

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

---



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνολογίες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας για  
ηλεκτροπαραγωγή



ΑΓΟΡΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΜΑΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νικόλαο Μαμάση, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που με βοήθησε με τις γνώσεις του να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Η επίβλεψη του ήταν συνεχής και πάντοτε σε κλίμα άπταιστης συνεννόησης και συνεργασίας.

Επιπροσθέτως, ευχαριστώ πολύ τον Διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη, ο ρόλος του οποίου ήταν καθοριστικός για την έγκαιρη ολοκλήρωση της εργασίας. Τον ευχαριστώ για την προθυμία του να με βοηθήσει, τις ώρες που διέθεσε από τον χρόνο του και την πλήρη κατανόηση που έδειξε.

Ακόμα, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ρωμανό Ιωαννίδη φοιτητή στα πρώτα έτη των σπουδών μου και υποψήφιο Διδάκτορα πλέον. Ήταν διαθέσιμος όποτε τον χρειαζόμουν με συνεχή υποστήριξη και συμβουλές για οποιοδήποτε θέμα προέκυπτε. Στο ίδιο πλαίσιο δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ και σε όλους εκείνους τους συμφοιτητές μου που όλα αυτά τα χρόνια κατέστησαν την καθημερινότητα μου περισσότερο ευχάριστη όλα αυτά τα χρόνια.

Το τελευταίο αλλά και σπουδαιότερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένειά μου, τους γονείς Θεοχάρη και Ιωάννα καθώς και τα αδέρφια μου Κωνσταντίνο, Φωτεινή και Αλέξανδρο για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε κάθε δύσκολη στιγμή της ζωής μου.

ΑΓΟΡΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	i
Περίληψη .....	iv
Abstract .....	v
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Σκοπός της εργασίας .....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας .....	1
1.3 Θαλάσσια ενέργεια .....	2
1.3.1 Κυματική Ενέργεια .....	5
1.3.2 Παλιρροιακή Ενέργεια .....	10
1.3.3 Θερμοδυναμική Ενέργεια .....	16
1.3.4 Ενέργεια λόγω θαλάσσιων ρευμάτων .....	20
1.3.5 Ωσμωτική ενέργεια .....	22
2. Επισκόπηση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμούς .....	27
2.1 Τοποθεσία .....	27
2.2 Μέγεθος και προσανατολισμός συσκευών .....	28
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	29
2.4 Σημαντικότερες εγκαταστάσεις .....	32
2.4.1 <i>Limpet</i> .....	32
2.4.2 <i>Ocean Energy Buoy (OE Buoy)</i> .....	33
2.4.3 <i>Mk1</i> .....	33
2.4.4 <i>Archimedes Wave Swing (AWS)</i> .....	34
2.4.5 <i>Wave Star</i> .....	35
2.4.6 <i>Pelamis P2</i> .....	36
2.4.7 <i>Searaser</i> .....	37
2.4.8 <i>PowerBuoy PB3</i> .....	37
2.4.9 <i>SSG (Sea-wave Slot-cone Generator)</i> .....	38
2.4.10 <i>Wave Dragon</i> .....	39
2.4.11 <i>Waveplane</i> .....	40
2.4.12 <i>Oyster</i> .....	41
2.4.13 <i>Langlee</i> .....	42
2.5 Κόστος συσκευών απορρόφησης κυματικής ενέργειας .....	49
3. Υπολογιστικά σχήματα εκτίμησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	54
3.1 Χαρακτηριστικά κυμάτων .....	54

3.2 Μοντέλα απορρόφησης κυματικής ενέργειας της εκάστοτε τεχνολογίας.....	55
3.2.1 Τεχνολογία Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού ( <i>Oscillating Water Column</i> ).....	56
3.2.2 Τεχνολογία πλωτών μετατροπέων.....	61
3.2.3 Τεχνολογία μετατροπέων υπερπηδητών από το υγρό στοιχείο.....	62
3.2.4 Τεχνολογία συσκευών κρούσης.....	64
3.3 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυμάτων.....	66
4. Εφαρμογή στο νησί της Αστυπάλαιας.....	70
4.1 Sea-wave Slot-cone Generator (SSG).....	71
4.2 Wave Star.....	72
4.3 Σύγκριση των δύο σεναρίων.....	73
5. Συμπεράσματα.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	82
ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΕ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	102

## Περίληψη

Ο πλανήτης γη, με τα υπάρχοντα στοιχεία, είναι το μόνο μέρος με τις κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης του ανθρώπινου είδους και άλλων έμβιων όντων. Για τον λόγο αυτό πρωταρχικό σκοπό αποτελεί η προστασία του. Μέχρι και σήμερα σε αρκετές δράσεις της ανθρωπότητας ελλοχεύουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι αλλοιώνοντας την ποιότητα της ζωής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της. Το θετικό είναι ότι όταν επήλθε κρίση στο εμπόριο των ορυκτών καυσίμων και κατανοήθηκε ότι τα αποθέματα τους εξαντλούνται οι ερευνητές στράφηκαν στην αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας, ανανεώσιμων και φιλικών για το περιβάλλον. Με το πέρασμα των χρόνων οι πηγές αυτές εξελίσσονται αντικαθιστώντας σε πολλές περιπτώσεις τα ορυκτά καύσιμα και κατά τα φαινόμενα το ‘μέλλον τους ανήκει’.

Οι δημοφιλέστερες μορφές ανανεώσιμων ενεργειών είναι η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενώ λιγότερο γνωστές και εξελιγμένες είναι και η γεωθερμική, η παραγόμενη από την βιομάζα ενέργεια και η θαλάσσια ενέργεια. Οι προβλέψεις για αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων στο μέλλον στρέφει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στην εύρεση νέων πόρων πέρα των τριών πρώτων. Παρατηρώντας μια απεικόνιση του πλανήτη γη, η θάλασσα αποτελεί μια αχανή έκταση που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του και πιθανότατα έναν πόρο με αρκετές δυνατότητες. Οι ιδιότητες της και τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε αυτή διαφοροποιούν 5 μορφές αυτής της ενέργειας συνολικά, την κυματική, την παλιρροιακή, την θερμοδυναμική, την ενέργεια από τα ωκεάνια ρεύματα και αυτήν που στηρίζεται στο φαινόμενο της ώσμωσης.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιοποίηση της αποθηκευμένης στα κύματα ενέργειας. Στο ένα σκέλος της καταγράφονται τα χαρακτηριστικά ορισμένων εγκαταστάσεων αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας, με μία σύντομη αναφορά στο κόστος της κάθε μίας και στο δεύτερο συνδέονται οι φυσικές μεταβλητές των διαταραχών με την παραγόμενη ενέργεια μέσω ορισμένων μοντέλων και κατασκευαστικών καμπυλών.

Η πρώτη αξιοποιημένη απόπειρα απορρόφησης κυματικής ενέργειας υλοποιήθηκε το 2000 στην δυτική ακτή της Σκωτίας. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση ήταν γνωστή με το όνομα Limpet και η εγκατεστημένη ισχύς της έφτανε τα 500 kW. Τα πρωτότυπα τα οποία έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα ξεπερνάνε τα 1000 και μέχρι τον Φεβρουάριο του 2013 σύμφωνα με το ευρωπαϊκό κέντρο θαλάσσιας ενέργειας (European Marine Energy Center) υπολειτουργία τελούν 227 συσκευές σε όλο τον κόσμο (όπως φαίνεται και στο παράρτημα Α στο τέλος).

Αναφορικά με το δεύτερο σκέλος, καταστρώθηκαν εξισώσεις με τις οποίες γίνεται καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία των μονάδων και προσδιορίζονται οι παράμετροι καθορισμού του ποσού της παραγόμενης ενέργειας για τις διάφορες κατηγορίες του κεφαλαίου 3. Στο επόμενο κεφάλαιο, μάλιστα, εφαρμόζονται τα μοντέλα των πλωτών και των υπερπηδητών από το υγρό στοιχείο τεχνολογιών στην περιοχή της Αστυπάλαιας μέσω μετρήσεων που συντέθηκαν για το διάστημα των επόμενων 100 χρόνων (2018-2117).

## **Abstract**

Planet earth as the existing elements prove is the only place with the proper living conditions for the human species and other living beings. For this reason the primary purpose is its protection. Until today many actions of the humanity imply environmental hazards with consequences to the quality of life. A typical example is the consumption of fossil fuels to meet human's energy demands. The positive state is that when the oil crises strike and was understood that these stocks are depleted the researchers tried to find new sources of energy, renewable and environmentally friendly. Over the years these sources have evolved replacing in many cases fossil fuels and apparently they are the future energy.

The most popular forms of renewable energy are wind, solar and hydro energy while geothermal, biomass-generated energy and ocean energy are less known. Forecasts for increasing energy demands in the future are turning the scientific community's interest in finding new resources beyond the three popular. Observing the globe, the sea is a vast area that covers most of planet earth and probably a resource that contains big amounts of energy. Her properties and the phenomena taking place in it categorize 5 forms as a whole, wave energy, tidal energy, thermodynamic energy, energy from the ocean currents and the one based in the phenomenon of osmosis.

This diploma thesis deals with the exploitation of energy stored in waves. In one part, are recorded the characteristics of some wave energy utilization facilities with a short mention to the cost of each one and in the second, wave variables are related to the energy generated by certain models and construction curves.

The first memorable attempt to absorb wave energy was implemented in 2000 on the west coast of Scotland. This particular installation was known as Limpet and its installed capacity was 500 kW. The prototypes that have been built to date are over 1000 and by February 2013 according to European Marine Energy Center (EMEC) 227 devices are operating worldwide (as shown in Appendix).

Concerning the second part, equations have been developed to help the understanding of the units operation and specify the parameters that determine the amount of energy produced for the different categories of chapter 3. In the following chapter models of floating and overtopping technologies are applied in the region of Astypalaia through measurements compiled for the next hundred years (2018-2117)

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Οι προσπάθειες αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της αιολικής της υδροηλεκτρικής και άλλων συχνά κατακρίνονται από την κοινή γνώμη. Ανεμογεννήτριες, φράγματα και άλλες διατάξεις αλλοιώνουν εν μέρει το φυσικό περιβάλλον με αποτέλεσμα την οπτική και ακουστική όχληση των ανθρώπων και την ευαισθητοποίηση για τις αρνητικές επιδράσεις στο σύνολο του οικοσυστήματος. Υπάρχει, ωστόσο, και μια αστεϊρευτή πηγή ενέργειας η οποία αν και παραγκωνισμένη δύναται να αποδίδει σημαντικά ποσά ενέργειας προκαλώντας ασθενέστερες αντιδράσεις. Η πηγή αυτή είναι η θάλασσα. Η τεράστια έκτασή της συνεπάγεται την ύπαρξη πληθώρας ιδανικών τοποθεσιών για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Από αυτές οι περισσότερες είναι ερημικές αλλά ακόμα και αν δεν είναι, η δυνατότητα εγκατάστασης του εξοπλισμού σε βαθιά νερά δύναται να κάμψει τις αντιστάσεις των γηγενών κατοίκων. Αυτά και άλλα προτερήματα που αναπτύσσονται παρακάτω καθιστούν την θαλάσσια φιλικότερη ανάμεσα στις ήδη φιλικές ανανεώσιμες ενέργειες. Σκοπός της εργασίας αυτής, λοιπόν, είναι η αξιολόγηση των ενεργειακών δυνατοτήτων της θάλασσας και πιο συγκεκριμένα των κυματισμών σε διάφορες τοποθεσίες ανά τον κόσμο. Ακόμα και σήμερα, βέβαια, παρόλη την πρόοδο και την εντατικοποίηση των μελετών οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο.

Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι και η επιδιωκόμενη, στο συγκεκριμένο κείμενο, σύνδεση της παραγωγής ενέργειας με φυσικές μεταβλητές όπως τα ύψη  $H$  και οι περίοδοι κύματος  $T$ . Μέσω διαφόρων υπολογιστικών συστημάτων, καμπυλών και πινάκων καταρτισμένων από τους κατασκευαστές, οι ερευνητές έχουν την δυνατότητα να προσδιορίσουν την απόδοση των διαφορετικών τεχνολογιών στην πιθανή περιοχή εγκατάστασής τους. Όλες αυτές οι γνώσεις είναι απαραίτητο να αξιοποιηθούν και να εφαρμοσθούν για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων από την παρούσα διπλωματική εργασία.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά και στις 5 μορφές θαλάσσιας ενέργειας. Αρχικά καταγράφεται για κάθε μία χωριστά μια σύντομη ιστορική αναδρομή στις πρώτες απόπειρες αξιοποίησής τους καταλήγοντας στην κατηγοριοποίηση των κατασκευασμένων έως σήμερα εγκαταστάσεων με βάση τον τρόπο εξαγωγής ενέργειας. Ακολούθως παρατίθενται χάρτες εκτίμησης των δυνατοτήτων όλων των μορφών καθώς και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αφού επιλέχτηκε να αναπτυχθεί η αποθηκευμένη στους κυματισμούς ενέργεια, πραγματοποιήθηκε η επισκόπηση 13<sup>ov</sup> συστημάτων απορρόφησής της. Της επισκόπησης αυτής προηγήθηκε η διαφοροποίηση τους βασισμένη σε τρία κριτήρια: την απόσταση τους από την ακτή, το μέγεθος και τον προσανατολισμό τους και την αρχή λειτουργίας τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά σχήματα βάση των οποίων εκτιμάται η παραγόμενη ενέργεια δεδομένου ότι είναι γνωστές ορισμένες φυσικές

μεταβλητές. Στο τέλος του κεφαλαίου, προσδιορίζονται οι μέθοδοι μέτρησης των μεταβλητών αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίζεται μέσω συνθετικών μετρήσεων, που αφορούν την περιοχή της Αστυπάλαιας, η παραγωγή ενέργειας μιας υπερπηδητής από το θαλάσσιο νερό εγκατάστασης και μίας δεύτερης με ενσωματωμένους πλωτήρες με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νησιού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

### **1.3 Θαλάσσια ενέργεια**

Για πολλά χρόνια η ανθρωπότητα στήριζε την παραγωγή ενέργειας αποκλειστικά στις συμβατικές πηγές, δηλαδή τα ορυκτά καύσιμα και κυρίως το πετρέλαιο. Οι πηγές αυτές, κείτονται στο υπέδαφος του πλανήτη και ο ρυθμός παραγωγής τους σε σχέση με τον ρυθμό κατανάλωσης τους είναι δραματικά μικρότερος με αντίκτυπο, φυσικά, στα αποθέματά τους. Πρόκειται για πηγές οι οποίες με το πέρασμα των χρόνων θα εκλείψουν, ωστόσο ελάχιστοι είχαν συνειδητοποιήσει αυτόν τον κίνδυνο από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Ανάμεσα σε αυτούς οι Tom Dale και Vernon Gill Carter αναφέρθηκαν το 1956, στο βιβλίο τους “Topsoil and Civilization”, στην καταστροφή που προκαλεί ο άνθρωπος στο περιβάλλον και αργότερα το 1973 ο γνωστός οικονομολόγος Ernst Schumacher στο βιβλίο του “Small is beautiful: a study of economics as if people mattered” στο οποίο αναφέρθηκε πιο εξειδικευμένα στην λανθασμένα ανεξέλεγκτη χρήση των ορυκτών καυσίμων και τον κίνδυνο εξάντλησης των αποθεμάτων τους στον πλανήτη. Εντούτοις, οι απόψεις αυτές επικρίνονταν από την κοινή γνώμη. Αφορμή, λοιπόν, για την αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας στάθηκαν δύο πετρελαϊκές κρίσεις, το 1973 και το 1979, τις οποίες προκάλεσε το εμπάργκο των αραβικών χωρών (1973) και η κατακόρυφη αύξηση της τιμής του πετρελαίου λόγω της επανάστασης στο Ιράν (1979). Οι ανεπτυγμένες χώρες στράφηκαν στα στοιχεία της φύσης για την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ανανεώσιμη χαρακτηρίζεται μια πηγή ενέργειας η οποία προέρχεται από μια φυσική διεργασία, δεν εξαντλείται σε βάθος χρόνου και είναι φιλική προς το περιβάλλον. Μοιραία όταν γίνεται λόγος για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι πρώτες που έρχονται στον νου του καθενός είναι η ηλιακή, η αιολική και ίσως η υδροδυναμική λόγω των φραγμάτων και άλλων υδροηλεκτρικών έργων. Αυτές είναι άλλωστε και οι πιο διαδεδομένες και τεχνολογικά πιο εξελιγμένες. Υπάρχει, όμως, μία ανανεώσιμη πηγή, μεταξύ άλλων, με τεράστιες δυνατότητες η οποία βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Η ανανεώσιμη αυτή πηγή δεν είναι άλλη από το υγρό στοιχείο των θαλασσών. Πρόκειται για έναν τεράστιο περιβαλλοντικό “θησαυρό” ο οποίος καλύπτει τα δύο τρίτα της επιφάνειας της γης. Αναλογιζόμενοι και τις εκτιμήσεις που κάνουν λόγο για αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 30% από το 2010 έως το 2040, σύμφωνα με στοιχεία της αμερικανικής εταιρίας Exxonmobil, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη απορρόφησης ενέργειας από τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους ωκεανούς και τις θάλασσες γενικά. Όμοια με τον διαχωρισμό αυτών των φυσικών διεργασιών, πραγματοποιείται και ο διαχωρισμός των θαλάσσιων μορφών ενέργειας.



Οι μορφές αυτές είναι οι εξής:

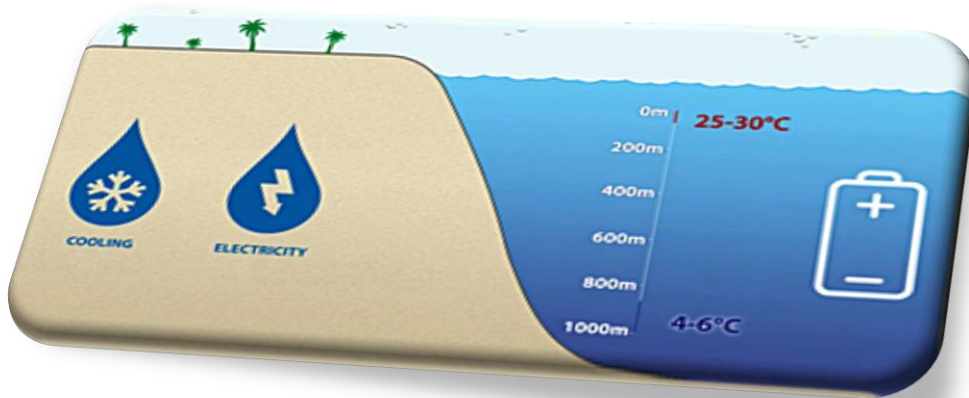
- i. Κυματική ενέργεια
- ii. Παλιρροιακή ενέργεια
- iii. Θερμοδυναμική ενέργεια
- iv. Ενέργεια λόγω θαλάσσιων ρευμάτων
- v. Ωσμωτική ενέργεια



Εικόνα 1.1 Κόματα.  
(Πηγή: [www.teamenergy.gr](http://www.teamenergy.gr))



Εικόνα 1.2 Παλίρροια.  
(Πηγή: [www.perierga.gr](http://www.perierga.gr))



Εικόνα 1.3 Διαφορά θερμοκρασίας νερού.(Θερμοδυναμική ενέργεια).  
(Πηγή: [www.dutchwatersector.com](http://www.dutchwatersector.com))



Εικόνα 1.4 Θαλάσσια ρεύματα  
(Πηγή: στιγμιότυπο από το [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))



Εικόνα 1.5 Εκβολή ποταμού. (Ωσμωση).  
(Πηγή: [www.iefimerida.gr](http://www.iefimerida.gr))

### 1.3.1 Κυματική Ενέργεια

Οι κυματισμοί ορίζονται ως όλες οι μη μόνιμες διαταραχές της θέσεως των μορίων του νερού σε ελλειπτικές τροχιές των οποίων η ακτίνα μειώνεται με το βάθος. Η συνολική μηχανική ενέργεια των κυμάτων προκύπτει από το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής τους ενέργειας. Σύμφωνα με την θεωρία του Stokes 1<sup>ης</sup> τάξεως για τους γραμμικούς κυματισμούς απειροστού πλάτους το ενεργειακό περιεχόμενο στήλης νερού πλάτους 1 m και μήκους L, είναι:

$$E = E_k + E_d = \frac{1}{16} \rho g H^2 L + \frac{1}{16} \rho g H^2 L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

όπου:

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

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

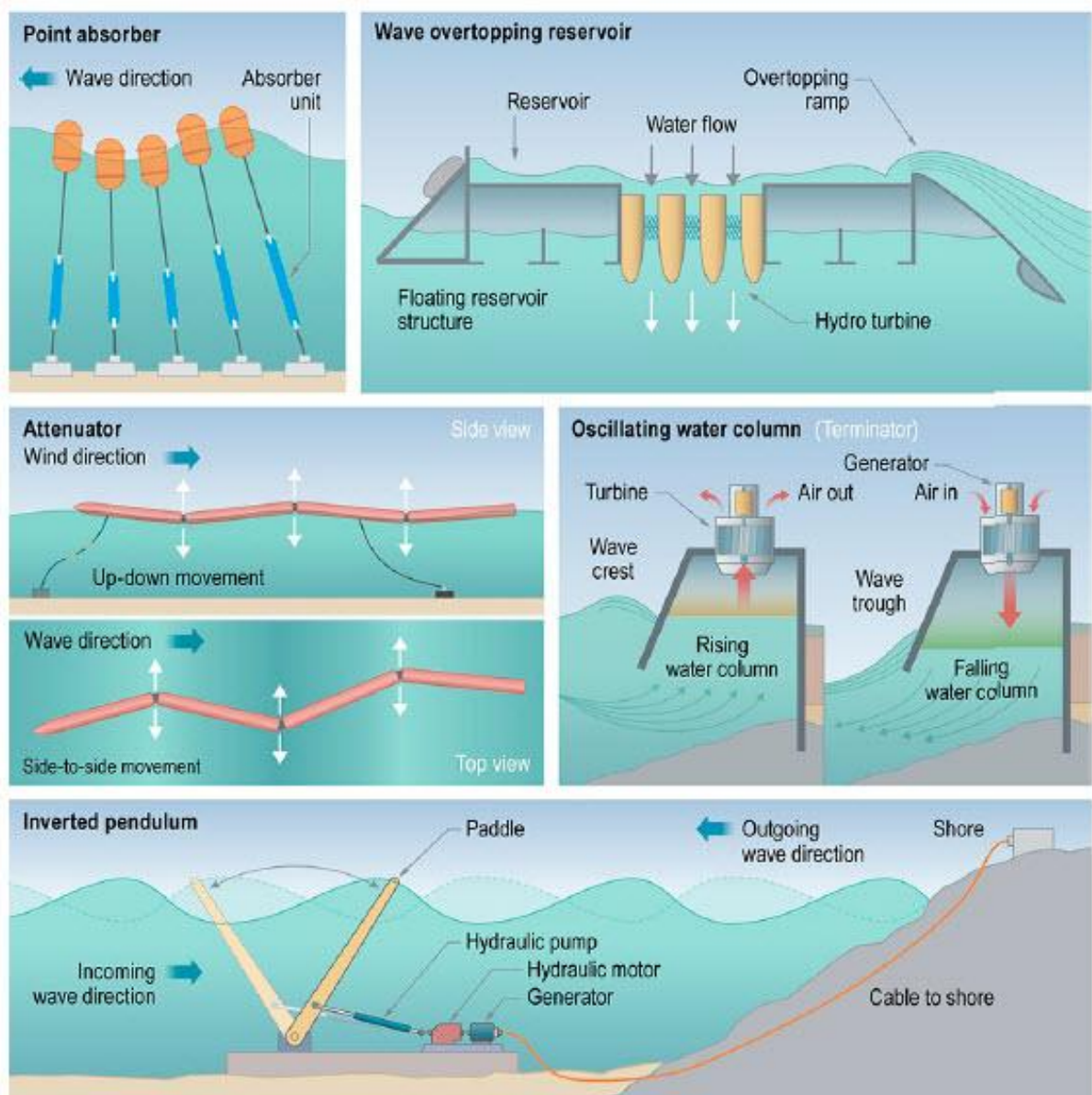
$H$ : το ύψος κύματος (m)

Η πρώτη απόπειρα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας έγινε, παραδόξως, πολύ νωρίτερα από την κρίση του πετρελαίου. Τον 13<sup>ο</sup> αιώνα στην Κίνα υπήρξαν κάποια δείγματα μύλων που περιστρέφονταν με την βοήθεια των κυμάτων, ωστόσο η πρώτη ευρεσιτεχνία απορρόφησης κυματικής ενέργειας άνηκε στον Girard και τον υιό του από το 1799 στην Γαλλία (Clément A. et al., 2002).

Έχουν γίνει αρκετές συζητήσεις τον 19<sup>ο</sup> αιώνα για το συγκεκριμένο θέμα και πολύ περισσότερες μετά την πετρελαϊκή κρίση αλλά η παραγωγή ενέργειας θεωρήθηκε πολύπλοκη και οικονομικά ασύμφορη για τα δεδομένα της εποχής. Για τον λόγο αυτό, δόθηκε προτεραιότητα και οικονομική υποστήριξη, στην έρευνα και την ανάπτυξη τεχνολογιών αξιοποίησης της ηλιακής, της αιολικής και της υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο. Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών αναγκών, όμως, στρέφει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας στην ‘μπλε ενέργεια’ η οποία έχει τεράστιες δυνατότητες και σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του πλανήτη.

Μέχρι σήμερα η τεχνολογία μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό βρίσκεται σε πειραματικό επίπεδο. Οι μετατροπείς αυτοί παράγουν ενέργεια με διάφορους τρόπους μέσω της κίνησης και της πτώσης του νερού. Με βάση τις αρχές λειτουργίας τους οι συσκευές χωρίζονται σε

- i. Μετατροπείς οι οποίοι αξιοποιούν την διαφορά πίεσης σε δύο διαφορετικούς χώρους
- ii. Μετατροπείς πλωτούς που αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του νερού
- iii. Μετατροπείς οι οποίοι υπερπηδούνται από τα κύματα και εκμεταλλεύονται την πτώση του νερού
- iv. Μετατροπείς οι οποίοι αξιοποιούν τις οριζόντιες δυνάμεις μετάδοσης των κυμάτων.



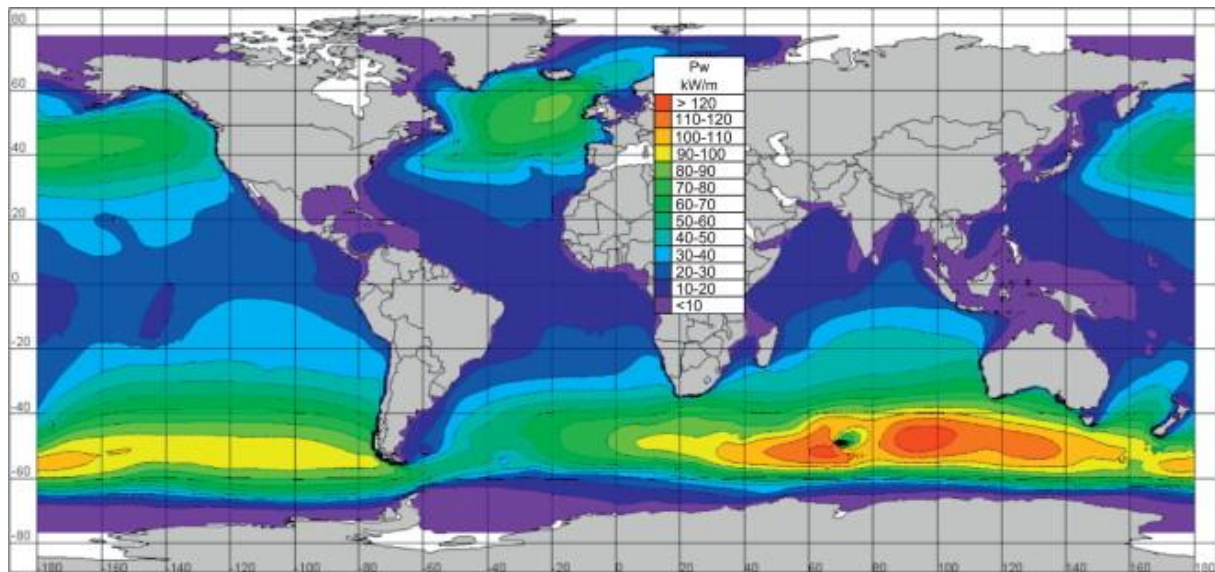
Εικόνα 1.6 Αξιοποίηση κυματικής ενέργειας με διάφορες τεχνολογίες.  
(Πηγή: Bedard R., 2006)

Στην εικόνα φαίνονται οι εξής τεχνολογίες:

- i. Point absorber (πλωτή συσκευή)
- ii. Wave overtopping reservoir (Υπερπηδητή κατασκευή)
- iii. Attenuator (πλωτή συσκευή)
- iv. Oscillating water column (συσκευή αξιοποίησης διαφοράς πίεσης)
- v. Inverted pendulum (αξιοποίηση των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούν τα εισερχόμενα και τα εξερχόμενα κύματα κοντά στην ακτή – κίνηση εκκρεμούς).

Ο βαθμός αποδοτικότητας των συστημάτων αυτών εξαρτάται από παράγοντες όπως η ταχύτητα, το ύψος και η συχνότητα-περίοδος κύματος καθώς και από την πυκνότητα του νερού. Συνεπώς, βαρύνουσας σημασίας είναι και η επιλογή της τοποθεσίας τους. Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την απεικόνιση του κυματικού κλίματος και την εκτίμηση της αποθηκευμένης στους κυματισμούς ενέργειας, σε παγκόσμια κλίμακα. Στην

εικόνα 1.6 παρουσιάζεται ο παγκόσμιος χάρτης του κυματικού δυναμικού σε μέση ετήσια βάση.



Εικόνα 1.6 Εκτίμηση μέσης ετήσιας κυματικής ενέργειας σε kW/m για περίοδο 10 ετών.  
(Πηγή: Cornett A., 2008)

Συμπερασματικά από τον χάρτη αυτόν:

- i. Οι μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας συγκεντρώνονται ανάμεσα στις 40° και 60° σε κάθε ημισφαίριο και συγκριτικά το νότιο ημισφαίριο είναι ενεργειακά πλουσιότερο από το βόρειο.
- ii. Οι μέγιστες τιμές (>120 kW/m) εμφανίζονται στο νότιο μέρος του Ινδικού ωκεανού κοντά στα νησιά Kerguelen και ως 1400 km ανατολικά τους, ενώ πολύ μεγάλες είναι και οι τιμές στις νότιες ακτές της Αυστραλίας, της Νέας Ζηλανδίας, της Αφρικής και της Χιλής.
- iii. Όσον αφορά το βόρειο ημισφαίριο οι μέγιστες τιμές (80-90 kW/m) εμφανίζονται δυτικά των Βρετανικών Νησιών, της Ισλανδίας και της Γροιλανδίας. Στον Ειρηνικό ωκεανό αρκετά υψηλές τιμές (60 kW/m) παρατηρούνται δυτικά του Καναδά, της Ουάσινγκτον (επαρχία της Κολούμπια) και του Όρεγκον.
- iv. Η μέγιστη διαθέσιμη μηνιαία τιμή είναι παρόμοια και στα δύο ημισφαίρια (200 kW/m), ωστόσο η απόσταση των περιοχών, με τέτοιες τιμές κυματικού δυναμικού, από τις ακτές και τα ενεργητικά επίπεδα των κυμάτων τις καθιστούν απαγορευτικές για εγκατάσταση των τεχνολογιών απορρόφησης κυματικής ενέργειας (Lopez I. et al, 2013).
- v. Σημαντικός παράγοντας, λοιπόν, είναι και οι απόσταση από τις ακτές στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση. Στο βόρειο ημισφαίριο κοντά στις ακτές των Βρετανικών Νησιών, της Ισλανδίας και της Γροιλανδίας τα επίπεδα ενέργειας είναι υψηλότερα. Στο νότιο ημισφαίριο οι νότιες ακτές της Χιλής και της Αφρικής, αλλά και οι νοτιοδυτικές ακτές της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας δείχνουν προσφορότερες. Μέτρια είναι τα επίπεδα ενέργειας στα νερά του Ισημερινού.

Αρκετοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με την αξιολόγηση των κυματικών πόρων σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Συγκεντρωτικά τα πιο αναλυτικά δημοσιευμένα αποτελέσματα αυτών των ερευνών παραθέτονται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Παγκόσμιοι θεωρητικοί πόροι κυματικής ενέργειας ανά περιοχή.

RESOURCE	P <sub>gross</sub> (GW)	P (GW)	P <sub>net</sub> (GW)
Europe (N and W)	381	371	286
Baltic sea	15	4	1
European Russia	37	22	3
Mediterranean	75	37	37
North Atlantic Archipelagos	111	111	111
North America (E)	115	103	35
North America (W)	273	265	207
Greenland	103	99	3
Central America	180	171	171
South America (E)	206	203	202
South America (W)	325	324	324
North Africa	40	40	40
West and Middle Africa	77	77	77
Africa (S)	178	178	178
Africa (E)	133	133	127
Asia (E)	173	164	157
Asia (SE) and Melanesia	356	283	283
Asia (W and S)	100	90	84
Asiatic Russia	172	162	23
Australia and New Zealand	590	574	574
Polynesia	63	63	63
<b>TOTAL</b>	<b>3703</b>	<b>3474</b>	<b>2986</b>

(López I. et al., 2013)

Στον συγκεκριμένο πίνακα η τιμή P<sub>gross</sub> αναφέρεται στους συνολικούς ‘ακαθάριστους’ πόρους, η τιμή P προκύπτει χωρίς να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των περιοχών με δυναμικό μικρότερο των 5 kW/m και η τιμή P<sub>net</sub> χωρίς να ληφθούν υπόψη ούτε οι περιοχές με δυναμικό μικρότερο των 5 kW/m, ούτε οι καλυμμένες από πάγο περιοχές. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε το θεωρητικό συνολικό ‘καθαρό’ ποσό ενέργειας που δύναται να απορροφηθεί από τους κυματισμούς είναι περίπου 3 TW παγκοσμίως ή 26.280 TWh/yr την στιγμή που κάποιες πιο φιλόδοξες εκτιμήσεις αναφέρονται σε 29.500 TWh/yr (Mofk G. et al., 2010). Ειδικότερα, οι ακτές της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας, καθώς και τα νησιά στην νότια πλευρά αυτών, οι ακτές της βορειοδυτικής Αμερικής, οι ακτές τις νοτιοδυτικής Αμερικής όπως και αυτές της Ευρώπης που βρέχονται από τον Ατλαντικό ωκεανό φαντάζουν οι ιδανικότερες για την εγκατάσταση διατάξεων απορρόφησης της κυματικής ενέργειας.

Η ενέργεια από τα κύματα, λοιπόν, δείχνει σπουδαία ανά περιοχές και ικανή να συμβάλλει, με την σωστή αξιοποίησή της, στην αντιμετώπιση ενεργειακών ζητημάτων. Οι αστείρευτοι πόροι της δεν είναι το μόνο της πλεονέκτημα:

- ❖ Η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι μηδενική κατά την λειτουργία των σταθμών, συνεπώς η ενέργεια είναι φιλική προς το περιβάλλον.

- ❖ Η αξιοπιστία της είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γεγονός το οποίο οφείλεται στην μεγαλύτερη πυκνότητά της (κυματική ενέργεια: 2-3 kW/m<sup>2</sup>, ηλιακή ενέργεια: 0,1-0,2 kW/m<sup>2</sup>, αιολική ενέργεια: 0,4-0,6 kW/m<sup>2</sup>) (López I. et al., 2013)
- ❖ Τα κύματα καλύπτουν πολύ μεγάλες αποστάσεις με μικρές ενεργειακές απώλειες.
- ❖ Η κυματική ενέργεια θεωρείται αξιοποιήσιμη μέχρι και το 90% του έτους. Το αντίστοιχο ποσοστό για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια είναι 20-30% (Pelc R. and Fujita R., 2002)
- ❖ Είναι αρκετά πιο προβλέψιμη από λοιπές ανανεώσιμες ενέργειες.
- ❖ Δεν απαιτείται δέσμευση γης για τις εγκαταστάσεις.
- ❖ Η οπτική και ακουστική όχληση με σωστή τοποθέτηση και σχεδιασμό μπορεί να είναι ανεπαίσθητη. Για παράδειγμα, υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθούν οι συσκευές μακριά από την ακτή ή σε κάποια απομονωμένη περιοχή.
- ❖ Το κόστος λειτουργίας είναι σχετικά μικρό.
- ❖ Οι πόροι αξιοποιούνται αποδοτικότερα αφού ένα μεγάλο μέρος του πληθυσμού της γης (37%) κατοικεί σχετικά κοντά στις ακτές (μέχρι και 90 km μακριά από την ακτή) (López I. et al., 2013)
- ❖ Οι εγκαταστάσεις είναι συμβατές με τα αιολικά πάρκα (υβριδικό σύστημα).
- ❖ Δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας.

Εκτός από όλα αυτά υπάρχουν, φυσικά, και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία αποτελούν τροχοπέδη στην ανάληψη δράσεων με γνώμονα την εξαγωγή ενέργειας από τα κύματα:

- ❖ Η απαίτηση μεγάλων επενδύσεων κυρίως για την εγκατάσταση των τεχνολογιών και των παρακειμένων έργων μεταφοράς της ενέργειας.
- ❖ Η τοποθέτηση επιβλαβών εμποδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον τα οποία αυξάνουν τις πιθανότητες τραυματισμού των μεγαλύτερων συνήθως θηλαστικών, όπως χελώνες και θαλασσοπούλια.
- ❖ Οι πιθανές ακουστικές επιπτώσεις στην θαλάσσια ζωή και τα ενδεχόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω των υποθαλάσσιων καλωδίων.
- ❖ Η τοποθέτησή τους, πολλές φορές, σε απομακρυσμένες περιοχές συνεπάγεται την ανάγκη αναβάθμισης των δικτύων, ακόμα και ανεγέρσεις κτηριακών εγκαταστάσεων αποθηκευτικότητας κοντά στις ακτές για την παραλαβή και μεταφορά της ενέργειας.
- ❖ Η μεταβλητότητα πόρων-μεταβλητότητα ηλεκτρικής παραγωγής: αστάθεια των ποσών ενέργειας που μεταφέρονται στο δίκτυο, γεγονός το οποίο δεν συμβάλλει στην ομαλή λειτουργία του δικτύου.
- ❖ Όσον αφορά τις εγκαταστάσεις μακριά από την ακτή οι δύσκολες κυματικές και καιρικές συνθήκες δύνανται να προκαλέσουν βλάβες στις συσκευές, ενώ ταυτόχρονα η επισκευή και η συντήρησή τους εμφανίζει δυσκολίες.
- ❖ Τέλος, η κατεύθυνση των κυμάτων σε βαθιά νερά (βάθος > 40m) αλλάζει διαρκώς και για την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας οι συσκευές ίσως χρειάζεται να ευθυγραμμίζονται αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι τα πλεονεκτήματα είναι, ελαφρώς, περισσότερα από τα μειονεκτήματα, ωστόσο, οι έρευνες συνεχίζονται και πολλές από τις αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να εξομαλυνθούν ή να εξαλειφθούν. Ακόμα και το κόστος το οποίο είναι κομβικής σημασίας σε

μία εποχή οικονομικής κρίσης, θα μειωθεί εφόσον η κυματική ενέργεια εμπορευματοποιηθεί μπαίνοντας στην ‘εξίσωση’ των ανεπτυγμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

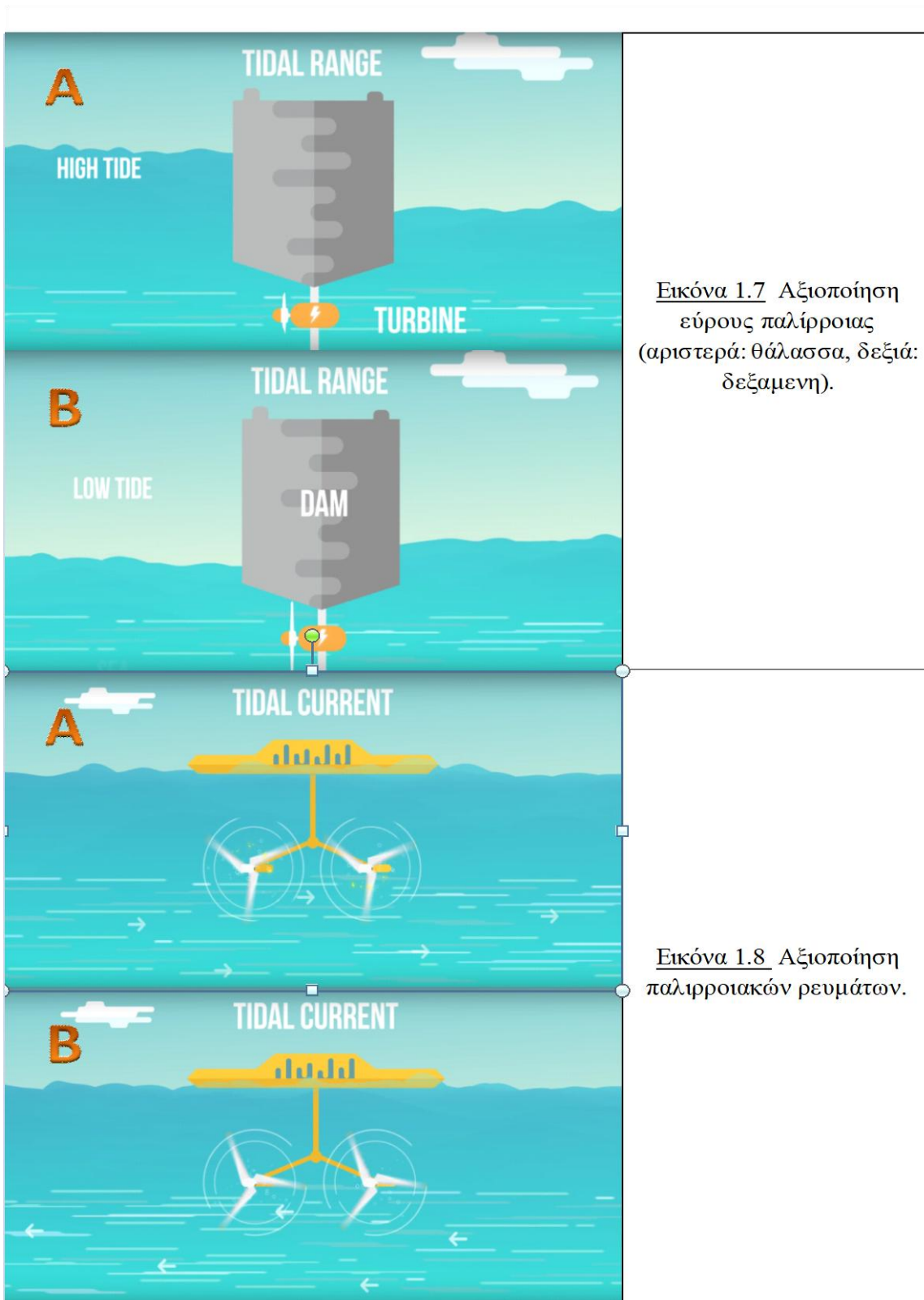
### 1.3.2 Παλιρροιακή Ενέργεια

Παλιρροιακή ονομάζεται η ενέργεια η οποία παράγεται μέσω της περιοδικής ανόδου και καθόδου της στάθμης των θαλασσών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην βαρυτική έλξη που ασκούν η σελήνη και ο ήλιος στη γη. Όταν η σελήνη ευθυγραμμιστεί πλήρως με την γη και τον ήλιο η βαρυτική έλξη στις θάλασσες είναι μεγαλύτερη της συνήθους με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης τους και την έναρξη της ροής των υδάτων σε δύο όψεις της γης, αυτήν που βρίσκεται πιο κοντά στην σελήνη και την αντιδιαμετρική της (πλημμυρίδα-high tide). Στις υπόλοιπες όψεις η στάθμη πέφτει (άμπωτη-low tide). Όταν η σελήνη σχηματίζει ορθή γωνία με την γη και τον ήλιο οι έλξεις της σελήνης και του ηλίου αλληλεπιδρούν και το φαινόμενο εξασθενεί χωρίς ωστόσο να εξαλείφεται διότι η έλξη που ασκεί η σελήνη στην γη είναι δύο φορές μεγαλύτερη από αυτήν που ασκεί ο ήλιος. Ο χρόνος για την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου παλίρροιας είναι 12 ώρες και 25 περίπου λεπτά, συνεπώς το πλήρες φαινόμενο παρατηρείται περίπου δύο φορές την ημέρα.

Από το 787 μ.Χ. σε ακτές της Αγγλίας, της Ισπανίας και της Γαλλίας κατασκευάστηκαν κάποιοι μύλοι για την αξιοποίηση των παλιρροιών κυρίως για ιδιωτική χρήση. Η πρώτη εγκατάσταση σε εμπορικό μέγεθος βρίσκεται στην τοποθεσία Brittany, στις εκβολές του ποταμού Rance στην νοτιοδυτική Γαλλία (Rance Tidal Power Station). Κατασκευάστηκε το 1966 και για 45 χρόνια ο σταθμός αυτός ήταν ο μεγαλύτερος όσον αφορά την αξιοποίηση της παλίρροιας με συνολική παραγωγική ικανότητα 240 MW, τροφοδοτώντας το 0,12% της ζήτησης για ενέργεια της Γαλλίας ([www.wyretidalenergy.com](http://www.wyretidalenergy.com)). Την παραγωγική αυτή ικανότητα ξεπέρασε ο σταθμός ο οποίος κατασκευάστηκε το 2011 στην Νότια Κορέα, πιο συγκεκριμένα στην λίμνη Sihwa, με 254 MW, ισχύ που καθιστά τον σταθμό κορυφαίο στο είδος του μέχρι και σήμερα. ([www.powertechnology.com](http://www.powertechnology.com)).

