέρονται σε περικόλειστες θάλασσες (Μεσόγειος). Σε αυτή την περίπτωση γίνεται προσπάθεια αναγνώρισης περιοχών hotspots δηλ. περιοχών που εμφανίζουν μεγάλη συγκέντρωση κυματικής ισχύος η αξιοποίηση της οποίας θα ήταν συμφέρουσα.

Προχωρώντας και ένα βήμα παρακάτω θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί την αξιοποίηση της κυματικής στο Αιγαίο και στο Ιόνιο πέλαγος ακόμα και αν το κυματικό δυναμικό είναι χαμηλό. Αυτό γιατί η Ελλάδα διαθέτει μήκος ακτογραμμής ~16,000χλμ κάτι που δίνει μεγάλες δυνατότητες εκμετάλλευσης με παράκτιες και επάκτιες διατάξεις κατακράτησης – απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Επίσης το μεγάλο αυτό μήκος ακτογραμμής συνδέεται με το μεγάλο πλήθος νησιωτικών συμπλεγμάτων



του ελλαδικού χώρου τα οποία θα μπορούσαν να ενισχύσουν την ενεργειακή κατανάλωση με εκμετάλλευση της κυματικής. Με τον τρόπο αυτό περιοχές του Ελλαδικού χώρου όπως απομονωμένα νησιά, θα μπορούν να φθάσουν σε ενεργειακή αυτάρκεια, απαλλαγμένα από την εξάρτηση του κεντρικού δικτύου και των προβλημάτων διασύνδεσης με αυτό. Επομένως η επάκτια δέσμευση κυματικής ενέργειας σε υπάρχουσες κατασκευές καταρχήν (π.χ λιμενοβραχίονες) με διατάξεις σηματοδούρας (buoy) δηλ. απορροφητές θα μπορούσε να είναι συμφέρουσα.

Γενικότερα έργα μορφής φάρμας παράκτια ή επάκτια αναμένονται με μικρό κόστος, ενώ τα αναμενόμενα αποτελέσματα από την υλοποίηση θα είναι:

- η δέσμευση κυματικής ενέργειας σε περιοχές ακτογραμμής της ενδοχώρας καθώς σε νησιωτικά συμπλέγματα,
- η προσθήκη ενός νέου ποσοστού συμμετοχής στο ενεργειακό μείγμα των ΑΠΕ στην χώρα που δεν έχει προδιαγραφεί ακόμα σήμερα κάτι που αποτελεί και διαρκή στόχο της ΕΕ όπως σημειώνεται και στις προτάσεις της Επιτροπής.
- ανταπόκριση στην αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αφού εκτιμάται ότι στο άμεσο μέλλον η κατανάλωση θα αυξηθεί για την επαναφορά της οικονομίας και την πορεία προς την ανάπτυξη.
- διαφοροποίηση μείγματος των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ αφού τα τελευταία χρόνια η πιο διαδεδομένη επένδυση, σχετίζεται κυρίως με φωτοβολταϊκή και αιολική τεχνολογία,
- αύξηση της ανταγωνιστικότητας της Ελληνικής οικονομίας με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας για την εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση συστοιχιών επάκτιων διατάξεων (φάρμες), αφού θα δοθεί η δυνατότητα απασχόλησης εξειδικευμένου προσωπικού υψηλής στάθμης στον τόπο καταγωγής,
- απρόσκοπτη προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε Ελληνικά νησιά - νησιωτικά συμπλέγματα από αυτόνομα δίκτυα με μειωμένο κόστος,
- μείωση εισαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας ή και εξαγωγών με την προσθήκη επιπλέον ποσών ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση της κυματικής.

Στην Ελλάδα μοναδική προσπάθεια εκμετάλλευσης της κυματικής γίνεται στην Κρήτη και πιο συγκεκριμένα στο λιμάνι του Ηρακλείου από τον ίδιο το φορέα (Λιμένα Ηρακλείου) σε συνεργασία με τη γερμανική εταιρία.

Η εταιρία ανέπτυξε ένα αρθρωτό σύστημα το οποίο επιπλέει εξ ολοκλήρου πάνω από τη γραμμή του νερού, αποφεύγοντας τη διάβρωση και τακτική συντήρηση η οποία είναι πολύ πιο δύσκολο να χειριστεί υποβρύχια. Η κατακόρυφη κίνηση από τα κύματα μπορεί να ανασηκώνει μια ράβδο που περνά μέσα από μια μονάδα γεννήτριας. Ουσιαστικά η βασική αρχή είναι ότι μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι αρχικά η κινητική ενέργεια της ράβδου (κατακόρυφη κίνηση) λόγω της μετάδοσης κίνησης από τα κύματα μετατρέπεται σε ηλεκτρική σε μια γεννήτρια και στη συνέχεια αυτή μπορεί να μεταφέρεται στο δίκτυο. Μάλιστα αξίζει να σημειωθεί ότι η εταιρία λαμβάνει κρατική επιχορήγηση (Γερμανία) συμμετέχοντας σε ερευνητικό πρόγραμμα που έχει εγκριθεί από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση ύψους 1εκ. ευρώ για τη διερεύνηση αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα.



Ο δομοστοιχειωτός μετατροπέας κυμάτων ενέργειας αποτελεί μια οικονομική αποδοτική λύση ενώ μεταφέρεται και συντηρείται εύκολα. Ανάλογα με την ισχύ κύματος στην τοποθεσία και τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πελάτη, ο αριθμός και το μέγεθος των μονάδων του μετατροπέα κυμάτων ενέργειας ρυθμίζονται ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπέας ενέργειας κυμάτων μπορεί πάντα να παρέχει τη βέλτιστη παροχή ενέργειας με το χαμηλότερο κόστος. Κάθε γεννήτρια εξοικονομεί περίπου 780 τόνους CO<sub>2</sub> κάθε χρόνο.