Η παλίρροια συνίσταται σε δύο μέρη, την κατακόρυφη αυξομείωση της στάθμης της θάλασσας, που καθορίζει και το εύρος της (tidal range), καθώς και την ροή όγκων νερού που οφείλεται στις εναλλαγές πλημμυρίδας και άμπωτης (tidal current). Διάφορες εγκαταστάσεις αξιοποιούν τις συνιστώσες αυτές για την παραγωγή ενέργειας. Για την αξιοποίηση του εύρους της παλίρροιας κατασκευές εγκιβωτισμού νερού, τύπου φράγματος, με διόδους νερού στην βάση τους δημιουργούν κλειστές περιοχές (δεξαμενές). Η διαφορά στάθμης εκατέρωθεν των κατασκευών προκαλεί την ροή νερού μέσω των διόδων αυτών. Επεξηγηματικά, κατά την πλημμυρίδα το νερό ρέει προς την κλειστή περιοχή, ενώ κατά την άμπωτη το νερό ακολουθεί την αντίθετη διαδρομή. Πύλες απαγορεύουν την ροή έως ότου η διαφορά στάθμης νερού στην θάλασσα και την δεξαμενή να είναι μεγαλύτερη των 2 m για μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Στις διόδους αυτές τοποθετούνται υδροστρόβιλοι οι οποίοι περιστρέφονται κατά την διάρκεια και των δύο διαδρομών του νερού με αποτέλεσμα την γέννηση ηλεκτρισμού (Εικόνα 1.7). Αναφορικά με την δεύτερη συνιστώσα, συσκευές αντίστοιχες των ανεμογεννητριών λειτουργούν υποθαλάσσια και βασιζόμενες στην κινητική ενέργεια των μορίων του νερού και την πυκνότητα του υγρού στοιχείου ενεργοποιούνται αποδίδοντας ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 1.8). Τα παλιρροιακά ρεύματα προκαλούνται από την αύξηση και την μείωση της στάθμης της θάλασσας κατά την πλημμυρίδα και την άμπωτη.



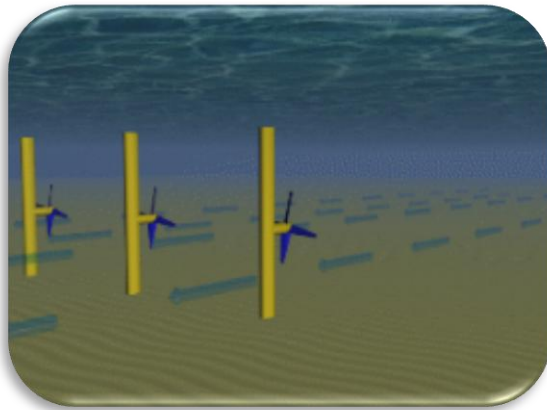


Εικόνα 1.7 Αξιοποίηση εύρους παλίρροιας (αριστερά: θάλασσα, δεξιά: δεξαμενη).

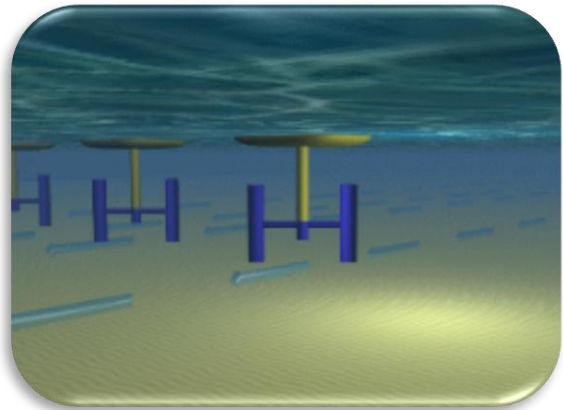
Εικόνα 1.8 Αξιοποίηση παλιρροιακών ρευμάτων.

(Πηγή: [www.oceanenergy.tudelft.nl](http://www.oceanenergy.tudelft.nl). Στιγμιότυπα από καταγραφή αναπαράστασης των διεργασιών της παλίρροιας)

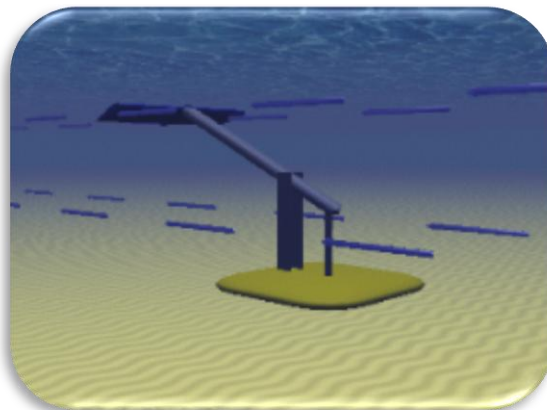
Ειδικότερα, για τα παλιρροιακά ρεύματα οι κύριες διατάξεις των υδροστροβίλων μπορούν να χωριστούν σε έξι (6) κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους:



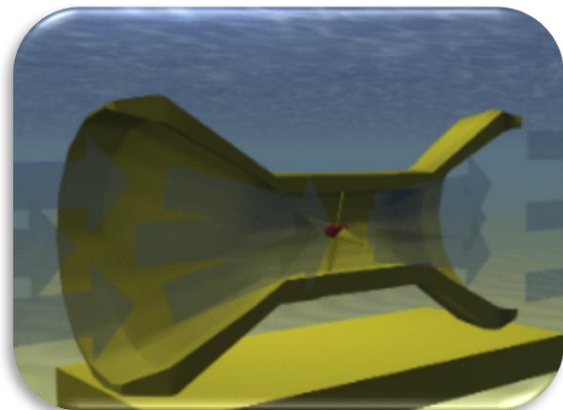
1. Οριζόντιων αξόνων



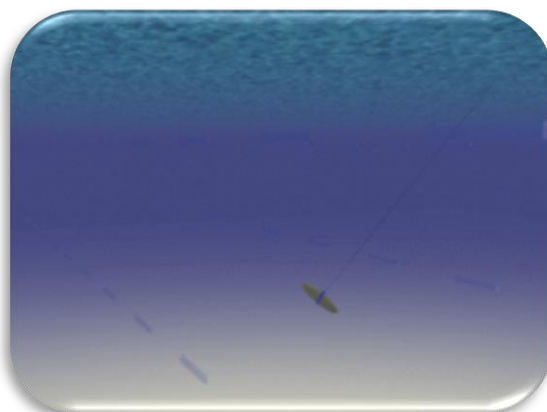
2. Κατακόρυφων αξόνων



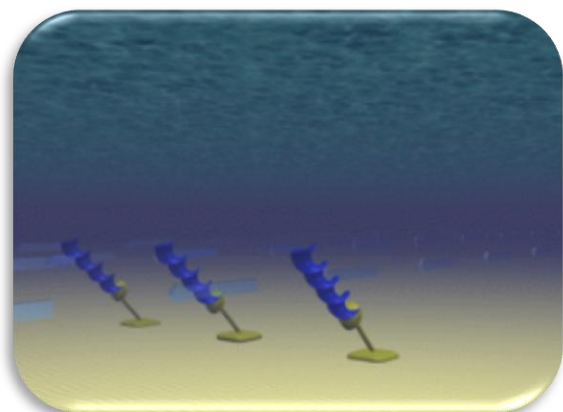
3. Παλινδρομικά υδροπτέρυγα



4. Βασισμένοι στο φαινόμενο Venturi



5. Παλιρροιακός χαρταετός



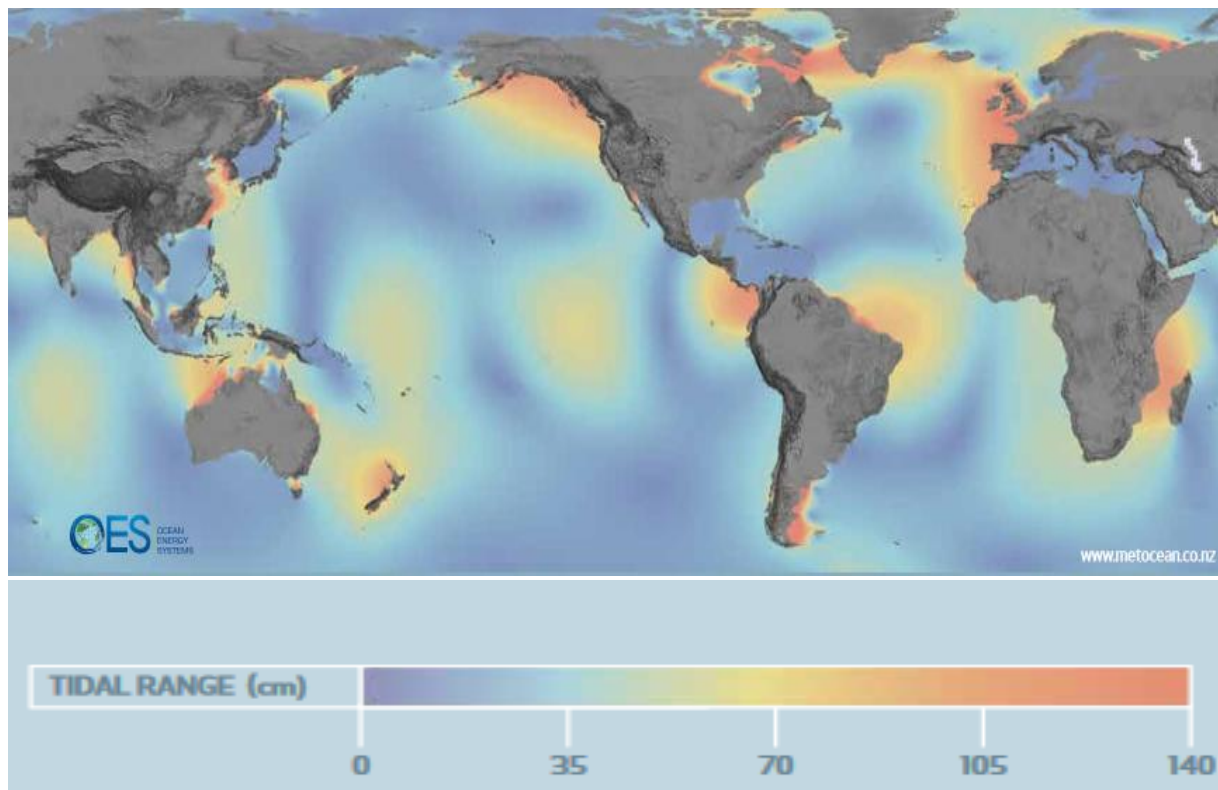
6. Βίδες του Αρχιμήδη

Εικόνα 1.9 Κατηγορίες τεχνολογιών αξιοποίησης παλιρροιακών ρευμάτων.

(Πηγή: [www.oceanenergy.tudelft.nl](http://www.oceanenergy.tudelft.nl))

Το εύρος των παλιρροιών ποικίλλει σε τοποθεσίες ανά τον κόσμο φτάνοντας σε τιμές της τάξεως των 17 m στον κόλπο Fundy στον ανατολικό Καναδά. Η κατακόρυφη μετατόπιση της στάθμης είναι μεγαλύτερη σε στενά περάσματα με γεωμορφολογική πολυπλοκότητα κοντά

στην ακτή. Ιδανικές, για την εγκατάσταση σταθμών αξιοποίησης του φαινομένου της παλίρροιας, θεωρούνται οι περιοχές με παλιρροιακό εύρος μεγαλύτερο των 7 m. Συγκεντρωτικά τα εύρη των παλιρροιών παγκοσμίως απεικονίζονται στον χάρτη παρακάτω.



Εικόνα 1.10 Παλιρροιακά εύρη (Tidal range).

(Πηγή: Huckerby J. et al., 2012)

Παρατηρούμε ότι:

- i. Εκ πρώτης όψεως το βόρειο ημισφαίριο διαθέτει μεγαλύτερο παλιρροιακό δυναμικό συγκριτικά με το νότιο.
- ii. Στο βόρειο ημισφαίριο οι μεγαλύτερες δυνατότητες υφίστανται στον ανατολικό Καναδά, στα νοτιοδυτικά της Γροιλανδίας, στις ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου, της Ιρλανδίας και της Γαλλίας καθώς και στα σύνορα Νορβηγίας και Ρωσίας. Σημαντικά είναι και τα μεγέθη για τις δυτικές ακτές του Καναδά και τις ανατολικές της Κίνας. Ειδικότερα, στον κόλπο Fundy στον ανατολικό Καναδά το εύρος της παλίρροιας είναι δυνατόν να φτάσει μέχρι τα 17 m, στην θάλασσα της Μάγχης που χωρίζει το Ηνωμένο Βασίλειο από την Γαλλία το εύρος φτάνει μέχρι τα 15 m περίπου και στον κόλπο του Σαν Μισέλ στην βορειοδυτική Γαλλία φτάνει μέχρι τα 13,5 m (Lewis A. et al., 2011).
- iii. Στο νότιο ημισφαίριο σημαντικότερη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας κατά διάρκεια της παλίρροιας εμφανίζονται στις ακτές της Αργεντινής καθώς και στις βόρειες ακτές της Αυστραλίας. Ειδικά στο λιμάνι του Rio Gallegos στην νότια Αργεντινή το εύρος στην μέγιστη τιμή του είναι περίπου 13 m (Μαμάσης Ν. και Τσουκαλά Β., 2016).
- iv. Τέλος, είναι εμφανές ότι ανεξαρτήτου ημισφαιρίου οι μεγάλες τιμές βρίσκονται κοντά στις ακτές, δίπλα σε ακρωτήρια και σε στενά περάσματα, όπως είχε προαναφερθεί.

Τα παλιρροιακά ρεύματα, από την άλλη μεριά, αναγνωρίζονται ως αξιοποιήσιμα εφόσον η ταχύτητα τους ξεπερνάει τα 2,5 m/s. Τέτοιες ταχύτητες είναι πιθανό να αναπτυχθούν και σε περιοχές όπου το εύρος της παλίρροιας είναι αρκετά μικρότερο των 7 m, όπως η Ιταλία και η Ελλάδα. Τεράστιο είναι, φυσικά, και το ενδιαφέρον στις χώρες με μεγάλο παλιρροιακό εύρος που προαναφέρθηκαν, χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιρλανδία, η Γαλλία, ο Καναδάς και η Νότια Αμερική. Επιπροσθέτως, ιδιαίτερα ελκυστικές είναι και οι συνθήκες στην Νέα Ζηλανδία, την Ιαπωνία, την Κορέα και τις Φιλιππίνες. Ειδικότερα στην Ευρώπη εκτιμάται ότι περισσότερες από 106 τοποθεσίες, η πλειονότητα των οποίων βρίσκονται στο Ηνωμένο Βασίλειο, πληρούν τις προϋποθέσεις εγκατάστασης τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας με τεχνικές δυνατότητες 48 TWh/yr. Αντίστοιχα για την Κίνα εκτιμήσεις αναφέρονται σε διαθεσιμότητα περίπου 14 GW ενέργειας από παλιρροιακά ρεύματα (Lewis A. et al., 2011).

Παγκοσμίως η ενέργεια η οποία μπορεί να παραχθεί αθροιστικά λόγω του παλιρροιακού εύρους και των παλιρροιακών ρευμάτων ανέρχεται στα 1.200 TWh/yr (World Energy Council 2010). Το 1966 στον ποταμό Rance, στην Γαλλία εγκαταστάθηκε ο πρώτος σταθμός αξιοποίησης του παλιρροιακού εύρους και μέχρι σήμερα οι κατασκευές και οι σχεδιασμοί συνεχίζονται με μεγαλύτερους ρυθμούς. Οι πέντε (5) μεγαλύτεροι σταθμοί οι οποίοι λειτουργούν είναι οι εξής (σε παρένθεση το έτος έναρξης λειτουργίας τους):

- i. Σταθμός στην λίμνη Sihwa στην Νότια Κορέα, ισχύος 254 MW (2011)
- ii. Σταθμός στον ποταμό La Rance στην Γαλλία, ισχύος 240 MW (1966)
- iii. Σταθμός στον κόλπο Fundy στις ανατολικές ακτές του Καναδά, ισχύος 20 MW (1984) (www.nspower.ca)
- iv. Σταθμός στην Wuyantu στις ανατολικές ακτές της Κίνας, ισχύος 3,2 MW (1980) (Elements of Tidal-Electrical Engineering)
- v. Σταθμός σε πειραματικό στάδιο στην Kislaya Guba στις βορειανατολικές ακτές της Ρωσίας, ισχύος 1,7 MW (1968). (www.wikipedia.org)



Εικόνα 1.11 Σταθμοί στον ποταμό La Rance (αριστερά) και την λίμνη Sihwa (δεξιά).  
(Πηγή: www.wikipedia.com και www.blog.naver.com, αντίστοιχα)

Σχετικά με την αξιοποίηση των παλιρροιακών ρευμάτων η πρώτη προσπάθεια τοποθετείται χρονικά στις αρχές της δεκαετίας του 1990 στην τοποθεσία Loch Linnhe στις δυτικές ακτές της Σκωτίας (www.itpower.co.uk). Από τότε έχουν γίνει πολλές προσπάθειες με πειραματικές διατάξεις και έργα σε μεγαλύτερες-εμπορικές κλίμακες όπως είναι το SeaGen στις ανατολικές

ακτές της Βόρειας Ιρλανδίας στο Strangford Lough με ισχύ 1,2 MW. Στις νήσους Orkney της Σκωτίας μία διάταξη διαφορετική από το SeaGen εκμεταλλεύεται τα παλιρροιακά ρεύματα με την βοήθεια ενός υδροστροβίλου (Sausser B., 2008). Τελειώνοντας, υπό κατασκευή τελεί ένα πολύ μεγάλο έργο, το Meygen, ανάμεσα στις βόρειες ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου της νήσου Stroma το οποίο στο πέρας της κατασκευής του θα φτάνει σε ισχύ τα 398 MW (Dickie Mure, 2016).



Εικόνα 1.12 Σταθμοί στην Βόρεια Ιρλανδία (αριστερά) και στις νήσους Orkney (δεξιά)  
(Πηγές: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) και [www.openhydro.com](http://www.openhydro.com), αντίστοιχα)

Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ανθρώπινης παρέμβασης στην φύση για την απορρόφηση ενέργειας που προσφέρει η παλίρροια παραθέτονται παρακάτω.

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- ❖ Η πηγή είναι ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον καθώς η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι μηδενική κατά την λειτουργία των σταθμών.
- ❖ Η πρόβλεψη του χρόνου, του τόπου και της ισχύος του φαινομένου των παλιρροιών είναι ευκολότερη συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος.
- ❖ Η πυκνότητα του νερού, είναι 800 περίπου φορές μεγαλύτερη από αυτή του ανέμου, αποτελώντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την κινητική ενέργεια του υγρού στοιχείου.
- ❖ Η οπτική όχληση είναι μικρή για τον άνθρωπο. Αφορά μόνο της συσκευές τύπου φράγματος και με σωστό σχεδιασμό και εγκατάσταση αναιρείται.
- ❖ Η προστασία από πλημμύρες και δημιουργία χώρων αναψυχής μέσω των παλιρροιακών φραγμάτων.
- ❖ Η συμβατότητα των εγκαταστάσεων με τα αιολικά πάρκα (υβριδικό σύστημα).
- ❖ Η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Αρκετά σημαντικά είναι, όμως και τα εμπόδια που συναντά η λήψη αποφάσεων και δράσεων αναφορικά με την εκμετάλλευση της παλίρροιας:

- ❖ Ο κίνδυνος σύγκρουσης θηλαστικών με της υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις και γενικά η αύξηση της θνησιμότητας των ψαριών.
- ❖ Το υψηλό κόστος κυρίως για την εγκατάσταση και την συντήρηση των συσκευών σε περιοχές όπου η ισχύς των παλιρροιών είναι μεγάλη.

- ❖ Η αστάθεια της ενέργειας που μεταφέρεται στο δίκτυο αφού η ισχύς των παλιρροιών εξαρτάται από τις θέσεις του ηλίου και της σελήνης, ουράνια σώματα τα οποία βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση.
- ❖ Το υψηλό κόστος μεταφοράς της ενέργειας σε κατάλληλη μορφή και ένταση στην στεριά.
- ❖ Ο μικρός αριθμός ιδανικών τοποθεσιών, συγκριτικά με λοιπές ανανεώσιμες πηγές.

Η πλειονότητα των μειονεκτημάτων θα αντιμετωπιστεί, μερικώς ή ολικώς, με την εντατικότερη πλέον ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας με την παλιρροιακή ενέργεια. Η τυποποίηση του εξοπλισμού και η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για βέλτιστη αποδοτικότητα θα συνέβαλλαν στην μείωση του κόστους. Ο εναλλακτικός σχεδιασμός των υδροστροβίλων καθώς και άλλα τεχνάσματα σαν την εσκεμμένη ηχητική όχληση στα επικίνδυνα σημεία θα μπορούσε να μειώσει τα ατυχήματα με του ζωντανούς οργανισμούς στην κοινότητα του βυθού. Τέλος, η παραγόμενη ενέργεια θα αποκτούσε μια σταθερότητα, ενδεχομένως, με την παρεμβολή κάποιας συσκευής ηλεκτρικής αποθήκευσης (μπαταρία).

### 1.3.3 Θερμοδυναμική Ενέργεια

Το 15% της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην θάλασσα διατηρείται στα ανώτερα στρώματα νερού και μειώνεται εκθετικά με το βάθος καθώς η θερμική αγωγιμότητα του νερού είναι χαμηλή (Charlier R. and Justus J.R., 1993). Κοντά στα τροπικά, κυρίως, μέρη η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού φτάνει τους 25-30°C στην επιφάνεια, ενώ η αντίστοιχη θερμοκρασία σε μεγάλα βάθη της τάξεως των 1000 m φτάνει συνήθως στους 4-6°C. Η αξιοποίηση της θερμοκρασιακής της διαφοροποίησης με κατάλληλες τεχνικές δύναται να αποδώσει τεράστια ποσά ενέργειας. Οι θεωρητική θερμοδυναμική ενέργεια η οποία είναι πιθανό να παραχθεί στο μέλλον κυμαίνεται στις 44.000 TWh/yr (Nihous G.C., 2007), περισσότερες από κάθε άλλη μορφή θαλάσσιας ενέργειας. Οι πολύ αισιόδοξες εκτιμήσεις φτάνουν μέχρι της 88.000 TWh/yr (Pelc R. and Fujita R., 2002).

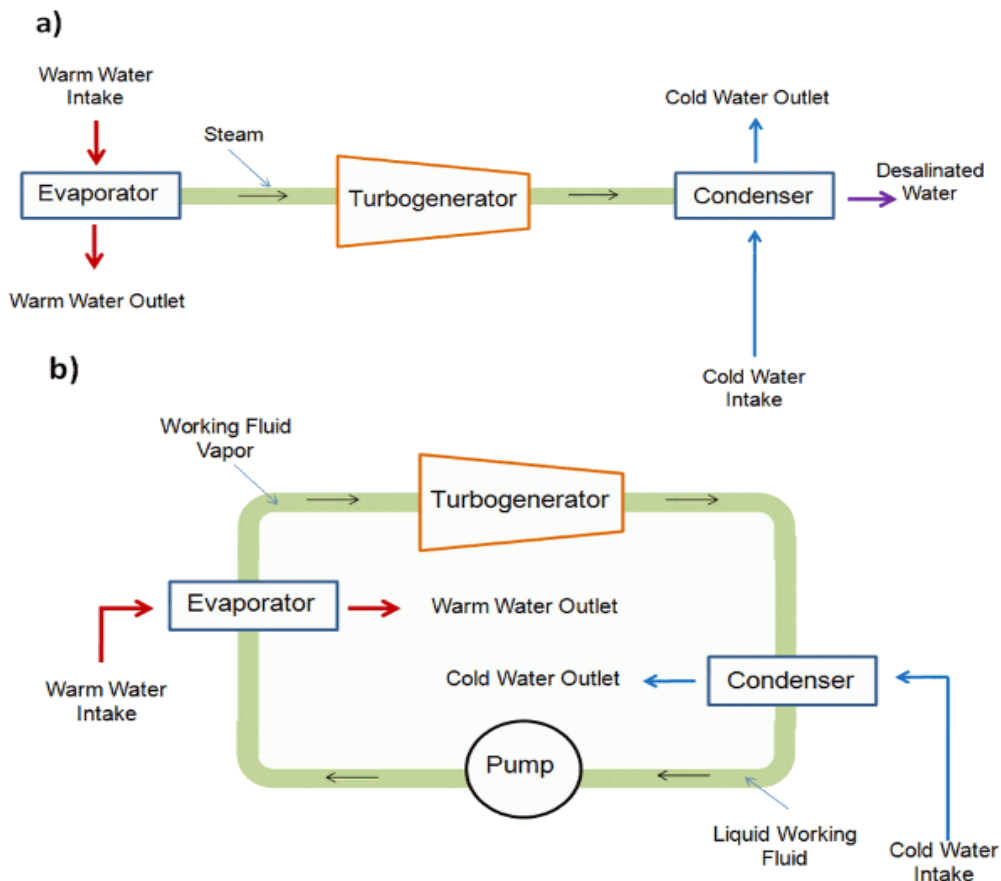
Οι πρώτες αναφορές στην θερμοδυναμική ενέργεια της θάλασσας έγιναν το 1881 από τον Jacques Arsene d'Arsonval, έναν Γάλλο φυσικό. Ο μαθητής του George Claude κατασκεύασε τον πρώτο σταθμό αξιοποίησής της στην Κούβα το 1930. Παράγωγο της προσπάθειας του ήταν 22 kW ηλεκτρισμού, απόρροια της ελλιπούς τεχνογνωσίας εκείνη την εποχή. Η εγκατάσταση καταστράφηκε αργότερα από έντονα καιρικά φαινόμενα (Chiles J., 2009).

Η βασική ιδέα λειτουργίας από εκείνη την εποχή μέχρι σήμερα είναι η ίδια. Ειδικές συστοιχίες αγωγών αντλούν από τον βυθό το κρύο νερό και από την επιφάνεια το ζεστό σε ειδικές κατασκευές στις οποίες είτε με την βοήθεια ενός ακόμα υγρού είτε όχι λαμβάνουν χώρα οι απαραίτητες διεργασίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλόγως με την διαδρομή του νερού από την αρχή μέχρι το τέλος των διεργασιών οι εγκαταστάσεις χωρίζονται σε ανοιχτού κύκλου, κλειστού κύκλου και υβριδικές (Charlier R. and Justus J.R., 1993). Επεξηγηματικά:

- i. Ανοιχτού κύκλου: το ζεστό νερό της επιφάνειας μεταφέρεται σε έναν θάλαμο κενού αέρος και εξατμίζεται, ενώ το αλάτι κατακάθεται στον πάτο του θαλάμου. Ο ατμός διέρχεται μέσω στροβίλων, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας, πριν συμπυκνωθεί με την αγωγή του κρύου νερού από τον βυθό της θάλασσας. Προϊόν της

συμπύκνωσης αυτής είναι λίτρα αφαλατωμένου νερού τα οποία χρησιμοποιούνται για ύδρευση και άρδευση (Εικόνα 1.13a).

- ii. Κλειστού κύκλου: πρόκειται για πιο αποδοτικά συστήματα. Το νερό από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέρεται σε θαλάμους θέρμανσης, αυξάνοντας την θερμοκρασία αυτού και εξατμίζοντας ένα άλλο υγρό το οποίο τοποθετείται σε αυτούς. Επιλεκτικά το υγρό αυτό έχει χαμηλό σημείο βρασμού, διότι η θερμοκρασία βρίσκεται σε επίπεδα δωματίου. Η αμμωνία, το προπάνιο και οι χλωροφθοράνθρακες πληρούν τις προϋποθέσεις και προτιμώνται συνήθως. Ο ατμός προκαλεί την κίνηση στροβίλων και την παραγωγή ενέργειας πριν συμπυκνωθεί και σε αυτή την περίπτωση με την βοήθεια του κρύου νερού. Η διαφορά είναι ότι το προϊόν είναι υγρή αμμωνία η οποία θα ξαναχρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο παραγωγής ενέργειας. Οι προπέλες σε αυτά τα συστήματα είναι μικρότερες από στα συστήματα ανοιχτού τύπου διότι η πίεση από το υγρό που εξατμίζεται είναι μεγαλύτερη (Εικόνα 1.13b).
- iii. Υβριδικές: συνδυασμός συστημάτων ανοιχτού και κλειστού τύπου. Αρχικά, το νερό εξατμίζεται σε χαμηλή πίεση (χαρακτηριστικό συστήματος ανοιχτού τύπου) και ο ατμός της εξατμίζει, διαδοχικά, ένα άλλο υγρό με χαμηλό σημείο βρασμού (χαρακτηριστικό συστήματος κλειστού τύπου). Πλεονέκτημα και για της υβριδικές εγκαταστάσεις αποτελεί η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. (Lewis A. et al., 2011)



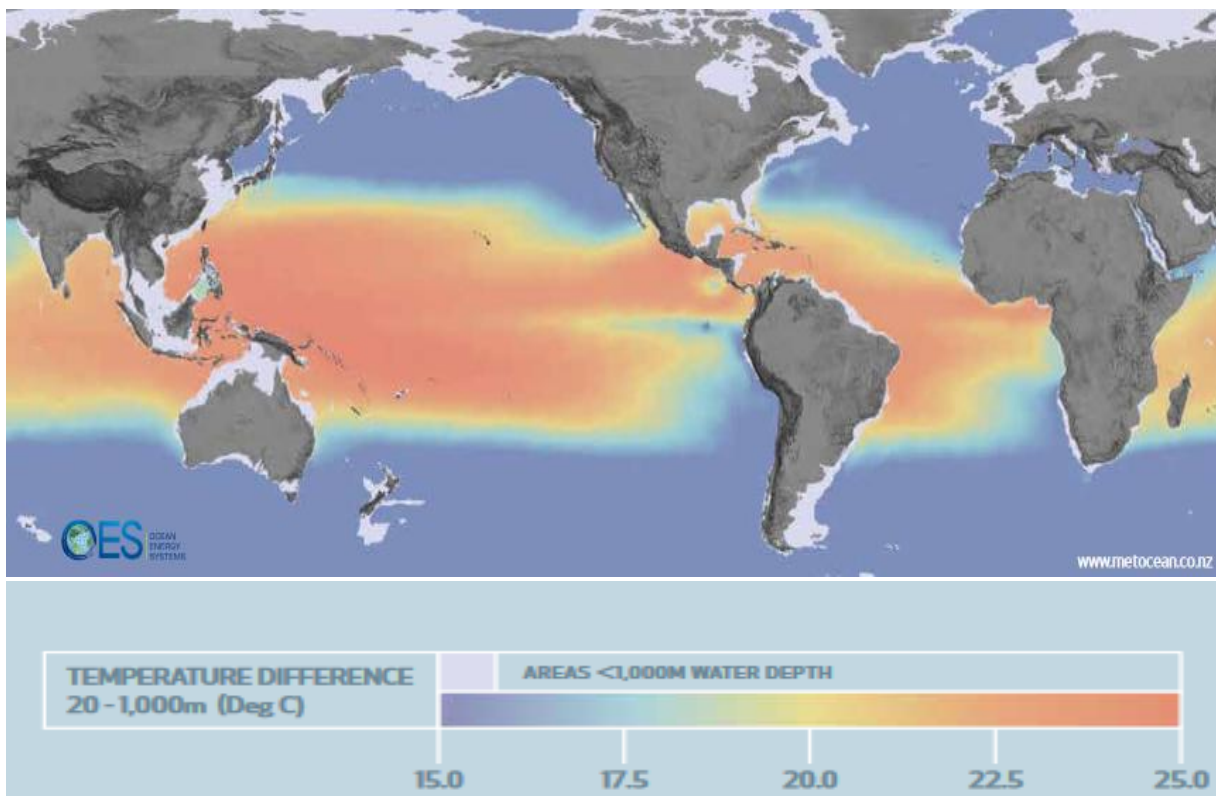
Εικόνα 1.13 Σχηματική αναπαράσταση εγκαταστάσεων:

a) ανοιχτού κύκλου και b) κλειστού κύκλου.

(Πηγή: [www.large.stanford.edu](http://www.large.stanford.edu))

Αυτές οι μονάδες παραγωγής θερμοδυναμικής ενέργειας θεμελιώνονται είτε στην στεριά είτε στην θάλασσα, σε βάθος που δεν ξεπερνάει τα 100 m περίπου. Σημαντική ανάπτυξη σημειώνεται, στην κατασκευή πλωτών μονάδων οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν σε διάφορες τοποθεσίες. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, όσον αφορά την πρώτη κατηγορία η συντήρηση της μονάδας είναι ευκολότερη αλλά ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην εγκατάσταση και την συντήρηση των αγωγών που μεταφέρουν το κρύο νερό στην μονάδα, οι οποίοι υπόκεινται σε καταπονήσεις λόγω της ζώνης θραύσης των κυμάτων. Η θεμελίωση βαθύτερα της ζώνης θραύσης εκμηδενίζει τον κίνδυνο αυτόν. ωστόσο η θεμελίωση και η συντήρηση γίνεται με πιο αυστηρούς κανόνες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απαίτηση μεγάλων σε μήκος καλωδίων μεταφοράς ενέργειας καθιστά την λύση αυτή ακριβότερη από την πρώτη. Στους πλωτούς σταθμούς, από την άλλη, προβλήματα που σχετίζονται με της δυσμενείς καιρικές και κυματικές συνθήκες στα ανοιχτά καλούνται να αντιμετωπιστούν. Βαρύνουσας σημασίας είναι η αγκυροβόληση τους στον βυθό αλλά και η αντοχή των καλωδίων μεταφοράς ενέργειας στην στεριά και των αγωγών τροφοδότησης νερού στην μονάδα.

Η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας συγκριτικά με την θερμοκρασία σε βάθος 1000 m περίπου, που απαιτείται για να αποδώσει ένας σταθμός είναι 20°C. Ο χάρτης στην εικόνα 1.14 απεικονίζει της θερμοκρασιακές μεταβολές του νερού σε βάθος 20 m και 1000 m.



**Εικόνα 1.14** Θερμοκρασιακές διαφορές στα 20 m και στα 1000 m  
(Πηγή: Huckerby J. et al., 2012)



Είναι εμφανές ότι:

- i. Οι μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασιακής μεταβολής εμφανίζονται στην Ισημερινή ζώνη.
- ii. Στις Φιλιππίνες, την Ινδονησία και σε άλλα τροπικά νησιά του Ειρηνικού ωκεανού καθώς και της βόρειες ακτές της Αυστραλίας η διαφορά θερμοκρασίας φτάνει μέχρι και τους 25°C.
- iii. Όσον αφορά την Αμερική, οι βορειοανατολικές ακτές της λατινικής Αμερικής, η ‘διώρυγα’ που ενώνει την λατινική Αμερική με της Ηνωμένες Πολιτείες την Αμερικής καθώς και τα νησιά της Καραϊβικής παρουσιάζουν μεταβολές άνω των 20°C.
- iv. Σημαντικά ποσά ενέργειας προσφέρουν οι ακτές της Ινδίας της και οι ακτές της Γουινέας, της Γκάνας και της Νιγηρίας στην αφρικανική ήπειρο.
- v. Τέλος παρατηρούμε ότι ολόκληροι ήπειροι, σαν την Ευρώπη, και μεγάλες χώρες σαν, τον Καναδά και την Ρωσία, δεν είναι δυνατόν να βρουν διέξοδο στην συγκεκριμένη μορφή ενέργειας.

Η πρώτη απόπειρα μετατροπής της θερμοδυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική πιστώνεται στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το πρωτότυπο ‘Mini-OTEC’ κατασκευάστηκε το 1979 και εγκαταστάθηκε στην νήσο Χαβάη. Πρόκειται για μία πλωτή συσκευή, κλειστού κύκλου η αποδοτικότητα της οποίας βασιζόταν στις φυσικές ιδιότητες της αμμωνίας. Η ονομαστική ισχύς του ήταν 53 kW, αλλά τα προβλήματα άντλησης επέτρεπαν την απόδοση μόνο 18 kW (Lewis A. et al., 2011). Ακολούθησε σημαντικός αριθμός επιχειρήσεων σε χώρες όπως η Ιαπωνία και η Ινδία, σε τροπικά νησιά του Ειρηνικού και της Καραϊβικής και σε άλλες περιοχές, κατά κύριο λόγο σε πειραματικό επίπεδο. Τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, η ανάγκη αξιοποίησης περισσότερων ανανεώσιμων πηγών συμβάλλει στην εντατικοποίηση των προσπαθειών και με την συνδρομή της εμπλουτισμένης τεχνογνωσίας η αποδοτικότητα των συστημάτων αυξάνεται. Τον Αύγουστο του 2015 στην Χαβάη εγκαινιάστηκε ένας δοκιμαστικός σταθμός ισχύος 100 kW ο οποίος τροφοδοτεί περίπου 120 νοικοκυριά. Απώτερος σκοπός είναι η κατασκευή, μελλοντικά, ενός πλωτού σταθμού στην περιοχή ο οποίος θα τροφοδοτεί 120.000 νοικοκυριά ([www.makai.com](http://www.makai.com)). Προς το παρόν, υπό κατασκευή βρίσκεται στην νήσο Martinique στην Καραϊβική θάλασσα το έργο με όνομα NEMO. Το 2014 εγκρίθηκε η χρηματοδότηση του και αν ολοκληρωθεί με επιτυχία η κατασκευή θα αποτελεί την μεγαλύτερη μονάδα καθώς με ισχύ 10 MW θα εξυπηρετεί 35.000 περίπου νοικοκυριά ([www.naval-group.com](http://www.naval-group.com)).

Σε κάθε μελέτη τέτοιων έργων λαμβάνονται υπόψη, φυσικά, τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα της ανθρώπινης παρέμβασης στον θαλάσσιο βιότοπο. Η αποτίμηση αυτών σε συνδυασμό με τον χάρτη της εικόνας 1.14 καθορίζουν την βέλτιστη λύση για την ανθρωπότητα και το περιβάλλον.

Ξεκινώντας με τα πλεονεκτήματα:

- ❖ Η συνεχής ανανέωση των πόρων, καθιστά την πηγή σπουδαία.
- ❖ Ενέργεια παράγεται 24 ώρες την ημέρα καθ’ όλη την διάρκεια του έτους, αφού οι ωκεανοί λειτουργούν ως χώροι αποθήκευσης θερμότητας και κατά συνέπεια και ενέργειας (σταθερότητα δικτύου).
- ❖ Ο περιβαλλοντικός κίνδυνος είναι μικρός.
- ❖ Ελάχιστη ή καμία δέσμευση γης για την εγκατάσταση των σταθμών παραγωγής ενέργειας.

- ❖ Η παραγωγή πόσιμου νερού το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση και άρδευση.
- ❖ Η χρήση του κρύου νερού που αποβάλλεται για κλιματισμό, ψύξη ακόμα και για δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη οργανισμών, όπως τα ψάρια και η άλγη.
- ❖ Η ηχητική όχληση είναι ελάχιστη.
- ❖ Η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

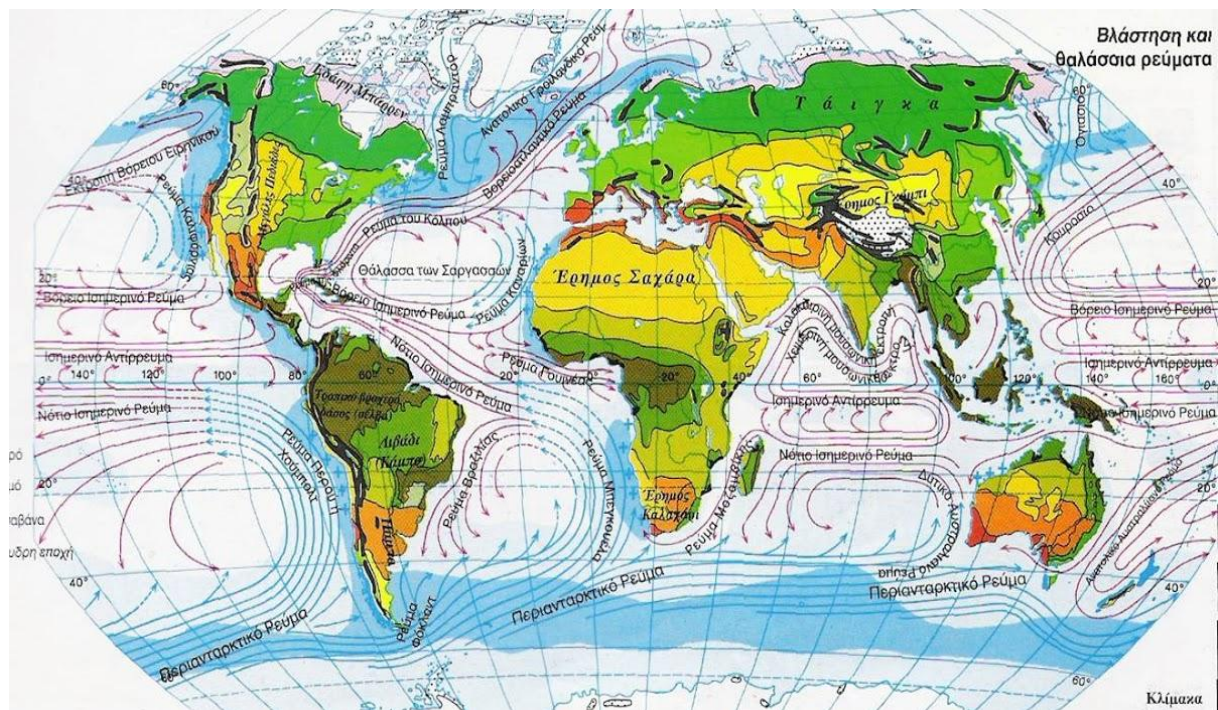
- ❖ Απαιτείται ενέργεια για την άντληση των υδάτων και την προσαγωγή της στους ειδικούς θαλάμους.
- ❖ Η άντληση κρύου νερού από τον βυθό συνεπάγεται την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) σε ποσοστό 10% από όσο θα απελευθέρωνε μία εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.
- ❖ Η θεμελίωση των εγκαταστάσεων στο διαβρώσιμο θαλάσσιο περιβάλλον, διέπεται από αυστηρούς κανόνες καθώς εγκυμονεί κινδύνους.
- ❖ Η συντήρηση των καλωδίων μεταφοράς ενέργειας και των αγωγών μεταφοράς νερού λόγω των θαλάσσιων διαταραχών είναι απαιτητική.
- ❖ Δύσκολη είναι και η συντήρηση των θαλάμων κενού αέρος.
- ❖ Τα προβλήματα ιζηματογενούς φύσης στις περιοχές άντλησης κρύου νερού.

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας είναι δυνατόν να προσφέρει αυτονομία στα τροπικά νησιά με την παραγωγή ενέργειας και πόσιμου νερού. Εμπειριστικώς μελέτες για το κόστος των συγκεκριμένων μονάδων δεν υφίστανται ακόμα, διότι οι περισσότερες διατάξεις είναι πειραματικές. Εκ πρώτης όψεως, αποτελεί μια πηγή ενέργειας με περισσότερες δυνατότητες από της προαναφερθείσες και με λιγότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Είναι απαραίτητο, φυσικά, να σταθμιστεί και ο παράγοντας κλιματική αλλαγή που θα επηρεάσει αρνητικά τις δυνατότητες αυτές στο μέλλον, ως έναν βαθμό.

#### 1.3.4 Ενέργεια λόγω θαλάσσιων ρευμάτων

Θαλάσσια ρεύματα ονομάζονται οι μετακινήσεις μεγάλων μαζών νερού προς ορισμένη κατεύθυνση στους ωκεανούς με μικρή μεταβλητότητα. Τα ρεύματα αυτά μοιάζουν με ποταμούς, μέσα στην θάλασσα, ρέοντας είτε στην επιφάνειά της (επιφανειακά ρεύματα) είτε στον πυθμένα (βαθιά ρεύματα). Τα επιφανειακά ρεύματα κατευθύνονται συνήθως από τους ανέμους αναπτύσσοντας δεξιόστροφες ροές στο βόρειο ημισφαίριο και αριστερόστροφες στο νότιο ημισφαίριο (Εικόνα 1.15). Τα βαθιά ρεύματα συντηρούνται κυρίως από τις διαφορές θερμοκρασίας και αλατότητας στα σημεία εμφάνισής τους. Ο δεύτερος διαχωρισμός των ρευμάτων είναι σε ψυχρά και θερμά. Όταν η θερμοκρασία τους είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία των νερών που τα περιβάλλουν γίνεται λόγος για θερμά ρεύματα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση τα ρεύματα χαρακτηρίζονται ψυχρά. Εφόσον οι ροές είναι ισχυρές επηρεάζουν και το κλίμα των γειτονικών περιοχών της μεταβάλλοντας αντίστοιχα την θερμοκρασία των αυρών που φυσούν πάνω από αυτές ([www.physiclessons.blogspot.gr](http://www.physiclessons.blogspot.gr)). Για παράδειγμα, το ψυχρό θαλάσσιο ρεύμα του Χούμπολτ, που ρέει κατά μήκος του Περού, καθιστά το κλίμα της πρωτεύουσας του, της Λίμα, δροσερότερο από το τροπικό κλίμα της Ισημερινής ζώνης στην οποία βρίσκεται.

Τα ρεύματα γενικά διευκολύνουν τα μεγάλα ιστιοπλοϊκά ταξίδια και συμβάλλουν στην διάδοση διαφόρων μορφής ζωής σαν τα χέλια. Το σημαντικότερο, εντούτοις είναι ότι αποτελούν μια πηγή ενέργειας, ανεξερεύνητη σε μεγάλο βαθμό.. Ο χάρτης της εικόνας 1.15 απεικονίζει με κόκκινο χρώμα τα θερμά ρεύματα και με μπλε χρώμα τα ψυχρά. Μερικά μόνο από αυτά θεωρούνται αξιοποιήσιμα αναπτύσσοντας επαρκείς ταχύτητες της τάξεως των 2 m/s (Leaman K.D. and Molinari R.L., 1987). Προφανώς και η δυναμική ρευμάτων με μικρότερες ταχύτητες ενδείκνυται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο η τεχνολογία και οι πρακτικές λειτουργίας βελτιώνονται.



Εικόνα 1.15 Θαλάσσια ρεύματα σε παγκόσμια κλίμακα.