Τον Δεκέμβριο του 2015, στο λιμάνι του Ηρακλείου εγκαταστάθηκε ένα μόνο δομοστοιχείο μετατροπέα κυμάτων ενέργειας πιλοτικά, για τον έλεγχο της λειτουργικότητας και την αντίσταση στη διάβρωση των εξαρτημάτων. Οι μακροχρόνιες δοκιμές συνεχίστηκαν από την άνοιξη του 2016 για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της συστοιχίας μετατροπέων ενέργειας κυμαίνόμενου κύματος.

Στην τυποποιημένη έκδοση, το πλωτό σώμα μιας μεμονωμένης μονάδας έχει διάμετρο 2 μέτρων, ολόκληρη η μονάδα έχει ύψος 10 μέτρα. Οι ενότητες συνδέονται σε μια σειρά μεταβλητού μεγέθους, ανάλογα με τα μήκη κύματος στην τοποθεσία.

Η δεύτερη γενιά δομοστοιχείων ενέργειας κύματος λειτούργησε ομαλά και παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύστημα offgrid. Με την επιτυχή υλοποίηση στοιχείων δεύτερης γενιάς, προσφέρεται μια μακροπρόθεσμη λύση για την προμήθεια συστημάτων mini-grid ή off-grid.

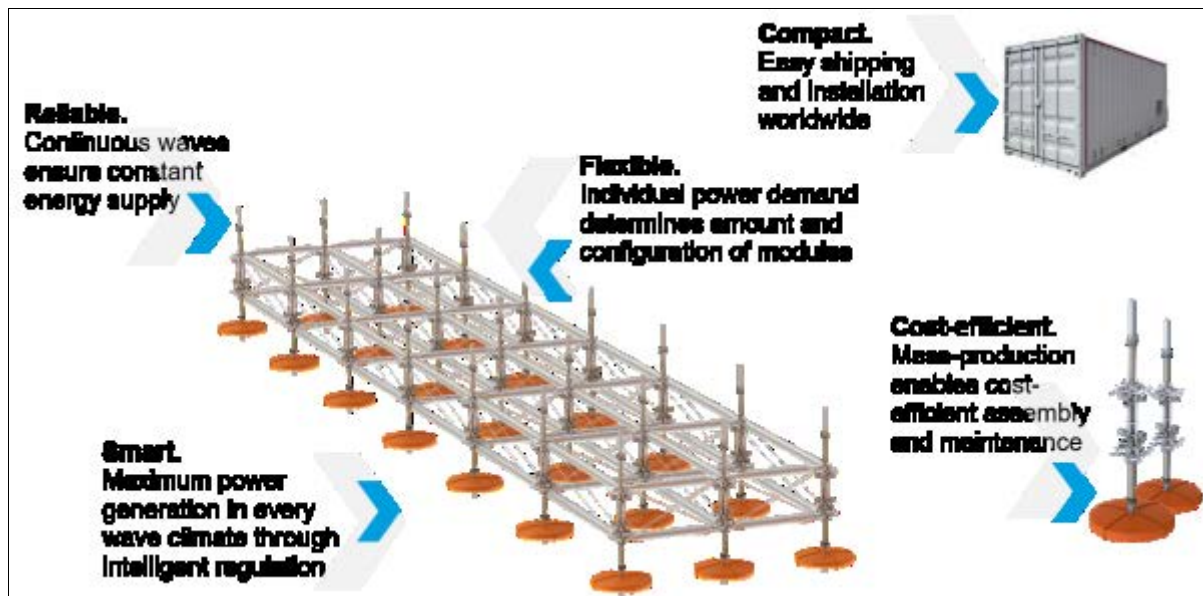
## 6.2 Χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα του μετατροπέα.

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

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

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





Εικόνα 75: Συστοιχία μετατροπέων για υψηλότερου βαθμού εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.

Η διάταξη χαρακτηρίζεται ως σημειακός απορροφητής με τα βασικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα WEC να είναι η ονομαστική ισχύς 36kW, τάση λειτουργίας 800V, καλυπτόμενη επιφάνεια 10m<sup>2</sup>, Το μήκος της ράβδου είναι 10m, με δυνατότητα κίνησης 3.5m.

### 6.3 Λιμένας Ηρακλείου – Τοποθέτηση μετατροπέα.

Στις 5 Ιουλίου 2018, τέθηκε σε δοκιμαστική λειτουργία στο λιμάνι του Ηρακλείου της Κρήτης μια μονάδα WEC. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας μονάδας είναι ότι μπορεί να παράγει ελεγχόμενη και σταθερή ενέργεια από τα κύματα. Σε επόμενο στάδιο σχεδιάστηκε η εγκατάσταση τριών επιπλέον δομοστοιχείων στο τοίχιο του κυματοθραύστη στο λιμάνι του Ηρακλείου. Αυτό εξυπηρετεί το στόχο της συλλογής δεδομένων σχετικά με τη λειτουργικότητα και την ηλεκτρική απόδοση των μονάδων υπό διαφορετικές συνθήκες κύματος.

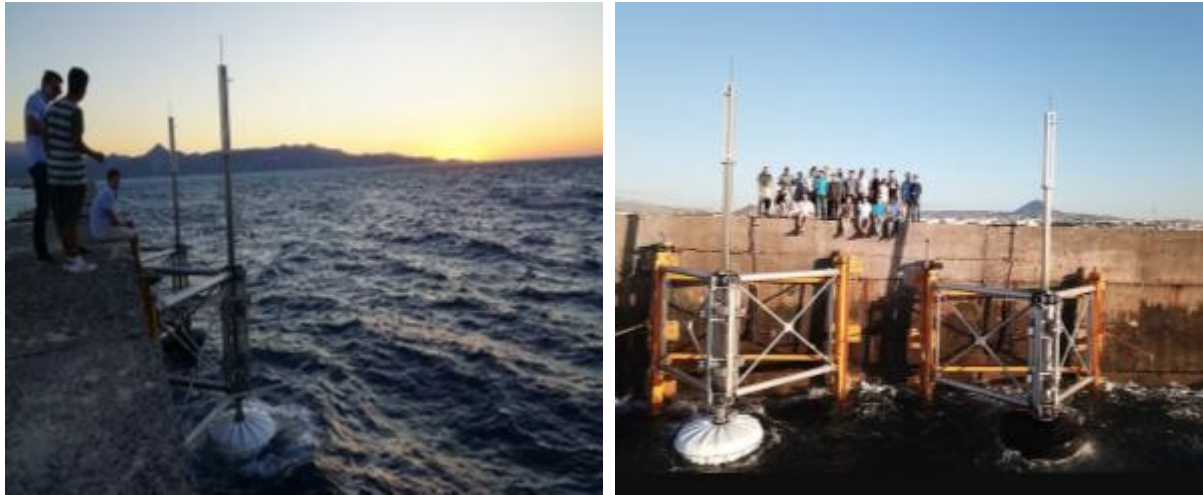
Το σχέδιο για μια δέσμη ενεργειών κυμαινόμενων κυμάτων, που θα κατασκευαστεί μεταξύ 2019 και 2020, βρίσκεται ήδη στο στάδιο της προετοιμασίας. Αυτές οι πλωτές συστοιχίες (φάρμα) θα προετοιμάσουν το έδαφος για την εφαρμογή της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σε ένα μεγαλύτερο βαθμό σε εγκαταστάσεις ακτογραμμής με τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Μελλοντικά σχεδιάστηκε η δοκιμή σε πραγματική κλίμακα της ηλεκτρικής διασύνδεσης αρκετών γεννητριών σε δομοστοιχεία παραγωγής ενέργειας. Για να γίνει αυτό, η μετάφραση δηλ. της ακανόνιστης ταλαντευόμενης κίνησης των κυμάτων σε ηλεκτρικό ρεύμα που συμμορφώνεται με το δίκτυο, σχεδιάστηκε η δοκιμή αρχικά ενός μικρού δικτύου των πέντε σταθερών εγκατεστημένων μονάδων δοκιμής.

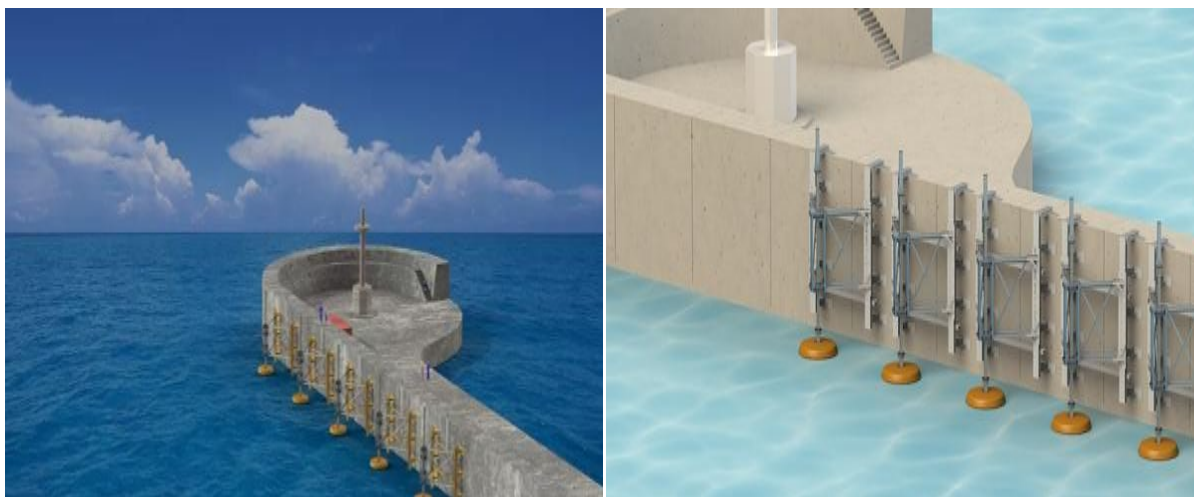
Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της δοκιμής στις ενότητες τοποθέτησης σε τοίχο κύματος, η εταιρία σε συνεργασία με τους τοπικούς φορείς (Λιμένα Ηρακλείου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεσογειακό Παν/μιο Κρήτης) σχεδίασε να δοκιμάσει μια πλωτή



εκδοχή της τεχνολογίας του μετατροπέα κυμάτων ενέργειας δηλ. μια μορφή φάρμας. Ο προγραμματισμένος μετατροπέας ενέργειας κυμαίνόμενου κύματος θα αποτελείται από 18 μονάδες.



Εικόνα 76: Η διαδικασία της τοποθέτησης δομοστοιχείων μετατροπής κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 77: Εικονογράφηση της εγκατάστασης πέντε δομοστοιχείων στον κυματοθραύστη του λιμένα Ηρακλείου.