(Πηγή: [www.mankap.blogspot.gr](http://www.mankap.blogspot.gr))

Γίνετε αντιληπτό, λοιπόν, ότι,

1. Στον Ατλαντικό ωκεανό δύο είναι τα μεγάλα κυκλώματα: το ρεύμα του κόλπου (Gulf Stream) στα ανατολικά των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και του κόλπου του Μεξικού διασχίζοντας το βόρειο τμήμα του ωκεανού και δευτερευόντως το ρεύμα της Βραζιλίας στο νότιο τμήμα του.
2. Στον Ειρηνικό ωκεανό δεσπόζει το ρεύμα Κουρόσιο στα ανατολικά της Ασιατικής ηπείρου που καλύπτει τον βόρειο τομέα του ωκεανού, ενώ στον νότο ενδιαφέρον εμφανίζει το ρεύμα της ανατολικής Αυστραλίας.
3. Τελειώνοντας στον Ινδικό ωκεανό οι μουσώνες αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την δημιουργία και την συντήρηση των ρευμάτων καθώς και την κατεύθυνση αυτών. Το ρεύμα της Μοζαμβίκης είναι άκρως εκμεταλλεύσιμο λόγω της ισχύος του αλλά και λόγω της θέσης του στο στενό πέρασμα που σχηματίζεται ανάμεσα στην Μοζαμβίκη και την Μαδαγασκάρη.

Η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι παρόμοια με αυτήν της αξιοποίησης των παλιρροιακών ρευμάτων. Οι διαφορές έγκεινται στις κατευθύνσεις των ρευμάτων, (τα παλιρροιακά ρεύματα ρέουν και στις δύο κατευθύνσεις, ενώ τα ωκεάνια προς την μία μόνο

κατεύθυνση) και στις ταχύτητες (τα ρεύματα των παλιρροιών αναπτύσσουν υψηλότερες ταχύτητες από τα ωκεάνια). Πριν από δεκαετίες, έρευνες του ‘MacArthur Workshop’ κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές δυνατότητες του ρεύματος της Φλώριντας (ένα μέρος του ρεύματος του κόλπου-Gulf Stream) ανέρχονται στα 25 GW (Stewart H.B., 1974). Μέχρι στιγμής δεν έχουν αναπτυχθεί πειραματικές εγκαταστάσεις ή εγκαταστάσεις επίδειξης, αν και οι θετικές πτυχές εκμετάλλευσης της συγκεκριμένης ενέργειας είναι αρκετές:

- ❖ Τα θαλάσσια ρεύματα συντηρούνται από γενεσιουργές αιτίες όπως ο άνεμος, η διαφορά πυκνότητας, θερμοκρασίας και αλατότητας καθώς και οι δυνάμεις Coriolis, με αποτέλεσμα η πηγή να κατατάσσεται της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- ❖ Εκτιμάται ότι δεν θα υπάρξει εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων.
- ❖ Οι συσκευές μέσω των οποίων παράγεται ενέργεια (υδροστρόβιλοι) θεμελιώνονται στον πυθμένα, είναι υποθαλάσσιες και η παρέμβαση στην στεριά είναι ελάχιστη.
- ❖ Δεν υφίσταται οπτική και ακουστική όχληση για τον άνθρωπο, ενώ ταυτόχρονα δεν εμποδίζονται οι θαλάσσιες μεταφορές.
- ❖ Η πυκνότητα του νερού, είναι μεγαλύτερη από αυτή του ανέμου και εξισορροπώντας την μειωμένη ταχύτητα των μορίων του νερού διατηρεί την κινητική ενέργεια του υγρού στοιχείου σε ικανοποιητικά επίπεδα.
- ❖ Η συμβατότητα των εγκαταστάσεων με τα αιολικά πάρκα (υβριδικό σύστημα).
- ❖ Η δημιουργία καινούριων θέσεων εργασίας.

Από την άλλη μεριά, καθόλου ευκαταφρόνητες δεν είναι οι προκλήσεις οι οποίες πρέπει να ξεπεραστούν έτσι ώστε να καταστεί ανταγωνιστική η παραγόμενη από τα θαλάσσια ρεύματα ενέργεια:

- ❖ Το υψηλό κόστος λόγω της μη τυποποίησης του εξοπλισμού, καθώς και το κόστος συντήρησης στις πολύ δύσκολες καιρικές και κυματικές συνθήκες στην ανοιχτή θάλασσα.
- ❖ Η πιθανή αύξηση των τραυματισμών και της θνησιμότητας των περισσότερων ζώντων οργανισμών του βυθού.
- ❖ Το βάθος λειτουργίας φτάνει έως τα 100 m περιορίζοντας τις επιλογές αναφορικά με την επιλογή της ιδανικότερης τοποθεσίας εγκατάστασης.
- ❖ Οι πιθανές ακουστικές επιπτώσεις στην θαλάσσια ζωή και η γέννηση ενδεχόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων λόγω των υποθαλάσσιων καλωδίων.
- ❖ Η παρεμπόδιση της αλιείας.

Ο περιορισμός των περιβαλλοντικών κινδύνων και οι συμβιβασμοί μεταξύ των διαφόρων χρηστών του θαλάσσιου παράγοντα και δευτερευόντως, χρονικά, το κόστος θα καθορίσουν την συμβολή των θαλάσσιων ρευμάτων στην λύση του ενεργειακού ζητήματος του πλανήτη.

### 1.3.5 Ωσμωτική ενέργεια

Ωσμωση ονομάζεται η φυσική διαδικασία κατά την οποία μόρια διαλύτη διέρχονται μέσω ημιπερατής μεμβράνης, από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) στο διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (πυκνότερο) έως ότου οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων και στις δύο πλευρές να εξισωθούν. Αποτέλεσμα της διεργασίας αυτής είναι η συσσωρευμένη πίεση από την μονόπλευρη ροή του νερού η οποία επαρκεί για την παραγωγή αρκετά

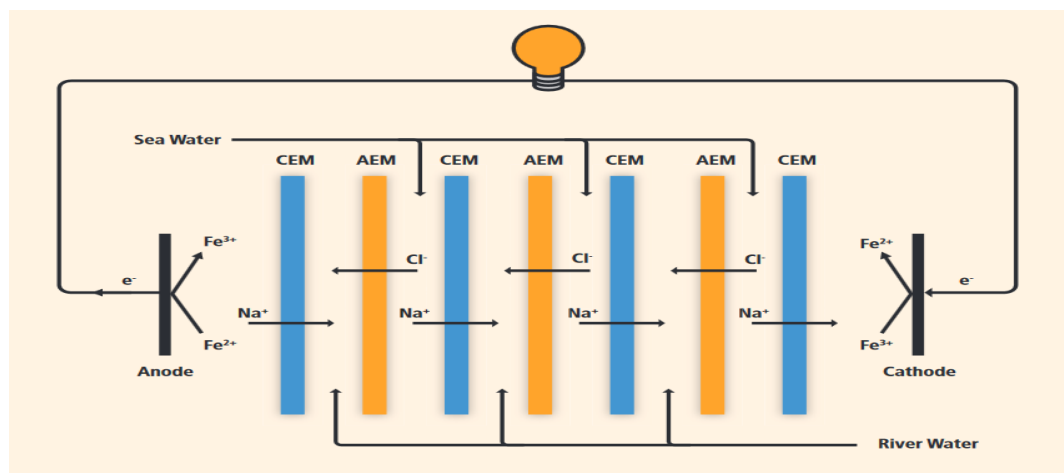
μεγάλων ποσών ενέργειας. Στην πραγματικότητα, το αραιότερο δείγμα είναι το γλυκό νερό των ποταμών και των λιμνών και το πυκνότερο το νερό της θάλασσας. Με την τοποθέτηση μια ημιπερατής μεμβράνης διαχωρισμού των δύο υγρών σε ειδικές κατασκευές και κατάλληλους μετατροπείς παράγεται ενέργεια σε αξιοποιήσιμες μορφές.

Μέχρι το 1970 η επιστημονική κοινότητα δεν είχε ασχοληθεί καθόλου με την εκμετάλλευση της ώσμωσης για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών καθώς δεν υπήρχαν τα κατάλληλα τεχνολογικά μέσα για της αντίστοιχες δράσεις. Η κατάσταση άλλαξε με την δημιουργία των πρώτων αποτελεσματικών ημιπερατών μεμβρανών. Ο ισραηλινός επιστήμονας Sidney Loeb επιχείρησε για πρώτη φορά την δεκαετία του 1970 να παράγει οσμωτική ενέργεια στις εκβολές του ποταμού Ιορδάνη στην Νεκρά Θάλασσα. Ταυτόχρονα, πρότεινε την κατασκευή και άλλων παρόμοιων μονάδων, ωστόσο το πλάνο του δεν εφαρμόστηκε ποτέ ([www.iefimerida.gr](http://www.iefimerida.gr)).

Δύο είναι οι μέθοδοι μετατροπής της συγκεκριμένης ενέργειας σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας ημιπερατές μεμβράνες:

- i. Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis, RED)
- ii. Η παρατεταμένη πίεσης ώσμωση (Pressure Retarded Osmosis, PRO).

Κατά την διάρκεια της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης συμπυκνωμένο διάλυμα άλατος έρχεται σε επαφή με το γλυκό νερό μέσω μιας εναλλασσόμενης σειράς μεμβρανών ανταλλαγής ανιόντων και κατιόντων (AEM και CEM) (εικόνα 1.16). Ρέοντας σε αυτή την ειδική διάταξη τα κατιόντα νατρίου  $\text{Na}^+$  κατευθύνονται, από τις αντίστοιχες μεμβράνες στην κάθοδο και τα ανιόντα χλωρίου  $\text{Cl}^-$  στην άνοδο. Η χημική διαφορά δυναμικού γεννά τάση σε κάθε μεμβράνη. Το συνολικό δυναμικό του συστήματος είναι το άθροισμα των διαφορών δυναμικού σε κάθε ζεύγος μεμβρανών ανταλλαγής ανιόντων και κατιόντων (Lewis A. et al., 2011).

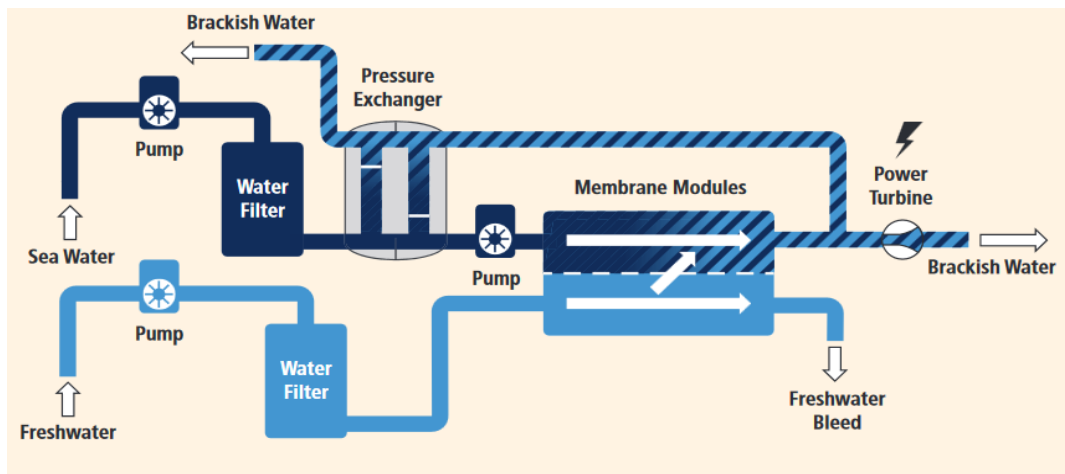


Εικόνα 1.16 Αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (RED).

(Πηγή: Van den Ende and Groeman, 2007)

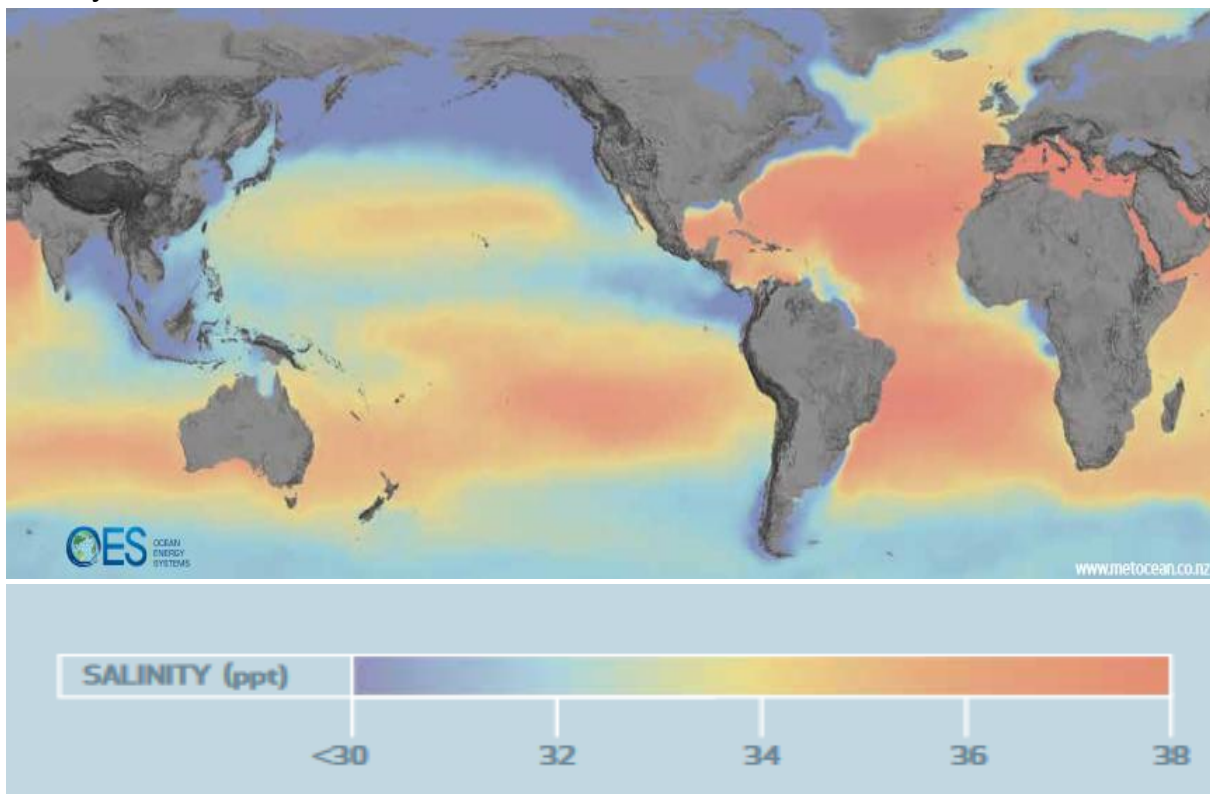
Η ώσμωση παρατεταμένης πίεσης στηρίζεται στην διαφορά συγκέντρωσης άλατος ανάμεσα σε δύο υγρά. Μια ημιπερατή μεμβράνη με μικρές οπές διαχωρίζει τα δύο υγρά επιτρέποντας μόνο στα μόρια του νερού, που είναι μικρά, να την διαπεράσουν. Τα μόρια άλατος του θαλασσινού νερού δεν έχουν αυτή την δυνατότητα. Το νερό επιδιώκει την μείωση της συγκέντρωσης αλατιού στο δείγμα του αλμυρού νερού και για τον λόγο αυτό ρέει προς τη

πλευρά του θαλάσσιου δείγματος αυξάνοντας την πίεση σε αυτή την μεριά. Με την αρωγή ενός ή περισσοτέρων υδροστρόβιλων η πίεση αυτή αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εικόνα 1.17) (Lewis A. et al., 2011).



Εικόνα 1.17 Ωσμωση παρατεταμένης πίεσης (PRO)  
(Πηγή: Scråmestø et al., 2009)

Η αλμυρότητα του θαλασσινού νερού κυμαίνεται συνήθως από 30 έως 50 ppt (parts per thousand). Ειδικότερα, οι τιμές σε περιοχές ανά τον κόσμο απεικονίζονται στον χάρτη της εικόνας 1.18.



Εικόνα 1.18 Συγκέντρωση αλατιού στις θάλασσες (Salinity).  
(Πηγή: Huckerby J. et al., 2012)

Η αλμυρότητα των νερών των ποταμών και των λιμνών, τα οποία προέρχονται από την βροχή, το λιώσιμο του χιονιού και την ροή των υπόγειων ρευμάτων, φτάνει μέχρι την τιμή

των 0,5 ppt (Huckerby J. et al., 2012). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό τα ερευνητικά στοιχεία του παραπάνω χάρτη καθορίζουν της ιδανικότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση του εξοπλισμού παραγωγής ωσμωτικής ενέργειας. Παραδείγματα τέτοιων τοποθεσιών είναι οι εκβολές ποταμών όπως ο Κονγκό στην κεντρική Αφρική και ο Αμαζόνιος που διασχίζει την Λατινική Αμερική. Αξιοσημείωτο είναι ότι περιοχές, όπως η Μεσόγειος θάλασσα, με μικρές δυνατότητες εκμετάλλευσης των άλλων μορφών θαλάσσιας ενέργειας, πληρούν της προϋποθέσεις εμφάνισης ώσμωσης καθώς οι συγκεντρώσεις αλατιού είναι μεγάλες. Επιπροσθέτως, σπουδαίες δυνατότητες υπάρχουν στον Ατλαντικό και τον Ινδικό ωκεανό, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα αλμυροί σε όλη σχεδόν την έκταση της.

Αθροιστικά το τεχνικό δυναμικό για την παραγωγή ωσμωτικής ενέργειας ανέρχονται περίπου στις 1650 TWh/yr. Το πρώτο, πιλοτικό, ηλεκτροπαραγωγό εργοστάσιο, ισχύος 4 kW, εγκαινιάστηκε τον Νοέμβριο του 2009 στο Tofte, στην νοτιοανατολική Νορβηγία κοντά στο Όσλο, αποτελώντας το πρώτο παράδειγμα χρήσης παρατεταμένης πίεσης ώσμωσης (PRO). Στην τοποθεσία αυτή η πρόσβαση σε θαλασσινό νερό θεωρούνταν επαρκής και ποσότητες γλυκού νερού αντλούνταν από μία παραπλήσια λίμνη (Scråmestø et al., 2009). Μετά από τέσσερα (4) χρόνια η εταιρία κατασκευής αναγνώρισε ότι η τεχνολογία δεν μπορεί να αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να καταστεί ανταγωνιστική με τις προοπτικές της αγοράς εκείνης της εποχής και διέκοψε την λειτουργία του. Παρόλα αυτά, συντονισμένες έρευνες πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα αυτό και οι τεχνικές αξιοποίησης της ώσμωσης βελτιώθηκαν. Αντιστοίχως, το κυριότερο παράδειγμα αξιοποίησης της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης (RED) είναι η μονάδα παραγωγής στο Afsluitdijk της Ολλανδίας. Από τον Νοέμβριο του 2014 αντλεί νερό από την θάλασσα Wadden και την λίμνη Ljsselmeer, μια περιοχή της οποίας οι δυνατότητες φτάνουν ενδεχομένως σε ισχύ 200 MW (Molenbroek E.C., 2007).



**Εικόνα 1.19** Σταθμός στο Tofte (αριστερά) και σταθμός στο Afsluitdijk (δεξιά).

(Πηγή: στιγμιότυπα από το [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))

Εν τέλει, καθοριστικός παράγοντας για την προώθηση και την εμπορευματοποίηση αυτής της μορφής ενέργειας είναι ο βαθμός υπεροχής των θετικών έναντι των αρνητικών απορροιών της. Σαφώς αναφερόμαστε σε μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία κατά κύριο λόγο είναι φιλική προς το περιβάλλον, αφού οι εκπομπές διοξειδίου (CO<sub>2</sub>) του άνθρακα είναι μικρές και

αφορούν μόνο την εγκατάσταση και την συντήρηση της μονάδας. Αξιομνημόνευτα, εντούτοις, είναι και τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- ❖ Η σταθερότητα της ενέργειας και η διαθεσιμότητα της και τις 24 ώρες της ημέρας.
- ❖ Το χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης.
- ❖ Οι μονάδες είναι αρκετά απλές και ευέλικτες ως προς τον σχεδιασμό τους.
- ❖ Η οπτική και ακουστική όχληση μπορεί να είναι ανεπαίσθητη εφόσον οι σταθμοί βρίσκονται εκβολές ποταμών και κατά κύριο λόγο σε απομακρυσμένες περιοχές. Υπάρχει και η δυνατότητα να κατασκευασθούν εν μέρει ή εντελώς υπόγειες μονάδες.
- ❖ Η δημιουργία ενός αριθμού θέσεων εργασίας.

Από την άλλη μεριά, επιτακτική θεωρείται η υπέρβαση των δυσκολιών κατά την εγκατάσταση, την λειτουργία και την συντήρηση των μονάδων καθώς και ο μετριασμός των ανεπιθύμητων επιπτώσεων στο συναφές περιβάλλον:

- ❖ Στην περίπτωση που το υφάλμυρο νερό με το πέρας της συνολικής διεργασίας αποτεθεί συμπυκνωμένο στο θαλάσσιο περιβάλλον θα προκαλέσει αλλαγή των συνθηκών και υπάρχει πιθανότητα να απειληθούν ορισμένοι θαλάσσιοι οργανισμοί (ψάρια, φυτά κ.α.) στην συγκεκριμένη περιοχή.
- ❖ Το αρχικό κόστος επένδυσης είναι υψηλό εφόσον η τεχνολογική πρόοδος είναι αισθητά μικρή.
- ❖ Η παραγωγή αναγόμενη στα κυβικά μέτρα μεμβράνης που χρησιμοποιούνται είναι μικρή.
- ❖ Τελειώνοντας, η ενέργεια δεν είναι εμπορικά αξιοποιήσιμη.



## 2. Επισκόπηση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμούς

Εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες μορφές θαλάσσιας ενέργειας, η παλιρροιακή ενέργεια θεωρείται εμπορευματοποιημένη, ενώ η κυματική συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον μετά από αυτήν. Η εργασία αυτή αφορά αποκλειστικά την αποθηκευμένη στους κυματισμούς ενέργεια. Το 2000 τέθηκε σε λειτουργία στην Σκωτία η πρώτη αξιομνημόνευτη εγκατάσταση μετατροπής της θαλάσσιας ενέργειας σε ηλεκτρισμό (Limpet 500) και από τότε έως την σημερινή εποχή έχουν κατασκευαστεί πάνω από 1000 πρωτότυπες συσκευές (Pelc R. and Fujita R., 2002). Τα κριτήρια κατηγοριοποίησης αυτών ποικίλλουν, συνηθέστερα όμως, τρία (3) είναι τα κυριότερα τα οποία λαμβάνονται υπόψη και αφορούν:

- i. Την απόσταση τους από την ακτή (τοποθεσία)
- ii. Το μέγεθος και τον προσανατολισμό τους σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης των κυμάτων
- iii. Την αρχή λειτουργίας τους (μηχανικός σχεδιασμός). (López I. et al., 2013)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν όλες οι υποκατηγορίες του παραπάνω διαχωρισμού και θα απαριθμηθούν τα υπάρχοντα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

### 2.1 Τοποθεσία

Ανάλογα με την απόσταση τους από την ακτή οι μετατροπείς χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες:

- i. Χερσαίοι (onshore)
- ii. Παράκτιοι – ακτοπλοϊκοί (nearshore)
- iii. Υπεράκτιοι (offshore).

*Χερσαίοι μετατροπείς:* θεμελιώνονται στην ακτή ή σε ρηχά νερά και αρκετές φορές είναι ενσωματωμένοι σε φράγματα ή σε κάποιο βραχώδες σημείο με κατακόρυφη κλίση. Τα σημαντικότερα προτερήματά τους είναι η εύκολη εγκατάσταση και συντήρησή τους λόγω της προσβασιμότητας της τοποθεσίας και το σχετικά μικρό μήκος των υποθαλάσσιων καλωδίων για την μεταφορά της ενέργειας στο δίκτυο. Από την άλλη μεριά, οι κυματισμοί φτάνουν στις ακτές με αισθητά μειωμένη την ενέργεια τους συγκριτικά με τα βαθιά νερά, γεγονός το οποίο οφείλεται στην αλληλεπίδρασή τους με τον πυθμένα. Εξίσου σημαντικά είναι και τα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία είναι πιθανό να προκύψουν από την ανθρώπινη παρέμβαση στην ακτή.

*Παράκτιοι μετατροπείς:* Οι συσκευές αυτές είτε θεμελιώνονται στον πυθμένα είτε είναι πλωτές και αγκυροβολούνται σε αυτόν. Και στις δύο περιπτώσεις τοποθετούνται μερικές εκατοντάδες μέτρα από την ακτή σε βάθος που κυμαίνεται από 10 m έως 25 m. Η κυματική ενέργεια σε τέτοιες αποστάσεις από την ακτή είναι σαφώς μεγαλύτερη συγκριτικά με την ενέργεια της πρώτης κατηγορίας και για τον λόγο αυτόν είναι απαραίτητο η αντοχή των συστημάτων να είναι μεγαλύτερη.

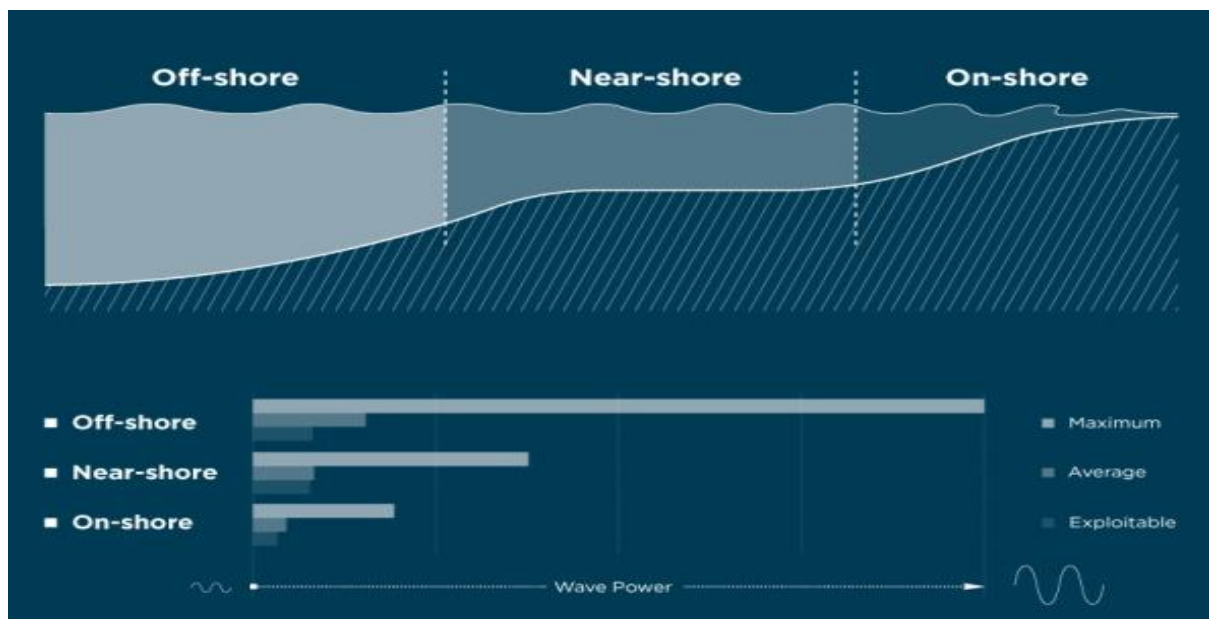
*Υπεράκτιοι μετατροπείς:* πλωτές ή βυθισμένες συσκευές οι οποίες αγκυροβολούνται στην ανοιχτή θάλασσα σε βάθη που υπερβαίνουν τα 40 m. Η κυματική ισχύς σε τέτοια βάθη είναι σπουδαία χωρίς, ωστόσο, αυτό να καθίσταται αποκλειστικά πλεονέκτημα. Αναμενόμενο είναι τα ποσά ενέργειας τα οποία εξάγονται να φτάνουν σε αρκετά υψηλά επίπεδα, ωστόσο, οι

συνθήκες είναι εντονότερες και ικανές να προκαλέσουν ευκολότερα κάποια βλάβη στον τεχνολογικό εξοπλισμό. Συνεπώς, το κόστος συντήρησης είναι υψηλότερο σε σχέση με τις προηγούμενες δύο, όπως και το κόστος των μεγάλων σε μήκος καλωδίων μεταφοράς. Συγκεντρωτικά, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά κάθε θέσης στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 2.1 Παράγοντες επιρροής της ιδανικής τοποθέτησης των σταθμών

Χαρακτηριστικά/Ζώνες	Χερσαίες	Παράκτιες	Υπεράκτιες
Κόστος εγκατάστασης	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΤΡΙΟ	ΥΨΗΛΟ
Κόστος συντήρησης	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΤΡΙΟ	ΥΨΗΛΟ
Κόστος καλωδίωσης	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΤΡΙΟ	ΥΨΗΛΟ
Διαθέσιμο Ενεργειακό δυναμικό	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΤΡΙΟ	ΥΨΗΛΟ
Κίνδυνος βλάβης	ΧΑΜΗΛΟΣ	ΜΕΤΡΙΟΣ - ΥΨΗΛΟΣ	ΥΨΗΛΟΣ

Στην εικόνα 2.1 περιγράφεται σχηματικά το ενεργειακό δυναμικό συναρτήσει της απόστασης από την ακτή σύμφωνα με έρευνες του πανεπιστημίου του Τέξας (Texas A&M University).



Εικόνα 2.1 Ενεργειακό δυναμικό συναρτήσει της απόστασης από την ακτή.  
(Πηγή: [www.waveenergyconversiontamu.weebly.com](http://www.waveenergyconversiontamu.weebly.com))

## 2.2 Μέγεθος και προσανατολισμός συσκευών

Ανάμεσα σε ένα τόσο μεγάλο πλήθος πρωτοτύπων δεν θα μπορούσαν να μην υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο μέγεθος αλλά και την τοποθέτηση των συσκευών. Επεξηγηματικά, οι κατευθύνσεις στις οποίες τοποθετούνται τα συστήματα είναι: παράλληλα με την κατεύθυνση των κυμάτων και κάθετα σε αυτή. Ο συνδυασμός των δύο αυτών κριτηρίων συμβάλει στην ομαδοποίηση των μετατροπέων σε:

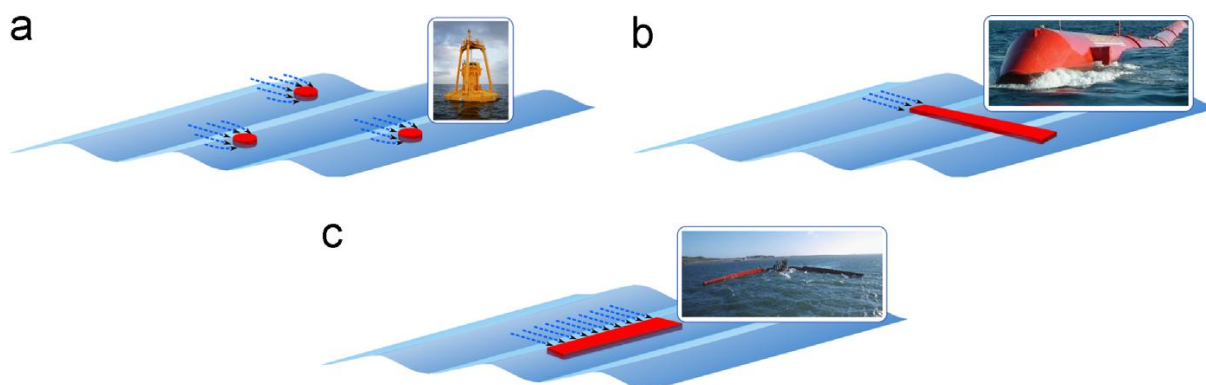
- i. Εξασθενητές ενέργειας κυματισμών (attenuators),
- ii. Σημειακούς απορροφητές ενέργειας (point absorbers)

iii. Εξολοθρευτές ενέργειας κυματισμών (terminators).

*Εξασθενητές*: συσκευές μεγάλου μήκους συγκριτικά με το μήκος κύματος και κατεύθυνση άξονα κάθετη με αυτή των κυματισμών. Αποτελούνται από κυλινδρικά μέλη τα οποία συνδέονται μέσω αρθρώσεων με αποτέλεσμα την δυνατότητα κίνησης του καθενός ανεξαρτήτως των υπολοίπων. Καθώς το κύμα διέρχεται από την συσκευή το νερό την ωθεί θέτοντας την σε κίνηση (οριζόντια και κατακόρυφη) η οποία ευθύνεται για την απορρόφηση και την μετέπειτα μετατροπή της θαλάσσιας ενέργειας (Εικόνα 2.2.b).

*Σημειακοί απορροφητές*: συσκευές μικρότερου μήκους σε σχέση με τους υπόλοιπους μετατροπείς οι οποίες εκμεταλλεύονται οποιαδήποτε κατεύθυνση της κυματικής διάδοσης για την παραγωγή ενέργειας. Ονομάζονται σημειακοί λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους σε ένα περιβάλλον αχανούς έκτασης όπως είναι οι ωκεανοί. Πρόκειται κυρίως για υπεράκτιες πλωτές συσκευές η παλινδρομική κίνηση των οποίων μετατρέπεται σε περιστροφική ή ταλαντευόμενη ανάλογα με την συσκευή γέννησης ηλεκτρισμού στον βυθό (Εικόνα 2.2.a).

*Εξολοθρευτές*: συσκευές παρόμοιες σε λειτουργία και μέγεθος με τους εξασθενητές. Η διαφορά είναι ότι τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε ο άξονάς τους να είναι παράλληλος στην κυρίαρχη κατεύθυνση των κυματισμών με σκοπό την μερική θραύση τους (Εικόνα 2.2.c).



Εικόνα 2.2 Μέγεθος και προσανατολισμός συσκευών.  
(Πηγή: Lopez I. et al., 2013)

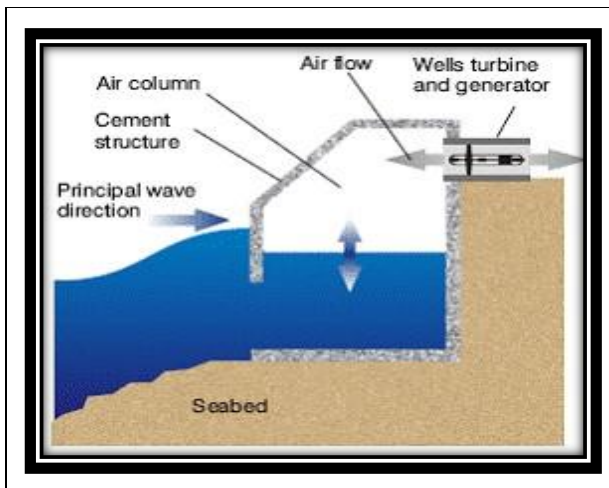
### 2.3 Αρχή λειτουργίας

Ένας τελευταίος διαχωρισμός, αναλυτικότερος και σαφέστερος από τους άλλους δύο, βασίζεται στον μηχανικό σχεδιασμό της κάθε διάταξης δηλαδή στον τρόπο με τον οποίο μετατρέπεται η θαλάσσια ενέργεια σε ηλεκτρισμό. Οι κατηγορίες που σχετίζονται με τον διαχωρισμό αυτόν είναι τέσσερις:

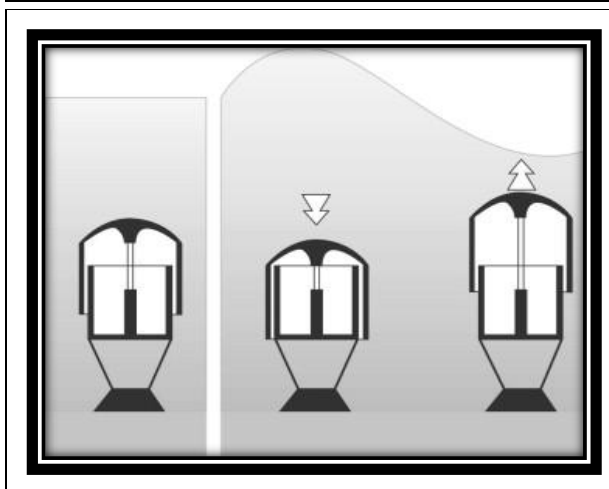
- i. Μετατροπείς εκμεταλλεόμενοι συγκεκριμένη διαφορά πίεσης
- ii. Πλωτοί μετατροπείς
- iii. Υπερπηδητοί από το υγρό στοιχείο μετατροπείς
- iv. Μετατροπείς εκμεταλλεόμενοι την κινητική ενέργεια των κυμάτων κατά την οριζόντια κατεύθυνση (Συσκευές κρούσης)

*Διαφορά πίεσης*: οι κορυφές και οι κοιλίες των κυματισμών προκαλούν μια διαφορά πίεσης ανάμεσα στο υγρό στοιχείο των θαλασσών και ενός βυθισμένου ή ημιβυθισμένου θαλάμου κατακλυσμένου από αέρα. Οι συσκευές οι οποίες λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο είναι οι μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (Oscillating Water Column) και οι μετατροπείς

που βασίζονται στην αρχή του Αρχιμήδη (Archimedes effect converters): “κάθε σώμα βυθισμένο σε ένα ρευστό δέχεται άνωση ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει”. Η πρώτη κατηγορία αφορά εγκαταστάσεις στην ακτή ή σε ρηχά νερά με γενικά χαρακτηριστικά αυτά της εικόνας 2.3. Όταν μία κορυφή κύματος ανακλάται στα τοιχώματα της κατασκευής αυξάνεται και η στάθμη του νερού στην ημιβυθισμένη στήλη αέρα συμπιέζοντας τον αέρα που ρέει προς την μόνη του διέξοδο, έναν στρόβιλο γέννησης ηλεκτρισμού. Προς την αντίθετη κατεύθυνση ρέει ο αέρας όταν μια κοιλία προσπίπτει στην κατασκευή διότι η στάθμη του νερού στον θάλαμο μειώνεται ακολουθώντας την στάθμη των κυματισμών. Αξιοσημείωτο ως προς τον τεχνολογικό εξοπλισμό είναι ότι ο στρόβιλος περιστρέφεται προς μία μόνο κατεύθυνση ανεξαρτήτως της ‘διαδρομής’ που ακολουθεί ο αέρας. Αναφορικά με την δεύτερη κατηγορία οι μετατροπείς αποτελούνται από έναν σταθερό θάλαμο γεμάτο αέρα και ένα πώμα το οποίο έχει την δυνατότητα να κινείται κατακόρυφα αναλόγως της άνωσης που του ασκεί ο εσώκλειστος αέρας. Παρατηρώντας την εικόνα 2.4 γίνεται αντιληπτό ότι αν πάνω από την συσκευή διέρχεται μία κυματική κορυφή η πίεση του υπερκείμενου υγρού είναι μεγαλύτερη από τις άλλες συνιστώσες και το πώμα ωθείται προς τον βυθό. Στην συνέχεια, καθώς η κορυφή απομακρύνεται, το πώμα αναδύεται διότι η άνωση λόγω της αλατότητας της θάλασσας αλλά κυρίως λόγω του συμπιεσμένου αέρα υπερνικά οποιαδήποτε άλλη επίδραση στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η λειτουργία αυτή παραπέμπει στην λειτουργία των εμβόλων και μέσω μιας γραμμικής γεννήτριας συλλέγεται ενέργεια.

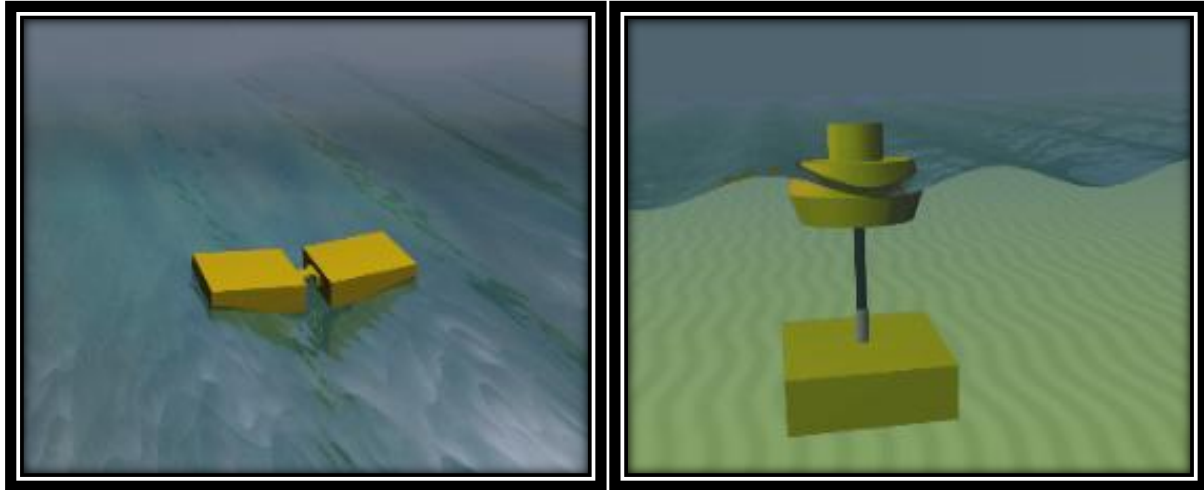


Εικόνα 2.3 Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης ύδατος.  
(Πηγή: Georgiev A. et al., 2013)



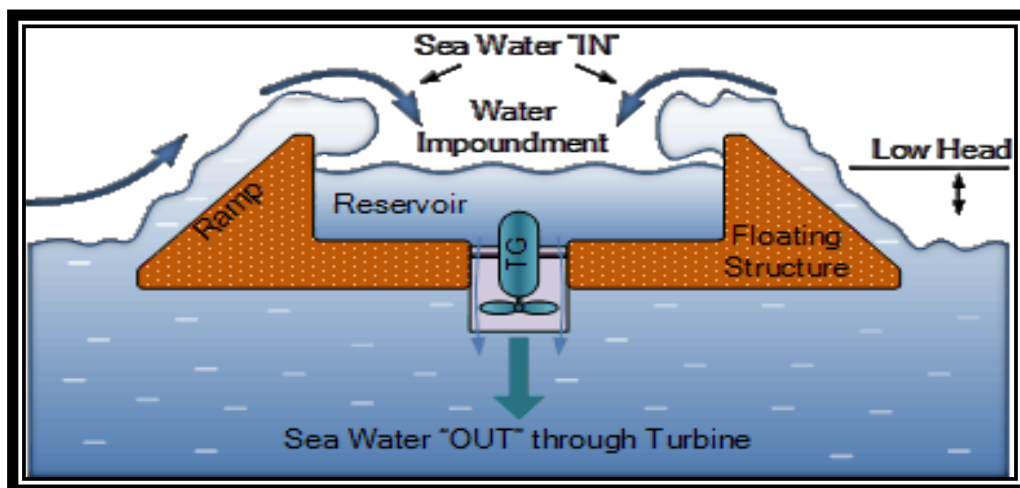
Εικόνα 2.4 Μετατροπείς βασισμένοι στην αρχή του Αρχιμήδη.  
(Πηγή: Prado M. and Polinder H., 2013)

*Πλωτοί μετατροπείς:* Κατασκευές οι οποίες έχουν την δυνατότητα να μένουν στην επιφάνεια και ανάλογα με τις κυματικές διαταράξεις να κινούνται τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια. Διαχωρίζονται σε απλές αν το σώμα τους είναι ενιαίο και αρθρωτές στις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Εικόνα 2.5 Πλωτές συσκευές μετατροπής θαλάσσιας ενέργειας σε ηλεκτρισμό  
(Πηγή: [www.oceanenergy.tudelft.nl](http://www.oceanenergy.tudelft.nl))

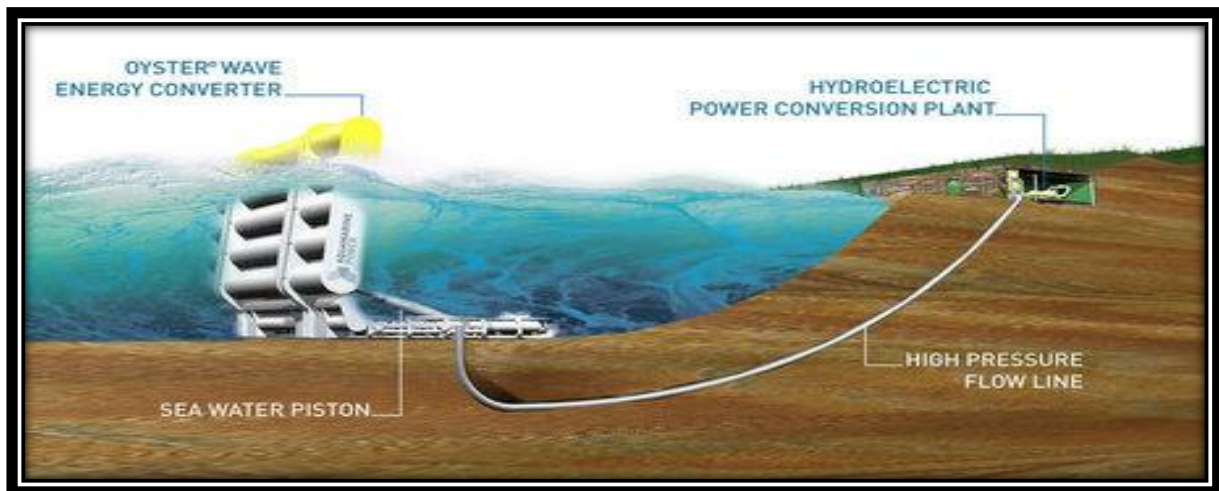
*Υπερπηδητοί μετατροπείς:* Κατασκευές οι οποίες προσομοιάζουν σε δεξαμενές νερού με αποκλειστικό σκοπό την αύξηση της δυναμικής κυματικής ενέργειας. Ειδικές ράμπες διευκολύνουν την διέλευση σημαντικών ποσών νερού σε μία δεξαμενή κατά την εξέλιξη κυματικών φαινομένων. Η δεξαμενή αυτή βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και στον πυθμένα της κείτονται στρόβιλοι-τουρμπίνες μέσω των οποίων το νερό της εναποτίθεται και πάλι στην θάλασσα. Με την περιστροφή των τουρμπινών σε κάθε τέτοια εκκένωση δημιουργούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.6 Μετατροπέας υπερπηδητός από τους κυματισμούς  
(Πηγή: [www.blackfishengineering.com](http://www.blackfishengineering.com))

*Συσκευές κρούσης:* εύκαμπτες ή αρθρωτές κατασκευές τοποθετημένες κάθετα στην κυρίαρχη διεύθυνση του κύματος. Το περύγιο (flap) της κατασκευής κινείται παλινδρομικά υπό την επίδραση των κυματισμών ενεργοποιώντας τα έμβολα (pistons) τα οποία ωθούν θαλασσινό

νερό (ή κάποιο άλλο ρευστό) στον υδροηλεκτρικό σταθμό μετατροπής ενέργειας στην ακτή (ή στα ενσωματωμένα συστήματα απορρόφησης ισχύος).