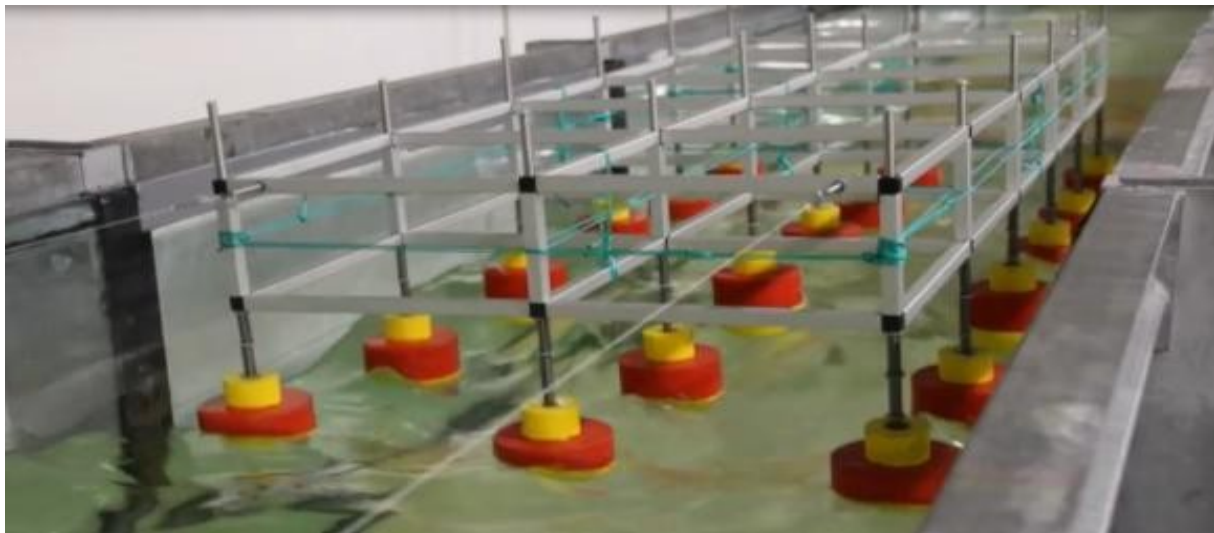
Οι δοκιμές με το πρωτοποριακό πρωτότυπο του μετατροπέα ενέργειας κύματος στον λιμενοβραχίονα του λιμανιού του Ηρακλείου έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε δοκιμές ανοιχτής θάλασσας με μεγάλη επιτυχία. Έτσι η δημιουργία νέων στοιχείων σχετικά με αυξημένη απόδοση οδηγεί την τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα μετατροπής κυματικής ενέργειας και εφαρμογής και στην ακτογραμμή.

Στην Εικ.78 φαίνεται μια μορφή φάρμας όπου φαίνεται η ταλάντωση που εκτελούν ομάδες της συστοιχίας μετατροπέων καθώς και το μήκος κύματος που εκμεταλλεύονται. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα το ταίριασμα της συχνότητας του κύματος στην κατεύθυνση διάδοσής του με τη συχνότητα της κατακόρυφης κίνησης των δομοστοιχείων οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

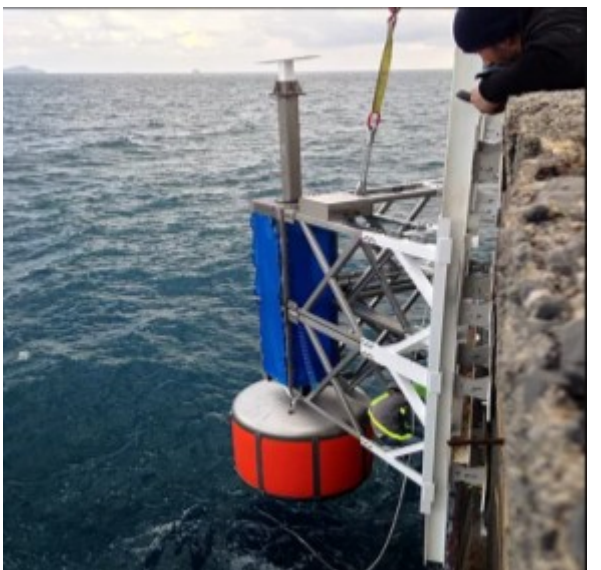
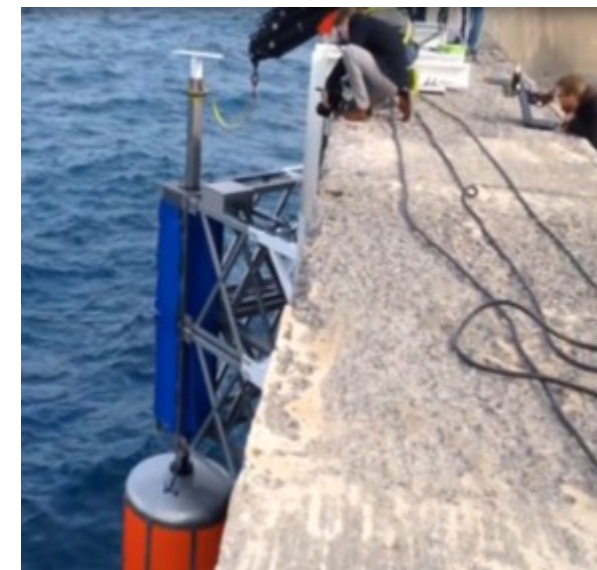
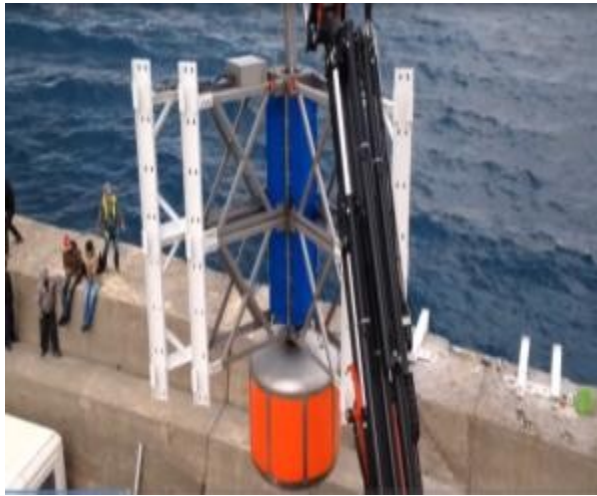


*Εικόνα 78: Φάρμα - Συστοιχίες μετατροπών (WEC's).*

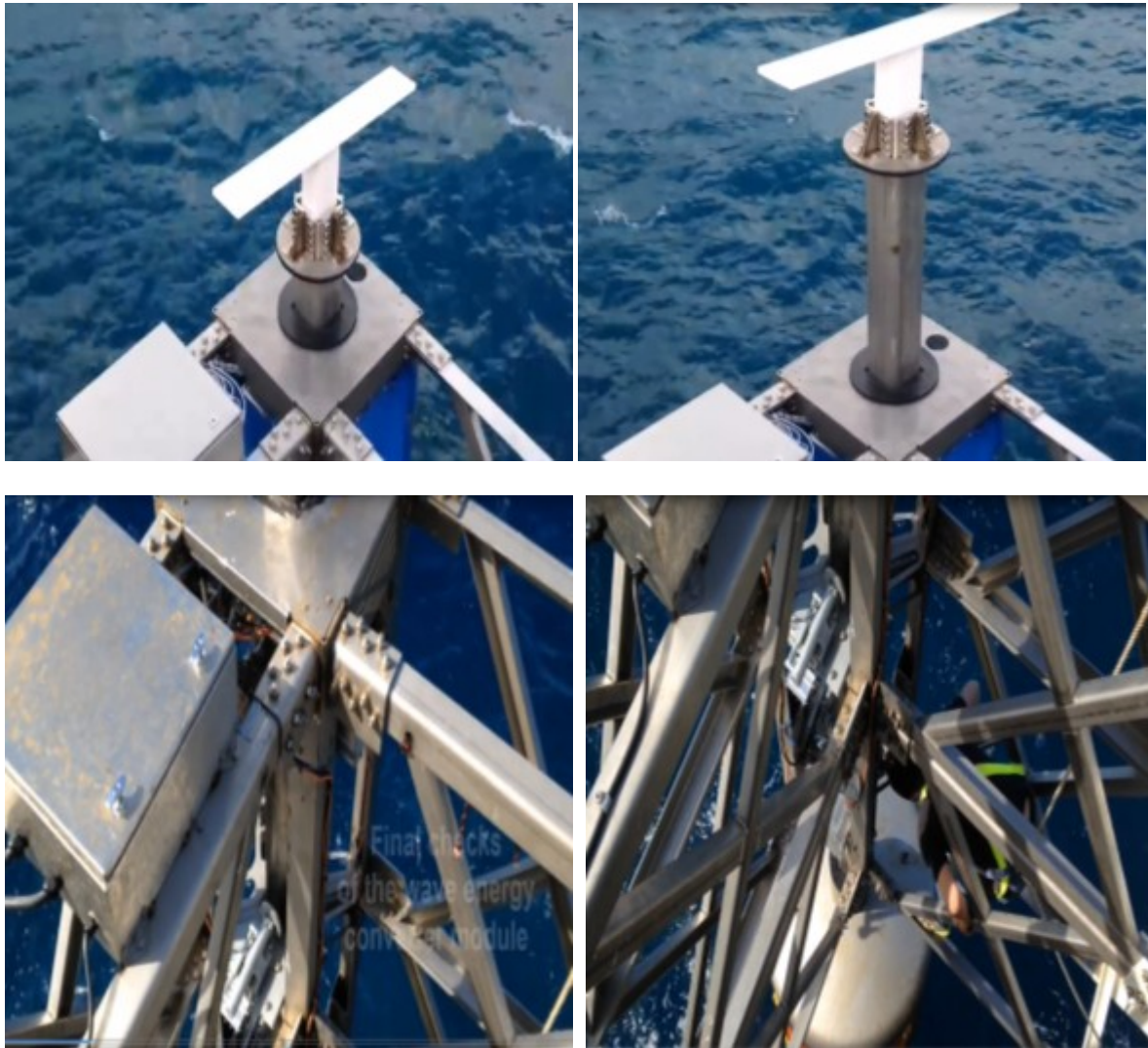
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί η πολύ σημαντική συνεισφορά στην έρευνα καταρχήν που προηγείται της κατασκευής και δοκιμής σε πραγματική κλίμακα. Έτσι για παράδειγμα δοκιμές των διατάξεων αρχικά έγιναν στο Πολυτεχνείο της Φλωρεντίας σε εργαστήριο Υδραυλικής στο οποίο η φάρμα τοποθετήθηκε σε κανάλι και με εφαρμογή θεωρίας ομοιότητας πραγματικοί κυματισμοί προσομοιώθηκαν ώστε να δοκιμαστεί η αντοχή και η όλη συμπεριφορά της συστοιχίας δομοστοιχείων.



*Εικόνα 79: Δοκιμές σε κλίμακα Εργαστηρίου στη Φλωρεντία.*



Εικόνα 80: Εγκατάσταση πρότυπης μονάδας WEC στο λιμάνι του Ηρακλείου.

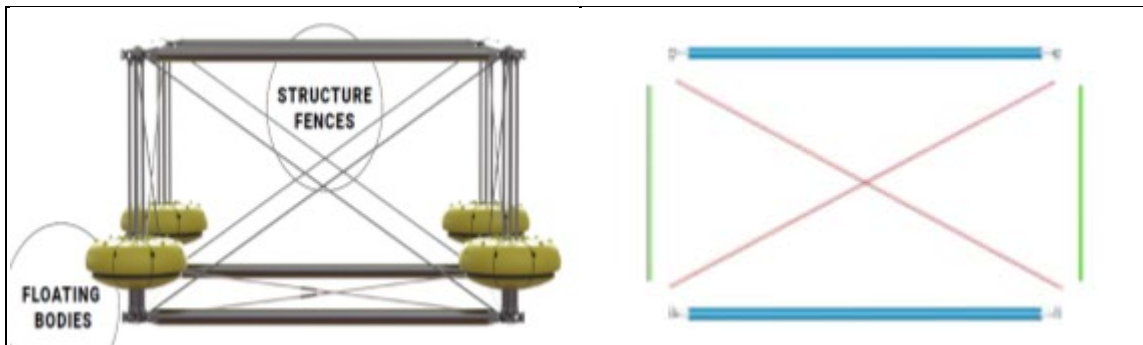


Εικόνα 81: Το δομοστοιχείο εγκατεστημένο - Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (on board).

#### 6.4 Κατασκευαστικά Στοιχεία Φάρμας.

Στη συνέχεια δίνονται κάποια χαρακτηριστικά κατασκευαστικά στοιχεία μιας φάρμας εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας και σε μια προσπάθεια παράλληλης εκμετάλλευσης αιολικής και ηλιακής ενέργειας δίνεται ένας εφαρμόσιμος τρόπος προς αυτή την κατεύθυνση.