Εικόνα 2.7 Συσκευή κρούσης  
(Πηγή: [www.subseaworldnews.com](http://www.subseaworldnews.com))

## 2.4 Σημαντικότερες εγκαταστάσεις

Σε αυτές τις τεχνολογικές ευρεσιτεχνίες βασίστηκε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ολόκληρων εγκαταστάσεων με σκοπό την αξιοποίηση της θαλάσσιας ενέργειας. Από το 2000 και έπειτα οι εμπνευστές κυματικής τεχνολογίας βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη ανταπόκριση και γενναιότερη εταιρική χρηματοδότηση για την εφαρμογή των ιδεών τους. Φυσικά, εφόσον πρόκειται για καινούρια τεχνολογία οι πρώτες, χρονικά, απόπειρες βρίσκονταν κυρίως σε πειραματικό στάδιο με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Ως εκ τούτου, η τεχνογνωσία και η αποδοτικότητα των συστημάτων βελτιώνονται διαρκώς καθιστώντας τα υπολογίσιμα για την λύση ενεργειακών ζητημάτων πολλών νησιών και παραθαλάσσιων τοποθεσιών ανά τον κόσμο.

- i. Μετατροπείς θαλάσσιας ενέργειας που αποδίδουν εξαιτίας της διαφοράς πίεσης εσωτερικά και εξωτερικά ενός θαλάμου (Εικόνα 2.21).

**2.4.1 Limpet:** το 1998 το πανεπιστήμιο του Μπέλφαστ (Queen's University of Belfast) σε συνεργασία με τους συμβούλους μηχανικούς Kirk McClure και Morton και το τεχνικό πανεπιστήμιο στην Λισσαβόνα (IST Portugal) ανέθεσαν στις εταιρίες Wavegen Ltd. και Charles Brand Ltd. την κατασκευή και την δοκιμή ενός πρωτοτύπου στην Νήσο Islay στην δυτική ακτή της Σκωτίας. Η εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται στα 500 kW και από τον Νοέμβριο του 2000 τροφοδοτούσε το ηλεκτρικό δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου. Η κατασκευή αποτελείται από τρεις (3) ταλαντευόμενες στήλες ύδατος τετραγωνικών διαστάσεων (6x6) m με κλίση 40°. Η θεμελίωση της πραγματοποιήθηκε στην στεριά σε απόσταση 17 m από την ακτή, σε βάθος 6 m με σημείο αναφοράς την μέση στάθμη της θάλασσας στην περιοχή. Με το πέρας της ολοκλήρωσης του έργου αφαιρέθηκαν 2500 m<sup>3</sup> βραχώδους υπόβαθρου, ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση με τους κυματισμούς οι οποίοι προσέκρουαν κάθετα σε αυτό (Εικόνα 2.8). Ο σταθμός πλέον έχει σταματήσει να λειτουργεί. (Queen's University of Belfast, 2002)



Εικόνα 2.8 Έργα πριν την λειτουργία του σταθμού  
(Πηγή: Queen’s University of Belfast, 2002)

2.4.2 Ocean Energy Buoy (OE Buoy): άλλη μία τεχνολογία ταλαντευόμενης στήλης νερού, σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή συγκριτικά με την προηγούμενη (υπεράκτια εγκατάσταση). Σε λειτουργία τέθηκε στο Spiddal στην δυτική ακτή της Ιρλανδίας το 2007 για πειραματικούς σκοπούς ένα πρωτότυπο της συσκευής σε κλίμακα 1:4. Επί τρία χρόνια δοκιμάζονταν στις πολύ δύσκολες συνθήκες που επικρατούν στον Ατλαντικό ωκεανό συλλέγοντας πολύτιμα δεδομένα. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και το βάρος του (28 t) συνέβαλλε στην αποφυγή της ανατροπής του, ενώ ταυτόχρονα η πολύ ισχυρή αγκυροβόληση εξασφάλιζε διαρκώς την θέση του (Εικόνα 2.9). Σύμφωνα με δελτίο τύπου της εταιρίας Ocean Energy Ltd. Έχει δρομολογηθεί η εγκατάσταση ενός όμοιου πλωτού έργου εγκατεστημένης ισχύος 1,25 MW στην νήσο Χαβάη, το φθινόπωρο του 2018. ([www.oceanenergy.ie](http://www.oceanenergy.ie))



Εικόνα 2.9 Κυματικές – καιρικές συνθήκες και αγκυροβόληση της OE Buoy.  
(Πηγή: [www.oceanenergy.ie](http://www.oceanenergy.ie))

2.4.3 Mk1: ο μαθηματικός και ωκεανογράφος Tom Denniss εμπνεύστηκε την συγκεκριμένη τεχνολογία και η εταιρία Energetech την κατασκεύασε (η Energetech υφίσταται από το 1997 και μετονομάστηκε σε Oceanlinx το 2007). Η Mk1 είναι ένας παράκτιος σταθμός στο λιμάνι Kembla στην νότιο ανατολική ακτή της Αυστραλίας, ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία το 2005 με ονομαστική ισχύ 500 kW. Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο της ταλαντευόμενης στήλης νερού. Τα παραβολικής μορφής τοιχώματα του, από την πλευρά των εισερχόμενων

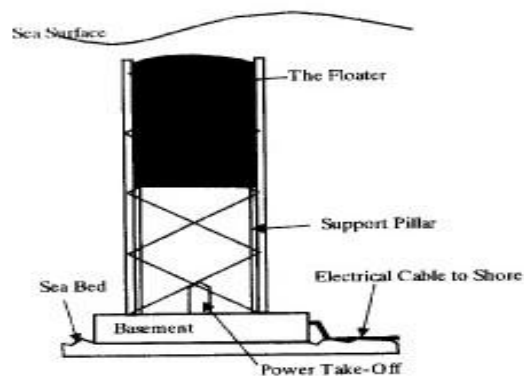
κυμάτων είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του (Εικόνα 2.10). Πρόκειται για μία οξυδερκή προσθήκη, διότι συμβάλλει στην αύξηση του ύψους των κυμάτων ανάκλασης με συνέπεια την ταυτόχρονη αύξηση της διαφοράς πίεσης, του κομβικού παράγοντα για απόδοση ενέργειας. Το 2009 η εταιρία αποφάσισε την διακοπή της λειτουργίας του εφόσον είχαν αποκομιστεί σημαντικές πληροφορίες και εξασφαλίστηκε η κατάλληλη χρηματοδότηση για νέα πιο προσοδοφόρα συστήματα (Brown S., 2016).



Εικόνα 2.10 Λήψη Mk1 από ψηλά  
(Πηγή: [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))

2.4.4 Archimedes Wave Swing (AWS): το έργο αυτό ήταν έμπνευση της Teamwork Technology (βάση στην Ολλανδία) από το 1993 και προορίζονταν για πειραματικούς σκοπούς. Η ομάδα αυτή μαζί με τους συνεργάτες της σύστησαν μια ολόκληρη επιχείρηση η οποία ειδικεύεται στην αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας, την AWS Ocean Energy Ltd. (βάση στην Σκωτία). Τον Μάιο του 2004 ολοκληρώθηκε η υλοποίηση της έμπνευσής τους και πλοηγήθηκε στις ακτές της Πορτογαλίας κοντά στην πόλη Πόρτο. Το έργο αυτό αποτελείται από μία ορθογώνια βάση με έναν (1) πυλώνα γεμάτο νερό σε κάθε γωνία ισορροπίας και έναν (1) κεντρικό κύλινδρο, την συσκευή παραγωγής ενέργειας ύψους 38 m και διαμέτρου 9 m μέσα σε έναν χαλύβδινο κλωβό για λόγους ασφαλείας. Πάνω από τον κύλινδρο ένας πλωτήρας κινείται κατακόρυφα αναλαμβάνοντας τον ρόλο του πώματος που συμπιέζει τον εσώκλειστο στον κύλινδρο αέρα. Η εγκατάσταση αγκυροβολείται στον πυθμένα και βυθίζεται όσο γεμίζονται οι τέσσερις (4) γωνιακοί πυλώνες ώστε να αρχίσει την λειτουργία της σε μια περιοχή βάθους 40 m (Εικόνα 2.11). Το Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσει ο πλωτήρας είναι 2,2 m/s και η εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται στα 2 MW. Ο σχεδιασμός της πρώτης αυτής έκδοσης ήταν αντιοικονομικός, όσον αφορά τις πρώτες ύλες και την επένδυση κεφαλαίων, ωστόσο τα μελλοντικά πρωτότυπα προβλέπεται να είναι μικρότερες πλωτές συσκευές, αγκυροβολημένες στον πυθμένα με καλύτερη απόδοση (Polinder H. and Scuotto M., 2005).





Εικόνα 2.11 Σχεδιαστική απεικόνιση του έργου.  
(Πηγή: Pontes T., “Wave Energy Exploitation”, 2010)

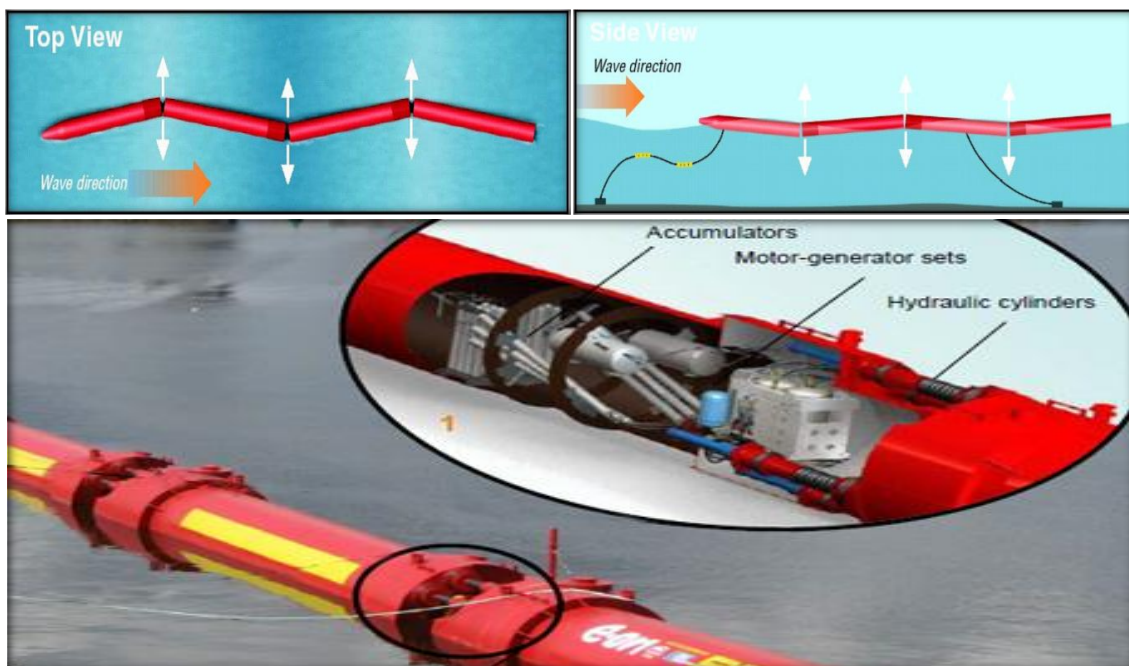
**ii. Πλωτοί μετατροπείς ενέργειας (Εικόνα 2.22).**

2.4.5 Wave Star: η ομώνυμη εταιρεία κατασκευής της μονάδας σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Aalborg και άλλες εταιρίες (Dong Energy και Energinet) απασχολούνται με την δημιουργία υβριδικών πάρκων, ειδικότερα με τον επιτυχή συνδυασμό κυματικής και αιολικής ενέργειας. Με έδρα την Δανία αναπτύσσει από το 2003 και έπειτα νέες συστοιχίες συλλογής της κυματικής ενέργειας. Μία από αυτές ήταν και το πρωτότυπο Wave Star ισχύος 110 kW σε κλίμακα 1:2 συγκριτικά με το πρωτότυπο εμπορικής κλίμακας (600kW). Το πρωτότυπο αυτό εγκαταστάθηκε στην τοποθεσία Hanstholm της βόρειας ακτής της Δανίας το 2009 και παραδίδει ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτρισμού της χώρας από το 2010. Η εγκατάστασή του έλαβε χώρα στο αιολικό πάρκο της περιοχής με όνομα Horns Rev 2, σε βάθος νερού με μέγιστη τιμή 6 m. Ο σχεδιασμός του είναι τέτοιος ώστε να στηρίζεται σε 4 πυλώνες με 2 πλωτήρες ενσωματωμένων σε κάθε του πλευρά μέσω βραχιόνων. Στην βάση των βραχιόνων υδραυλικοί κύλινδροι μιμούνται τις παλινδρομικές κινήσεις των πλωτήρων λόγω της κυματικής διαταραχής, μεταφέροντας την κινητική τους ενέργεια στις γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την διάρκεια των καταιγίδων παύει η λειτουργία του σταθμού και οι πλωτήρες μαζί με ολόκληρη την κατασκευή ανυψώνονται για την αποφυγή οποιασδήποτε βλάβης. Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι η ανέγερση μονάδων ισχύος 600 kW. Οι προσδοκίες της εταιρίας φαίνονται στην εικόνα 2.12: μονάδες με 20 συνολικά πλωτήρες θεμελιωμένες σε βάθος 20 μέτρων. (Marquis L. et al., 2012)



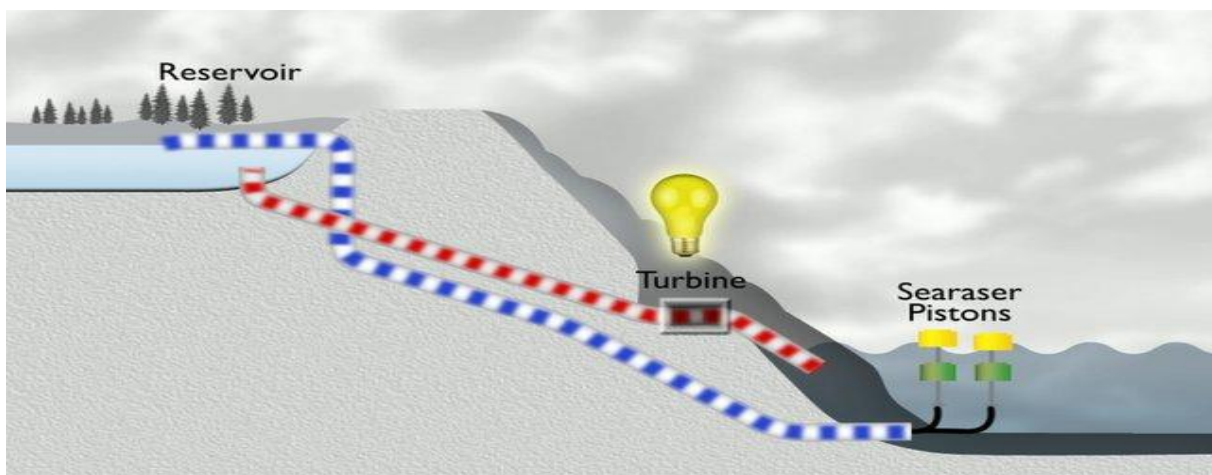
Εικόνα 2.12 Σχεδιαστική άποψη μονάδας ισχύος 600 kW.  
(Πηγή: Marquis L. et al., 2012)

**2.4.6 Pelamis P2:** από τα δημοφιλέστερα επιτεύγματα του κλάδου θεωρούνται τα παραγόμενα από την εταιρία Pelamis Wave Power συστήματα. Επεξηγηματικά, τέσσερα (4) μηχανήματα πρώτης γενιάς και ένα (1) δεύτερης γενιάς έχουν πλοηγηθεί και δοκιμαστεί ως σήμερα. Αποτελούνται από έναν αριθμό μεταλλικών κυλίνδρων που συνδέονται μέσω αρθρώσεων και έχουν την δυνατότητα να επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο σχεδιασμός αυτός υποστηρίζει την λειτουργία τους σε υπεράκτιες περιοχές μετριάζοντας την επιρροή των έντονων κυματικών φαινομένων. Αναφορικά με την απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας, όλα τα απαραίτητα μέσα βρίσκονται στο σώμα της συσκευής. Οι κατακόρυφες και οριζόντιες κινήσεις των κυλίνδρων, προσαρμοσμένες στο κυματικό προφίλ της εκάστοτε περιοχής, θέτουν σε κίνηση και τις αρθρώσεις που τους συνδέουν. Αντίσταση προβάλλουν οι υδραυλικοί κύλινδροι στο εσωτερικό των αρθρώσεων αντλώντας ρευστό σε συσσωρευτές υψηλής πίεσης επιτρέποντας την συνεχή και ομαλή παραγωγή ενέργειας (Εικόνα 2.13). Όταν η διαδικασία μετατροπής ολοκληρωθεί η ενέργεια μεταφέρεται στην στεριά μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων και του κατάλληλου εξοπλισμού. Η τελευταία δράση ήταν η εγκατάσταση του Pelamis P2 (Pelamis 2<sup>ης</sup> γενιάς) στο Orkney, βόρεια της Σκωτίας, τον Ιούλιο του 2010. Με πέντε (5) κυλίνδρους διαμέτρου 4 m και μήκους 36 m έκαστος η συνολική εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται στα 750 kW και ζυγίζει 1300 t (Yemm R. et al., 2012). Το Pelamis P2 συμμετείχε σε ένα τριετές πρόγραμμα δοκιμών που ξεκίνησε τον Οκτώβρη του 2010 και ύστερα από αυτό χρησιμοποιείται από την εταιρία για σκοπούς επίδειξης ([www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk)). Τον Σεπτέμβριο του 2008 πλοηγήθηκαν τρεις συσκευές Pelamis 1<sup>ης</sup> γενιάς 5 χιλιόμετρα από την ακτή της πόλης Povoas de Varzim της Πορτογαλίας. Με συνολική εγκατεστημένη ισχύ ίση με 2,25 MW θεωρήθηκε το πρώτο πάρκο αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας σε εμπορική κλίμακα. Ωστόσο, μετά από δύο μήνες λόγω τεχνικών και οικονομικών προβλημάτων η λειτουργία του σταμάτησε ([www.cleantech.com](http://www.cleantech.com)).



**Εικόνα 2.13** Οι κινήσεις και ο εξοπλισμός του Pelamis P2  
(Πηγές: [www.esru.stath.ac.uk](http://www.esru.stath.ac.uk) και [www.solarninovinky.cz](http://www.solarninovinky.cz))

2.4.7 Searaser: μια καινοτομία σχεδιασμένη από τον μηχανικό Alvin Smith της εταιρίας Devon Energy η οποία κατασκευάστηκε από τις εταιρίες Ecotricity και Dartmouth Wave Energy με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο. Ο σχεδιασμός της είναι απλός ενώ η εταιρία πιστεύει ότι θα παράγει ηλεκτρισμό φθηνότερα από κάθε άλλη τεχνολογία κυματικής ή οποιασδήποτε άλλης ανανεώσιμης ενέργειας. Το Searaser απαρτίζεται κατά κύριο λόγο από μία σημαδούρα στην επιφάνεια της θάλασσας, ένα ή περισσότερα πιστόνια και έναν αγωγό μεταφοράς νερού, εξαρτήματα που συνδέονται με μία δεύτερη σημαδούρα βυθισμένη και αγκυροβολημένη στον πυθμένα. Η λειτουργία της διαφέρει από αυτή των υπολοίπων πλωτών μονάδων, διότι δεν παράγει άμεσα ηλεκτρική ενέργεια. Αντιθέτως, η κατακόρυφες κινήσεις λόγω των κυματικών διαταράξεων της άνωθεν σημαδούρας ενεργοποιεί τα έμβολα τα οποία αντλούν θαλασσινό νερό σε μία δεξαμενή αποθήκευσης σε υψηλότερη στάθμη. (Αντίστοιχα με την διάμετρο των εμβόλων που κυμαίνεται από 800 mm έως 1200 mm ονοματίζονται και τα πρωτότυπα: για παράδειγμα Searaser 1200). Το νερό από την δεξαμενή επιστρέφει στην θάλασσα αφού πρώτα διέρθει από στροβίλους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 2.14). Πρόκειται λοιπόν για μια διάταξη βασισμένη στις αρχές παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Όπως ακριβώς με ένα μικρό ή μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο (φράγμα), έτσι και σε αυτή την περίπτωση επιδιώκεται η δημιουργία υψομετρικής διαφοράς για την εκμετάλλευση του υγρού στοιχείο. Σπουδαίο προτέρημα της μεθόδου αυτής είναι και η αποθηκευτικότητα του νερού με αποτέλεσμα την σταθερότητα και την διάρκεια στην παραγωγή ενέργειας ([www.ecotricity.co.uk](http://www.ecotricity.co.uk)). Τον Απρίλιο του 2009 στις Νότιες ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου κοντά στο λιμάνι του Bournemouth δοκιμάστηκε ένα παράκτιο πρωτότυπο μικρής κλίμακας με επιτυχία. Ακολούθησαν κι άλλες δοκιμές με απώτερο σκοπό την εγκατάσταση στο μέλλον του μοντέλου Searaser 1200 σε μεγαλύτερη κλίμακα. Το μοντέλο αυτό θα είναι ικανό να αντλεί 1,6 m<sup>3</sup> νερό ανά δευτερόλεπτο και να παράγει περίπου 1 MW ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτοντας τις ανάγκες 1720 νοικοκυριών σύμφωνα με τον κ. Smith. ([www.y-green.blogspot.com](http://www.y-green.blogspot.com))



Εικόνα 2.14 Γενική διάταξη μιας εγκατάστασης Searaser  
(Πηγή: [www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com))

2.4.8 PowerBuoy PB3: ενεργή στον χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι και η εταιρία Ocean Power Technology (OPT), των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (ΗΠΑ). Η ομώνυμη τεχνολογία της (PowerBuoy) χρησιμοποιείται εσχάτως σε θαλάσσιες εκτάσεις

κυρίως της Αυστραλίας, των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας. Όλα τα μοντέλα της ανήκουν στην κατηγορία των πλωτών μετατροπέων και αποτελούνται από έναν πλωτήρα, μία δοκό και ένα βυθισμένο πιάτο ανύψωσης. Η δοκός και το πιάτο δεν ανταποκρίνονται στα κύματα και παραμένουν σταθερά σε αντίθεση με τον πλωτήρα ο οποίος κινείται κατακόρυφα εφόσον επιπλέει κάθε στιγμή στην επιφάνεια. Η σχετική κίνηση του πλωτήρα ως προς την δοκό οδηγεί στην παραγωγή ‘γραμμικής’ ενέργειας που μετατρέπεται σε περιστροφική μέσω ειδικών μηχανισμών στο εσωτερικό της δοκού. Αυτήν αξιοποιεί η γεννήτρια ηλεκτρισμού και ενεργοποιείται άμεσα. Το προϊόν αυτής της διαδικασίας μεταφέρεται στην ακτή μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων αφού οι μετατροπείς αγκυροβολούνται σε μεγάλη απόσταση από την στεριά με βάθος μεγαλύτερα των 40 m. Η εταιρία κατασκευής ισχυρίζεται ότι σε δύσκολες κυματικές συνθήκες η απόδοση ενέργειας είναι συνεχής ενισχύοντας την άποψη αυτή με την πεποίθηση ότι στην δοκό υπάρχει αρκετός χώρος για την τοποθέτηση ενός μηχανισμού αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία). Παράδειγμα προϊόντος με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί το PowerBuoy PB3. Στα τέλη του Ιουνίου του 2015 παρατάχθηκε τέσσερα (4) μίλια μακριά από τις ακτές του New Jersey για την υποστήριξη παράκτιων δικτύων ασφαλείας του ναυτικού των ΗΠΑ. Η διάμετρος του πλωτήρα ισούται με 2,65 m ενώ της δοκού με 1 m και το συνολικό ύψος της κατασκευής υπολογίστηκε στα 13,3 m, ενώ το βάρος της φτάνει τους 8,3 t. Τέλος, συνολικά παράγει σε καθημερινή βάση περίπου 8,4 kWh ενώ η ενσωματωμένη μπαταρία του έχει χωρητικότητα 50 kWh, και μπορεί να φτάσει μέχρι τις 150 kWh. ([www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com)).



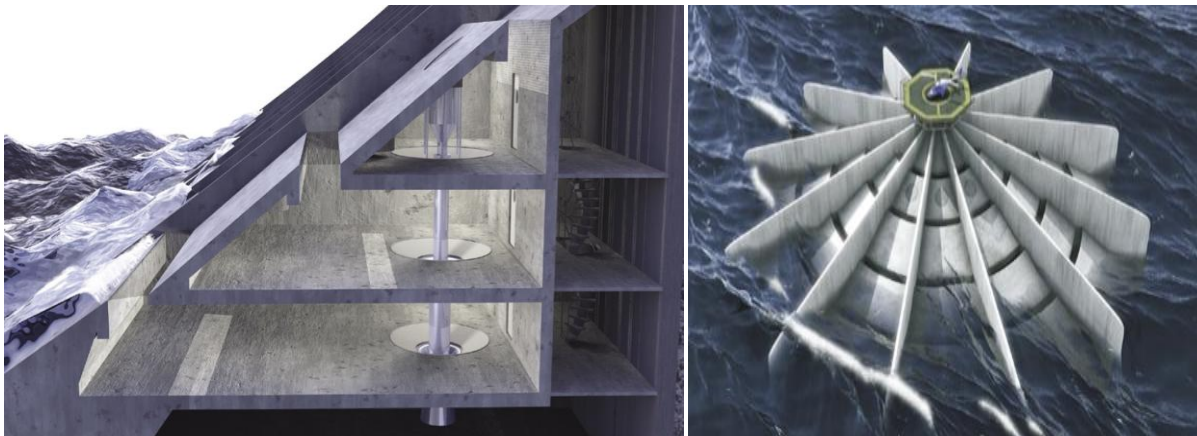
**Εικόνα 2.15** Φωτογραφική και σχηματική απεικόνιση του Searaser PB3

(Πηγές: [www.powermag.com](http://www.powermag.com) και Zou S. et. al., 2017)

**iii. Μετατροπείς υπερπηδητοί από τους κυματισμούς (Εικόνα 2.23).**

**2.4.9 SSG (Sea-wave Slot-cone Generator):** η συγκεκριμένη τεχνολογία υλοποιήθηκε από την εταιρία WAVEenergy Ltd. μετά από έξι (6) χρόνια έρευνας και ανάπτυξης του τμήματος πολιτικών μηχανικών του Πανεπιστημίου του Aalborg στη Δανία. Οι εγκαταστάσεις της θεμελιώνονται στην στεριά ή στην ζώνη θραύσης των κυμάτων, διότι απαραίτητη για την λειτουργία τους είναι η υπερπήδηση τους από τα υγρά στοιχεία των ωκεανών, ωστόσο η εταιρία σχεδιάζει και υπεράκτιες εγκαταστάσεις ίδιας τεχνολογίας για μελλοντική χρήση. Πρόκειται για στιβαρές κατασκευές από σκυρόδεμα οι οποίες αποτελούνται από έναν αριθμό δεξαμενών (συνήθως 3 ή περισσότερες) σε κατακόρυφη διάταξη στις οποίες αποθηκεύεται η

ενέργεια των εισερχόμενων κυμάτων σαν δυνητική ηλεκτρική ενέργεια. Στον πυθμένα των δεξαμενών έγκεινται, ευθυγραμμισμένοι, στρόβιλοι από τους οποίους διέρχεται το αποθηκευμένο νερό περιστρέφοντας τους με συνέπεια την παραγωγή ηλεκτρισμού (Εικόνα 2.16). Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κατηγορίας εκτός της αποθηκευτικότητας είναι και το γεγονός ότι αποδίδει σε ένα ευρύ φάσμα κυματικών συνθηκών. Πιλοτικά έργα σχεδιάζονται και λαμβάνουν υπόσταση σε χώρες όπως η Νορβηγία, η Δανία και οι ΗΠΑ. Μία από αυτές βρίσκεται στην δυτική ακτή της νήσου Kvitsøy στην Νορβηγία. Η ανοικοδόμηση του έργου ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2005 σε συνεργασία με το νορβηγικό Πανεπιστήμιο επιστήμης και τεχνολογίας (NTNU:Norwegian University of Science and Technology). Αρχικά, συλλέχθηκαν δεδομένα για το κυματικό προφίλ της περιοχής και σχεδιάστηκε το έργο. Ακολούθησε το 2008 η ανέγερση των τριών (3) δεξαμενών του έργου με σκοπό αφενός τον προσδιορισμό των καταπονήσεων που δέχεται, αφετέρου την μέτρηση των επιπέδων του νερού που εισέρχεται στις δεξαμενές. Τελευταίοι τοποθετήθηκαν οι τέσσερις (4) στρόβιλοι, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 150 kW και η γεννήτρια παραγωγής ενέργειας, ταυτόχρονα με την σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο (Vicinanza D. et al., 2012).



Εικόνα 2.16 Διαρρύθμιση υπάρχουσας (αριστερά) και μελλοντικής (δεξιά) υπεράκτια εγκατάσταση SSG.

(Πηγή: [www.waveenergy.no](http://www.waveenergy.no))

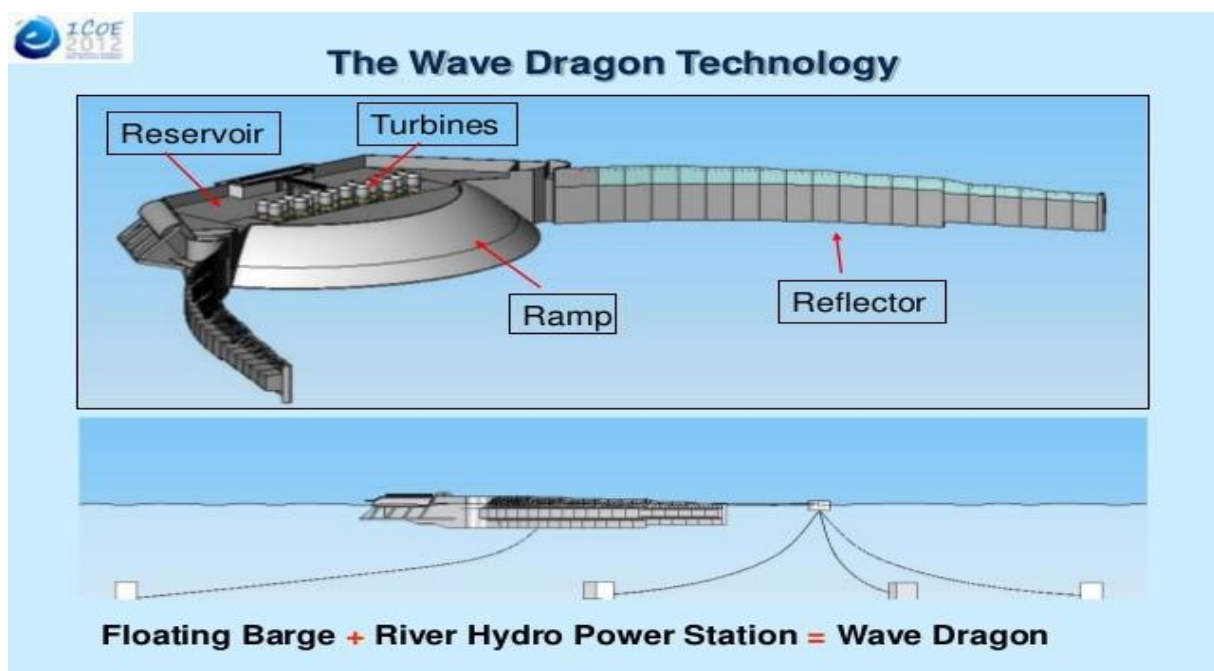
2.4.10 Wave Dragon: στην κατηγορία της τεχνολογίας υπερπήδησης εντάσσεται και αυτή η καινοτομία. Σε μεγάλη απόσταση από την ακτή (υπεράκτιες μονάδες) δύο ανακλαστήρες και μία ράμπα καθοδηγούν το νερό σε μία δεξαμενή αποθήκευσης σε στάθμη υψηλότερη από αυτήν της θάλασσας αφού ο σταθμός επιπλέει. Η διαφορά αυτή ευθύνεται για την άμεσα αξιοποιήσιμη κινητική ενέργεια του νερού κατά την ολοκλήρωση του κύκλου της διαδικασίας όπου το νερό επιστρέφει εκεί όπου ανήκει. Η εκκένωση λαμβάνει χώρα μέσω ενσωματωμένων στρόβιλων οι οποίοι περιστρέφονται προσομοιάζοντας την μέθοδο συλλογής κυματικής ενέργειας με την αντίστοιχη για την αιολική (Kofoed J.P. et al., 2004). Την περίοδο 1998-2001 ένα πρωτότυπο μελετήθηκε από το Πανεπιστήμιο του Aalborg και το 2003 ένα πρωτότυπο με διαστάσεις 57x27 m και βάρος 237 t τοποθετήθηκε στο Nissum Bredning της Δανίας τροφοδοτώντας το δίκτυο για παραπάνω από 20.000 ώρες. Ήταν μία πειραματική διάταξη σε μικρή κλίμακα (1:4) με επτά (7) στρόβιλους και εγκατεστημένη ισχύ ίση με 140 kW. Αν και σχεδιασμένο για 3 χρόνια λειτουργίας παρέμεινε στην θάλασσα μέχρι το 2010 παρά την διάβρωση του. Ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες η ονομαστική ισχύς της

μονάδας σε πλήρη κλίμακα κυμαίνεται, σύμφωνα με την εταιρία, από 1,5 MW έως 12 MW. Αναλυτικά τα συμπεράσματα του πειράματος αναγόμενα σε πλήρη κλίμακα (1:1) παραθέτονται στον πίνακα παρακάτω:

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά σταθμών Wave Dragon σε πλήρη κλίμακα για διάφορα κυματικά δυναμικά.

Κυματικό δυναμικό (kW/m)	Πλάτος (m)	Βάρος (t)	Στρόβιλοι	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)
12	170	6500	8	1,5
24	260	22000	16	4
36	300	33000	16-20	7
48	390	54000	16-24	12

(Friis Madsen E. et al, 2012)



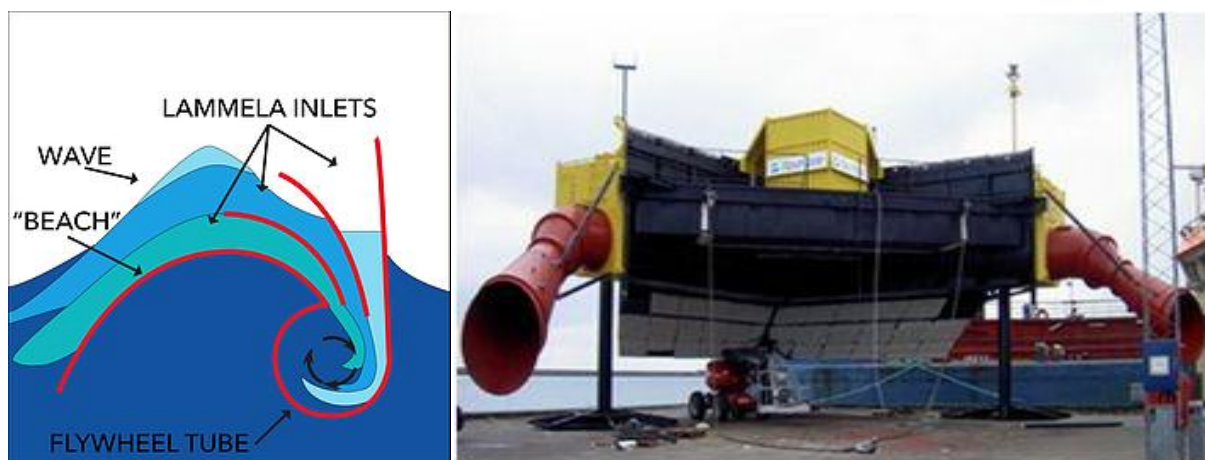
Εικόνα 2.17 Αρχιτεκτονική της διάταξης Wave Dragon

(Πηγή: Friis-Madsen E. et al., 2012)

**2.4.11 Waveplane:** η μορφή του είναι παρόμοια με αυτή του SSG παραπάνω. Επεξηγηματικά η κατασκευή είναι συμμετρική σχήματος V και στην πρόσοψη οπές, σε διαφορετικά επίπεδα, επιτρέπουν την εισροή του νερού. Χαρακτηριστικό στοιχείο της ωστόσο είναι η δυνατότητά της να επιπλέει στην επιφάνεια με την βοήθεια δεξαμενών πληρωμένων με αφρό αλλά δεν κινείται κατακόρυφα υπό την επίδραση των κυματισμών. Αυτό οφείλεται στο βάρος της, στην άκαμπτη φύση της και την τοποθέτηση ενός ή περισσότερων πλακών (πιάτων) απόσβεσης στην βάση αυτής και των βυθισμένων πυλώνων της προσφέροντας την επιθυμητή ισορροπία. Κάτω από την εγκατάσταση ο βυθός τροποποιείται ώστε να μοιάζει με μια παραλία. Όταν το κύμα διέρχεται από αυτήν, η ταχύτητα του κάτω μέρους του αυξάνεται και το πάνω μέρος του ωθείται προς την συσκευή αυξάνοντας την κινητική του ενέργεια στην πρόσκρουση με αυτήν. Το πάνω μέρος του κύματος εισέρχεται στην συσκευή όπου γίνεται ο εξής διαχωρισμός:

- ο Το εισερχόμενο στα κατώτερα επίπεδα νερό οδηγείται απευθείας στους δύο ειδικούς αγωγούς στους πόδες της
- ο Το εισερχόμενο στα ανώτερα επίπεδα νερό αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται όταν κριθεί αναγκαίο.

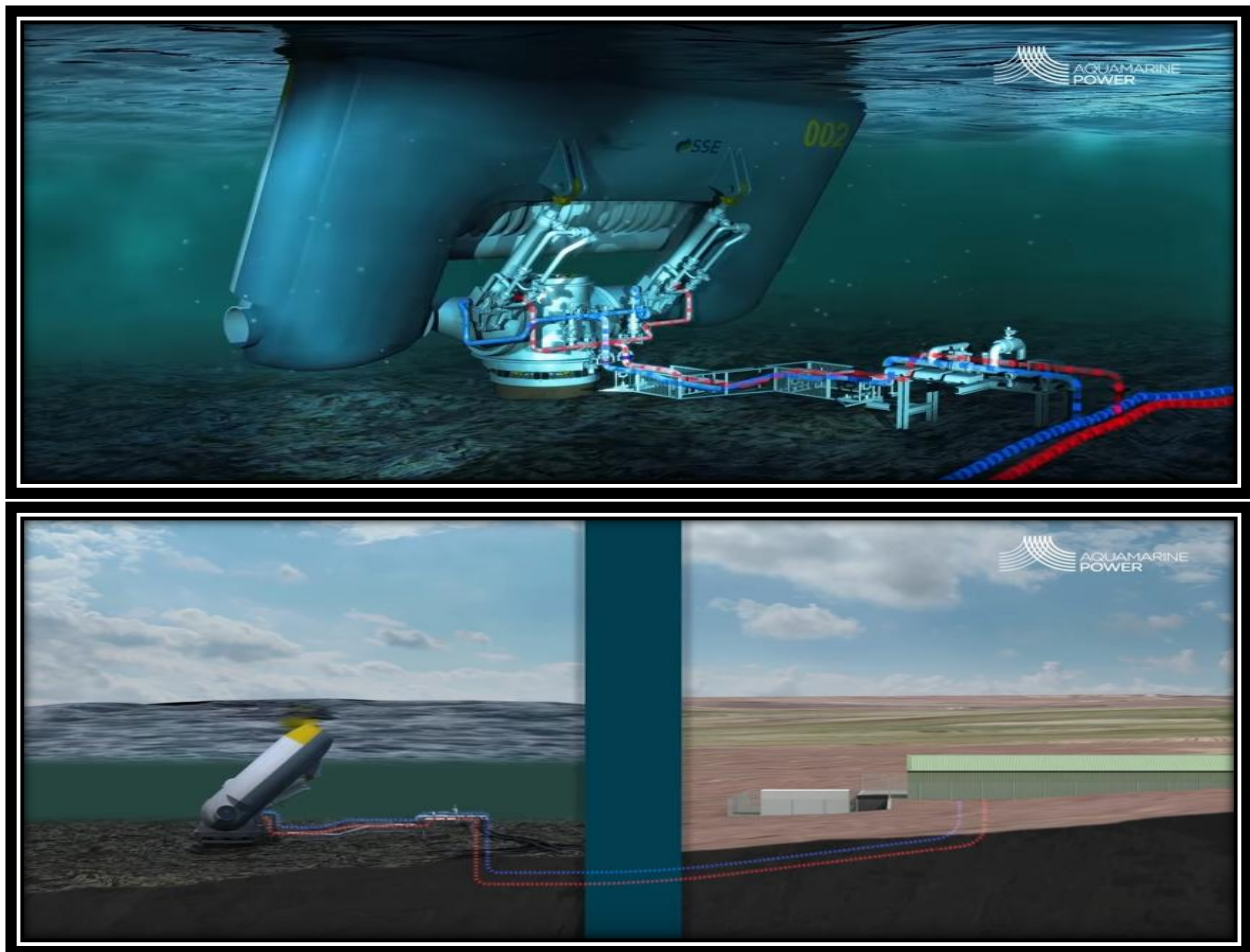
Όλες οι δεξαμενές συνδέονται με τους δύο αγωγούς που προαναφέρθηκαν με την ονομασία fly-wheel-tube. Σε αυτούς το νερό κινείται ακανόνιστα και συμπιέζεται με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητάς του σύμφωνα με τον Bernoulli. Συμπερασματικά, στο έργο εντάσσονται αρκετοί παράμετροι με στόχο την αύξηση της κινητικής ενέργειας του νερού που καθορίζει την απόδοση της γεννήτριας ηλεκτρισμού μέσω της περιστροφής των υδροστρόβιλων στο εσωτερικό των αγωγών ([www.waveplane.org](http://www.waveplane.org)). Το μεγαλύτερο σε μέγεθος μοντέλο της εταιρίας εγκαταστάθηκε το 2008 κοντά στην πόλη Hanstholm σε νερά με βάθος 15 m. Το βάρος του φτάνει τους 90 t και η ονομαστική ισχύς του τα 75 kW ([www.openei.org](http://www.openei.org)).



Εικόνα 2.18 Μορφή και διαδρομή κυμάτων (αριστερά) και η πίσω όψη του μετατροπέα (Πηγή: [www.waveplane.org](http://www.waveplane.org) και [www.openei.org](http://www.openei.org))

**iv. Μετατροπείς ενέργειας εκμεταλλεζόμενοι την κινητική ενέργεια κατά την οριζόντια διεύθυνση των εισερχόμενων και εξερχόμενων, σε μια ακτή, κυμάτων (Εικόνα 2.24).**

**2.4.12 Oyster:** μια εναλλακτική μέθοδο εξαγωγής ενέργειας από τους κυματισμούς επιχείρησε να προωθήσει, μέσω της διάταξης Oyster, η εταιρία Aquamarine που εδράζεται στο Εδιμβούργο. Η απόδοση της συγκεκριμένης συσκευής εξαρτάται από την παλινδρομική κίνηση ενός βυθισμένου (σχεδόν καθολικά) περυγίου. Η ενέργεια των εισερχόμενων και εξερχόμενων κυμάτων θέτει σε κίνηση το περύγιο ενεργοποιώντας με τον τρόπο αυτόν τα έμβολα με τα οποία είναι εξοπλισμένη η συσκευή. Τα έμβολα αντλούν υψηλής πίεσης νερό μέσω υποθαλάσσιων αγωγών στον υδροηλεκτρικό σταθμό στην στεριά. Σε αυτόν ολοκληρώνεται η μετατροπή της γραμμικής ενέργειας σε περιστροφική αρχικά, με την διέλευση του νερού από υδροστρόβιλους και τελικά, σε ηλεκτρισμό με την βοήθεια ηλεκτρικών γεννητριών. Δύο γενιές της τεχνολογίας Oyster έχουν δοκιμαστεί: το OYSTER 1 εγκατεστημένης ισχύος 315 kW και το OYSTER 800 εγκατεστημένης ισχύος 800 kW στα βόρεια της Σκωτίας, στην νήσο Orkney σε απόσταση περίπου 500 m από την στεριά σε βάθος 10 m. Μάλιστα το OYSTER 800 ξεκίνησε να λειτουργεί το 2011 για πειραματικούς σκοπούς και τον Ιανουάριο του 2012 συνδέθηκε με το ηλεκτρικό δίκτυο μέχρι το 2015 οπότε και η εταιρία Aquamarine διέκοψε την λειτουργία της ([www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk))



Εικόνα 2.19 Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας της τεχνολογίας Oyster.  
(Πηγή: στιγμιότυπο από το [www.youtube.com](http://www.youtube.com))

2.4.13 Langlee: η εγκατάσταση αυτή παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με την προηγούμενη. Στην πραγματικότητα το έργο αυτό της Langlee Wave Power (έτος ίδρυσης 2006 από τον Julius Espedal) συνίσταται σε μία πλατφόρμα η οποία αγκυροβολείται στον πυθμένα, διότι είναι σχεδιασμένη ώστε να επιπλέει σε στάθμη όπου το μεγαλύτερο μέρος της είναι βυθισμένο. Σε αυτήν είναι ενσωματωμένα δύο πτερύγια συμμετρικά (Εικόνα 2.20), σε αντικριστές θέσεις και οι κινήσεις τους είναι επίσης συμμετρικές (είτε απομακρύνονται είτε το ένα πλησιάζει το άλλο). Η διαφορά φάσης αυτή σε συνδυασμό με την συμμετρία συμβάλλει, για κατάλληλα μήκη κύματος, στην μείωση του μεγέθους της δύναμης που ασκείται στην πλατφόρμα και τις αγκυροβολήσεις. Τα συστήματα απορρόφησης ισχύος βρίσκονται στο εσωτερικό των τεσσάρων (4) κατακόρυφων στηλών στις γωνίες της κατασκευής. Αναλυτικότερα, άμεσα συνδεδεμένα με τα πτερύγια είναι ορισμένα από τον σχεδιασμό έμβολα τα οποία τίθενται σε λειτουργία όταν κινούνται και τα αντίστοιχα πτερύγια υπό την επίδραση των κυματισμών. Τα έμβολα αυτά ωθούν κάποιο ρευστό σε συσσωρευτές υψηλής πίεσης ωφελώντας την εξαγωγή ενέργειας με την μεσολάβηση ηλεκτρικών γεννητριών. Η ιδέα για την υλοποίηση του Langlee συλλήφθηκε το 2005 και αποτέλεσε την αφορμή για την έναρξη πειραματικών μελετών στην έκταση της Βόρειας θάλασσας που ανήκει στην Δανία και στην Horns Rev 1, μια υπεράκτια μονάδα ανεμογεννητριών στην Δανία. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από τις δοκιμές ενός πρωτοτύπου με διαστάσεις



1,25x1,25 m σε μία βαθιά δεξαμενή στο τμήμα πολιτικών μηχανικών του Πανεπιστημίου του Aalborg, όπου υπήρχε η δυνατότητα να προσομοιωθούν οι πραγματικές κυματικές συνθήκες των δύο τοποθεσιών σε κλίμακες 1:20 και 1:30 (Πίνακες 2.3 και 2.4) (Kofoed J.P. et al., 2010).

Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα πειράματος στην μονάδα Horns Rev 1 (βάθος 10 m)

Real sea conditions					Scale 1:20		Scale 1:30	
Wave State	Hs [m]	Tp [s]	Wave power [kW/m]	Prob. [%]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
1	0.5	2.8	0.3	21.3	0.03	0.63	0.02	0.51
2	1.0	5.5	2.4	34.2	0.05	1.23	0.03	1.00
3	1.5	6.2	6.0	21.2	0.08	1.39	0.05	1.13
4	2.0	6.9	11.8	12.9	0.10	1.54	0.07	1.26
5	2.5	7.6	20.2	6.6	0.13	1.70	0.08	1.39
6	3.0	8.3	31.8	3.3	0.15	1.86	0.10	1.52
7	3.5	9.0	46.9	0.6	0.18	2.01	0.12	1.64

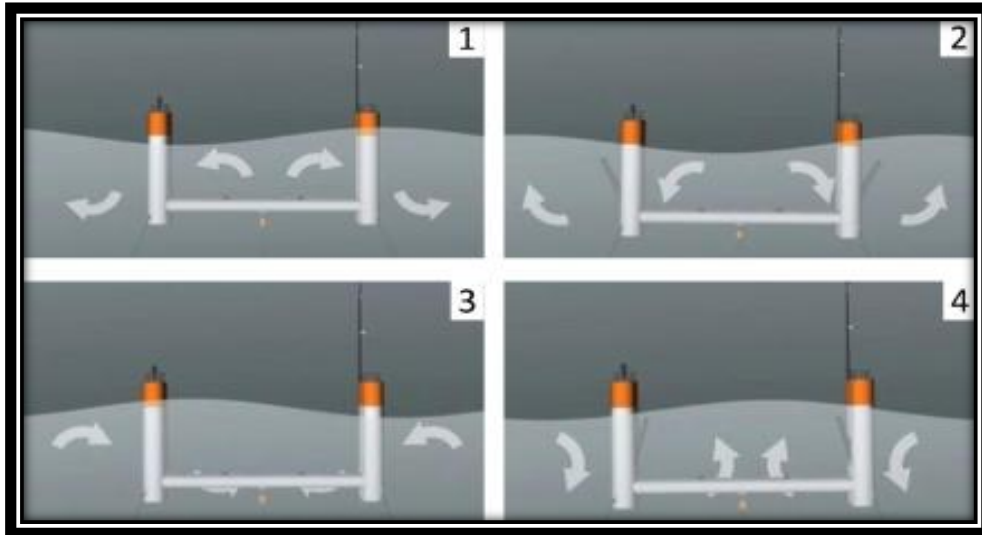
(Πηγή: Sørensen H.C. et al., 2005)

Πίνακας 2.4 Αποτελέσματα πειράματος στην Βόρεια Θάλασσα (βάθος 30 m)

Real sea conditions					Scale 1:20		Scale 1:30	
Wave State	Hs [m]	Tp [s]	Wave power [kW/m]	Prob [%]	Hs [m]	Tp [s]	Hs [m]	Tp [s]
1	1.0	5.6	2.4	46.8	0.05	1.25	0.03	1.02
2	2.0	7.0	12.0	22.6	0.10	1.57	0.07	1.28
3	3.0	8.4	32.3	10.8	0.15	1.88	0.10	1.53
4	4.0	9.8	67.0	5.1	0.20	2.19	0.13	1.79
5	5.0	11.2	119.7	2.4	0.25	2.50	0.17	2.04

(Πηγή: Kofoed J.P. and Friigard P.B., 2008)

Με το πέρασμα του χρόνου βέβαια ορισμένοι παράμετροι της συσκευής βελτιώνονται και πρωτότυπα σε πλήρη κλίμακα έχουν συμφωνηθεί να πλοηγηθούν σε περιοχές όπως είναι τα Κανάρια νησιά. Η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού Robusto, που προορίζεται να πλοηγηθεί στην Τενερίφη θα φτάνει, τα 132 kW, ενώ προβλέπεται να εγκατασταθεί άλλος ένας στα βόρεια της νήσου Lanzarote με ονομαστική ισχύ 500 kW περίπου ([www.renews.biz](http://www.renews.biz)).



Εικόνα 2.20 Σχηματική αναπαράσταση κινήσεων πτερυγίων  
(Πηγή: Kofoed J.P. et al., 2010)

Στις εικόνες παρακάτω συνοψίζονται όλες οι προαναφερθείσες τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι η εξαγόμενη ενέργεια καθορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ σε συνδυασμό με τον συντελεστή διαθεσιμότητας (availability factor) των κυματικών συσκευών. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη επιβαρυντικούς παράγοντες στην ετήσια απόδοση των συστημάτων. Ειδικότερα, είναι λογικό οι μονάδες να μην μετατρέπουν ενέργεια όλο τον χρόνο αφενός διότι σταματάνε την λειτουργία τους, αφετέρου διότι οι πόροι των πηγών δεν είναι διαθέσιμοι-ασφαλείς κάποιες χρονικές περιόδους. Για παράδειγμα κατά την διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων και για όσο χρόνο συντηρούνται τα έργα η παραγωγή ενέργειας σταματά.

Επιπροσθέτως απώλειες υφίστανται σε κάθε φυσική διεργασία με αποτέλεσμα την μείωση της ισχύος των συστημάτων συγκριτικά με την εγκατεστημένη. Τα φαινόμενα αυτά αποτυπώνονται στον συντελεστή αποδοτικότητας (capacity factor) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ποσού παραγόμενης ενέργειας σε μία χρονική περίοδο προς το ποσό της θεωρητικής ενέργειας που θα παράγονταν αν η εγκατάσταση λειτουργούσε σε πλήρη ισχύ στην ίδια χρονική περίοδο.

Έτσι, η ετήσια παραγωγή ενέργειας μιας εγκατάστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$ΕΠΕ = Εγκατεστημένη\ ισχύς * ΣΑ * ΣΔ * 365 * 24$$

Όπου,

ΕΠΕ: Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας (Annual Energy Production) (kWh)

ΣΑ: ο συντελεστής αποδοτικότητας

ΣΔ: ο συντελεστής διαθεσιμότητας



**Όνομα:** Limpet (WaveGen)  
**Τοποθεσία:** Νήσος Islay (Δυτικά της Σκωτίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2000  
**Εγκατεστημένη Ισχύς:** 500 kW

*Χερσαία εγκατάσταση  
 Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος  
 Ταλαντευόμενη στήλη νερού*



**Όνομα:** Mk1 (Energetech-Oceanlinx)  
**Τοποθεσία:** Kiama (Νότιο ανατολική ακτή Αυστραλίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2005  
**Εγκατεστημένη Ισχύς:** 500 kW

*Παράκτια εγκατάσταση  
 Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος  
 Ταλαντευόμενη στήλη νερού*



**Όνομα:** OE Buoy (Ocean Energy)  
**Τοποθεσία:** Spiddal (Δυτική ακτή Ιρλανδίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2007  
**Εγκατεστημένη Ισχύς:** -

*Υπεράκτια εγκατάσταση  
 Σημειακός απορροφητής ενέργειας  
 Ταλαντευόμενη στήλη νερού*



**Όνομα:** Archimedes Wave Swing (AWS Ocean Energy)  
**Τοποθεσία:** Ακτή Πορτογαλίας, κοντά στην πόλη Porto  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2004  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 2000 kW

*Υπεράκτια εγκατάσταση  
 Σημειακός απορροφητής ενέργειας  
 Μετατροπέας 'του Αρχιμήδη'*

Εικόνα 2.21 Τεχνολογία ταλαντευόμενης στήλης νερού

(Πηγές κατά σειρά: [www.owc-wec.weebly.com](http://www.owc-wec.weebly.com), [www.nnmrec.oregonstate.edu](http://www.nnmrec.oregonstate.edu), [www.oceanenergy.ie](http://www.oceanenergy.ie), [www.multisub.pt](http://www.multisub.pt))



**Όνομα:** Wave Star (Wave Star)  
**Τοποθεσία:** Hanstholm (Βόρεια ακτή Δανίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2009  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 110 kW

*Παράκτια εγκατάσταση  
 Σημειακός απορροφητής ενέργειας  
 Αρθρωτή πλωτή συσκευή*



**Όνομα:** Pelamis P2 (Pelamis Wave Power)  
**Τοποθεσία:** Νήσος Orkney (Βόρεια της Σκωτίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2010  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 750 kW

*Υπεράκτια εγκατάσταση  
 Εξασθενητής ενέργειας κύματος  
 Αρθρωτή πλωτή συσκευή*



**Όνομα:** Searaser (Ecotricity)  
**Τοποθεσία:** Νότιες ακτές Ηνωμένου Βασιλείου  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2009  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** -

*Παράκτιες εγκαταστάσεις  
 Σημειακός απορροφητής ενέργειας  
 Απλές πλωτές συσκευές*



**Όνομα:** PowerBuoy PB3 (Ocean Power Technologies)  
**Τοποθεσία:** Ακτή New Jersey (ΗΠΑ)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2015  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 350 W

*Υπεράκτια εγκατάσταση:  
 Σημειακός απορροφητής ενέργειας  
 Απλή πλωτή συσκευή*

Εικόνα 2.22 Τεχνολογία πλωτών μετατροπέων

(Πηγές κατά σειρά: [www.wavestarenergy.com](http://www.wavestarenergy.com), [www.renews.biz](http://www.renews.biz), [www.power-technology.com](http://www.power-technology.com), [www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com))



**Όνομα:** SSG (WAVEenergy)  
**Τοποθεσία:** Νήσος Kvistøy  
 (Νορβηγία)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2008  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 150 kW

*Χερσαία - Παράκτια εγκατάσταση  
 Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος  
 Υπερπηδητή εγκατάσταση*



**Όνομα:** Wave Dragon (Wave Dragon)  
**Τοποθεσία:** Nissum Bredning  
 (Δυτικές ακτές Δανίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2003  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 140 kW

*Υπεράκτια εγκατάσταση  
 Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος  
 Υπερπηδητή κατασκευή*



**Όνομα:** Waveplane (Waveplane AS)  
**Τοποθεσία:** Hanstholm (Βόρεια  
 ακτή Δανίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2008  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 75 kW

*Παράκτια εγκατάσταση  
 Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος  
 Υπερπηδητή κατασκευή*

Εικόνα 2.23 Τεχνολογία μετατροπών υπερπηδητών από το υγρό στοιχείο  
 (Πηγές κατά σειρά: Vicinanza D. et al., 2009, [www.maritimejournal.com](http://www.maritimejournal.com),  
[www.waveplane.org](http://www.waveplane.org))



**Όνομα:** Oyster 800 (Aquamarine)  
**Τοποθεσία:** Νήσος Orkney (βόρεια της Σκωτίας)  
**Έτος έναρξης λειτουργίας:** 2011  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 800 kW

**Παράκτια εγκατάσταση**  
**Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος**  
**Συσκευή κρούσης**



**Όνομα:** Robusto (Langlee Wave Power)  
**Τοποθεσία:** Βορειοδυτικά της Τενερίφης  
**\*Σχεδιασμένη κατασκευή**  
**Εγκατεστημένη ισχύς:** 132 kW

**Υπεράκτια εγκατάσταση**  
**Εξολοθρευτής ενέργειας κύματος**  
**Συσκευή κρούσης**

Εικόνα 2.24 Συσκευές κρούσης  
(Πηγές κατά σειρά: [www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com), [www.langleewp.com](http://www.langleewp.com))

## 2.5 Κόστος συσκευών απορρόφησης κυματικής ενέργειας

Αναφορικά με το κόστος της κυματικής ενέργειας δεν μπορεί να γίνει μία ενιαία εκτίμηση διότι τα χαρακτηριστικά των συσκευών διαφέρουν. Για παράδειγμα η εγκατάσταση του εξοπλισμού και η συντήρηση του θα κοστίζει ένα σημαντικά μεγαλύτερο ποσό για ένα υπεράκτιο έργο συγκριτικά με ένα χερσαίο. Το κόστος συνήθως που υπολογίζεται για κάθε έργο ονομάζεται Levelized Cost of Energy (ή Electricity). Ο υπολογισμός του βασίζεται στον προσδιορισμό :

- ❖ Των κεφαλαιουχικών δαπανών CAPEX
- ❖ Των δαπανών λειτουργίας OPEXt
- ❖ Της διάρκειας ζωής του έργου n
- ❖ Του συντελεστή προσαρμογής των μελλοντικών τιμών στις σημερινές (συντελεστής έκπτωσης r)

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_1^n \frac{OPEXt}{(1+r)^t}}{\sum_1^n \frac{Annual\ Energy\ Production}{(1+r)^t}}$$

(“International Levelized Cost of Energy for Ocean Energy Technologies.” 2015)

Αρκετές φορές στον υπολογισμό του LCOE λαμβάνεται υπόψη και το κόστος ‘παροπλισμού’ κάθε εγκατάστασης (SLD):

$$LCOE = \frac{CAPEX + SLD}{87,6 * LF} * \frac{r * (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + \frac{OPEXt}{87,6 * LF}$$

Όπου,

LF: το γινόμενο του συντελεστή αποδοτικότητας (Capacity factor) με το συντελεστή διαθεσιμότητας (Available factor) (βλ. σελίδα 44) και

$$SLD = \frac{SDC}{(1+r)^n}$$

Με τον τρόπο αυτό προσαρμόζονται οι τιμές της περιόδου παύσης λειτουργίας με τις υφιστάμενες σήμερα. (SI Ocean Project, 2013)

Το γεγονός, ωστόσο, ότι η μελετώμενες τεχνολογίες είναι νέες και αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους σε συνδυασμό με την μη εμπορευματοποίηση του εξοπλισμού καθιστά τον υπολογισμό των οικονομικών ζημιών δύσκολη σε κάθε περίπτωση. Στον πίνακα 2.5 παρατίθενται, κατά προσέγγιση τα έξοδα λειτουργίας και οι κεφαλαιουχικές δαπάνες των παραπάνω συσκευών, ανακτημένων από την βιβλιογραφία, χάριν μιας περισσότερο ολοκληρωμένης εικόνας των χαρακτηριστικών τους στοιχείων.

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) συνίστανται:

- ❖ Στις δαπάνες της κατασκευής και εγκατάστασης της μονάδας
- ❖ Στις δαπάνες της θεμελίωσης ή της αγκυροβόλησής της στην επιθυμητή θέση
- ❖ Στις δαπάνες για τον μηχανολογικό εξοπλισμό
- ❖ Στις δαπάνες για την σύνδεσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο

Από την άλλη μεριά στις δαπάνες λειτουργίας (OPEXt) συμπεριλαμβάνονται:

- ❖ Οι δαπάνες συντήρησης και επιδιόρθωσης των βλαβών
- ❖ Οι δαπάνες για τα ανταλλακτικά
- ❖ Οι δαπάνες του κόστους του σκάφους εξυπηρέτησης και του απαιτούμενου προσωπικού εργασίας
- ❖ Οι δαπάνες για εφεδρικό εξοπλισμό και προσωπικό σε περίπτωση βλάβης
- ❖ Το κόστος της αδράνειας των συσκευών λόγω ήπιων ή υπερβολικά άστατων κυματικών συνθηκών.

Σύμφωνα με τους Lewis A. et al. (2011) οι μέσες ετήσιες δαπάνες λειτουργίας ανέρχονται στο 1,8% των κεφαλαιουχικών δαπανών. Με τα δεδομένα αυτά ένας χονδρικός υπολογισμός του LCOE γίνεται στην παρούσα εργασία ως εξής:

$$LCOE = (CAPEX + Y * OPEX) / (Total Energy Production) \Rightarrow$$

$$LCOE = (1,18 * CAPEX) / (Installed Power * 365 * 24 * Y * n)$$

Όπου

Y: φυσιολογικό διάστημα 'ζωής' του έργου (=10 χρόνια)

IP: εγκατεστημένη ισχύς σε kW

CAPEX: κεφαλαιουχικές δαπάνες σε €

n: ο συντελεστής απόδοσης (=0,30)

Το κόστος της ενέργειας αντιπροσωπεύει στην ουσία της τιμή πώλησης της kWh για την οικονομική απόσβεση του έργου σε ένα φυσιολογικό διάστημα ζωής (10 χρόνια):

$$ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ = LCOE$$

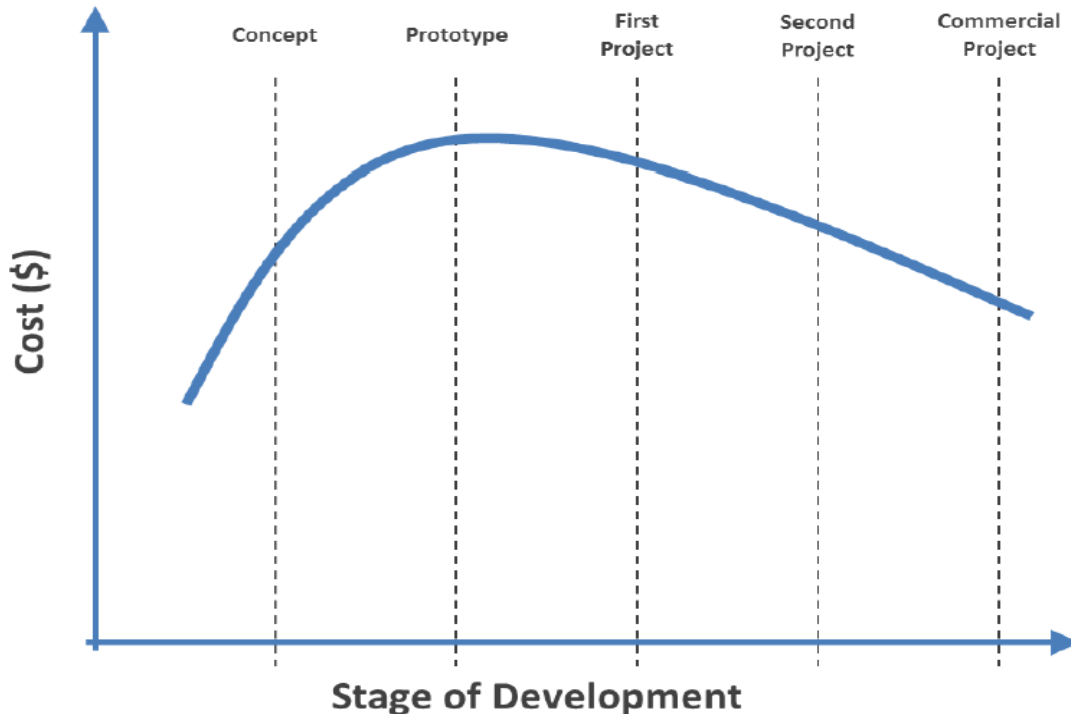


Πίνακας 2.5 Τα κόστη για ορισμένες συσκευές

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗ ΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (kW)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€/kWh)	ΚΕΦΑΛΑΙΟΥΧΙΚΕΣ ΔΑΠΑΝΕΣ (€)	ΠΗΓΕΣ
<b>Limpet</b> (OWC)	<b>500</b>	<b>0,08</b>	<b>850.000</b>	(Queen's University of Belfast, 2002)
<b>OE Buoy</b> (OWC)	<b>1250</b>	<b>0,18</b>	<b>5.000.000</b>	(www.oceanenergy.ie)
<b>Wave Star</b> (Attenuator)	<b>600</b>	<b>0,19</b>	<b>2.576.000</b>	(O'Connor et al., 2013)
<b>Pelamis P2</b> (Attenuator)	<b>750</b>	<b>0,19</b>	<b>3.220.000</b>	(O'Connor et al., 2013)
<b>SSG</b> (Overtopping Device, L=100m)	<b>150</b>	<b>0,18</b>	Εγκατάσταση: 285.000	(URS: Wave Energy Feasibility Study Report, 2009)
			Θεμελίωση: 60.000	
			Τουρμπίνες: 225.000	
			Σύνδεση στο δίκτυο: 30.000	
			<b>Σύνολο: 600.000</b>	
<b>Wave Dragon</b> (Overtopping device)	<b>140</b>	<b>0,18</b>	<b>560.000</b>	(www.wavedragon.net)
<b>Oyster 800</b> (OWSC)	<b>800</b>	<b>0,04</b>	<b>700.000</b>	(www.etp-scotland.as.uk)
				Aquamarine Power
<b>Robusto</b> (OWSC)	<b>132</b>	<b>0,18</b>	Εγκατάσταση: 264.000	(www.langleewp.com)
			Αγκυροβόληση: 26.400	
			Γεννήτρια: 184.800	
			Σύνδεση στο δίκτυο: 52.800	
			<b>Σύνολο: 528.000</b>	

Να σημειωθεί ότι οι συσκευές του πίνακα 2.5 είχαν μια διάρκεια ζωής που δεν έφτασε εν τέλει τα 10 έτη (λειτούργησαν για περίπου 3 έτη οι περισσότερες) και οι αναφερόμενες κεφαλαιουχικές δαπάνες προέρχονται από πληροφορίες των κατασκευαστριών εταιριών. Συνεπώς, τα αντίστοιχα κόστη της ενέργειας (€/kWh) πιθανόν να είναι μεγαλύτερα.

Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα της εικόνας 2.25. Η ενδεικτική αυτή απεικόνιση συνδέει το κόστος του τελικού έργου σε εμπορική κλίμακα, με το κόστος των προγενέστερων πειραματικών διατάξεων. Η επισκόπηση που προηγήθηκε αφορούσε τέτοιες διατάξεις μικρότερης κλίμακας κατά κύριο λόγο.



Εικόνα 2.25 Ενδεικτικά κόστη ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης των έργων

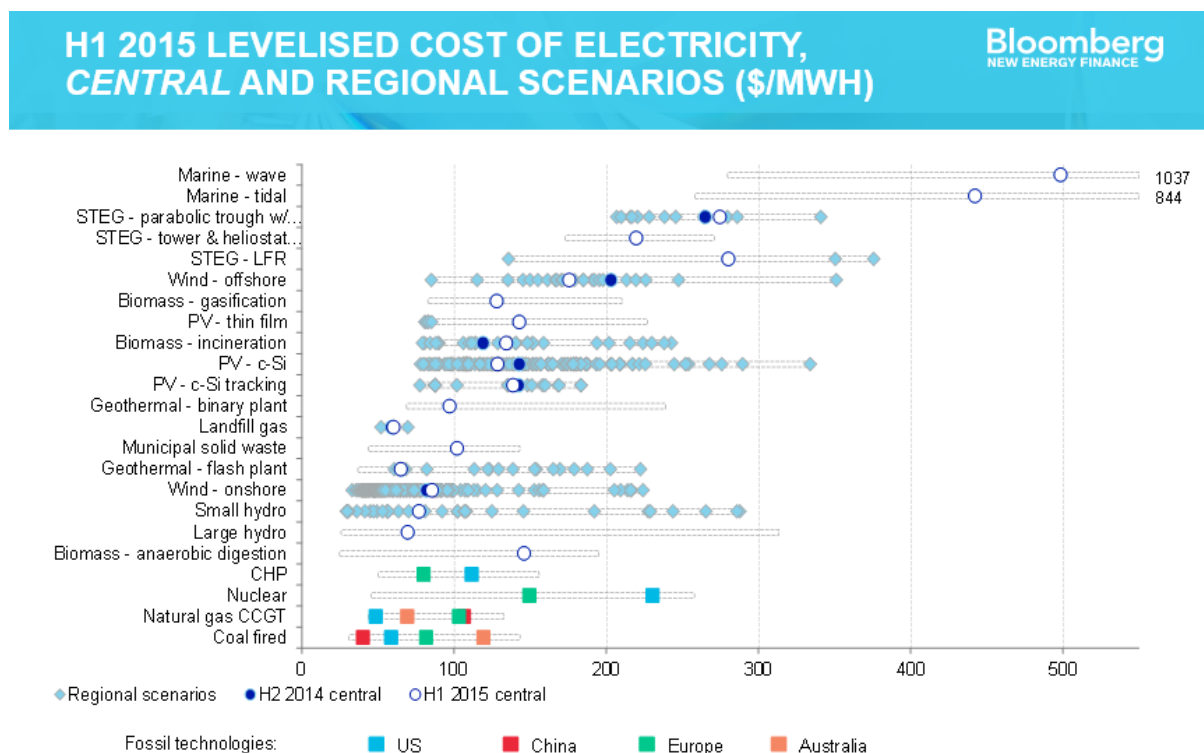
Όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα, στα πρώτα στάδια της παραγωγής οι σχεδιαστές αφενός είναι υπεραισιόδοξοι και αφετέρου κατέχουν λιγότερες γνώσεις σχετικά με τους παράγοντες που θα επηρεάσουν το κόστος του κύκλου ζωής και την απόδοση των έργων στην πραγματικότητα. Με το πέρας ενός αριθμού πειραμάτων ο σχεδιασμός ωριμάζει, κατανοούνται οι πτυχές των τεχνολογιών και οι προβλέψεις του κόστους γίνονται ακριβέστερες. Με την πλοήγηση του εμπορικού έργου όλες οι οικονομικές μεταβλητές ποσοτικοποιούνται και λαμβάνονται υπόψη σε μελλοντικές απόπειρες κατά την κρίση των σχεδιαστών.

Συγκριτικά με τις λοιπές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το μέσο κόστος αξιοποίησης της θαλάσσιας ενέργειας είναι αρκετά μεγαλύτερο σύμφωνα με την δημοσίευση της εταιρίας ερευνών Bloomberg New Energy Finances. Οι εκτιμήσεις του κόστους LCOE για το 2015, με εμφανείς τις διαφορές συγκριτικά με τον πίνακα 2.5, ήταν οι εξής:

- ❖ Κυματική ενέργεια: **500 δολάρια/MWh**
- ❖ Παλιρροιακή ενέργεια: **440 δολάρια/MWh**
- ❖ Θερμοδυναμική ενέργεια (μονάδες ισχύος 1-10 MW): **190-940 δολάρια/MWh**
- ❖ Υπεράκτια αιολική ενέργεια: **175 δολάρια/MWh**
- ❖ Χερσαία αιολική ενέργεια: **85 δολάρια/MWh**
- ❖ Ηλιακή ενέργεια (ηλιακά πάνελ σε σειρά, LFR): **280 δολάρια/MWh**
- ❖ Ηλιακή ενέργεια (Ηλιοστάτες + πύργος υποδοχής ακτινοβολίας): **220 δολάρια/MWh**

- ❖ Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα: **70 δολάρια/MWh**
- ❖ Μικρά υδροηλεκτρικά έργα: **75 δολάρια/MWh**
- ❖ Γεωθερμική ενέργεια: **65 δολάρια/MWh**

Στο διάγραμμα της εικόνας 2.26 εμφανίζονται οι τιμές αυτές (εκτός από το κόστος εκμετάλλευσης της θερμοδυναμικής ενέργειας) καθώς και ορισμένων άλλων πηγών ενέργειας (Σενάριο H1). (World Energy Council 2016)



**Εικόνα 2.26** Τα ενδεικτικά κόστη (LCOE) εγκαταστάσεων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

(Πηγή: Bloomberg New Energy Finances)

Για τον παραπάνω πίνακα χρησιμοποιήθηκαν, όσο είναι δυνατόν, εμπειρικά δεδομένα από πραγματικά έργα τα οποία ολοκληρώθηκαν ή βρίσκονται υπό κατασκευή. Όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων, κυρίως θαλάσσια ενέργεια, η συμπλήρωση γίνεται μέσω της ανάλυσης τάσεων της εταιρίας για την τεχνολογία και το κόστος χρηματοδότησης.

Η σημαντική αύξηση που παρατηρείται στο διάγραμμα της εικόνας 2.26 σε σχέση με τον πίνακα 2.5 αναφορικά με το ύψος του LCOE πιθανότερα έγκειται:

- ❖ Στην μικρότερη διάρκεια ζωής του έργου (από την προβλεπόμενη-σχεδιασμένη) (συσκευές πίνακα 2.5)
- ❖ Στην τοποθέτηση εγκαταστάσεων λόγω συμφερόντων σε περιοχές που υπό κανονικές συνθήκες είναι λιγότερο αποδοτικές. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση του βαθμού αποδοτικότητας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το LCOE καθιστώντας πολύ υψηλό (συσκευές διαγράμματος εικόνας 2.26).

Σύμφωνα με στοιχεία της Διεθνούς Οργάνωσης Ενέργειας (International Energy Agency) η κυματική ενέργεια θα καταστεί ανταγωνιστική το 2030 περίπου. (Raventos A. et al., 2010)

### 3. Υπολογιστικά σχήματα εκτίμησης ηλεκτρικής ενέργειας

Τα σωματίδια των υδάτινων μαζών απομακρύνονται από την θέση ηρεμίας τους λόγω των λεγόμενων γενεσιουργών δυνάμεων και επαναφέρονται σε αυτή υπό την επίδραση των δυνάμεων επαναφοράς. Απλούστερα, υπό ορισμένες συνθήκες ταλαντώνονται γύρω από την θέση ισορροπίας τους γεννώντας τους θαλάσσιους κυματισμούς.

Οι κυριότερες γενεσιουργές δυνάμεις είναι:

1. Ο άνεμος (ανεμογενείς κυματισμοί)
2. Οι σεισμικές δυνάμεις (τσουνάμις)
3. Οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσεως (seiches)
4. Η έλξη της σελήνης (παλίρροια)

Από την άλλη μεριά οι κυριότερες δυνάμεις επαναφοράς είναι:

1. Η βαρύτητα
2. Η δύναμη Coriolis (για μεγάλα μήκη κύματος)
3. Η επιφανειακή τάση (για μικρά μήκη κύματος)

Οι πιο συνηθισμένοι κυματισμοί στην φύση είναι οι ανεμογενείς κυματισμοί ή αλλιώς κυματισμοί βαρύτητας των οποίων τα σωματίδια τίθενται σε κίνηση από την πνοή του ανέμου και επανέρχονται στην θέση ισορροπίας λόγω της βαρύτητας, μέχρι απομακρυνθούν ξανά από τις δυνάμεις αδράνειας. Αναλυτικότερα, οι παλμοί της πίεσεως του ανέμου δημιουργούν τις πρώτες διαταραχές στην θαλάσσια επιφάνεια. Η μορφή αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου η οποία κατανέμεται ανομοιόμορφα (η ταχύτητα του ανέμου στην κορυφή ενός κύματος μπορεί να φτάσει μέχρι και σε πενταπλάσιες τιμές συγκριτικά με την ταχύτητα στην κοιλιά του). Έστερα, ξεκινά η σταδιακή μεταφορά ενέργειας από το πεδίο ροής του ανέμου στο πεδίο ροής των κυμάτων. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής προκαλεί θαλάσσιους κυματισμούς και ένα άλλο θαλάσσια ρεύματα. Με τον τρόπο αυτόν όσο μεταφέρεται ενέργεια στην θάλασσα το ύψος και η ταχύτητα των κυμάτων αυξάνονται στην αρχή γραμμικά και στην συνέχεια με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό.

#### 3.1 Χαρακτηριστικά κυμάτων

Το κείμενο που ακολουθεί βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις φοιτητικές σημειώσεις του κ. Μουντζούρη 'Θαλάσσια Υδραυλική' που εκδόθηκε στην Αθήνα το 2009.

Θεωρώντας τα κύματα αυτά μονοχρωματικά και αναλύοντάς τα σε δύο διαστάσεις, ορίζονται τα κάτωθι γεωμετρικά και άλλα χαρακτηριστικά τους:

**Ύψος κύματος H:** η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλίας του κύματος και είναι ίσο με το διπλάσιο του εύρους ταλαντώσεως των σωματιδίων.

**Μήκος κύματος L:** η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλαντώσεως (η μέτρηση γίνεται κατά μήκος της διεύθυνσεως μεταδόσεως).

**Καμπυλότητα ή κυρτότητα κύματος γ:** ο λόγος του ύψους προς το μήκος κύματος (H/L).

**Μέτωπο κύματος:** το επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο ταλαντώσεως και εφαιπτόμενο στην διατομή του κύματος.

**Διεύθυνση μεταδόσεως:** η κάθετη γραμμή στο μέτωπο του κύματος (βρίσκεται στο επίπεδο ταλαντώσεως).

Περίοδος κύματος T: ο χρόνος στον οποίο σημειώνεται μια πλήρης ταλάντωση ενός σωματιδίου γύρω από την θέση ισορροπίας. Αλλιώς ορίζεται σαν τον χρόνο ανάμεσα στην διέλευση δύο διαδοχικών κορυφών κύματος από ένα ορισμένο σημείο.

Ταχύτητα κύματος C: η απόσταση που διανύει το μέτωπο του κύματος στην μονάδα του χρόνου (ο λόγος του μήκους κύματος προς την περίοδο κύματος  $C=L/T$ ).

Διατομή κύματος: η κατακόρυφη διατομή κατά την διεύθυνση μεταδόσεως.

Κορυφή κύματος: το υψηλότερο σημείο ταλάντωσης των υγρών σωματιδίων πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

Κοιλία κύματος: το χαμηλότερο σημείο ταλάντωσης των υγρών σωματιδίων κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

Βάθος νερού h: η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας πάνω από τον πυθμένα σε ηρεμία.

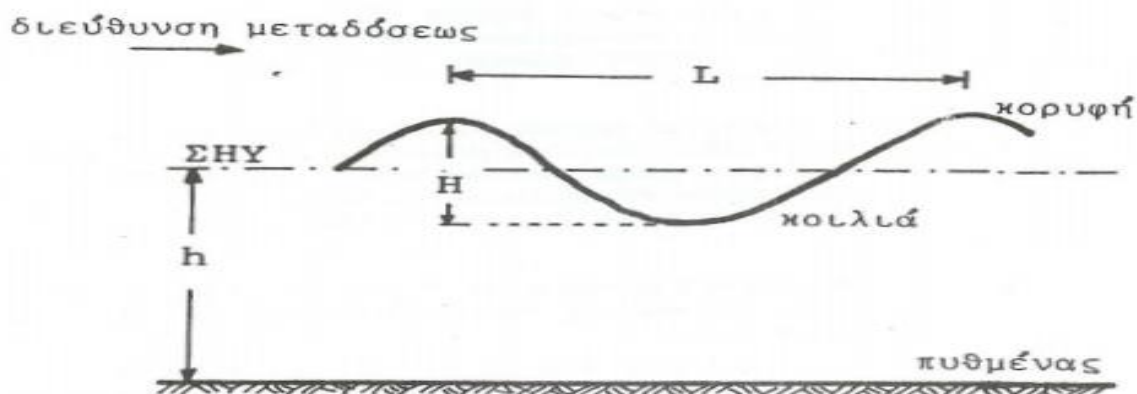
Σχετικό βάθος νερού: ο λόγος του βάθους του νερού προς το μήκος κύματος  $h/L$ . Τα νερά διαχωρίζονται ως εξής:

- ❖ Βαθεία νερά για  $h/L \geq 0,50$
- ❖ Ενδιάμεσα νερά για  $0,04 \leq h/L \leq 0,50$
- ❖ Ρηγά νερά για  $h/L \leq 0,04$

ΣΗΥ (Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος): η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

Όσον αφορά τους τρισδιάστατους κυματισμούς οι ορισμοί αυτοί ισχύουν, ωστόσο πρέπει να εισαχθεί και ο όρος του μήκους κορυφής κύματος.

(Μουντζούρης Κ. 2009)



Εικόνα 3.1 Τυπική διατομή δισδιάστατου μονοχρωματικού κύματος

(Πηγή: Μουντζούρης Κ., 2009)

### 3.2 Μοντέλα απορρόφησης κυματικής ενέργειας της εκάστοτε τεχνολογίας

Τα κύματα φέρουν όπως έχει προαναφερθεί σημαντικά ποσά ενέργειας τα οποία ωστόσο είναι αδύνατο να απορροφηθούν εξ' ολοκλήρου από οποιαδήποτε σύστημα αξιοποίησής τους. Οι πιο ακριβείς μέθοδοι προσδιορισμού της αποδοτικότητας τέτοιων συστημάτων είναι οι πειραματικές μέθοδοι με διατάξεις μικρότερης κλίμακας από τα πρωτότυπα. Ιδιαίτερως ωφέλιμη, όμως, είναι και η δημιουργία ορισμένων μαθηματικών μοντέλων για τον άμεσο υπολογισμό της εξαγόμενης ενέργειας μέσω ορισμένων κυματικών παραμέτρων. Στόχος, φυσικά, είναι τα αποτελέσματα των μοντέλων αυτών να προσεγγίζουν όσο είναι δυνατόν τα πειραματικά ενισχύοντας την αξιοπιστία τους.

### 3.2.1 Τεχνολογία Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού (Oscillating Water Column)

Οι εγκαταστάσεις αυτές αποτελούνται από έναν ή περισσότερους θαλάμους με δύο ανοίγματα σε κάθε έναν: ένα προς την θάλασσα και ένα προς την ατμόσφαιρα. Πρόκειται για έργα χερσαία ή παράκτια, βυθισμένα εν μέρει στην θάλασσα. Στο άλλο άνοιγμά τους τοποθετούνται τουρμπίνες οι οποίες περιστρεφόμενες θέτουν σε λειτουργία τις γεννήτριες ηλεκτρισμού του έργου. Σε μερικές διατάξεις ένα τρίτο άνοιγμα (στην ατμόσφαιρα) ρυθμίζει την πίεση του αέρα όταν αυτή ξεπεράσει κάποια όρια, με σκοπό την αποφυγή ζημιών στις τουρμπίνες (βαλβίδες ανακούφισης πίεσεως).

Όπως έχει προαναφερθεί, η στάθμη του νερού στο εσωτερικό του θαλάμου ανεβαίνει όταν οι κορυφές των κυματισμών πλησιάζουν και προσπίπτουν στο εμπρόσθιο τοίχο των εγκαταστάσεων, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση των κοιλιών, με μία διαφορά φάσης. Σε κάθε περίπτωση ορισμένη ποσότητα αέριας μάζας αλληλεπιδρά με την υγρή μάζα, την εισερχόμενη από το άνοιγμα στην θάλασσα, χωρίς να υπάρχει οποιαδήποτε ανάμειξη (συμπεριφέρονται σαν δύο διαφορετικά σώματα). Για μεγάλα μήκη κύματος συγκριτικά με το πλάτος του θαλάμου, η ελεύθερη επιφάνεια της στήλης είναι επαρκώς επίπεδη για να θεωρηθεί, σε συνδυασμό με την ασυμπιεστότητά, της ότι ταλαντώνεται σαν ένα έμβολο. Στο απλουστευμένο αυτό μοντέλο οι υδροδυναμικές εξισώσεις εκφράζονται με όρους δυνάμεων και ταχυτήτων. Αντίθετα στο δεύτερο αυστηρότερο μοντέλο οι εξισώσεις εκφράζονται με όρους πίεσης και ρυθμού ροής (Εικόνα 3.2). Σε κάθε περίπτωση αποτέλεσμα είναι η συμπίεση και η αποσυμπίεση του υπερκείμενου αέρα που προκαλεί την κίνηση των πτερυγίων των τουρμπινών και κατ' επέκταση την παραγωγή έργου. Η ενέργεια των κυματισμών δεν εισέρχεται ακέραια στην εγκατάσταση λόγω του φαινομένου της ανάκλασης και της περίθλασης τους την στιγμή της πρόσπτωσης. Η μαθηματική έκφραση του παραπάνω φαινομένου είναι η εξής:

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (1)$$

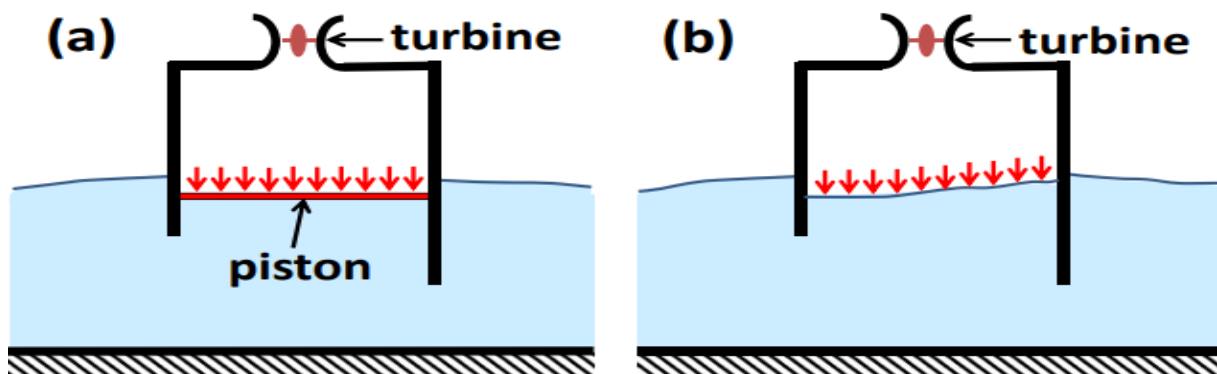
όπου,

$E_i$ : η συνολική ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος

$E_r$ : η ανακλώμενη κυματική ενέργεια

$E_t$ : η περιθλώμενη κυματική ενέργεια

$E_a$ : η αφομοιωμένη, από την στήλη ύδατος, ενέργεια



Εικόνα 3.2 (a) άκαμπτη ελεύθερη επιφάνεια (πιστόνι) (b) παραμορφωμένη ελεύθερη επιφάνεια

(Πηγή: Falcão A. et al, 2015)

Σύμφωνα με την θεωρία απειροστού ύψους (Airy) η συνολική ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος ισούται με το άθροισμα της κινητικής και δυναμικής του ενέργειας:

$$Ei = Ep + Ek = \frac{1}{8} * \rho * g * H^2 * L \quad (2)$$

όπου,

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού ( $kg/m^3$ )

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

$H$ : το ύψος κύματος (m)

$L$ : το μήκος κύματος(m)

Οι ενέργειες ανάκλασης και περίθλασης είναι δυνατόν να εκφραστούν συναρτήσει των ομώνυμων συντελεστών ( $Cr$ : συντελεστής ανάκλασης και  $Ct$ : συντελεστής περίθλασης):

$$Er = Ei * Cr^2 \quad (3) \quad \text{και} \quad Et = Ei * Ct^2 \quad (4)$$

Ο συντελεστής  $Cr$  ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του ανακλώμενου κύματος ( $Hr$ ) προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος ( $H$ ):

$$Cr = \frac{Hr}{H} \quad (5)$$

Ο συντελεστής  $Ct$  ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του κύματος δίπλα (για χερσαία έργα) ή πίσω (για παράκτια έργα) από την συσκευή ( $Ht$ ) προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος ( $H$ ):

$$Ct = \frac{Ht}{H} \quad (6)$$

Το ποσό της ενέργειας που απομένει καταλήγει στην ταλαντευόμενη στήλη ύδατος στο εσωτερικό του θαλάμου και αποτελεί την εν δυνάμει ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί. Με απλές αντικαταστάσεις προκύπτει η εξίσωση:

$$Ea = Ei * (1 - Cr^2 - Ct^2) \quad (7)$$

Ένα μέρος της εισερχόμενης ενέργειας ( $Ee$ ) ευθύνεται για την ταλάντωση του νερού στο εσωτερικό του θαλάμου ( $Es$ ) και ένα μέρος της φτάνει στις τουρμπίνες συνεισφέροντας στην παραγωγή ενέργειας ( $Ee$ ). Επιπροσθέτως, όπως σε κάθε φυσική διεργασία υφίστανται απώλειες που μπορεί να οφείλονται στην θραύση και σε στροβιλισμούς των κυμάτων κατά την εισροή τους στον θάλαμο καθώς και στις περιορισμένες δυνατότητες των τουρμπινών και γενικά του συστήματος εξαγωγής ενέργειας (Power Take Off system ή PTO system) ( $El$ ):

$$Ea = Es + Ee + El \quad (8)$$

Η ενέργεια  $Es$  προσδιορίζεται μέσω της ταλαντώσεως της ελεύθερης επιφάνειας του νερού από την θέση ισορροπίας του μέσα στην εγκατάσταση και εκτιμάται ανά μονάδα πλάτους (9) αλλά και ως μέση ενέργεια για μία περίοδο κύματος (10)

$$Es = \frac{1}{2} * \rho * g * n^2 * b \quad (9)$$

$$Es = \frac{1}{T} * \int_0^T \left( \frac{1}{2} * \rho * g * n^2 * b \right) dt = \frac{1}{16} * \rho * g * Hw * b \quad (10)$$

όπου,

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

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

$n$ : είναι η εξίσωση ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας της υδάτινης στήλης στον θάλαμο

$b$ : είναι το πλάτος του θαλάμου ( $\text{m}$ )

$H_w$ : είναι το ύψος ταλάντωσης της υδάτινης στήλης στον θάλαμο ( $\text{m}$ )

Σε μία περίοδο κύματος η ενέργεια ( $E_e$ ) που είναι διαθέσιμη στις τουρμπίνες ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του γινομένου της διαφοράς της ενδότερης και εξώτερης πίεσης του αέρα ( $\Delta p(t)$ ) με τον ρυθμό ροής του αέρα στο σύστημα εξαγωγής ενέργειας (PTO system) ( $Q(t)$ ) σε κάθε χρονική στιγμή:

$$E_e = \int_0^T \Delta p(t) * Q(t) dt \quad (11)$$

(Elhanafi A. et al., 2017)

Τον υπολογισμό της δυσχεραίνει η συμπιεστότητα του υπερκείμενου της υδάτινης στήλης αέρα στον θάλαμο. Η μάζα του αέρα αυτού (Sheng W. et al. 2013) ορίζεται ως το γινόμενο της πυκνότητας του ( $\rho_c$ ) με τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει στον θάλαμο ( $V$ ):

$$m = \rho_c * V \quad (12)$$

Από την ισοτροπική θεώρηση:  $p * \rho_c^{-\gamma} = p_a * \rho_a^{-\gamma}$  προκύπτει η πυκνότητα  $\rho_c$ :

$$\rho_c = \rho_a * (1 + p/(\gamma * p_a)) \quad (13)$$

Επιπροσθέτως ο όγκος  $V$  προκύπτει από την αφαίρεση του υδάτινου από τον συνολικό όγκο  $V_0$  του θαλάμου του έργου:

$$V = V_0 - A_c * h' \quad (14)$$

Ο ρυθμός ροής της αέριας μάζας μέσω των τουρμπινών γράφεται ως εξής:

$$dm/dt = d/dt (\rho_c * V) \quad (15)$$

Τελικά από τις παραπάνω σχέσεις οι Sarmiento A. και Falcao A. (Sarmiento, A. and Falcao A., 1985) πρότειναν τον παρακάτω τύπο για τον προσδιορισμό της διερχόμενης από τις τουρμπίνες παροχής του αέρα:

$$Q(t) = Q - \frac{V_0}{\gamma * p} * \frac{dp}{dt} \quad (16)$$

όπου,  $Q = A_c * \frac{dh'}{dt}$ ,  $Q(t) = A_t * u_a$  και  $V_0 = A_c * Y$

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης διορθώνει την σχέση συμπεριλαμβάνοντας την συμπίεση και την αποσυμπίεση του αέρα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην διαφορά της εξωτερικής και ενδότερης πίεσης. Με την άνοδο της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας της ταλαντευόμενης στήλης ο όγκος αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου συμπιέζεται με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητάς του. Όταν αυτή ξεπεράσει την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα πραγματοποιείται διαρροή προς το περιβάλλον μέσω του συστήματος απορρόφησης ενέργειας (PTO). Η αντίθετη διαδικασία παρατηρείται κατά την πτώση της στάθμης της υδάτινης στήλης.