Η σύνδεση των WECs γίνεται πάνω σε μια ελαφριά κατασκευή αλουμινίου σχήματος ορθογωνίου. Απαρτίζεται από 2 μεταλλικές δοκούς αλουμινίου θαλάσσης (marine aluminum) διαμέτρων στο εύρος (360 – 500)mm και μήκους (6 – 12)m. Το βάρος των δύο δοκών κυμαίνεται στο εύρος (300 – 370) kg. Οι μικρότερες πλευρές αποτελούνται από 2 ράβδους ίδιου υλικού διαμέτρου 250mm μήκους 6m και βάρους 78kg. Για την καλύτερη στήριξη υπάρχει διαγώνια σύνδεση με 2 ακόμα ράβδους αλουμινίου μήκους (8 – 13)m και βάρους (60 – 100)kg.

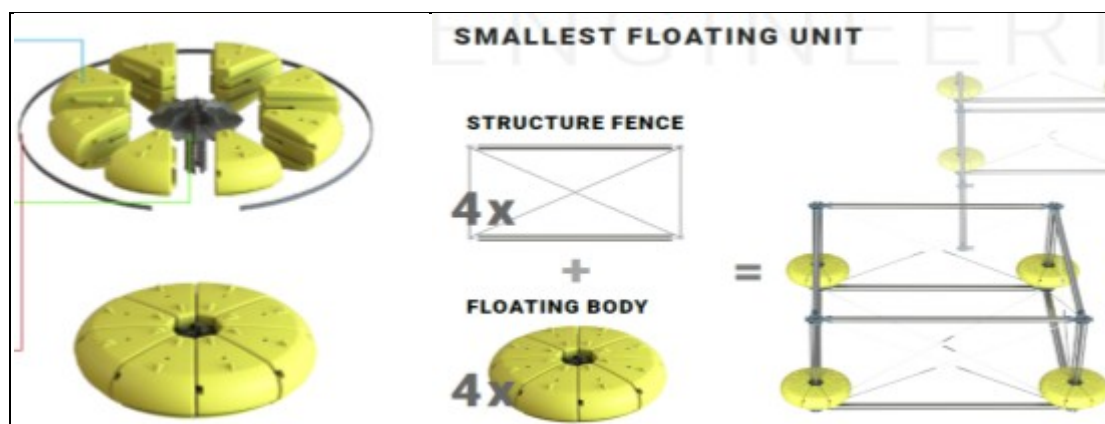


Εικόνα 82: Σκαρίφημα εγκατάστασης στήριξης των WECs.

Στην εικόνα φαίνονται και οι 4 μονάδες απορροφητών (WECs) που τίθενται στις γωνίες του ορθογωνίου και θα είναι σε επαφή με το νερό.

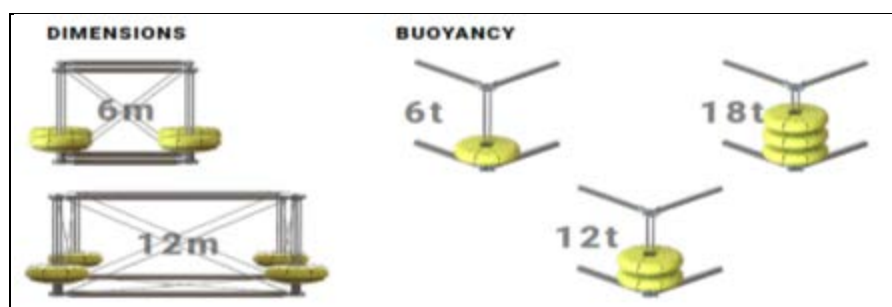
Αναφορικά με την κατασκευή των πλωτών σωμάτων καθένα από αυτά αποτελείται από 8 κομμάτια πολυαιθυλενίου βυθιζόμενου όγκου  $0.75\text{m}^3$ , ύψους  $1.5\text{m}$ . Το βάρος όλου του πλωτού σώματος είναι  $60\text{kg}$  με διαμέτρου  $3.2\text{m}$ . Τα 8 κομμάτια συνδέονται σε μορφή δίσκου με 4 συνδέσμους αλουμινίου διαμέτρου  $1.6\text{m}$  και βάρους  $200\text{kg}$ . Ο σχηματιζόμενος δίσκος των 8 κομματιών συγκρατείται με ένα μεταλλικό έλασμα μήκους  $11\text{m}$  και βάρους  $5\text{kg}$ .

Η περιγραφόμενη κατασκευή συνιστά τη μικρότερη δυνατή φάρμα - πλωτή μονάδα 4 WECs όπως φαίνεται στην Εικ.83.

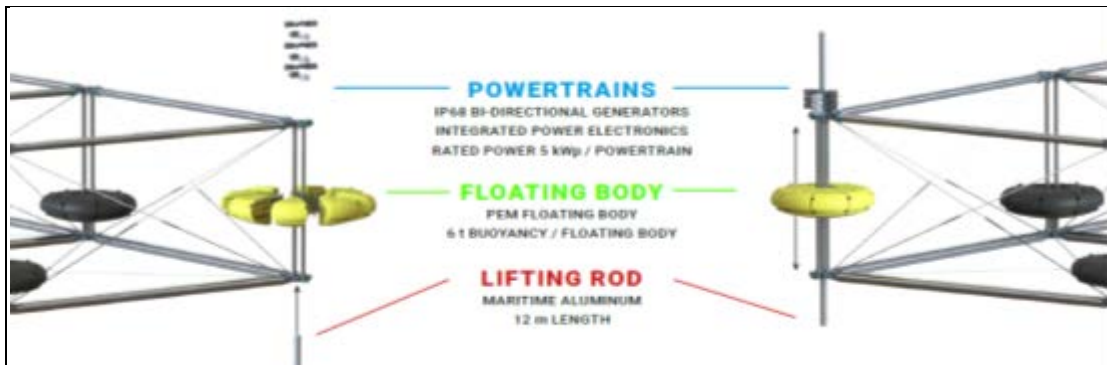


Εικόνα 83: Κατασκευή πλωτής φάρμας 4 στοιχείων (WECs).

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα περισσότερων πλωτών σωμάτων πάνω στην ίδια κατακόρυφη δοκό καθένα από τα οποία συνοδεύεται από τη δική του γεννήτρια.

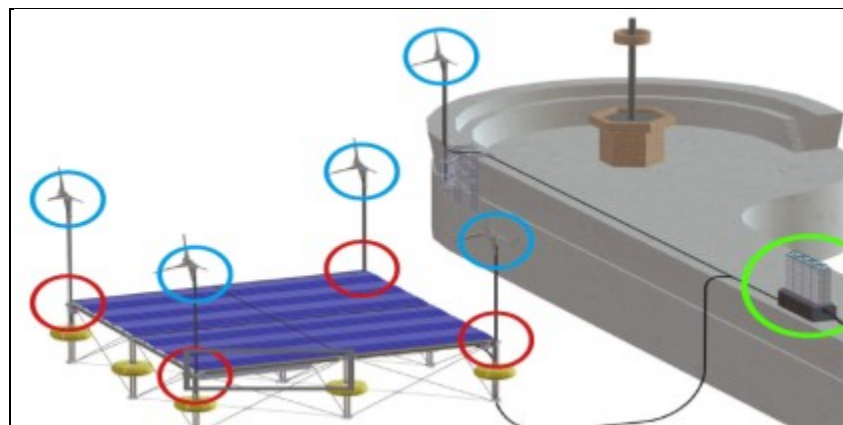


Εικόνα 84: Δυνατότητα συστοιχίας πλωτών σωμάτων.



Εικόνα 85: Θέση γεννήτριας μετατροπέα ή συστοιχίας πολλών πλωτών τμημάτων.

Στην περίπτωση που γίνεται συνεκμετάλλευση τόσο κυματικής όσο και αιολικής και ηλιακής ενέργειας τότε η διάταξη μπορεί να συμπληρωθεί με μικρές ανεμογεννήτριες όσο και με ηλιακά πάνελ ώστε να διατίθεται προς εκμετάλλευση μεγαλύτερη ισχύς άρα και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Μια τέτοια διάταξη έχει ήδη ποντιστεί στο λιμάνι του Ηρακλείου που συμπληρώνεται και από μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με δυνατότητα 20 kWh.



Εικόνα 86: Δυνατότητα υβριδικής φάρμας συνεκμετάλλευσης κυματικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 87: Εφαρμογή υβριδικής φάρμας συνεκμετάλλευσης κυματικής ηλιακής ενέργειας στο λιμάνι του Ηρακλείου.



## 7. Συμπεράσματα - Ανασκόπηση.

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

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

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

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

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

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του παγκόσμιου συμβουλίου ενέργειας περίπου 2TW δηλ. διπλάσια ποσότητα ισχύος της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να παράγεται από τους ωκεανούς και μόνο, με εκμετάλλευση της κυματικής. Κατά τις ίδιες εκτιμήσεις υπολογίζεται ότι 1εκ. GWh αποτελεί το ισοδύναμο των κυμάτων που πλήττουν τις ακτές της Αυστραλίας σε ετήσια βάση. Ακόμα το 25% της σημερινής κατανάλωσης της Μ. Βρετανίας θα





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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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



## Βιβλιογραφία

1. Iglesias, G., Carballo, R., (2011), Choosing the site for the first wave farm in a region: A case study in the Galician Southwest (Spain), *Energy* 36,
2. Zanolop, A.,T., Onea, F., Rusu E., (2014), Coastal impact assessment of a generic wave farm operating in the Romanian nearshore, *Energy* 72,
3. Rusu, E., Onea, F., (2016) Study on the influence of the distance to shore for a wave energy farm operating in the central part of the Portuguese nearshore, *Energy Conversion Management* 114,
4. Carballo R, Sanchez M, Ramos V, Fraguera JA, Iglesias G. Intra-annual wave resource characterization for energy exploitation: a new decision-aid tool. *Energy Convers Manage* 2015;93:1–8.
5. Rusu E, Guedes Soares C. Wave modelling at the entrance of ports. *Ocean Eng* 2011;38(17–18):2089–109.
6. El-Hamid MA, Zaki M. Dynamics of water waves interaction with wind-driven currents. *Energy Convers Manage* 1994;35(8):713–20.
7. Abanades J, Greaves D, Iglesias G. Coastal defense using wave farms: the role of farm-to-coast distance. *Renew Energy* 2015;75:572–82.
8. Silva R, Jorge da Silva A, Rusu E, Oliveira F, Larangeiro S, Taborda R. Evaluation of the longshore current for a sector of the Portuguese west coast: application of different methodologies. Presented at the 29th international conference on coastal engineering – ICCE2004, Lisbon, 19–24 September, 2004, vol. II. Published in *Coastal Engineering World Scientific Pub Co Inc Published*; 2005. p. 1455–67.
9. Gomes F, Pacheco BM, da Silva J, Silva R, Rusu E. Using GIS in the evaluation of wave induced currents in the Portuguese nearshore. Poster to 1st European geosciences union general assembly, Nice, France; 2004
10. Αθανασούλης Γ., και Σκασουρλής Ε. (1992). *Ατλας Ανέμου και Κύματος Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
11. Κούρτζης Θ. Χρήστος (2013), «Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη – εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα.» Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών
12. Μανάλης Αντώνιος Ευάγγελος (2012), «Κυματική και Ωκεάνια Ενέργεια – Σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές» Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας
13. Μαρτίν – Φερνάντεζ Στεφανία, (2014), «Η εφαρμογή της κυματικής ενέργειας στην παραγωγή της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας» Πτυχιακή Εργασία ΤΕΙ Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων,
14. Ντάβαλης Γεώργιος (2016) «Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό» Διπλωματική Εργασία Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας.
15. Σουκισιάν, Τ., Χατζηνάκη, Μ., Κορρές, Γ., Παπαδόπουλος, Α., Κάλλος, Γ., και