Τα άγνωστα μεγέθη είναι το  $h'$  και το  $p$ . Οι Setoguchi T. et al., (1999) συνέδεσαν το βάθος του προσπίπτοντος κύματος  $H'$  με το βάθος του νερού στον θάλαμο  $h'$ , με άλλα λόγια καθόρισαν την απόκριση της ταλαντευόμενης στήλης νερού στα εισερχόμενα κύματα κάθε στιγμή:

$$\frac{d}{dt} \left( \rho_s * h' * A_c * \frac{dh'}{dt} \right) = [\rho_s * g(H' - h') - \Delta p] * A_c \quad (17)$$

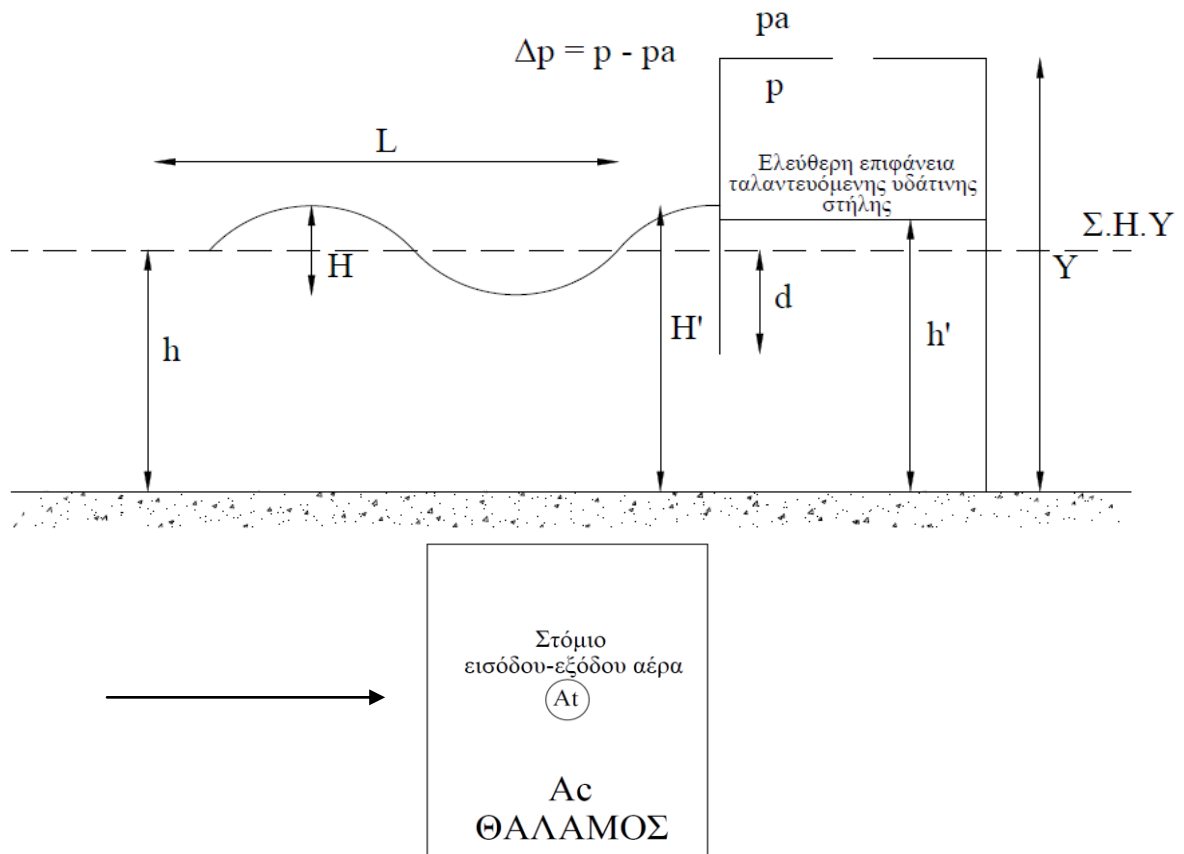
Από την άλλη μεριά η πτώση της πίεσης  $\Delta p$  αποτελεί συνάρτηση της παροχετευτικότητας του αέρα  $Q(t)$  και των χαρακτηριστικών των τοποθετημένων στην εγκατάσταση τουρμπινών:

$$\Delta p(t) = C_a * \frac{\rho_c * b * l_1 * n}{2} * \frac{1}{\alpha_1} * (u_a^2 + (r * \omega t)^2) \quad (18)$$

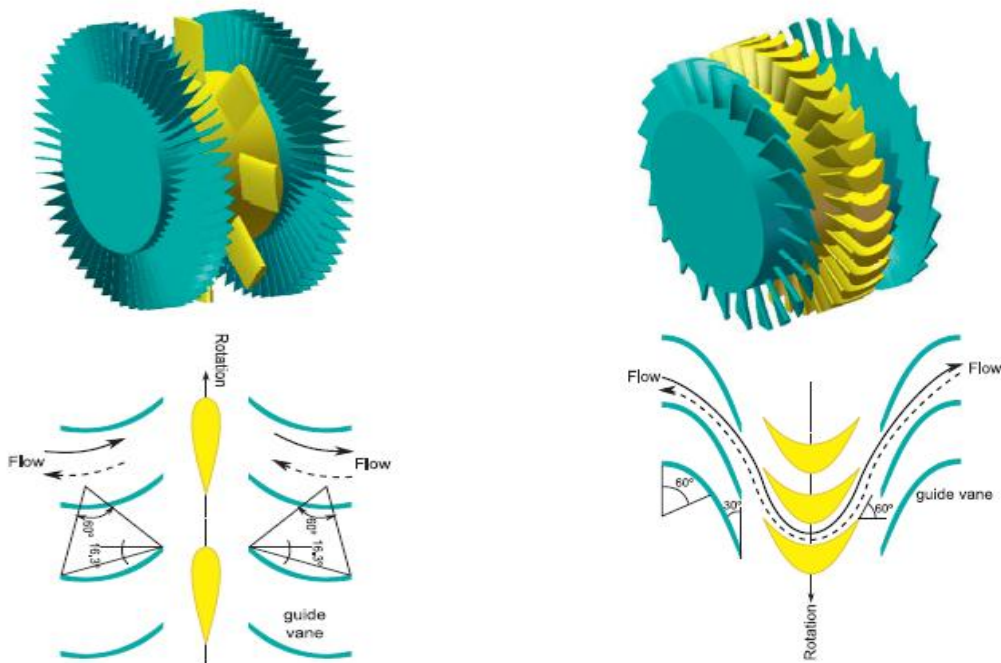
Τα μεγέθη που εμφανίζονται στις εξισώσεις (11) έως (18) φαίνονται παρακάτω:

- **m**: η μάζα αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου εγκατάστασης (Kg)
- **V**: ο όγκος αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου εγκατάστασης ( $m^3$ )
- **V<sub>0</sub>**: ο συνολικός όγκος θαλάμου εγκατάστασης ( $m^3$ )
- **A<sub>c</sub>**: το εμβαδόν διατομής θαλάμου εγκατάστασης ( $m^2$ )
- **A<sub>t</sub>**: το εμβαδόν διατομής στομίου εισαγωγής-εξαγωγής αέρα ( $m^2$ )
- **Y**: το συνολικό ύψος θαλάμου εγκατάστασης (m)
- **p**: η πίεση αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου εγκατάστασης (Pa)
- **p<sub>a</sub>**: η ατμοσφαιρική πίεση (Pa)
- **Δp**: η πτώση πίεσης ( $p - p_a$ ) (Pa)
- **g**: η επιτάχυνση βαρύτητας ( $=9,81 m/s^2$ )
- **h<sup>1</sup>**: το ύψος υδάτινης στήλης (m)
- **H'**: το βάθος νερού στο σημείο πρόσπτωσης των κυμάτων στην εγκατάσταση (m)
- **ρ<sub>c</sub>**: η πυκνότητα αέρα στο εσωτερικό του θαλάμου εγκατάστασης ( $kg/m^3$ )
- **ρ<sub>a</sub>**: η πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα ( $kg/m^3$ )
- **ρ<sub>s</sub>**: η πυκνότητα θαλασσινού νερού ( $kg/m^3$ )
- **γ**: η ειδική αναλογία θερμότητας αέρα ( $=1,4$ )
- **Q(t)**: η παροχή του αέρα μέσω των τουρμπινών ( $m^3/s$ )
- **Q**: η παροχή του αέρα μέσω των τουρμπινών ως ασυμπιεστο ρευστό ( $m^3/s$ )
- **u<sub>a</sub>**: η αξονική ταχύτητα ροής του αέρα μέσω των τουρμπινών (m/s)
- **C<sub>a</sub>**: ο συντελεστής ισχύος
- **b**: το ύψος των λεπίδων των τουρμπινών (m)
- **l<sub>1</sub>**: το μήκος των χορδών των λεπίδων (m)
- **n**: ο αριθμός των λεπίδων
- **α<sub>1</sub>**: η περιοχή τμήματος των λεπίδων (αθροιστική επιφάνεια λεπίδων) ( $m^2$ )
- **r**: η μέση διάμετρος της τουρμπίνας (m)
- **ω<sub>t</sub>**: γωνιακή ταχύτητα στροβίλου (rad/s)

<sup>1</sup> Ειδικότερα η ταλάντωση της υδάτινης στήλης εξαρτάται από το πλάτος και την περίοδο ταλάντωσης των προσπιπτόντων κυμάτων, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά όπως το βύθισμα του εμπρόσθιου τοίχου (d) της εγκατάστασης και η διάμετρος του στομίου για την διέλευση του αέρα στην κορυφή του θαλάμου (Gervelas R. et al., 2011, pp. 1007-1013).



Εικόνα 3.3 Όψη (πάνω) και κάτοψη (κάτω) της ταλαντευόμενης στήλης (εκτός κλίμακας)



Εικόνα 3.4 Οι δύο τύποι τουρμπινών: Wells turbine (αριστερά) και Impulse turbine (δεξιά)  
(Πηγή: López I. et al., 2013)

Εν κατακλείδι, η εξαγόμενη ενέργεια επηρεάζεται από τα εξής μεγέθη:

1. Χαρακτηριστικά ταλάντωσης προσπιπτόντων κυμάτων (περίοδος και ύψος κύματος)
2. Διαστάσεις θαλάμου προσαγωγής του νερού (μήκος, πλάτος, ύψος και βύθισμα εμπρόσθιου τοίχου) καθώς και το γεωμετρικό σχήμα του ανοίγματος στην θάλασσα.
3. Διαστάσεις στομίου εξαγωγής και εισαγωγής του αέρα
4. Χαρακτηριστικά μεγέθη τουρμπινών καθορισμένα από τον κατασκευαστή.

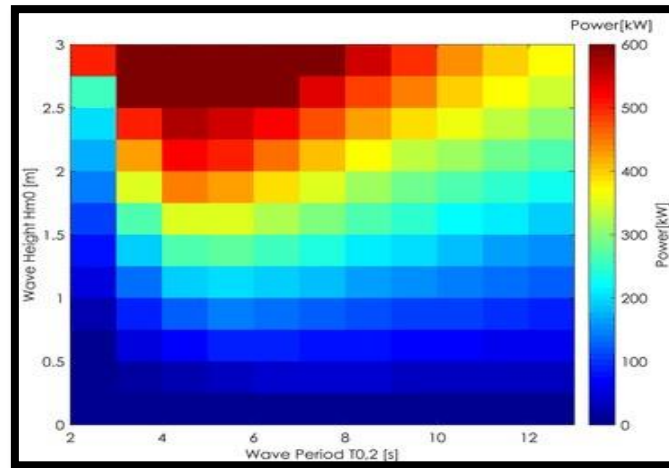
### 3.2.2 Τεχνολογία πλωτών μετατροπών

Ένα ξεχωριστό σύνολο αποτελούν οι σχεδιασμένες για να επιπλέουν συσκευές. Τα ήδη υπάρχοντα πρωτότυπα αποτελούνται από πλωτήρες εν μέρει ή αποκλειστικά. Στην πρώτη κατηγορία οι πλωτήρες, αποτελώντας έρμαιο των κυμάτων, κινούνται ως προς ένα σημείο αναφοράς ενεργοποιώντας τον μηχανολογικό εξοπλισμό για την παραγωγή ενέργειας. Ως σημεία αναφοράς χαρακτηρίζονται τα μέλη των κατασκευών τα οποία αγκυροβολούνται ή θεμελιώνονται στον πυθμένα και ακινητοποιούνται.. Εναλλακτικά, πλωτήρες συνδεδεμένοι αρθρωτά και αγκυροβολημένοι στον πυθμένα σχηματίζουν συσκευές με μεγάλο μήκος οι κινήσεις των οποίων είναι εναρμονισμένες με το κυματικό προφίλ της εκάστοτε περιοχής. Σε αυτή την περίπτωση, οι ακανόνιστες κινήσεις των γειτονικών πλωτήρων κινούν την διαδικασία μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.

Ο υπολογισμός της εξαγόμενης ενέργειας αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία κατά την οποία συνυπολογίζονται κατασκευαστικοί και υδροδυναμικοί παράγοντες καθώς και αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών με πρωτότυπα μικρότερης κλίμακας. Παραδείγματα τέτοιων αποτελούν η αδράνεια του ταλαντευόμενου σώματος της εγκατάστασης, η απόσβεση του μηχανολογικού εξοπλισμού (σύστημα ΡΤΟ), η υδροδυναμική απόσβεση και κατ' επέκταση και το εύρος κίνησης των πλωτήρων. Συνεπώς μείζονος σημασίας είναι και ο προσδιορισμός τους μεγέθους των συσκευών, δηλαδή της μάζας και των διαστάσεων τους (Fernandez Perez, M., 2013). Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις παραμέτρους οι κατασκευαστές κατήρτισαν αντιπροσωπευτικές καμπύλες απεικόνισης των δυνατοτήτων των έργων αυτής της κατηγορίας. Προαπαιτούμενο για τον ακριβή προσδιορισμό τους αποτελεί αποκλειστικά η γνώση των κυματικών συνθηκών και πιο συγκεκριμένα το χαρακτηριστικό ύψος ( $H_{m0}$ ) και η περίοδος ταλάντωσης ( $T$ ) των κυμάτων σε ωριαία βάση. Για κάθε συνδυασμό των δύο αυτών τιμών προκύπτει ένα σημείο σε κάθε απεικόνιση, αντιπροσωπευτικό της εξαγόμενης ενέργειας.

		Tpow (seconds)																	
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	
Hsig (metres)	0.5	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	
	1.0	idle	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	idle	idle	idle	
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2.0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3.0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3.5	-	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4.0	-	-	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4.5	-	-	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5.0	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5.5	-	-	-	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6.0	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
	6.5	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	481
	7.0	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8.0	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Εικόνα 3.6 Πινακοποιημένη ενεργειακή απόδοση σε kW της συσκευής Pelamis P2 (Πηγή: PELAMIS WEC – CONCLUSION OF PRIMARY R&D: FINAL REPORT)



Wave height $H_{m0}$ (m)	Wave period $T_{0.2}$ (s)										
	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13
0.0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5 - 1.0	0	49	73	85	86	83	78	72	67	63	59
1.0 - 1.5	54	136	193	205	196	182	167	153	142	132	123
1.5 - 2.0	106	265	347	347	322	294	265	244	224	207	193
2.0 - 2.5	175	429	522	499	457	412	372	337	312	288	267
2.5 - 3.0	262	600	600	600	600	540	484	442	399	367	340
3.0 -	Storm protection										

Εικόνα 3.5 Ενεργειακή απόδοση σε kW της εγκατάστασης Wave Star (Πηγή: Moschos E. et al., 2017 και Marquis L. et al., 2010)

### 3.2.3 Τεχνολογία μετατροπών υπερπηδητών από το υγρό στοιχείο

Η λειτουργία των συγκεκριμένων μετατροπών παραπέμπει στα χερσαία υδροηλεκτρικά έργα παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Κοινή συνιστώσα των δύο περιπτώσεων είναι η πτώση του νερού από συγκεκριμένο ύψος στους υδροστροβίλους των οποίων η περιστροφή θέτει σε λειτουργία τις γεννήτριες ηλεκτρισμού σε κάθε σταθμό. Βασική προϋπόθεση, λοιπόν, για την αποδοτικότητα των συστημάτων αποτελεί η δημιουργία υψομετρικής διαφοράς μεταξύ της πηγής ενέργειας και του χώρου όπου βρίσκονται υδροστροβίλοι (τουρμπίνες). Στο θαλάσσιο περιβάλλον αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή μίας ή περισσότερων δεξαμενών αποθήκευσης νερού σε στάθμη υψηλότερη από την στάθμη ηρεμίας των υδάτων στην περιοχή. Ως εκ τούτου, κάθε φορά που αναπτύσσονται κυματισμοί, πλησίον των μονάδων αυτών συλλέγονται σημαντικές ποσότητες νερού οι οποίες τελικά επιστρέφουν στην θάλασσα μέσω υδροστροβίλων με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι έρευνες σε εργαστήρια και σε πραγματικές συνθήκες, σε πρωτότυπα μικρότερης κλίμακας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι εγκαταστάσεις με περισσότερες από μία δεξαμενές αποθήκευσης σε διαφορετικά ύψη (όπως οι διατάξεις SSG και Waveplane) είναι αποδοτικότερες από αυτές που αποτελούνται από μία μόνο δεξαμενή (όπως η διάταξη Wave Dragon).

Ως αποτέλεσμα τέτοιων πειραματικών διατάξεων εκπονήθηκαν ορισμένες εξισώσεις υπολογισμού της ισχύος ενός υπερπηδητού από το νερό μετατροπέα. Για ένα έργο με περισσότερες από μία δεξαμενές σε διαφορετικά επίπεδα με κατακόρυφη διάταξη ο ρυθμός απόρριψης νερού από κάθε επίπεδο ανά μονάδα πλάτους ( $dq/dz$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{dq}{dz} = \sqrt{g * H_s} * A * e^{B * \frac{z}{H_s}} * e^{C * \frac{Rc,1}{H_s}} \quad (19)$$

όπου,

$z$ : η κάθετη συνισταμένη μετρημένη από την στάθμη ηρεμούντος ύδατος (ΣΗΥ) προς τα πάνω (m)

$H_s$ : φασματική εκτίμηση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος (m)

$R_{c,j}$ : υψομετρική διαφορά της δεξαμενής  $j$  και στάθμης ηρεμούντος ύδατος (ΣΗΥ) (m)

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

$A, B, C$ : εμπειρικές μεταβλητές οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε έργου όπως απεικονίζονται στην εικόνα 3.7

$h$ : η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας πάνω από τον πυθμένα σε ηρεμία (m)

$d_r$ : βύθισμα της ράμπας (m)

$HD_j$ : οριζόντιες αποστάσεις των διαδοχικών κορυφών εισόδου του νερού (m)

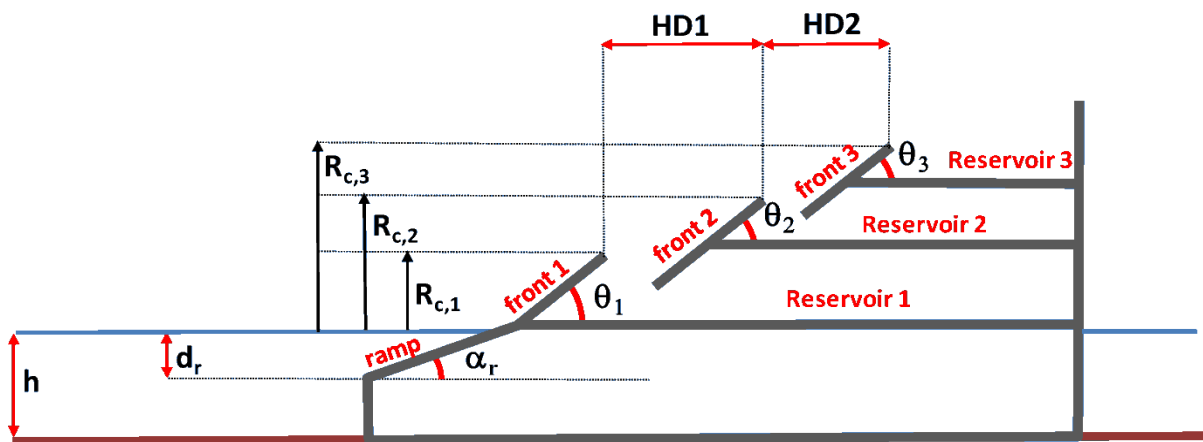
$\theta_j$ : κλίσεις μπροστινών τοιχωμάτων

$\alpha_r$ : κλίση της ράμπας

(Moschos E. et al. 2017)

Για παράδειγμα οι τιμές των μεταβλητών για  $d_r/h = 1$  και  $\alpha_r = \theta_j = 30^\circ - 35^\circ$  είναι:

$A = 0,197, B = -1,753, C = -0,408$ .



Εικόνα 3.7 Σκαρίφημα μια εγκατάστασης με 3 δεξαμενές  
(Πηγή: Vicinanza D. et al., 2012)

Από την ολοκλήρωση της σχέσης (20) προκύπτει η ποσότητα νερού ανά μέτρο που εισέρχεται σε κάθε δεξαμενή :

$$q_j = \int_{R_{c,j}}^{R_{c,j+1}} (dq/dz) dz = \sqrt{g * H_s^3} * \frac{A}{B} * e^{C * \frac{R_{c,1}}{H_s}} * \left( e^{B * \frac{R_{c,j+1}}{H_s}} - e^{B * \frac{R_{c,j}}{H_s}} \right) \quad (20)$$

Επίσης, όσον αφορά την υψηλότερη δεξαμενή μιας κατασκευής χωρίς οροφή σαν  $R_{c,j+1}$  μπορεί να ληφθεί είτε το άπειρο, είτε μία υψηλή τιμή όπως είναι για παράδειγμα το ύψος  $2 * R_{c,j+1}$ .

Η συνολική παροχή προς τις τουρμπίνες για κάθε δεξαμενή ορίζεται ως το γινόμενο της παροχής  $q_j$  ( $m^2/s$ ) με το συνολικό μήκος  $L$  (m) του μετώπου της δεξαμενής  $j$ :

$$Q_j = q_j * L_j \quad (21)$$

Τελικά, η παραγωγή ενέργειας  $P_j$  (W) μιας εγκατάστασης με τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξαρτάται από την συνολική ‘διαφυγή’ του νερού  $Q_j$  ( $m^3/s$ ), το ύψος πτώσης  $R_{c,j}$  (m) την πυκνότητα του νερού  $\rho_w$  ( $kg/m^3$ ) και τον βαθμό αποδοτικότητας των διατάξεων  $n$ . Για κάθε δεξαμενή (23) και συνολικά για ένα έργο με  $x$  δεξαμενές (24):

$$P_j = Q_j * R_{c,j} * g * n * \rho_w \quad (22) \quad P = \sum_{i=1}^x (P_i) \quad (23)$$

Η υδραυλική αποδοτικότητα ( $n$ ) του έργου αυτού κυμαίνεται σε ένα ποσοστό της τάξεως του 25-35%. Αναλυτικότερα:

- Κατά την πρόσπτωση των κυμάτων στην αιχμή των εισόδων των δεξαμενών, σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές, οι ενεργειακές απώλειες ανέρχονται στο 60% περίπου της συνολικής ενέργειας των κυμάτων (Η απορροφούμενη ενέργεια ισούται σχεδόν με το 40% της συνολικής ενέργειας των εισερχόμενων κυμάτων)
- Κατά την πτώση της υδάτινης μάζας στην δεξαμενή, σε χαμηλότερο δηλαδή υψόμετρο, η ενέργεια συγκριτικά με το προηγούμενο στάδιο διατηρείται σε ποσοστό 75% περίπου.
- Η αποδοτικότητα των υδραυλικών τουρμπινών που υπολογίζεται ίση με 90%.
- Η αποδοτικότητα του ηλεκτρικού εξοπλισμού και της γεννήτριας παραγωγής της ενέργειας θεωρείται κατά προσέγγιση ίση με 95%. (Vicinanza D. et al., 2012)



Εικόνα 3.8 Η κατακόρυφη διάταξη των υδραυλικών τουρμπινών  
(Πηγή: Vicinanza D. et al., 2012)

### 3.2.4 Τεχνολογία συσκευών κρούσης

Στην κατηγορία αυτήν ανήκουν συσκευές με ένα ή περισσότερα πτερύγια με ένα βαθμό ελευθερίας κίνησης, την στροφή, ως προς θεμελιωμένες (Oyster) ή αγκυροβολημένες (Langlee) στον πυθμένα αρθρώσεις. Η διεύθυνση τους είναι τέτοια ώστε τα κύματα να προσπίπτουν κάθετα στα πτερύγια όσο αυτό καθίσταται δυνατό στις εκάστοτε συνθήκες. Η αντίσταση των ενσωματωμένων στις αρθρώσεις εμβόλων στις παλινδρομικές κινήσεις των πτερυγίων συνιστά την βάση της παραγωγικής διαδικασίας.

Όμοια με τις πλωτές εγκαταστάσεις, τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής καθορίζονται μέσω εκτεταμένης και προσεκτικής παραμετροποίησης σε συνδυασμό με ορισμένα πειραματικά αποτελέσματα πρωτοτύπων σε μικρότερη κλίμακα από την εμπορική. Η πολυπλοκότητα των υδροστατικών συνθηκών, η αδράνεια των διατάξεων, οι συντελεστές

απόσβεσης (υδροδυναμικής και του συστήματος εξαγωγής ενέργειας) λαμβάνονται υπόψη από τους ερευνητές στα διαγράμματα και τους πίνακες καταγραφής της ενεργειακής απόδοσης των πρωτοτύπων (Whittaker T. and Folley M., 2012). Η ταλάντωση των πτερυγίων θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αποσβενήμενη όπου τον ρόλο οι υδροδυναμικές αντιστάσεις παίζουν τον ρόλο του ελατηρίου. Επομένως πέρα από το μέγεθος των συσκευών απαραίτητο δεδομένο αποτελεί και το βάθος θεμελίωσης ή αγκυροβόλησης της και πιο συγκεκριμένα το ποσοστό βύθισης τους (Fernandez Perez M., 2013) Για το ακριβή υπολογισμό της αρκεί η γνώση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος ( $H_s$ ) καθώς και η συχνότητα με την οποία οι κυματικές κορυφές προσπίπτουν στην επιφάνεια των πτερυγίων  $f$  (αντίστροφη της περιόδου του κύματος  $T$ :  $f = 1/T$ ).

$T_p$ $H_s$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0.5	2	6	11	13	12	9	7	5	3	2	2
1	6	25	48	57	51	38	30	20	13	9	8
1.5	13	58	118	132	132	102	82	52	33	22	16
2	22	90	132	132	132	132	132	90	60	42	33
2.5	33	131	132	132	132	132	132	132	94	69	56
3	45	132	132	132	132	132	132	132	132	99	79
3.5	54	132	132	132	132	132	132	132	132	132	104
4	57	132	132	132	132	132	132	132	132	132	127

Εικόνα 3.9 Πίνακας καταγραφής ενεργειακής απόδοσης σε kW της διάταξης Robusto (Πηγή: [www.langleewp.com](http://www.langleewp.com))

Τελειώνοντας, κομβικό ρόλο για την ανάπτυξη των συγκεκριμένων τεχνολογιών διαδραματίζει ο βαθμός αποδοτικότητας ( $\zeta$ ) των συγκεκριμένων έργων:

$$\zeta = P_e/P_i \quad (24)$$

όπου,

$P_e$ : η ισχύς της εγκατάστασης

$P_i$ : η συνολική ισχύς των προσπιπτόντων κυμάτων

Για τον υπολογισμό της ισχύος των προσπιπτόντων κυμάτων απαραίτητο είναι εκτός από το ύψος και το μήκος του προσπίπτοντος κύματος να λαμβάνεται υπόψη και η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το κύμα κάθε χρονική στιγμή ( $C_g$ ):

$$P_i = E_i/T = \frac{1}{8} * \rho * g * H^2 * C_g$$

Όπου,  $C_g = \frac{\omega}{2*k} * (1 + \frac{2*k*h}{\sin(2*k*h)})$ , για νερά μέτριου βάθους ( $\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$ ) και

$$C_g = \frac{1}{2} * \frac{L}{T}, \text{ για ρηγά νερά } h > \frac{L}{2}$$

όπου,

$\omega$ : είναι η κυκλική συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος,

$h$ : είναι το βάθος του νερού σε ηρεμία

$k$ : είναι ο αριθμός κύματος ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση  $\frac{\omega^2}{g} = K * \tanh(K * h)$

### 3.3 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυμάτων

Οι απαιτούμενοι παράμετροι για τα παραπάνω μαθηματικά μοντέλα, τα μεγέθη δηλαδή των θαλάσσιων διαταραχών προσδιορίζονται είτε από επιτόπιες μετρήσεις στις περιοχές ενδιαφέροντος είτε μέσω υπολογιστικών μεθόδων όπως η μέθοδος SMB (Sverdrub-Munk-Bretschneider) από την οποία προκύπτει σαν αποτέλεσμα το χαρακτηριστικό ύψος και η περίοδος κύματος βασιζόμενα στα ανεμολογικά δεδομένα κάθε περιοχής .

Οι άμεσες μετρήσεις γίνονται ως εξής:

- ❖ Με απευθείας ανάγνωση σε μία σταθερή κατακόρυφη σταδία
- ❖ Με μετρητές τοποθετημένους στα ύφαλα πλοίων
- ❖ Με οπτικές μεθόδους
- ❖ Με μετρητές με υπερήχους
- ❖ Με μετρητές πίεσεως
- ❖ Με μετρητές τύπου πλωτήρα

Η πρώτη είναι και η παλαιότερη από όλες και χρησιμοποιείται για τα έργα κοντά στην ακτή και τα έργα ανοιχτής θαλάσσης. Στην σταδία τοποθετούνται ηλεκτρικές επαφές οι οποίες καταγράφουν ηλεκτρονικά τις ενδείξεις. Σε αντίθετη περίπτωση ένας παρατηρητής οφείλει να καταγράφει συνεχώς τα αποτελέσματα. Είναι αδύνατο, ωστόσο, να ληφθούν πληροφορίες για την διεύθυνση των κυμάτων.

Η δεύτερη αφορά τις μετρήσεις στα ανοιχτά. Από την μία μεριά οι μετρητές αυτοί προσδιορίζουν την κατακόρυφη επιτάχυνση του πλοίου ως προς ένα σταθερό σύστημα αναφοράς και με διπλή ολοκλήρωση την κατακόρυφη μετατόπιση του. Ταυτόχρονα, μετριέται και η πίεση η οποία εξαρτάται από το ύψος των εκάστοτε κυμάτων. Συνδυάζοντας αυτά τα δύο αποτελέσματα και απαλείφοντας την κίνηση του πλοίου προκύπτει το απόλυτο ύψος κύματος αλλά και πάλι είναι αδύνατο να προσδιορισθεί η διεύθυνση των κυμάτων.

Αντίθετα, με την βοήθεια της τεχνολογίας κατά την τρίτη μέθοδο η διεύθυνση των κυμάτων είναι φανερή. Με τον όρο οπτικές μέθοδοι περιγράφονται η φωτογράφιση, η κινηματογράφιση σε τακτά χρονικά διαστήματα και η στερεογράφιση. Πλέον υπάρχει και η δυνατότητα καταγραφής του κυματικού προφίλ και την νύχτα με την συνδρομή ραντάρ μικρού μήκους κύματος.

Αναφορικά με την τέταρτη μέθοδο, ένα όργανο τοποθετείται στον πυθμένα και εκπέμπει υπέρηχους προς την επιφάνεια. Ανάλογα με τον χρόνο που μεσολαβεί από την εκπομπή του υπέρηχου μέχρι την επιστροφή του, μετά την ανάκλαση στην επιφάνεια, υπολογίζεται το ύψος του στρώματος του νερού και κατ' επέκταση και τα ύψη κύματος. Όλες οι καταγραφές μεταφέρονται μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων στην ακτή.

Οι μετρητές πίεσεως βασίζονται στο γεγονός ότι η πίεση σε οποιαδήποτε στάθμη της θάλασσας σχετίζεται άμεσα με τον όγκο της υγρής μάζας στα άνωθεν στρώματα, συνεπώς και με το ύψος κύματος σε κάθε σημείο. Στον πυθμένα η πίεση είναι:

$$p = \frac{H}{\cosh \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \frac{t}{T}$$



Όπου  $H$  είναι το ύψος κύματος,  $L$  το μήκος κύματος και  $T$  η περίοδος κύματος ( $L, T$  υπολογίζονται απευθείας). Η απόσβεση  $\cosh 2\pi d/L$  αυξάνει ταχύτητα με το βάθος και για τον λόγο αυτό η μέθοδος χρησιμοποιείται σε κύματα με μεγάλο  $L$  ή σε νερά με βάθος που δεν ξεπερνά τα 20 m περίπου. Μειονέκτημα αποτελεί το φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων που δεν επιτρέπει την πιστή αναπαράσταση της επιφάνειας. Οι μετρήσεις είτε μεταφέρονται μέσω καλωδίων στην ακτή είτε καταγράφονται σε ενσωματωμένη συσκευή.

Η πιο διαδεδομένη, ίσως, μέθοδος καταγραφής πραγματοποιείται από τους μετρητές τύπου πλωτήρα. Οι ενδείξεις ενός επιταχυνσιόμετρου, που βρίσκεται μέσα σε έναν πλωτήρα, ολοκληρώνονται δύο φορές με σκοπό να προκύψει η μετατόπιση της θαλάσσιας επιφάνειας. Ο πλωτήρας αγκυροβολείται σε βαθιά νερά και οι μετρήσεις είτε μεταφέρονται σε αποστάσεις μέχρι και 50 m είτε καταγράφονται σε ειδική συσκευή στο εσωτερικό του. Τρεις παλιοί πλωτήρες σε διάταξη μπορούν να προσδιορίσουν και την διεύθυνση μεταδόσεως των κυμάτων. Την δυνατότητα αυτή έχουν πλέον και μεμονωμένοι πλωτήρες με την χρησιμοποίηση ενός ανεστραμμένου εκκρεμούς. Συνοπτικά, η μέθοδος αυτή είναι η πιο ακριβής για την απόδοση της θαλάσσιας επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα το κόστος της είναι μεγάλο και τα όργανα υπόκεινται σε απώλειες από την ναυσιπλοΐα και άλλες αιτίες.



Εικόνα 3.10 Πλωτήρες του ελληνικού συστήματος θαλάσσιας έρευνας ‘Ποσειδώνας’  
(Πηγή: [www.poseidon.hcmr.gr](http://www.poseidon.hcmr.gr))

Το πιθανότερο, ωστόσο, είναι οι μετρήσεις να είναι ελλιπείς για απομακρυσμένες κυρίως τοποθεσίες διότι οι μετρητές δεν μπορούν να καλύψουν το τεράστιο θαλάσσιο φάσμα. Στην περίπτωση αυτή ιστορικά δεδομένα ή ενδείξεις των οργάνων σε παραπλήσιες περιοχές αξιοποιούνται για την προσομοίωση των θαλάσσιων συνθηκών στο σημείο του ενδιαφέροντος. Επομένως, υποθετικά σενάρια καλύπτουν τα υπάρχοντα κενά συμβάλλοντας στην ολοκλήρωση των εκάστοτε μελετών και πειραματικών δοκιμών.

Λύση θα μπορούσε να δώσει και η μέθοδος SMB εφόσον διατίθενται η ταχύτητα  $U$  (m/s), η διεύθυνση των ανέμων και η διάρκεια πνοής τους  $D$  (hr/y). Το μοντέλο αποτελεί μια παλαιωμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως και σήμερα απλοποιώντας σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα καθώς αγνοεί αρκετούς σημαντικούς παράγοντες. Η βασική παραδοχή του είναι ότι υφίσταται ένα κύμα, αντιπροσωπευτικό της θαλάσσιας διαταραχής και

ονομάζεται χαρακτηριστικό. Αντιστοιχεί προσεγγιστικά με το φυσικό κύμα το ύψος του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί από την ακτή και ισούται με το μέσο ύψος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων που εμφανίζονται.

Ένας επιπλέον όρος που εμφανίζεται είναι και το ανάπτυγμα του πελάγους  $F$  (Fetch). Πρόκειται για την μη διακοπτόμενη από χερσαία εμπόδια θαλάσσια έκταση γύρω από την ερευνώμενη θέση. Αποτέλεσμα της διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω είναι ο καθορισμός του χαρακτηριστικού ύψους  $H_s$  και της περιόδου κύματος  $T_s$ . Οι σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη αυτά είναι :

$$\frac{g * H_s}{U^2} = 0,283 * \tanh (0,0125 * \Phi^{0,42})$$

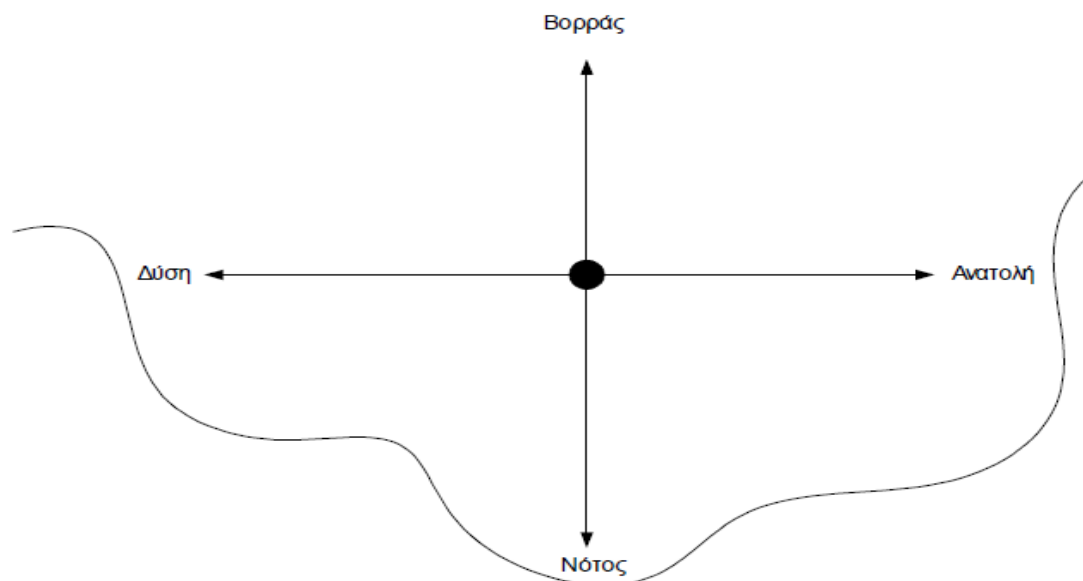
$$\frac{g * T_s}{U} = 7,540 * \tanh (0,077 * \Phi^{0,25})$$

$$\frac{g * D}{U} = 6,588 * \exp [\{0,016 * (\ln\Phi)^2 - 0,369 * (\ln\Phi) + 2,2024\}^{0,5} + 0,8798 * (\ln\Phi)]$$

Όπου  $\Phi$  είναι ο συντελεστής αναπτύγματος πελάγους :  $\Phi = \frac{gF}{U^2}$ .

Η διαδικασία υπολογισμού είναι η εξής:

- ❖ Επιλέγεται ένα σημείο στην υπό μελέτη ακτή στην περιοχή των βαθέων υδάτων
- ❖ Στο σημείο αυτό χαράσσονται οι ευθείες που παριστάνουν τις τέσσερις διευθύνσεις Βορρά, Νότος, Δύση, Ανατολή.

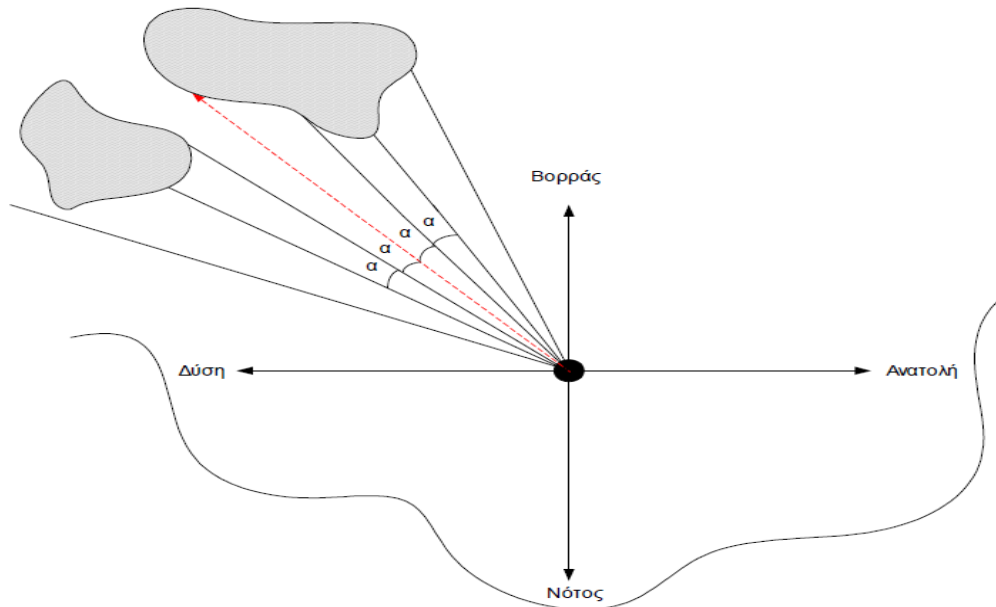


Εικόνα 3.11 Επιλεγμένο σημείο και τέσσερις διευθύνσεις προσανατολισμού

- ❖ Εντοπίζονται από τα τοπογραφικά και ανεμολογικά στοιχεία ποιες διευθύνσεις επηρεάζουν την ακτή της μελέτης. Οι διευθύνσεις αυτές απομονώνονται και για την κάθε μια ακολουθούνται τα κάτωθι βήματα:
  - Σχεδίαση από το επιλεγμένο σημείο ευθειών ανά  $5^\circ$ ,  $45^\circ$  δεξιά και αριστερά της κάθε διεύθυνσης.

- Επέκταση των ευθειών αυτών έως ότου τέμνουν κάποιο χερσαίο τμήμα και προσδιορισμός του μήκους τους  $R_i$  και του συνημίτονου της γωνίας  $\cos \alpha$ .
- ❖ Υπολογισμός του αναπτύγματος πελάγους σε μονάδες μήκους από την σχέση:

$$F = \sum (R_i * (\cos \alpha)^2) / \sum \cos \alpha$$



Εικόνα 3.12 Ευθείες ανά  $5^\circ$ ,  $45^\circ$  δεξιά και αριστερά της ορθώς επιλεγμένης διεύθυνσης

Η διάρκεια πνοής του ανέμου  $D$  ορίζεται ως το γινόμενο της συχνότητας του ανέμου (%) με το σύνολο των ωρών του χρόνου.