- Αναδρανιστάκης Ε. (2007). *Άτλας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών*. Ελ. Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, 300 σελ
16. Phillips, O.M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*. 2(5): 417–445.
  17. Miles, J.W. (1960). On the Generation of Surface Waves by Turbulent Shear Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 7, Pt. 3, pp. 469-478.
  18. Dean, R.G., Dalrymple, R.A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. ISBN 0-511-03791-0 eBook, Cambridge University Press.
  19. Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and Coastal waters*. Cambridge University Press, ISBN-13 978-0-511-27021-5 (eBook).
  20. Kamphuis, J.W. (2000). *Introduction to Coastal Engineering and Management*, Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 16, World Scientific Publishing Co.
  21. Kana, T.W., White, T.E. and McKee, P.A. (2004). Management and engineering guidelines from groin rehabilitation. *Journal of Coastal Research*, SI 33, p. 57-82
  22. Phillips, O.M. (1966, 1977). *Dynamics of the upper ocean*. Cambridge: Cambridge University Press.
  23. Reeve, D., Chadwick, A. and Fleming, Ch. (2004). *Coastal Engineering, Processes, theory and design practice*. Spon Press, ISBN 0-203-64735-1 Master e-book ISBN.
  24. U.S. Army Corps of Engineers, (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
  25. US Army Corps of Engineers, (1992). *Coastal groins and nearshore breakwaters*. *Engineering Manual*. Report EM 1110-2-1617

## Ιστοσελίδες σχετικές.

[I1] [https://aquaret.com/index8abe.html?option=com\\_content&view=article&id=135&Itemid=278&lang=en](https://aquaret.com/index8abe.html?option=com_content&view=article&id=135&Itemid=278&lang=en)

[I2] [https://aquaret.com/index525f.html?option=com\\_content&view=article&id=136&Itemid=279&lang=en](https://aquaret.com/index525f.html?option=com_content&view=article&id=136&Itemid=279&lang=en)



- Wave Dragon, [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)
- Waveroller, [www.aw-energy.com](http://www.aw-energy.com)
- WaveStar, [www.wavestarenergy.com](http://www.wavestarenergy.com)
- PELAMIS, [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)
- Oyster, [www.aquamarinepower.com](http://www.aquamarinepower.com)
- OPT Powerbuoy, [www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com)
- Limpet, [www.wavegen.co.uk](http://www.wavegen.co.uk)
- CETO, [www.carnegiewave.com](http://www.carnegiewave.com)
- AWS converter, [www.awsocan.com](http://www.awsocan.com)
- OWEC, [www.owec.com](http://www.owec.com)
- DEXA, <http://www.dexawave.com/index.php?page=1>
- Leancon, <http://www.leancon.com>
- Poseidon's Organ, <http://www.poseidonorgan.com/>
- AquaBuoy, <http://peswiki.com/index.php/Directory:AquaBuOY>
- Finavera, <http://www.finavera.com/en/home>
- <http://www.sde.co.il/energy.html>
- <http://www.cwavepower.com/index.html>



- Wave-Roller, <http://www.aw-energy.com/index.html>
- BioWAVE, <http://www.biopowersystems.com/index.html>
- Oceanlinx, <http://www.oceanlinx.com/default.asp>
- CES, <http://www.oceanmotion.ws/>
- OWEC, <http://www.owec.com/index.html>
- Sperboy, <http://www.sperboy.com/>
- SyncWave, <http://www.syncwaveenergy.com/index.html>
- SSG, <http://www.waveenergy.no/index.htm>
- Waveberg, <http://waveberg.com/>
- [www.wavesenergy.com](http://www.wavesenergy.com)
- [www.energypress.gr](http://www.energypress.gr)
- [www.ecocrete.gr](http://www.ecocrete.gr)
- [www.allaboutenergy.gr/](http://www.allaboutenergy.gr/)
- [www.alternative-energy-news.info](http://www.alternative-energy-news.info)
- [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)
- [www.dpenergy.com](http://www.dpenergy.com)
- <http://www.thinkglobalgreen.org/WAVEPOWER.html>
- <http://www.cres.gr> Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
- <http://www.offshorecenter.dk/> . Peter Blach, Newsletter ON/OFF 10, Offshore Center Denmark, May 2007,
- OPT PowerBuoy, <http://www.oceanpowertechnologies.com/tech.htm>
- WaveMaster, <http://www.oceanwavemaster.com/about.htm>
- OWEL, <http://www.owel.co.uk/print/background.htm>
- LabBuoy, <http://www.cres.gr/kape/pdf/Labbuoy.pdf>
- AWS Converter, <http://www.waveswing.com/>
- CETO, <http://www.ceto.com.au/home.php>
- SDE, <http://www.sde.co.il/energy.html>
- <https://www.irena.org/publications/2014/Jun/Wave-energy>

Trotman Unit, <http://www.trotmanunitwavepower.com/index.html>

Float Wave Electric Power System, <http://www.atecom.ru/we/>

Oyster, <http://www.aquamarinepower.com/>

Brandl Generator, [http://brandlmotor.de/brandlgenerator\\_eng.htm](http://brandlmotor.de/brandlgenerator_eng.htm)

Floating Wave Generator, <http://www.gedwardcook.com/wavegenerator.html>

FO<sup>3</sup>, [http://www.sintef.no/content/page1\\_\\_\\_\\_3757.aspx](http://www.sintef.no/content/page1____3757.aspx),

<http://www.seewec.org/index.html> McCabe Wave Pump,

[http://www.ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS\\_EIS\\_WhitePaper](http://www.ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS_EIS_WhitePaper)

[www.allaboutenergy.gr/Gaianthrakes.html](http://www.allaboutenergy.gr/Gaianthrakes.html)