Τελικά χρησιμοποιώντας τον αδιάστατο λόγο  $\Phi$  το ύψος του χαρακτηριστικού κύματος στα βαθειά  $H_s$  και την περίοδο κύματος  $T_s$ :

$$H_s = \left( \frac{U^2}{g} \right) * 0,283 * \tanh \{0,0125 * (\ln \Phi)^{0,42}\}$$

$$T_s = \left( \frac{U}{g} \right) 7,540 * \tanh \{0,077 * (\ln \Phi)^{0,25}\}$$

(Απόσπασμα από τις διαδικτυακές σημειώσεις της κ. Τσουκαλά Β. για το μάθημα της Ακτομηχανικής του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου)

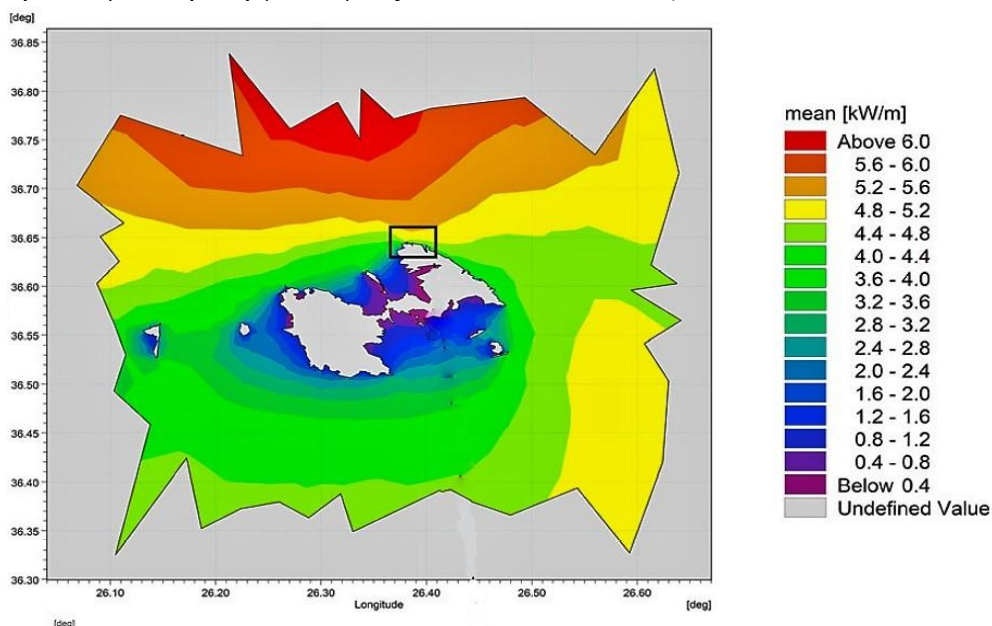
#### 4. Εφαρμογή στο νησί της Αστυπάλαιας

Η Αστυπάλαια είναι ένα νησί έκτασης 96,9 km<sup>2</sup> που ανήκει στο σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων στο νότιο Αιγαίο πέλαγος. Οι μόνιμοι κάτοικοι του νησιού σύμφωνα με την τελευταία απογραφή το 2011 ήταν 1334, ο αριθμός των παραθεριστών ωστόσο ανέρχεται κατά μέσο όρο στους 20.000 κάθε χρόνο.

Η ετήσια ζήτηση σε ενέργεια, σύμφωνα με τις μέσες μηνιαίες τιμές το έτος 2015 ήταν 6,35 GWh. Το νησί όντας αποκομμένο από το ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας εξαρτάται αποκλειστικά από τα ορυκτά καύσιμα με τις ακόλουθες περιβαλλοντικές και οικονομικές αρνητικές επιπτώσεις. (Δανιήλ Β., 2018)

Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, εξετάζεται η απόδοση ορισμένων διατάξεων εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας στην περιοχή στο πλαίσιο της αποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η πρώτη περίπτωση αφορά την εγκατάσταση ενός έργου αντίστοιχου του SSG και η δεύτερη ένα έργο με πλωτήρες αντίστοιχο του Wave Star όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

Η αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων για τα επόμενα 100 (2018-2117) χρόνια υπολογίστηκε μέσω της συνθετικής χρονοσειράς (Παράρτημα Β) που παράχθηκε από τους Moschos et al., (2017). Στην συγκεκριμένη πραγματοποιείται η λεπτομερής πρόβλεψη των υψών και των περιόδων των κυμάτων στην περιοχή μελέτης σε ωριαία βάση. Για την τελική επιλογή της περιοχής μελέτης συνεκτιμήθηκαν τα αποτελέσματα του φασματικού κυματικού μοντέλου MIKE 21 και η παράμετρος της απόστασης από την ακτή. Με την χρήση των μετρήσεων των σηματοδούρων της Μυκόνου και της Σαντορίνης, τις πιο κοντινές δηλαδή στην Αστυπάλαια, ως δεδομένα εκτιμήθηκε μέσω του μοντέλου το κυματικό δυναμικό γύρω από το νησί (Εικόνα 4.1). Εν τέλει η θέση που πληροί ταυτόχρονα τις προϋποθέσεις υψηλής δυναμικής ενέργειας και μικρής απόστασης από την ακτή, βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νησιού έχοντας πρόσβαση σε κυματική ενέργεια ύψους 5 kW/m (Εικόνα 4.1). (Moschos E. et al., 2017)



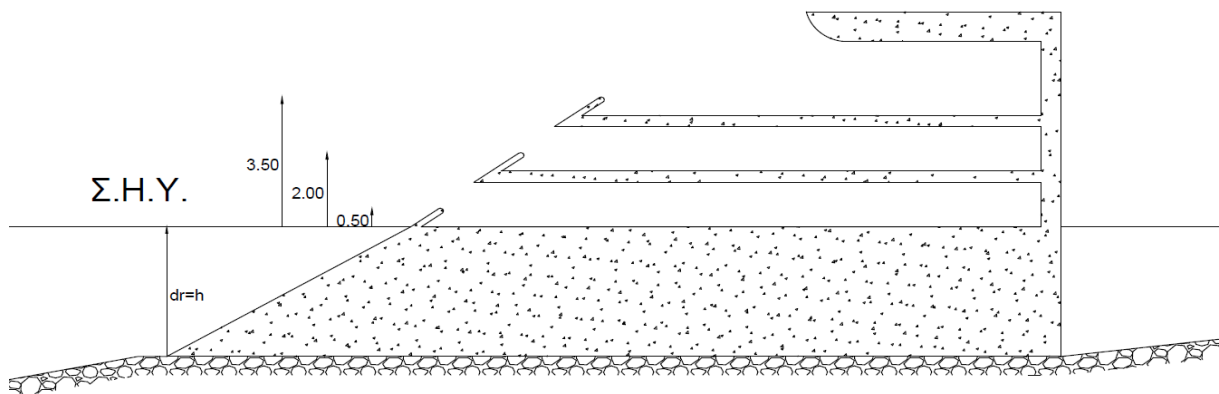
Εικόνα 4.1 Κυματικό δυναμικό γύρω από την Αστυπάλαια και επιλεγμένη θέση μελέτης. (Πηγή: Moschos E. et al, 2017)

## 4.1 Sea-wave Slot-cone Generator (SSG)

Σύμφωνα με το υποθετικό σενάριο της παρούσας εργασίας, μια διάταξη τύπου SSG εγκατεστημένης ισχύος 150 kW θεμελιώθηκε στον πυθμένα της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής της Αστυπάλαιας. Η βύθιση της κατώτερης ράμπας της  $dr$  ταυτίζεται με το συνολικό βάθος θεμελίωσης  $h$  ( $dr/h = 1$ ) και οι γωνίες κλίσης όλων των ραμπών ισούνται με  $35^\circ$  ( $\alpha r = \theta j = 35^\circ$ ) όπως στην εικόνα 4.2. Το έργο έχει μήκος  $L=100$  m και αποτελείται από τρεις δεξαμενές σε κατακόρυφη διάταξη τα ύψη των οποίων είναι 0,5 m, 2 m και 3,5 m και 4 συνολικά τουρμπίνες τύπου Kaplan (δύο στην κατώτερη δεξαμενή).

### Χαρακτηριστικά συσκευής

$R_{c1} =$	0,50	m
$R_{c2} =$	2,00	m
$R_{c3} =$	3,50	m
$L =$	100	m
$A =$	0,197	
$B =$	-1,753	
$C =$	-0,408	



Εικόνα 4.2 Σχηματική τομή μονάδας τύπου SSG (σχέδιο εκτός κλίμακας)

Ο υπολογισμός της μετατρεπόμενης ενέργειας της συγκεκριμένης μονάδας βασίστηκε στα προβλεπόμενα ύψη κύματος κατά την διαδικασία παραγωγής της χρονοσειράς που προαναφέρθηκε. Μέσω των εξισώσεων (21), (22), (23), (24) προσδιορίζονται τα ποσά ενέργειας που παράγονται με την πτώση του νερού μέσα από τις τουρμπίνες της κάθε δεξαμενής κάθε ώρα από το έτος 2018 έως το 2117. Η μόνη προϋπόθεση για την εφαρμογή των εξισώσεων, φυσικά, είναι να εισέρχεται νερό στην αντίστοιχη δεξαμενή, δηλαδή το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος ( $H_s/2$ ) να είναι μεγαλύτερο του ύψους του χείλους εισόδου στο εκάστοτε επίπεδο ενώ η κλίση της ράμπας εισόδου στον πόδα της συσκευής λαμβάνεται υπόψη μέσω των παραμέτρων  $A$ ,  $B$ ,  $C$  στην εξίσωση (21). Αθροιστικά τα αποτελέσματα για κάθε δεξαμενή χωριστά είναι:

- ❖ 58.877,24 kWh για τα 100 έτη και κατ' επέκταση 588,77 kWh κατά μέσο όρο ανά έτος (δεξαμενή 3)
- ❖ 14.882.629,44 kWh για τα 100 έτη και κατ' επέκταση 148.826,29 kWh κατά μέσο όρο ανά έτος (δεξαμενή 2)

- ❖ 22.492.378,14 kWh για τα 100 έτη και κατ' επέκταση 224.923,78 κατά μέσο όρο ανά έτος (δεξαμενή 1)

Συνολικά, δηλαδή, μια μονάδα τύπου SSG δύναται να παρέχει στο δίκτυο 0,374 GWh ηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση για την περίοδο 2018-2117.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα διαδικασίας υπολογισμού εξαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα τύπου SSG.

Συνολικά παραγόμενη ενέργεια ανά δεξαμενή (kWh)			
3	2	1	Δεξαμενές
58877,24	14882629,44	22492378,14	(100 έτη)
588,77	148826,29	224923,78	(ανά έτος)

<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>	<b>374338,85</b>	<b>kWh/έτος</b>
	<b>0,374</b>	<b>GWh/έτος</b>

## 4.2 Wave Star

Η παραγόμενη ενέργεια του έργου αυτού λαμβάνεται από τα πινακοποιημένα στοιχεία των κατασκευαστών. Πίνακας αξιολόγησης δυνατοτήτων έχει καταρτιστεί την εγκατάσταση της εταιρίας Wave Star με εγκατεστημένη ισχύ 600 kW (Εικόνα 3.5). Λόγω των ηπιότερων κυματικών συνθηκών στο Αιγαίο πέλαγος η αποδοτικότητα μιας τέτοιας διάταξης δεν θα ήταν ικανοποιητική. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το κυματικό δυναμικό των 5 kW/m (MIKE 21) και την αναμενόμενη αποδοτικότητα του έργου ( $n=30\%-35\%$ ) συνέβαλλαν στην απόφαση της θεμελίωσης μιας μονάδας εγκατεστημένης ισχύος 150 kW και συνολικού μήκους  $L=100$  m. Ο πίνακας αξιολόγησης των δυνατοτήτων αυτής της μονάδας προκύπτει από την υποβάθμιση του ήδη γνωστού πίνακα των 600 kW.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- ❖ Βήμα 1: Προσδιορισμός του βαθμού υποβάθμισης  $\lambda$  του πίνακα σύμφωνα με το κριτήριο Froude:

$$\lambda = (150/600)^{2/7}$$

- ❖ Βήμα 2: Πολλαπλασιασμός των τιμών παραγόμενης ενέργειας του πίνακα των 600 kW με την τιμή  $\lambda^{7/2}$  από όπου καθορίζονται τα ποσά εξαγόμενης ενέργειας  $P'$  της μονάδας των 150 kW:

$$P' = \lambda^{7/2} * P$$

- ❖ Βήμα 3: Προσαρμογή των υψών κύματος  $Hs'$  και των περιόδων κύματος  $T_{0,1}'$  μέσω του πολλαπλασιασμού των τιμών του πίνακα των 600 kW με τις τιμές  $\lambda$  και  $\lambda^{0,5}$  αντίστοιχα:

$$Hs' = \lambda * Hs$$

$$T_{0,1}' = \lambda^{0,5} * T_{0,1}$$

- ❖ Βήμα 4: Χαρακτηριστικό των έργων αυτών είναι ότι για ύψη μεγαλύτερα των 3 m παύουν να λειτουργούν και ανυψώνονται για την αποφυγή οποιασδήποτε βλάβης.

Επομένως, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας όλα τα κελιά του νέου πίνακα συμπληρώνονται γραμμικά έως ότου υφίστανται τιμές για ύψη κύματος  $H_s$  έως 3 m.

**Πίνακας 4.2** Υποβαθμισμένος πίνακας παραγόμενης ενέργειας για την εγκατάσταση τύπου Wave Star 150 kW.

$\lambda=$	<b>0,673</b>										
Ύψος κύματος $H_s'$ (m)	Περίοδος κύματος $T_{0,1}$ (s)										
	1,64-2,46	2,46-3,28	3,28-4,10	4,10-4,92	4,92-5,74	5,74-6,56	6,56-7,38	7,38-8,20	8,20-9,02	9,02-9,84	9,84-10,66
0,0-0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,34-0,67	0	12,25	18,25	21,25	21,5	20,75	19,5	18	16,75	15,75	14,75
0,67-1,01	13,5	34	48,25	51,25	49	45,5	41,75	38,25	35,5	33	30,75
1,01-1,35	26,5	66,25	86,75	86,75	80,5	73,5	66,25	61	56	51,75	48,25
1,35-1,68	43,75	107,25	130,5	124,75	114,25	103	93	84,25	78	72	66,75
1,68-2,02	65,5	150	150	150	150	135	121	110,5	99,75	91,75	85
2,02-2,36	80	150	150	150	150	150	145	127,5	117,5	108,75	100
2,36-2,69	95	150	150	150	150	150	150	147,5	137,5	125	113,5
2,69-3,00	105	150	150	150	150	150	150	150	150	140	128
> 3,00	Συνθήκες καταιγίδας (Παύση λειτουργίας)										

Στην συνέχεια μέσω της συνθετικής χρονοσειράς των κυματικών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκε και στην πρώτη περίπτωση με απλή ανάγνωση από τον πίνακα 4.2 προσδιορίζεται η απορροφούμενη ενέργεια από τους κυματισμούς για το έτος 2018. Ειδικότερα, για κάθε ζεύγος τιμών ύψους και περιόδου κύματος, όπως προβλέπονται στην συνθετική χρονοσειρά, αντιστοιχίζεται μία τιμή παραγόμενης ενέργειας για κάθε ώρα του έτους.

### 4.3 Σύγκριση των δύο σεναρίων

Για την σύγκριση των δύο τεχνολογιών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για το έτος 2018 (Παράρτημα Β), μια χρονοσειρά παραγόμενης ενέργειας για κάθε τεχνολογία που προέκυψε από τις μεθόδους που αναλυθήκαν παραπάνω.

Η πιο γενικευμένη και απλή σύγκριση αφορά τα αθροίσματα και τις μέσες τιμές των χρονοσειρών:

Συσκευή τύπου SSG		
ΣΥΝΟΛΟ:	0,386	GWh
Μέση τιμή:	44,074	kWh

Συσκευή τύπου Wave Star		
ΣΥΝΟΛΟ:	0,489	GWh
Μέση τιμή:	55,872	kWh

Η συσκευή με τους πλωτήρες (τύπου Wave Star) εμφανίζεται αποτελεσματικότερη στις κυματικές συνθήκες του νησιού της Αστυπάλαιας, ωστόσο αυτό δεν είναι το μοναδικό κριτήριο επιλογής της καταλληλότερης διάταξης.

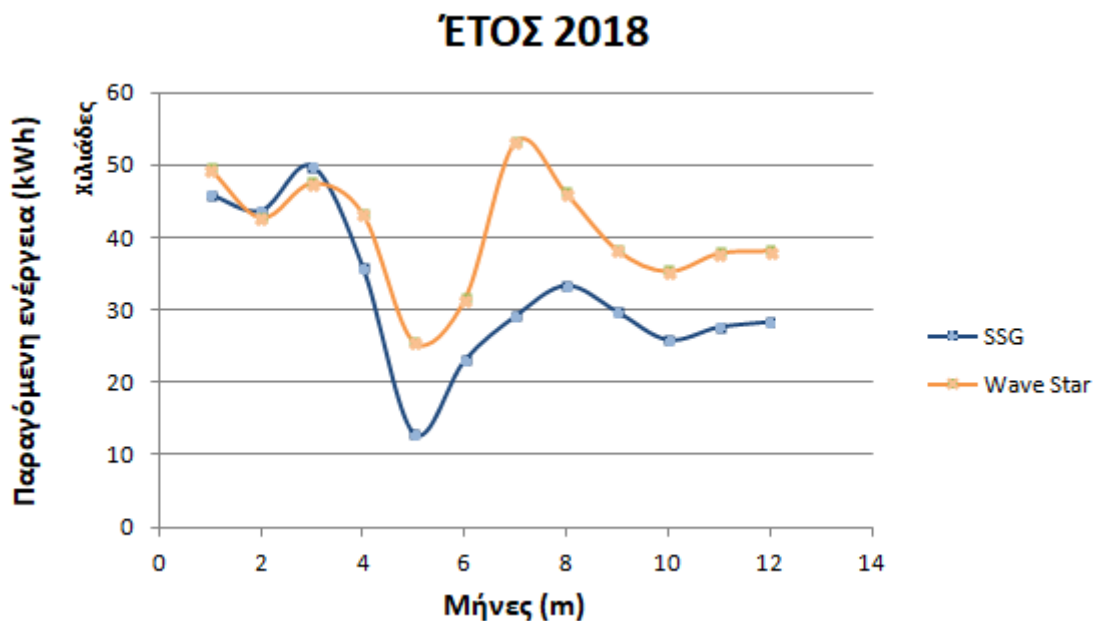
Ακολουθεί μια σειρά από ειδικότερες συγκρίσεις στις οποίες μελετώνται οι αντίστοιχες τιμές εξαγόμενης ενέργειας για κάθε διάταξη σε μηνιαία, ημερήσια και ωριαία βάση με την βοήθεια ενιαίων διαγραμμάτων.

Σε μηνιαία βάση αθροίζοντας τις ωριαίες τιμές για κάθε μήνα χωριστά προκύπτουν οι εξής χρονοσειρές:

Πίνακας 4.3 Παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα (έτος 2018).

ΜΗΝΕΣ	ΤΥΠΟΣ SSG	ΤΥΠΟΣ Wave Star
	Παραγόμενη ενέργεια σε μηνιαία βάση (kWh)	Παραγόμενη ενέργεια σε μηνιαία βάση (kWh)
1	45977,50	49516,74
2	43788,66	42777,00
3	49918,37	47587,18
4	35894,03	43306,67
5	12980,30	25571,06
6	23102,22	31470,81
7	29197,68	53287,50
8	33417,57	46177,50
9	29814,64	38326,24
10	25922,99	35340,75
11	27669,47	37859,56
12	28408,84	38218,99

Στην ευκολότερη κατανόηση και σύγκριση τους συμβάλλει το παρακάτω κοινό διάγραμμα:



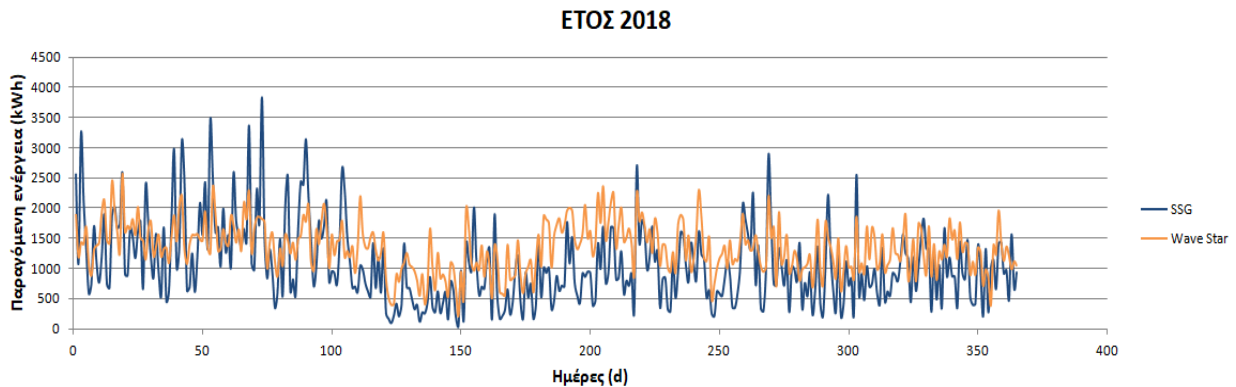
Συμπερασματικά, η συσκευή τύπου Wave Star αν εξαιρεθεί ο μήνας Φεβρουάριος και ο Μάρτιος είναι αρκετά αποδοτικότερη από τη ετέρα λύση. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημά της είναι ότι οι μέγιστες διαφορές εμφανίζονται τον μήνα Μάιο και τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο οπότε και η ενεργειακή ζήτηση του αυξάνεται λόγω της προσέλευσης των παραθεριστών που θα προτιμήσουν τον καλοκαιρινό αυτόν προορισμό για τις διακοπές τους. Η παραγωγικότητα της μονάδας τύπου SSG είναι γενικότερα χαμηλή τους καλοκαιρινούς μήνες αν και όπως θα αναφερθεί παρακάτω το πρόβλημα αυτό είναι δυνατόν να μετριαστεί.



Σε ημερήσια βάση αθροίζοντας τις ωριαίες τιμές για κάθε ημέρα χωριστά προέκυψε μία νέα χρονοσειρά με τα εκτιμώμενα ποσά απορροφούμενης ενέργειας και για τις 365 ημέρες του έτους για κάθε μία τεχνολογία. Η μορφή των χρονοσειρών και το αντίστοιχο διάγραμμα είναι τα εξής:

Πίνακας 4.4 Παραγόμενη ενέργεια ανά ημέρα (έτος 2018).

ΗΜΕΡΕΣ	ΤΥΠΟΣ SSG	ΤΥΠΟΣ Wave Star
	Παραγόμενη ενέργεια σε ημερήσια βάση (kWh)	Παραγόμενη ενέργεια σε ημερήσια βάση (kWh)
1	2576,33	1901,25
2	1075,92	1194,25
3	3255,33	1428,75
4	2136,07	1402,06
5	1315,78	1688,00
6	575,98	1061,50
7	738,65	878,50
8	1697,83	1305,81
9	1087,03	1377,00
10	762,25	1426,25
11	1196,85	1924,00
12	1891,48	2129,56
...	...	...
365	944,77	1037,50



Εκ πρώτης όψεως, η προσφερόμενη ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο από την μονάδα τύπου SSG εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα αλλά για να διαπιστωθεί εάν αυτό αποτελεί πρόβλημα είναι απαραίτητο να μελετηθούν και οι ωριαίες χρονοσειρές παραγόμενης ενέργειας. Επιπροσθέτως, και σε αυτό το διάγραμμα είναι φανερή η ενεργειακή υπεροχή της μονάδας τύπου Wave Star κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, δηλαδή από την 152<sup>η</sup> ημέρα έως την 243<sup>η</sup> ημέρα.

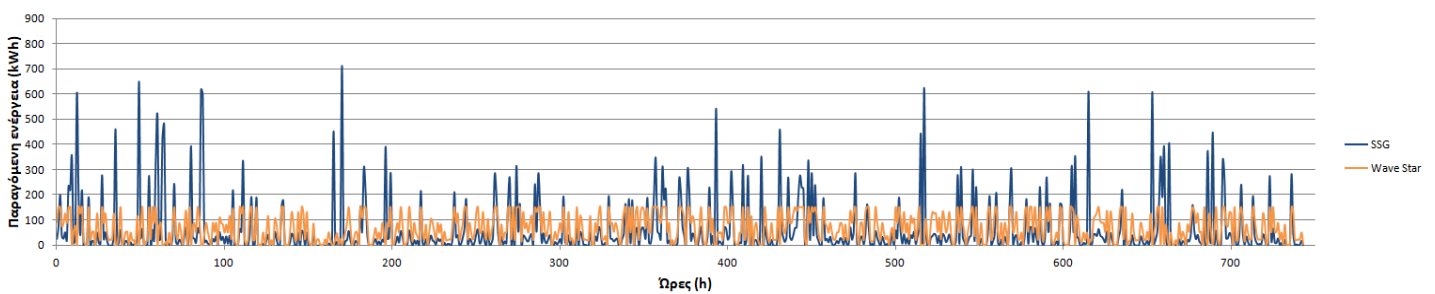
Σε ωριαία βάση οι προκύπτουσες χρονοσειρές από τις ανωτέρω διαδικασίες υπολογισμού στα υποκεφάλαια 4.1, 4.2. Πρόκειται για την λεπτομερέστερη σύγκριση από την οποία εξάγονται τα ασφαλέστερα συμπεράσματα για την λειτουργία της εκάστοτε μονάδος. Λόγω του μεγάλου πλήθους των τιμών εκπονήθηκαν διαγράμματα για κάθε μήνα χωριστά, για μεγαλύτερη ευκρίνεια και παρατίθενται στο παράρτημα Β. Στην συγκεκριμένη παράγραφο επιλέγεται να αναλυθεί ο μήνας Ιανουάριος και ο μήνας Ιούλιος. Οι χρονοσειρές έχουν την παρακάτω μορφή:

Πίνακας 4.5 Παραγόμενη ενέργεια ανά ώρα (έτος 2018)

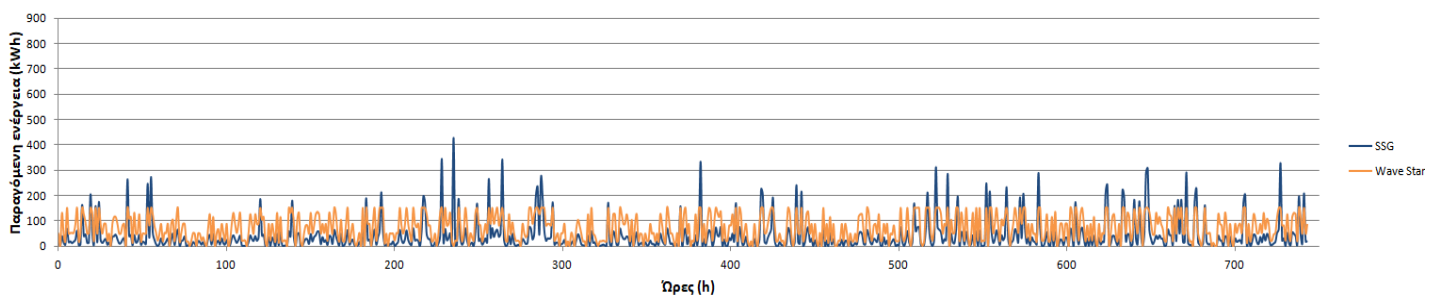
ΩΡΕΣ	ΤΥΠΟΣ SSG	ΤΥΠΟΣ Wave Star
	Παραγόμενη ενέργεια το έτος 2018 (kWh)	Παραγόμενη ενέργεια το έτος 2018 (kWh)
1	23,47	86,75
2	74,58	150,00
3	200,83	150,00
4	36,53	73,50
5	27,28	86,75
6	52,30	124,75
7	20,49	86,75
8	235,98	150,00
9	219,42	150,00
10	354,04	0,00
11	9,73	51,25
12	32,55	73,50
...	...	...
8760	30,79	80,50

Τα διαγράμματα των μηνών Ιανουαρίου και Ιουλίου σε ωριαία βάση είναι τα εξής:

ΜΗΝΑΣ 1



ΜΗΝΑΣ 7



Παρατηρώντας και τα δύο διαγράμματα η μετατρεπόμενη ενέργεια από την εγκατάσταση τύπου SSG είναι πολύ μεγαλύτερη τον μήνα Ιανουάριο σε σχέση με τον μήνα Ιούλιο και οι διακυμάνσεις της σε κάθε μήνα ξεχωριστά είναι μεγάλες (κυρίως για τον Ιανουάριο), ενώ όσον αφορά την δεύτερη λύση σημειώνεται μια σταθερότητα. Αυτό φανερώνει ότι η επιρροή των μεταβολών του ύψους κύματος είναι μεγαλύτερη στις υπερπηδητές από το υγρό στοιχείο κατασκευές. Χαρακτηριστικό δηλαδή για αυτές τις εγκαταστάσεις (SSG) θα ήταν η αβεβαιότητα και κάποια προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς της ενέργειας από τις διακυμάνσεις αυτές, αν δεν υφίσταντο η δυνατότητα αποθήκευσης, το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους. Ο σχεδιασμός και ο τρόπος λειτουργίας τους, προσφέρει ευελιξία στην παραγωγή ενέργειας. Για παράδειγμα, νερό μπορεί να αποθηκευτεί στην ανώτερη δεξαμενή μέσω του αποκλεισμού του από τις τουρμπίνες και να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη στιγμή, όταν η ενεργειακή ζήτηση στο νησί θα είναι μεγαλύτερη. Με τον τρόπο αυτόν εξομαλύνονται οι αιχμές των παραπάνω διαγραμμάτων (μπλε γραμμή) ελαττώνοντας τις διακυμάνσεις από ώρα σε ώρα και μειώνονται οι αποκλίσεις στην απόδοση από μήνα σε μήνα.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό κριτήριο είναι και το κόστος της κάθε περίπτωσης:  
Συσκευή τύπου SSG:

- ❖ Προσαρμόζοντας τα στοιχεία του κόστους ενός υπεράκτιου πάρκου μετατροπών κυματικής ενέργειας με συνολική ισχύ 30 MW στην συγκεκριμένη περίπτωση χερσαίου έργου εγκατεστημένης ισχύος 150 kW το κόστος εγκατάστασης και θεμελίωσης υπολογίζεται ως εξής:

Κόστος εγκατάστασης (μελέτη και κατασκευή συσκευής):  
 $(40.000.000+11.000.000+6.000.000)*(150/30.000) = \underline{285.000 \text{ €}}$   
 Κόστος θεμελίωσης:  $12.000.000*(150/30.000) = \underline{60.000 \text{ €}}$   
 (URS: Wave Power Feasibility Study Report, 2009)

- ❖ Για τον υπολογισμό του κόστους των τουρμπινών τύπου Kaplan χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του πανεπιστημίου Lancaster για παροχές μεγαλύτερες των  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ :  
 Κόστος τουρμπινών:  $1,13*4*14.000*(150/4)^{0,35} = \underline{225.000 \text{ €}}$   
 (www.engineering.lancs.ac.uk)
- ❖ Αναφορικά με το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε η τεχνο-οικονομική έκθεση των O' Connor et al. (2013) για μία άλλη εγκατάσταση απορρόφησης κυματικής ενέργειας, του Pelamis P1.

Κόστος σύνδεσης στο δίκτυο: 5% κεφαλαιουχικών δαπανών = 30.000 €  
**Συνολικές κεφαλαιουχικές δαπάνες: 600.000 €**

Συσκευή τύπου Wave Star: οι κεφαλαιουχικές δαπάνες ανέρχονται περίπου στα 5.366,67 € ανά εγκατεστημένο kW. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ισούνται με:

**Συνολικές κεφαλαιουχικές δαπάνες:  $5.366,67*150 = 805.000 \text{ €}$**

Συνδυάζοντας, λοιπόν, τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και τις δαπάνες λειτουργίας με την εκτιμώμενη παραγόμενη ενέργεια για 10 συνολικά χρόνια, όπως και στον πίνακα 2.5 προκύπτουν τα εξής κόστη ενέργειας:

Συσκευή τύπου SSG:  $1,18*600.000 \text{ €} / (386.000 \text{ kWh} * 10 \text{ years}) = 0,18 \text{ €/kWh}$

Συσκευή τύπου Wave Star:  $1,18*805.000 \text{ €} / (489.000 \text{ kWh} * 10 \text{ years}) = 0,19 \text{ €/kWh}$

Η συσκευή τύπου SSG είναι με μικρή διαφορά φθηνότερη και θεωρητικά προτιμότερη για την περίπτωση του νησιού της Αστυπάλαιας. Την άποψη αυτή ενισχύει το γεγονός ότι ταυτόχρονα με την εξαγωγή της ενέργειας είναι δυνατόν να συμβάλλει και στην προστασία της ακτής μειώνοντας ή απορροφώντας την ενέργεια των εισερχόμενων κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται υπόψη για την εκτίμηση του κόστους ενέργειας οι επιπλέον κεφαλαιουχικές δαπάνες που σχετίζονται με τις κατασκευές και τον εξοπλισμό που δεν θα υφίστανται σε έναν παραδοσιακό κυματοθραύστη. Για παράδειγμα, ως κεφαλαιουχικές δαπάνες θα θεωρούνταν το κόστος των τουρμπινών, το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο αλλά και κάποια πρόσθετη ποσότητα σκυροδέματος και χάλυβα για την κατασκευή των δεξαμενών. Συμπερασματικά η τιμή ανά kWh θα μειώνονταν (Margheritini L., 2009).

#### Συσκευή τύπου SSG

ΣΥΝΟΛΟ:	0,386	GWh
Μέση τιμή:	44,074	kWh
Διακύμανση:	92,716	
Συντελεστής αποδοτικότητας:	29%	

Κεφαλαιουχικές δαπάνες:	600.000	€
-------------------------	---------	---

Κόστος ενέργειας:	0,18	€/kWh
-------------------	------	-------

#### Συσκευή τύπου Wave Star

ΣΥΝΟΛΟ:	0,489	GWh
Μέση τιμή:	55,872	kWh
Διακύμανση:	52,432	
Συντελεστής αποδοτικότητας:	37%	

Κεφαλαιουχικές δαπάνες:	805.000	€
-------------------------	---------	---

Κόστος ενέργειας:	0,19	€/kWh
-------------------	------	-------

Εν τέλει,

- ❖ Με αυξημένο συντελεστή βαρύτητας χρησιμοποιείται στην σύγκριση το προτέρημα της αποθήκευσης ενέργειας για έναν καλοκαιρινό θεωρητικά προορισμό διότι η ζήτηση κάποιων μηνών είναι αισθητά μεγαλύτερη από κάποιους άλλους. Επεξηγηματικά, η ευελιξία στην παραγωγή ενέργειας σε τέτοιες περιπτώσεις μειώνει σε μεγάλο βαθμό την αβεβαιότητα.
- ❖ Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης τύπου SSG είναι μικρότερο συγκριτικά με την εγκατάσταση τύπου Wave Star ειδικά στην περίπτωση όπου συμβάλλει και στην προστασία της ακτής.

**Συνεπώς η συσκευή τύπου SSG δείχνει προτιμότερη σύμφωνα με την παρούσα εργασία.**

## 5. Συμπεράσματα

Η θαλάσσια ενέργεια συνίσταται σε 5 μορφές των οποίων οι θεωρητικές δυνατότητες ανέρχονται περίπου σε:

- ❖ Κυματική ενέργεια: 26.300 TWh ανά χρόνο
- ❖ Παλιρροιακή ενέργεια 1.200 TWh ανά χρόνο
- ❖ Θερμοδυναμική ενέργεια 44.000 TWh ανά χρόνο
- ❖ Ωσμωτική ενέργεια 1.650 TWh ανά χρόνο

Ενώ για την παραγόμενη ενέργεια μέσω των ωκεάνιων ρευμάτων οι πληροφορίες είναι ελλιπείς.

Παρατηρώντας, ωστόσο, τους αντίστοιχους χάρτες οι περιοχές με τις μεγαλύτερες δυνατότητες είναι, στην πλειοψηφία τους, απομακρυσμένες από την ακτή σε αποστάσεις απαγορευτικές για την εγκατάσταση έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εξαιρέση αποτελεί η παλιρροιακή ενέργεια. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.10 οι τιμές του εύρους παλίρροιας είναι μεγαλύτερες σε ακρωτήρια, στενά περάσματα και κόλπους. Όμοια και τα παλιρροιακά ρεύματα είναι ισχυρότερα σε στενά περάσματα ακόμα και αν το παλιρροιακό εύρος είναι σχετικά μικρό. Αυτός είναι και ο λόγος που η παλιρροιακή ενέργεια θεωρείται εμπορευματοποιημένη και περισσότερο εξελιγμένη από τις άλλες 4 μορφές παρόλο που οι δυνητικές της δυνατότητες στην σύγκριση υστερούν. Χαρακτηριστικά είναι τα δύο μεγάλα έργα στον ποταμό Rance και στην λίμνη Sihwa, ισχύος 240 MW και 254 MW αντίστοιχα, που αποτελούν τις πιο αξιομνημόνευτες μονάδες αξιοποίησης της θαλάσσιας ενέργειας συνολικά.

Η κατάταξη των υπόλοιπων μορφών με κριτήρια το επιστημονικό ενδιαφέρον και την εκτιμώμενη αποδοτικότητα είναι:

- ❖ Κυματική ενέργεια
- ❖ Θερμοδυναμική και ωσμωτική ενέργεια
- ❖ Ενέργεια από τα ωκεάνια ρεύματα

Ξεκινώντας από την τελευταία στην κατάταξη, καμία πειραματική απόπειρα εκμετάλλευσης της ενέργειας των ωκεάνιων ρευμάτων δεν έχει καταγραφεί έως σήμερα. Αναφορικά, με την θερμοδυναμική και την ωσμωτική ενέργεια οι δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί είναι ελάχιστες (περισσότερες για την θερμοδυναμική ενέργεια). Υπό κατασκευή βρίσκεται στην Μαρτινίκα (νησί στην Καραϊβική θάλασσα) ένα φαινομενικά σημαντικό έργο απορρόφησης ενέργειας βασισμένης στην διαφορά θερμοκρασίας του θαλάσσιου νερού (θερμοδυναμική ενέργεια) του οποίου η χρηματοδότηση εγκρίθηκε το 2014. Η εγκατεστημένη ισχύς του έργου αυτού θα ανέρχεται στα 10 MW και θα παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε περίπου 35.000 νοικοκυριά σύμφωνα με τις κατασκευάστριες εταιρίες.

Τέλος, για την εξαγωγή ενέργειας από του κυματισμούς έχει πλοηγηθεί ή θεμελιωθεί πλήθος διαφορετικών διατάξεων παγκοσμίως, σε πειραματικό στάδιο εκ των οποίων ορισμένες συνδέθηκαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της εκάστοτε περιοχής μέχρι το πέρας της δοκιμών. Οι εγκαταστάσεις αυτές διαχωρίζονται με βάση τις αρχές λειτουργίας τους σε:

- ❖ Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης ρευστού (εκμετάλλευση διαφοράς πίεσης)
- ❖ Πλωτοί μετατροπείς
- ❖ Υπερπηδητοί από το υγρό στοιχείο μετατροπείς

- ❖ Συσκευές κρούσης (ταλαντευόμενοι μεταροπείς λόγω της κινητικής ενέργειας των κυμάτων κατά την οριζόντια κατεύθυνση)

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της κυματικής ενέργειας συγκριτικά με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πηγάζει από το πρώιμο στάδιο των σχετικών ερευνών και αντικατοπτρίζεται στο υψηλό της κόστος ανά παραγόμενη kWh της εικόνας 2.26. Στον πίνακα 2.5 τα κόστη υπολογίστηκαν μικρότερα. Από την έρευνα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η αλήθεια βρίσκεται κάπου στην μέση. Ένα εύλογο εύρος θεωρητικά είναι τα 0,25-0,40 €/kWh. Η μείωση της τιμής αυτής, πιθανότατα, θα επέλθει με την εμπορευματοποίηση αυτής της μορφής ενέργειας μέσω της αναμενόμενης αύξησης της επιχειρηματικής ανταγωνιστικότητας σε αυτή την περίπτωση. Σημαντικό ποσοστό στις δαπάνες μιας εγκατάστασης διαδραματίζει και ο μηχανολογικός εξοπλισμός η τυποποίηση του οποίου θα συμβάλει δραστικά στην μείωση των κεφαλαιουχικών και λειτουργικών εξόδων της. Σύμφωνα με τους Raventos et al. (2010) η ενέργεια θα κοστίζει 0,20 €/kWh το 2020 και θα καταστεί ανταγωνιστική το 2030 περίπου όταν και η τιμή της θα μειωθεί στα 0,10-0,15 €/kWh.

Επιπροσθέτως στο κεφάλαιο 2 που αφορά την επισκόπηση 13 συνολικά εγκαταστάσεων με σκοπό την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, αποδεικνύεται ότι κάθε μία χωριστά αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις ανάγκες ενός νησιού ή μιας κοινωνίας γενικά. Οι λύσεις στο πρόβλημα αυτό είναι δύο:

- ❖ Δημιουργία πάρκων όμοιων μονάδων με συνέπεια την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύς σε μία τοποθεσία
- ❖ Δημιουργία υβριδικών πάρκων, δηλαδή συνδυασμός μονάδων αξιοποίησης της κυματικής και της αιολικής ενέργειας.

Στα μειονεκτήματα αυτά αντιπάρχονται τα πλεονεκτήματα της κυματικής ως ανανεώσιμης ενέργειας. Αναλυτικότερα, τα αποθέματα της είναι ανεξάντλητα και είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων είναι μηδενική. Τα σημεία στα οποία υπερέχει η κυματική ενέργεια έναντι άλλων ανανεώσιμων πηγών είναι τα εξής:

- ❖ Η διαθεσιμότητά της έως περίπου το 90% έτους τη στιγμή που τα αντίστοιχα ποσοστά για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια ανέρχονται στο 20-30%
- ❖ Η δυναμική ενεργειακή υπεροχή της ανά μονάδα επιφάνειας (2-3 kW/m<sup>2</sup>) έναντι της ηλιακής (0,1-0,2 kW/m<sup>2</sup>) και της αιολικής (0,4-0,6 kW/m<sup>2</sup>)
- ❖ Η επεμβάσεις στο περιβάλλον είναι μικρότερης κλίμακας εξομαλύνοντας τις αντιδράσεις της κοινής γνώμης ενώ ταυτόχρονα μια σειρά από μονάδες με ορθή χωροθέτηση ίσως αποκτήσει διττό ρόλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην προστασία μιας ακτής.

Ειδικότερα για την παραγωγή ενέργειας, ένα ολόκληρο κεφάλαιο αφιερώθηκε στην σύνδεση της με τις φυσικές μεταβλητές μέσω εξισώσεων. Τελικά, τα παραγόμενα ποσά ενέργειας των μετατροπέων ταλαντευόμενης στήλης ρευστού εξαρτώνται από το ύψος και την περίοδο ταλάντωσης των προσπιπτόντων κυμάτων, τις διαστάσεις του θαλάμου και του στομίου εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα καθώς και το γεωμετρικό σχήμα το ανοίγματος στην θάλασσα ενώ δεν μπορεί να αμεληθούν και τα χαρακτηριστικά της τοποθετούμενης

τουρμπίνας. Για την τεχνολογία των υπερπηδητών από το υγρό στοιχείο μετατροπέων στο μοντέλο της παρούσας εργασίας κομβικής σημασίας είναι το ύψος ταλάντωσης του προσπίπτοντος κύματος και ορισμένα κατασκευαστικά στοιχεία όπως ο αριθμός των δεξαμενών, η υψομετρική διαφορά του χείλους τους από την μέση στάθμη ηρεμούντος ύδατος, το βάθος θεμελίωσης – αγκυροβόλησης αλλά και τις κλίσεις των ραμπών υποδοχής του νερού στην πρόσοψη της εγκατάστασης. Για τις δύο εναπομείναντες κατηγορίες η εξαγόμενη ενέργεια υπολογίζεται με απλή ανάγνωση προσαρμοσμένων στις εκάστοτε συνθήκες διαγραμμάτων και πινάκων. Αυτά αποτελούν έργο των κατασκευαστριών εταιριών οι οποίες για την κατάρτιση τους θεωρούν της ταλαντώσεις των κινούμενων σωμάτων αποσβενήμενες. Ως αποσβέσεις θεωρούνται η αδράνεια των ταλαντευόμενων μερών των συσκευών, η απόσβεση του μηχανολογικού εξοπλισμού (σύστημα PTO), η υδροδυναμική απόσβεση, δηλαδή η αντίσταση του νερού αναλόγως με το βάθος και την πυκνότητα του (σχετικό διάγραμμα στο Παράρτημα Γ). Τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις διαστάσεις και την μάζα των πλωτήρων ή των πτερυγίων. Ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη και οποιαδήποτε στοιχεία έχουν προκύψει από πειραματικές διατάξεις μικρότερης κλίμακας από αυτήν του τελικού έργου.

Τέλος, αναφορικά με το νησί της Αστυπάλαιας το αποτέλεσμα της σύγκρισης της απόδοσης μία υπερπηδητής συσκευής τύπου SSG με μία συσκευή αποτελούμενη από πλωτήρες τύπου Wave Star ανέδειξε ως προτιμότερη την πρώτη λύση. Η σύγκριση βασίστηκε σε στοιχεία του έτους 2018 και ορισμένες εκτιμήσεις του κόστους μέσα από την βιβλιογραφία. Εν τέλει, η ενέργεια που δύναται να εξάγει ένα πάρκο αποτελούμενο αποκλειστικά από συσκευές απορρόφησης κυματικής ενέργειας δεν είναι αρκετή για να ικανοποιήσει την ζήτηση του νησιού (6,35 GWh). Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνει ενδεχομένως η δημιουργία ενός υβριδικού πάρκου, δηλαδή μιας συνδυαστικής διάταξης μετατροπέων κυματικής και αιολικής ενέργειας. Ενδεικτικά 4 συσκευές τύπου SSG με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής του κεφαλαίου 4 θα παρήγαγαν περίπου 1.55 GWh (=4\*0,386 GWh) δηλαδή το ¼ της μέσης ζήτησης ενέργειας ανά έτος.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

### **ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- Δανιήλ Β. 2018. ‘Διερεύνηση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μη συνδεδεμένο νησί της Αστυπάλαιας’. Διπλωματική εργασία. Αθήνα. 112.
- Μαμάσης Ν. και Τσουκαλά Β. 2016. “Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία”. Διαφάνειες παρουσίασης μαθήματος. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα.
- Μουντζούρης Κ. 2009. “Θαλάσσια Υδραυλική”. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Αθήνα.
- Τσουκαλά Β. διαδικτυακές σημειώσεις για το μάθημα της Ακτομηχανικής του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου στην ιστοσελίδα [www.mycourses.ntua.gr](http://www.mycourses.ntua.gr).

### **ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- Brown, S. 2016. “How Much Does Power Take- Off Affect The Dynamic Response of a WEC Device.” Heriot Watt University.
- Charlier, R.;Justus, J. 1993. “Ocean Energies: Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources.” *Elsevier*, 533.
- Chiles, J. 2009. "The Other Renewable Energy". *Invention and Technology*. **23** (4): 24–35
- Clément, A, P McCullen, António F de O Falcão, A Fiorentino, F Gardner, K Hammarlund, G Lemonis, et al. 2002. “Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (5): 405–31.
- Dickie, M.2016. "Scotland unveils world's largest tidal stream power project" *Financial Times*.
- Dimitriadis, P., E. Moschos, G. Manou, V. Afentoulis, D. Koutsoyiannis, and V. K. Tsoukala. 2017. “Harnessing Wind and Wave Resources for a Hybrid Renewable Energy System in Remote Islands: A Combined Stochastic and Deterministic Approach.” *Energy Procedia* 125: 415–24..
- Elhanafi, A., A. Fleming, G. Macfarlane, and Z. Leong. 2017. “Numerical Hydrodynamic Analysis of an Offshore Stationary–floating Oscillating Water Column–wave Energy Converter Using CFD.” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 9 (1): 77–99.
- F. P., Miguel. 2013. “A Comparative Study of Wave Power Generation Concepts,” no. June.
- Friis Madsen E., H.C. Sorensen and S. Parmenggiani. 2012. “The Development of a 1.5 MW Wave Dragon North Sea Demonstrator.” In *International Conference on Ocean Energy*.
- H Polinder and M. Scutto. 2005. “Wave Energy Converters and Their Impact on Power Systems.” In *2005 International Conference on Future Power Systems*.
- Huckerby, J., Jeffrey, H., Sedgwick, J., Jay, B. and Finlay, L. 2012. “An International Vision for Ocean Energy- Version II.” *Ocean Energy Systems Implementing Agreement*.
- “International Levelized Cost of Energy for Ocean Energy Technologies.” 2015. In . Lisbon: IEA-OES.
- Kofoed, J. P.; Frigaard, P. B.; Friis-Madsen, E.; Sørensen, H. C. 2004. “Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon.” In *Proceedings of the 8th World Renewable Energy Congress*. Denver, USA: Elsevier.
- Leaman, K.D., R.L. Molinari, and P.S. Vertes. 1987. “Structure and Variability of the Florida Current at 27°N.” *Journal of Physical Oceanography*, 565–83.



- Lewis, A., S. Estefen, J. Huckerby, W. Musial, T. Pontes, J. Torres-Martinez. 2011. "Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation." In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, edited by C. von Stechow O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, 497–533. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- López, I., J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez De Alegría, and I. Kortabarria. 2013. "Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27: 413–34.
- Margheritini, L. 2009. "R&D Towards Commercialization of Sea Wave Slot Cone Generator (SSG) Overtopping Wave Energy Converter: selected topics on the field of wave energy" Aalborg Department of Civil Engineering, Aalborg University. *DCE Thesis No.24*
- Marquis, L, M M Kramer, J Kringelum, J F Chozas, and N E Helstrup. 2012. "Introduction of Wavestar Wave Energy Converters at the Danish Offshore Wind Power Plant Horns Rev 2." *4th International Conference on Ocean Energy 2* (December): 2–7.
- Molenbroek, E.C. 2007. "Energie Uit Zout En Zoet Water Met Osmose," 2–5.  
<http://www.ecofys.com/files/files/rws-rapport-osmoseafsluitdijk-finalmetbijlagen.pdf>.
- Mork, G., S. Barstow, A. Kabuth, and M. Teresa Pontes. 2010. "Assessing the Global Wave Energy Potential." *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3*, no. January: 447–54.
- Nihous, G. C. 2007. "A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources." *Journal of Energy Resources Technology* 129 (1): 10.
- O'Connor, M., T. Lewis, and G. Dalton. 2013. "Techno-Economic Performance of the Pelamis P1 and Wavestar at Different Ratings and Various Locations in Europe." *Renewable Energy* 50: 889–900.
- Pecher, A Pecher, A. F. Serge; Kofoed, J. P.; Espedal, J.; Hagberg, S. 2010. "Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter." *20th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference* 7: 877–85.
- Pelc, R., and R. M. Fujita. 2002. "Renewable Energy from the Ocean." *Marine Policy* 26 (6): 471–79.
- Queen's University of Belfast. 2002. "1 November 1998 to 30 April 2002 Research Funded in Part by THE EUROPEAN COMMISSION In the Framework of the Non Nuclear Energy Programme JOULE III," no. April: 1–62.
- Raventos, A., A. Sarmiento, F. Neumann, N. Matos. 2010. "Projected Deployment and Costs of Wave Energy in Europe" *3<sup>rd</sup> International Conference on Ocean Energy* (October): 1-6.
- Sarmiento, A. J. N. A. and Falcao, A. F. D. O. 1985. "Wave Generation by an Oscillating Surface Pressure and Its Application in Wave Energy Extraction." *Journal of Fluid Mechanics* 150: 467–85.
- Sauser, B., 2008. "A large -scale tidal-power unit has started up in Northern Ireland" *MIT Technology Review*.
- Scråmestø, Øystein S, S. E. Skilhagen, and W. K. Nielsen. 2009. "Power Production Based on Osmotic Pressure ." *Proceedings of 16th Waterpower*, no. July: 1–10.
- Setoguchi, T., Takao, M., Kinoue, Y., Kaneko, K., Santhakumar, S. and Inoue, M. 1999. "Study of an Impulse Turbine for Wave Energy Conversion." In *Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 180–87.
- Sheng, W., J. Brooks, A. Lewis, M. Babuchon, and R. Alcorn. 2013. "Investigation To Air Compressibility of Oscillating Water Column." In *Conference: Proceedings of 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 1–10. Nantes, France.

- SI Ocean Project. 2013. "Ocean Energy: Cost of Energy and Cost Reduction Opportunities," no. May.
- Stewart, H.B. 1974. "Current from the Current." *Oceanus*, 38–41.
- Vicinanza, D., L. Margheritini, J. P. Kofoed, and M. Buccino. 2012. "The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments." *Energies* 5 (2): 193–226.
- URS. 2009. "Wave Energy Feasibility Study Report: City and Country of San Francisco.
- Whittaker, T., and M. Folley. 2012. "Nearshore Oscillating Wave Surge Converters and the Development of Oyster." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370 (1959): 345–64.
- World Energy Council. 2010. "2010 Survey of Energy Resources." *Survey of Energy Resources*, 618.
- World Energy Council. 2016. "World Energy Resources, Marine energy" *World Energy Resources*, 77.
- Yemm, R., D. Pizer, C. Retzler, and R. Henderson. 2012. "Pelamis: Experience from Concept to Connection." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370 (1959): 365–80.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΕ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[www.itpower.co.uk](http://www.itpower.co.uk)

[www.makai.com](http://www.makai.com)

[www.naval-group.com](http://www.naval-group.com)

[www.physiclessons.blogspot.gr](http://www.physiclessons.blogspot.gr)

[www.iefimerida.gr](http://www.iefimerida.gr)

[www.oceanenergy.ie](http://www.oceanenergy.ie)

[www.emec.org.uk](http://www.emec.org.uk)

[www.ecotricity.co.uk](http://www.ecotricity.co.uk)

[www.y-green.blogspot.com](http://www.y-green.blogspot.com)

[www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com)

[www.waveplane.org](http://www.waveplane.org)

[www.openei.org](http://www.openei.org)

[www.renews.biz](http://www.renews.biz)

[www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)

[www.etp-scotland.as.uk](http://www.etp-scotland.as.uk)

[www.langlewp.com](http://www.langlewp.com)

[www.windows2universe.org](http://www.windows2universe.org)

[www.engineering.lancs.ac.uk](http://www.engineering.lancs.ac.uk)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Επίσημα από το ευρωπαϊκό κέντρο θαλάσσιας ενέργειας (European Marine Energy Center) έχουν αναγνωρισθεί 227, υπό λειτουργία, πρωτότυπες συσκευές αν τον κόσμο. Στον πίνακα 2.5 παραθέτονται αναλυτικά τα ονόματα των συσκευών αυτών και οι φορείς ανάπτυξής τους με την τελευταία ενημέρωση του να πραγματοποιείται στις 3 Φεβρουαρίου του 2017.

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Able Technnologies LLC	USA	Electric Generating Wave Pipe	Attenuator
Aker Solutions ASA	Norway	Aker WEC	Attenuator
AlbaTERN Ltd	UK	WaveNet	Attenuator
ATA Engineering	USA		Attenuator
Atmocean Inc	USA	WES - Wave Energy System	Attenuator
AWECS Attenuator	USA		Attenuator
Cal Poly-Protean Wave Energy Inc	USA		Attenuator
Columbia Power Technologies	USA	StingRAY	Attenuator
Crestwing / Danyard Engineering Aps	Denmark	Crestwing	Attenuator
DEXAWAVE A/S	Denmark	DEXAWAVE coverter	Attenuator
Eco Wave Power	Israel	Wave Clapper	Attenuator
Eco Wave Power	Israel	Power Wing	Attenuator
Ecomerit Technologies	USA	Centipod	Attenuator
Ensea	Italy	SWATHS	Attenuator
Floating Power Plant AS	Denmark	Poseidon – Wave wind hybrid	Attenuator
Globalone Sciences	USA		Attenuator
Grey Island Energy Inc	Canada	SeaWEED	Attenuator
Group Captain SM Ghouse	India	Free Floating Wave Energy Convertor	Attenuator
KN Ocean Energy Science & Development	Denmark	KNSWING	Attenuator

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Kneider Innovations	France	Wave Energy Propulsion	Attenuator
Laminaria	Belgium	Laminaria	Attenuator
M4Wave Power	UK	M4	Attenuator
Martifer Energia	Portugal	FLOW	Attenuator
Mocean Energy	USA		Attenuator
Navatek Ltd	USA	NavatekWEC	Attenuator
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	China	Eagle	Attenuator
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	China	Duck	Attenuator
Oceantec Energias Marinas SL	Spain	Oceantech Energy Convertor	Attenuator
Perpetuwave	Australia	Xtracta (Hybrid Attenuator)	Attenuator
Sea Power Ltd	Ireland	Sea Power Platform	Attenuator
Tecnalia	Spain	PSE - MAR	Attenuator
Vortex Oscillation Technology Ltd	Russia	Vortex Oscillation Technology	Attenuator
WavePiston	Denmark	WavePiston	Attenuator
Waves Ruiz	France		Attenuator
Wavetube	Sweden		Attenuator
<i>Checkmate Seaenergy UK Ltd</i>	<i>UK</i>	<i>Anaconda</i>	<i>Bulge Wave</i>
<i>Vigor Wave Energy AB</i>	<i>Sweden</i>	<i>Vigor Wave Energy Convertor</i>	<i>Bulge Wave</i>

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Dresser Rand	USA	HydroAir	Oscillating Water Column
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Ireland	TETRON	Oscillating Water Column
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Ireland	TETRON	Oscillating Water Column
Leancon Wave Energy	Denmark	LEANCON WEC	Oscillating Water Column
Marine Power Technologies Pty Ltd	Australia	Energy Island	Oscillating Water Column
Oceanlinx	China	greenWAVE	Oscillating Water Column
Oceanlinx	China	ogWave	Oscillating Water Column
Oceanlinx	China	blueWAVE	Oscillating Water Column
Pico	Portugal	Pico OWC	Oscillating Water Column
Principle Power	USA		Oscillating Water Column
Ryokuseisha	Japan	WAG Buoy	Oscillating Water Column
SDK Marine	Spain	SDK Wave Turbine	Oscillating Water Column
Sea Energies Ltd	Ireland	SEWEC	Oscillating Water Column
Spar Buoy	Portugal	Spar Buoy	Oscillating Water Column
<i>Bombora Wave Power</i>	<i>Australia</i>	<i>mWave</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>Calwave</i>	<i>USA</i>	<i>WaveCarpet</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>Calwave</i>	<i>USA</i>	<i>CalWave</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>College of the North Arlantic</i>	<i>Canada</i>	<i>SARAH Pump</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>M3 Wave LLC</i>	<i>USA</i>	<i>DMP Device</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>Marine Power Systems</i>	<i>UK</i>	<i>WaveSub</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
<i>ORECon</i>	<i>UK</i>	<i>MRC 1000</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
<i>SeaNergy</i>	<i>Israel</i>	<i>Turbo Outburst Power/Top Desalination System</i>	<i>Submerged Pressure Differential</i>
Abengoa Seapower	Spain	Órgano	Point Absorber
AdapWave	USA		Point Absorber
AeroVironment Inc	USA	Eel Grass	Point Absorber
Applied Technologies Company Ltd (ATC)	Russia	Float Wave Electric Power Station (FWEPS)	Point Absorber
Aquagen Technologies	Australia	Rig Drive	Point Absorber
AquaHarmonics	USA		Point Absorber
Aqua – Magnetics Inc	USA	Electric Buoy	Point Absorber
Aqua – Shift	USA		Point Absorber
Atlas Ocean Systems	USA	SQ5	Point Absorber
Balkee Tide and Wave Electricity Generator	Mauritius	TWPEG	Point Absorber
Blue Power Energy Ltd	Ireland	Blue Power Take Off (PTOU)	Point Absorber
Brandl Motor	Germany	Brandl Generator	Point Absorber
Carnegie Wave Energy Ltd	Australia	CETO 6	Point Absorber
Ecotricity	UK	Searaser	Point Absorber
ELGEN Wave	USA	Horizon Platform	Point Absorber
Energystics	USA	Vibristor	Point Absorber
Finima – Aimmer	Hong Kong	Aimmer III	Point Absorber
FlanSea	Belgium	Wave Pioneer	Point Absorber
Float Inc	USA	Rho – Cee	Point Absorber

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Fred Olsen Ltd	Norway	Lifesaver	Point Absorber
Green Ocean Wave Energy	USA	Ocean Wave Air Piston	Point Absorber
Hydrocap Energy SAS	France	Seacap	Point Absorber
Independent Natural Resources	USA	SAEDOG	Point Absorber
Indian Wave Energy Device	India	IWAVE	Point Absorber
Ingine Inc	South Korea	INWave	Point Absorber
IOWEC	USA		Point Absorber
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Ireland	Wave Train	Point Absorber
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Ireland	Wave Train	Point Absorber
Korean Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)	Korea		Point Absorber
Kymogen	USA	Kymogen WEC	Point Absorber
MakerStrong	USA	eBuoy	Point Absorber
Marine Energy Corporation	USA	Wave Catcher	Point Absorber
Maruthi Power	USA		Point Absorber
Mighty Waves Energy Team	USA		Point Absorber
Motor Wave	Hong Kong	Motor Wave	Point Absorber
Neptune Renewable Energy Ltd	UK	Triton	Point Absorber
Neptune Wave Power	USA		Point Absorber
Next Gen	USA		Point Absorber
Northwest Energy Innovations	New Zealand	Azura	Point Absorber
Nualgi Nanobiotech	India	Rock n Roll wave energy device	Point Absorber

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Norwegian University of Science & Technology	Norway	CONWEC	Point Absorber
Ocean Electric Inc	USA	Wave platform	Point Absorber
Ocean Energy Industries Inc	USA	WaveSurfer	Point Absorber
Ocean Harvesting Technologies	Sweden	Ocean Harvester	Point Absorber
Ocean Motion International	USA	OMI Combined Energy System	Point Absorber
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	China	Neza II	Point Absorber
Ocean Power Technologies (OPT)	USA	Power Buoy	Point Absorber
Ocean Wave and Wind Energy (OWWE)	Norway	Wave Pump Rig	Point Absorber
Oceanic Power	Spain	SeaHeart	Point Absorber
Oscilla Power Inc	USA	TDB (magnetostrictive wave energy harvester_)	Point Absorber
OWEC Ocean Wave Energy Company	USA	OWEC Ocean Wave Energy Converter	Point Absorber
Pelagic Power AS	Norway	W2Power	Point Absorber
PIPO Systems	Spain	APC – PISYS	Point Absorber
Pontoon Power	Norway	Pontoon Power Converter	Point Absorber
Protean Wave Energy Limited	Australia	Protean WEC	Point Absorber
RESEN ENERGY	Denmark	Resen Waves LOPF buoys	Point Absorber
Sea Green Technologies	USA		Point Absorber
Seabased AB	Sweden	Linear generator (Islandberg Project)	Point Absorber



<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Seatricity	UK	Oceanus 2	Point Absorber
Seawood Designs Inc	Canada	SurfPower	Point Absorber
SEEWEC Consortium	UK	FO3	Point Absorber
Sigma Energy	Slovenia	MD Wave Power Converter	Point Absorber
Sinn Power	Germany	Sinn Power WEC	Point Absorber
Slow Mill	Holland	Slow Mill	Point Absorber
Snapper Consortium	UK	Snapper	Point Absorber
Spindrift Energy	USA	Spindrift Energy Device	Point Absorber
Super Watt Wave Catcher	USA		Point Absorber
The Bobber Company Ltd	UK	Manchester Bobber	Point Absorber
Tremont Electric	USA	nPower WEC	Point Absorber
Wave Energy Team at Virginia Tech	USA		Point Absorber
Wave Star Energy ApS	Denmark	Wave Star	Point Absorber
Waveberg Development	USA	Waveberg	Point Absorber
Waves4Power AB	Sweden	WaveEL – buoy	Point Absorber
Waveswing America	USA		Point Absorber
<i>Ecole Centrale de Nantes</i>	<i>France</i>	<i>SEAREV</i>	<i>Rotating Mass</i>
<i>Enorasy Labs</i>	<i>USA</i>		<i>Rotating Mass</i>
<i>Waves for Energy</i>	<i>Italy</i>	<i>ISWEC</i>	<i>Rotating Mass</i>
<i>Wello OY</i>	<i>Finland</i>	<i>Penguin</i>	<i>Rotating Mass</i>
<i>WITT Ltd</i>	<i>UK</i>		<i>Rotating Mass</i>
Advance Ocean Energy @ Virginia Tech	USA	MULLET	Overtopping/Terminator

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Atlantic Wavepower Partnership	USA		Overtopping/Terminator
AWS Ocean Energy	UK	AWS III	Overtopping/Terminator
Brimes Energy	USA	Jellyfish	Overtopping/Terminator
JAMSTEC	Japan	Mighty Whale	Overtopping/Terminator
Kinetic Wave Power	USA	PowerGin	Overtopping/Terminator
Norvento	Spain	Wavecat	Overtopping/Terminator
Ocean Wave and Wind Energy (OWWE)	Norway	OWWE - Rig	Overtopping/Terminator
Polygen Ltd	UK	Volta WaveFlex	Overtopping/Terminator
RTI Wave Power	USA		Overtopping/Terminator
Sea Power International AB	Sweden	Streamturbine	Overtopping/Terminator
SeWave Ltd	Faroe Islands	OWC	Overtopping/Terminator
The CyanWave Wave Energy Converter	Ireland	CyanWave4	Overtopping/Terminator
Wave Dragon	Denmark	Wave Dragon	Overtopping/Terminator
Wave Energy AS	Norway	Seawave Slot – Cone Generator (SSG)	Overtopping/Terminator
AW Energy	Finland	WaveRoller	Oscillating Wave Surge Converter
BioPower Systems Pty Ltd	Australia	bioWave	Oscillating Wave Surge Converter
CorPower Ocean AB	Sweden	CorPower Wave Energy Converter	Oscillating Wave Surge Converter
CorPower Ocean AB	Sweden	CPO2	Oscillating Wave Surge Converter
Costas Wave	USA	Costas Wave	Oscillating Wave Surge Converter
Ing Arvid Nesheim	Norway	Oscillating Device	Oscillating Wave Surge Converter
Kozoriz Franklin California Maglev Inc	USA		Oscillating Wave Surge Converter

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Langlee Wave Power	Norway	Langlee System	Oscillating Wave Surge Converter
Offshore Wave Energy Ltd (OWEL)	UK	OWEL WEC	Oscillating Wave Surge Converter
Polygen Ltd	UK	Ocean WaveFlex	Oscillating Wave Surge Converter
Resolute Marine Energy Inc	USA	Surge WEC	Oscillating Wave Surge Converter
Team FLAPPER	USA		Oscillating Wave Surge Converter
University of Tokyo (UT)	Japan	WaveRudder	Oscillating Wave Surge Converter
Wave Electricity Renewable Power Ocean (WERPO)	Israel	SDE	Oscillating Wave Surge Converter
40 South Energy	Italy	H24	Other
Aimmer UK	UK	Aimmer	Other
AlbaTERN Ltd	UK	SQUID	Other
Alternative Energy Engineering Associates	USA	AEEA – WECS	Other
Atargis Energy Corporation	USA	Cycloidal Wave Energy Converter (CycWEC)	Other
Avium AS	Turkey	Yeti Cluster System	Other
Bosch Rexroth	Germany		Other
Buoyant Energy	USA		Other
Caley Ocean Systems	UK	Wave Plane	Other
Coppe Subsea Technology	Brazil	Clean Energy from Waves	Other
Earth by Design	USA		Other
Etymol Ocean Power SpA	Chile	Etymol WEC – Alfa Series	Other
Fetzer Wave	USA		Other
Gmax Tidal Energy	USA		Other

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Greenfield Technologies LLC	USA		Other
Greenheat Systems Ltd	UK	Gentec WaTS	Other
Gyrogen (DNS)	USA		Other
Havkraft	Norway	Evolver (Havkraft Wave Energy Converter-H-WEC)	Other
Healy's Wave Energy Convertor	USA		Other
Hui Nalu	USA		Other
Hydrokinetic Energy Sollutions	USA		Other
IHC Tidal Energy	Netherlands	Wave Rotor/Oceanmill	Other
Intention AS	Norway	Intention Offshore Wave Energy Convertor	Other
Interproject Service (IPS) AB	Sweden	IPS OWEC Buoy	Other
James F Marino	USA		Other
Jetty Joule	USA		Other
Jospa Ltd	Ireland	Irish Tube Compressor	Other
Leviathan Energy Waves	USA		Other
Limerick Wave Ltd	UK	Limerick Wave PTO	Other
Marine Hydroelectric Company	USA	MHG (Marine Hydroelectric Generator)	Other
Muroran Institute of Technology	Japan	Pendulor	Other
NEMOS GmbH	Germany	NEMOS	Other
Ocean RusEnergy	Russia	Ocean 3	Other
Ocean RusEnergy	Russia	Ocean 160	Other

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Ocean RusEnergy	Russia	Ocean 640	Other
Ovsiankin Energy Group	USA		Other
PAULEY (Phil Pauley Innovation)	UK	Solar Marine Cells	Other
Poseidon's Kite	USA		Other
Rotary Wave SL	Spain	Rotary	Other
Royal Wave	USA		Other
RTI Wave Energy	USA	RTI F2/F2D	Other
Rutgers Wave Power	USA	Cyclic Pitch Paddle Wheel	Other
SARA Inc	USA	MHD Wave Energy Conversion (MWEC)	Other
Sea Wave Energy Ltd (SWEL)	UK	Waveline Magnet	Other
SeaFoil	USA		Other
TAMU – OSSL	USA		Other
Team Treadwater	USA		Other
Trident Energy Ltd	UK	PowerPod & PowerPod II (Linear Generator)	Other
Uniturbine Corporation	USA		Other
University of Genoa	Italy	Seaspoon	Other
Uppsala University	Sweden	Uppsala/Seabased AB Wave Energy Converter	Other
Vortex	USA		Other
Wave Water Works	USA		Other
WavePlane Production	Denmark	WavePlane	Other
Wavepower Technologies Limited	UK		Other

<b>ΦΟΡΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ</b>	<b>ΧΩΡΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ</b>
Waves2Energy	USA		Other
Wave - tricity	UK		Other
Wavy Turbine	USA		Other
Weptos	Denmark	Weptos WEC	Other
Wizards of Energy	USA		Other

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Μορφή χρονοσειράς υψών και περιόδων κυμάτων για 100 χρόνια (2018-2117):

year	month	day	hour	Wave Height Hs [m]	Wave Period T0,1 [s]
2018	1	1	0	1,083	4,740
2018	1	1	1	1,999	4,831
2018	1	1	2	2,255	5,251
2018	1	1	3	1,334	5,962
2018	1	1	4	1,159	4,011
2018	1	1	5	1,614	4,282
2018	1	1	6	1,021	3,716
2018	1	1	7	2,439	6,283
2018	1	1	8	2,353	3,392
2018	1	1	9	3,023	5,193
2018	1	1	10	0,764	4,483
2018	1	1	11	1,260	6,031
2018	1	1	12	4,215	4,224
2018	1	1	13	2,244	3,910
2018	1	1	14	1,413	4,384
2018	1	1	15	2,353	4,652
2018	1	1	16	0,459	5,012
2018	1	1	17	0,267	4,464
2018	1	1	18	0,085	3,729
2018	1	1	19	2,206	3,566
2018	1	1	20	0,431	5,060
2018	1	1	21	0,964	5,353
2018	1	1	22	0,904	4,423
2018	1	1	23	0,056	3,560
2018	1	2	0	1,612	4,760
2018	1	2	1	0,786	4,082
2018	1	2	2	0,658	6,554
2018	1	2	3	2,655	5,839
...	...	...	...	...	...
2117	12	31	22	1,832	4,408
2117	12	31	23	1,046	3,713

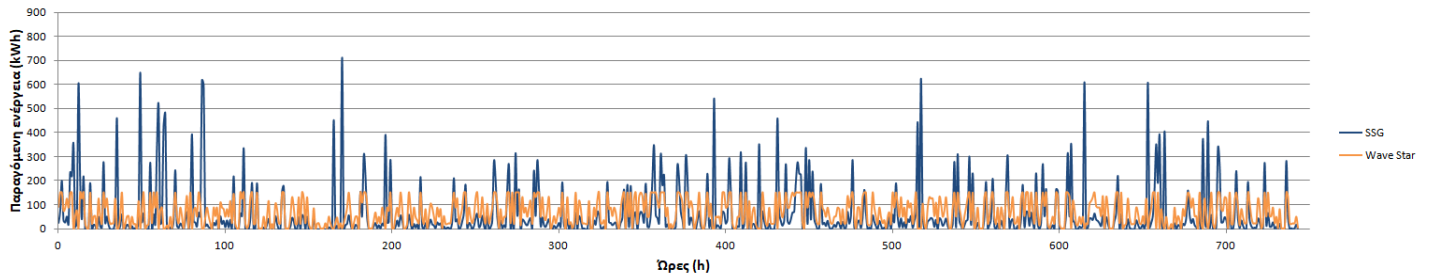
Οι χρονοσειρές παραγόμενης ενέργειας του έτους 2018 μέσω των οποίων πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των δύο εγκαταστάσεων:

ΤΥΠΟΣ SSG Παραγόμενη ενέργεια το έτος 2018 (kWh)	ΩΡΕΣ	ΤΥΠΟΣ Wave Star Παραγόμενη ενέργεια το έτος 2018 (kWh)
<b>ΣΥΝΟΛΟ: 0,386 GWh</b>		<b>ΣΥΝΟΛΟ: 0,489 GWh</b>
23,47	0,00	86,75
74,58	1,00	150,00
200,83	2,00	150,00
36,53	3,00	73,50
27,28	4,00	86,75
52,30	5,00	124,75
20,49	6,00	86,75
235,98	7,00	150,00
219,42	8,00	150,00
354,04	9,00	0,00
9,73	10,00	51,25
32,55	11,00	73,50
605,25	12,00	0,00
198,77	13,00	150,00
40,91	14,00	124,75
219,32	15,00	150,00
0,00	16,00	21,50
0,00	17,00	0,00
0,00	18,00	0,00
191,81	19,00	150,00
0,00	20,00	21,50
17,84	21,00	49,00
15,25	22,00	51,25
0,00	23,00	0,00
52,16	24,00	124,75
10,52	25,00	48,25
6,30	26,00	20,75
278,66	27,00	150,00
...	...	...
0,00	8759,00	0,00
30,79	8760,00	80,50

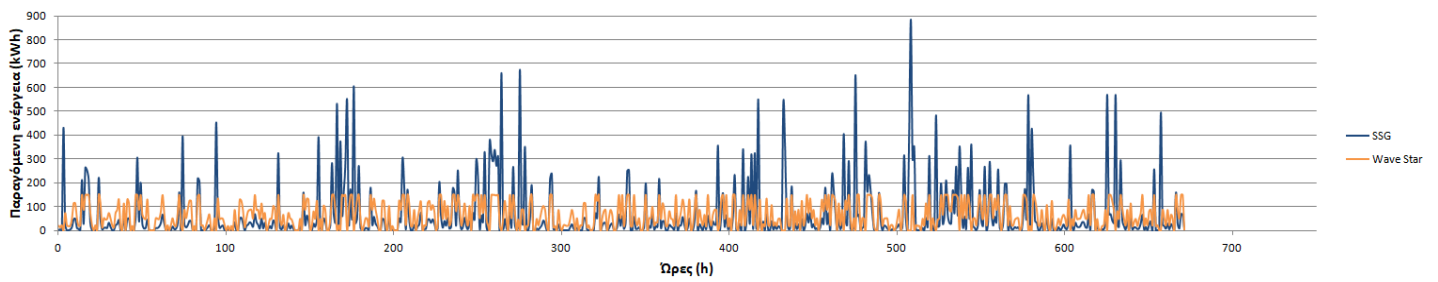


Διαγράμματα παραγόμενης ενέργειας σε ωριαία βάση για κάθε μήνα του έτους 2018:

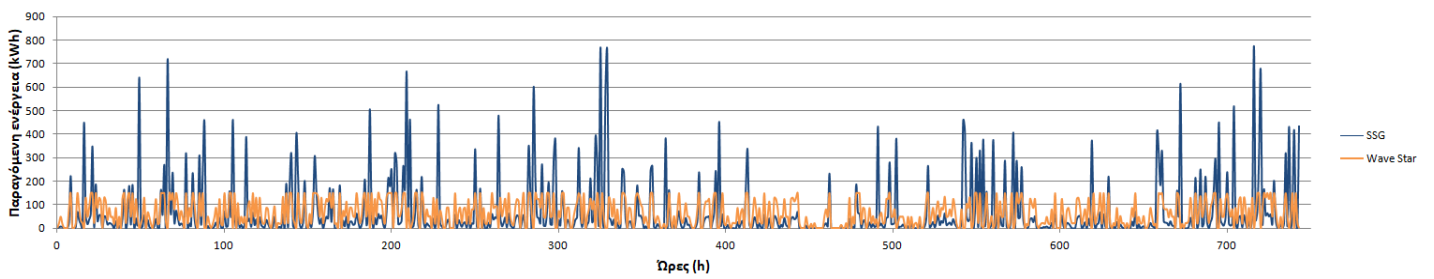
ΜΗΝΑΣ 1



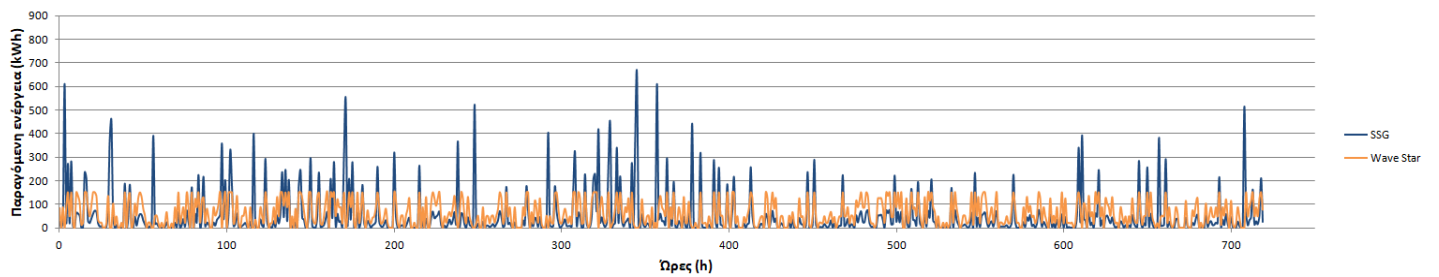
ΜΗΝΑΣ 2



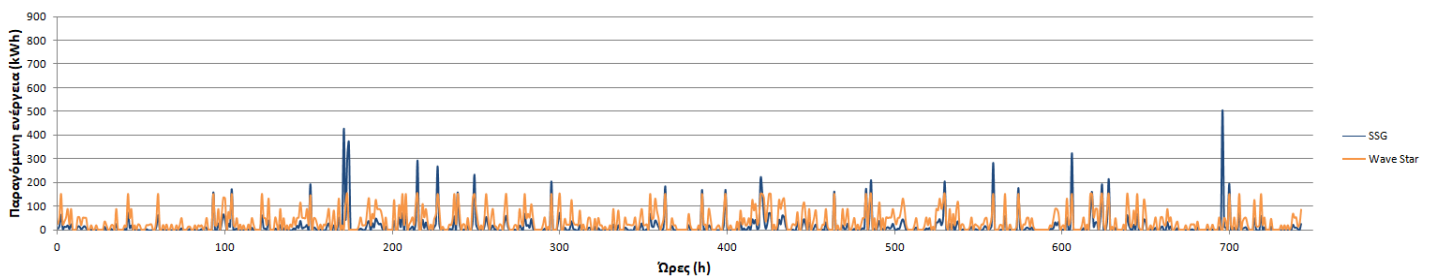
ΜΗΝΑΣ 3



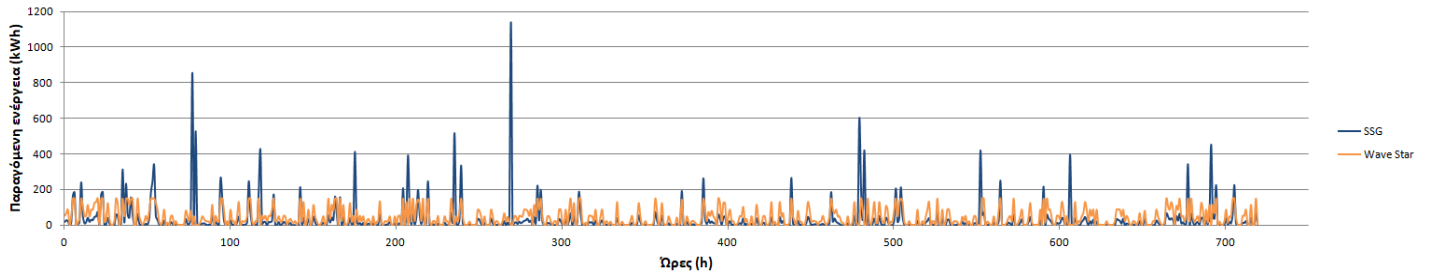
ΜΗΝΑΣ 4



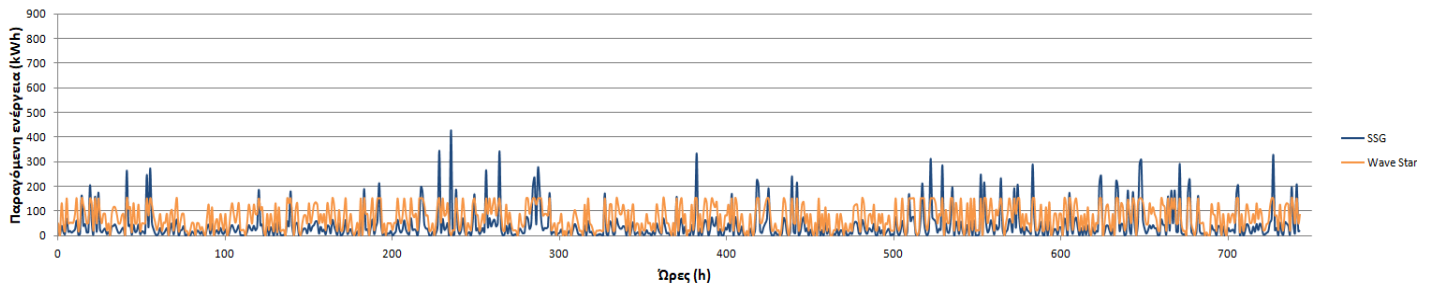
ΜΗΝΑΣ 5



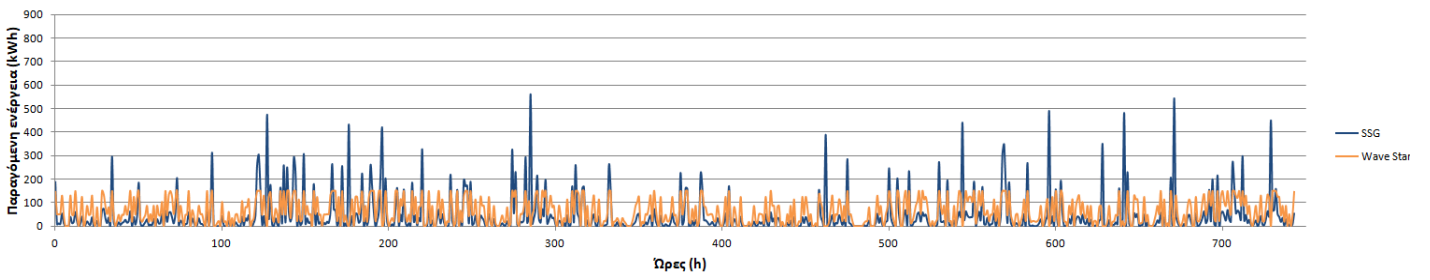
### ΜΗΝΑΣ 6



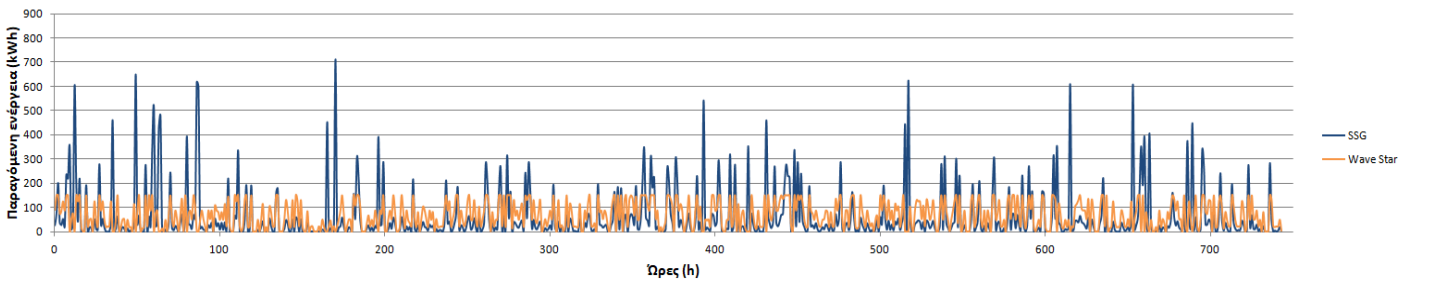
### ΜΗΝΑΣ 7



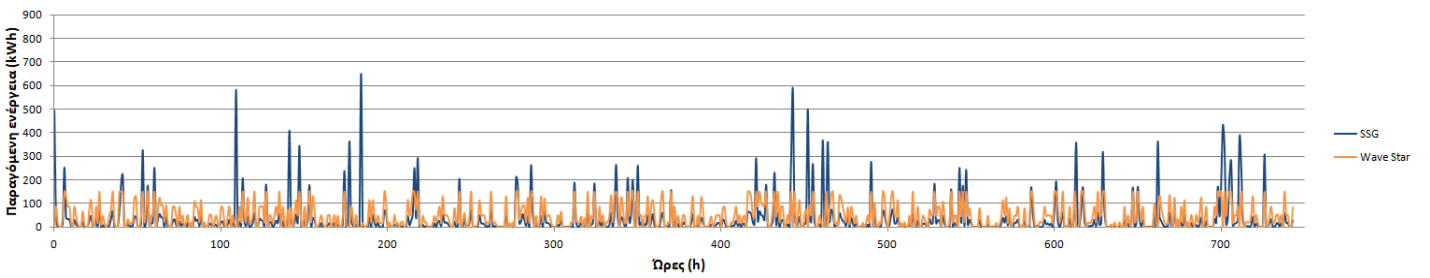
### ΜΗΝΑΣ 8



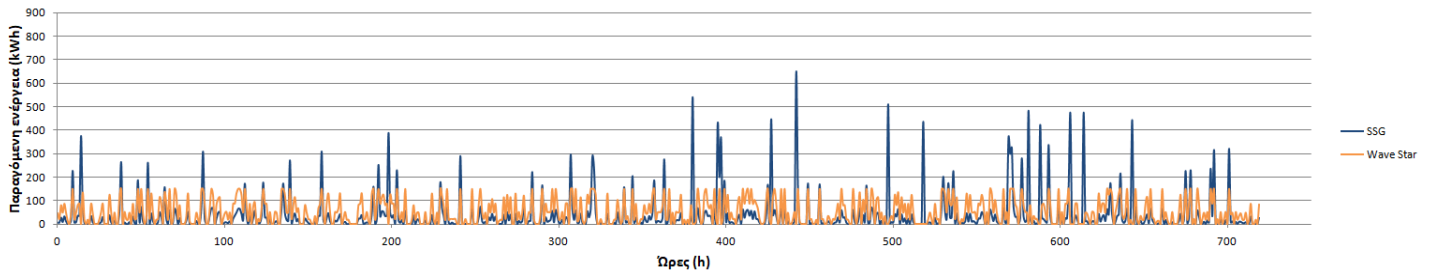
### ΜΗΝΑΣ 9



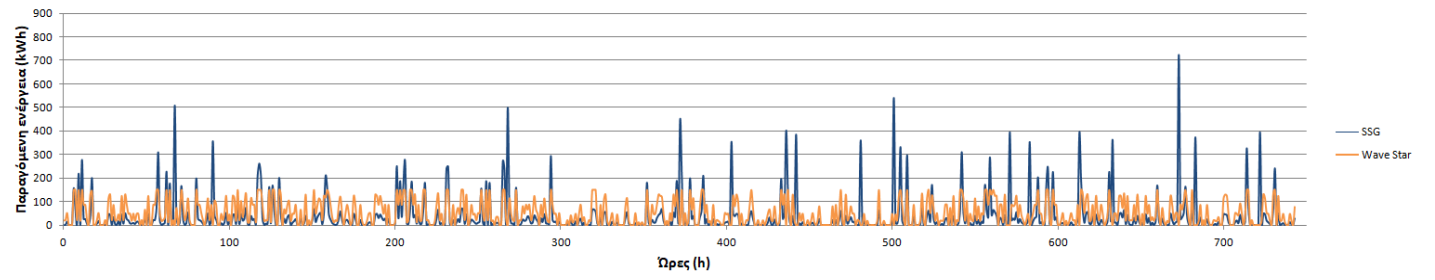
### ΜΗΝΑΣ 10



### ΜΗΝΑΣ 11



### ΜΗΝΑΣ 12

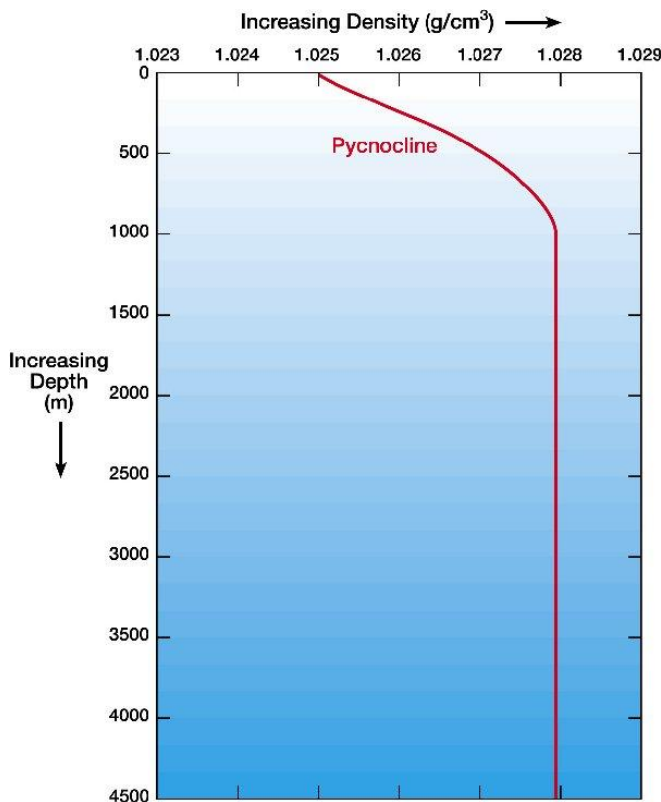


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Η πυκνότητα του καθαρού νερού ισούται με  $1000 \text{ kg/m}^3$  ενώ η πυκνότητα του νερού των θαλασσών στην επιφάνεια τους ισούται με  $1025 \text{ kg/m}^3$  λόγω της περιεκτικότητάς του σε αλάτι. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι η θερμοκρασία και η αλατότητα. Η μείωση της θερμοκρασίας και η αύξηση της αλατότητας αυξάνουν την πυκνότητα του νερού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαστρωμάτωσή του, διότι το λιγότερο πυκνό νερό επιπλέει πάνω από το πυκνότερο. Επομένως κατά κύριο λόγο το νερό με την χαμηλότερη θερμοκρασία και την μεγαλύτερη αλατότητα είναι και το πυκνότερο. Η επίδραση της θερμοκρασίας, ωστόσο, είναι μεγαλύτερη από αυτή της αλατότητας δίνοντας εξήγηση στο φαινόμενο όπου νερό μεγαλύτερης αλατότητας επιπλέει σε νερό μικρότερης πυκνότητας. Τότε είναι θέμα θερμοκρασίας.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι εφόσον η θερμοκρασία του νερού μειώνεται με την αύξηση του βάθους, αυξάνεται αντίστοιχα και η πυκνότητα του νερού με την αύξηση του βάθους. Το πυκνότερο στρώμα νερού στις θάλασσες βρίσκεται στον βυθό και η κυκλοφορία των νερών εκεί πραγματοποιείται κατά την οριζόντια κατεύθυνση (κατά μήκος των στρωμάτων).

Στο διάγραμμα φαίνονται οι τιμές της πυκνότητας του νερού που αντιστοιχούν σε κάθε βάθος. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται είτε με την συλλογή ενός δείγματος από την θάλασσα και την χρήση μίας εξίσωσης με παραμέτρους την θερμοκρασία, την αλατότητα και την πίεση του είτε άμεσα μέσω του οργάνου CTD που τοποθετείται στο νερό από μία πλατφόρμα ή ένα πλοίο. ([www.windows2universe.org](http://www.windows2universe.org))



Διάγραμμα πυκνότητας και όργανο μέτρησης CDT

