



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Τον Ωκεανό

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Χαιρετάκης

Επιβλέπουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Τον Ωκεανό

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Χαιρετάκης

Επιβλέπτουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.....

.....  
Μ. Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π. Τσαραμπάρης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018

.....

Κωνσταντίνος Π. Χαιρετάκης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός  
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Π. Χαιρετάκης, 2018  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η αναζήτηση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές βρίσκεται αρκετά χρόνια στο επίκεντρο της επιστήμης των ενεργειακών μηχανικών. Η παρούσα εργασία εξετάζει μια σχετικά νέα τεχνολογία, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την απορρόφηση της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων.

Αρχικά γίνεται εισαγωγή στην μηχανική της θάλασσας μέσω μιας ανάλυσής της ως ρευστό και ως κύμα και δίνονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση και την ενέργειά της. Στη συνέχεια απαριθμούνται οι τρόποι με τους οποίους υλοποιείται η μετατροπή της ενέργειας, τόσο στη μέθοδο της απορρόφησής της, όσο και στη μέθοδο παραγωγής της υπό ηλεκτρική μορφή, και περιγράφονται κάποιες πραγματικές εφαρμογές της έρευνας αυτής ανά τον κόσμο. Στο τέλος παρουσιάζεται μια σύντομη θεωρητική ανάλυση ενός μοντέλου παραγωγής ενέργειας μορφής πάρκου και εξετάζεται η οικονομική του βιωσιμότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές.

### Λέξεις – κλειδιά:

Κλίμα της θάλασσας, Ενέργεια κύματος, Μετατροπείας Κυματικής Ενέργειας, δυναμοδοσία



## **Abstract**

The quest for renewable energy sources has been the target of the electrical engineering science. This thesis examines a new proposed technology, the production of electric power through the absorption of sea wave energy.

Initially, there is an introduction to the sea dynamics through a fluid and wave analysis and the basic equations of its motions and its energy are given. Then, the ways of achieving this energy conversion are numbered, regarding both the power take-off system and the electric components, and some real-world systems are described. Lastly, a short cost analysis of such a power plant takes place and the economic results are compared to that of other renewable sources.

### **Key – words:**

Sea climate, Wave energy, Wave energy converter, power take-off





## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια, κ. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου για την εμπιστοσύνη και τη βοήθειά της κατά την συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ το ακαδημαϊκό προσωπικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τις γνώσεις που μου έδωσε κατά την διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη και την υπομονή τους τόσο κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, όσο και κατά την διάρκεια των σπουδών μου.



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	5
Περίληψη .....	7
Abstract .....	9
Ευρετήριο εικόνων .....	13
Ευρετήριο πινάκων .....	14
<u>1. Εισαγωγή</u> .....	15
1.1 Ενεργειακή κρίση .....	15
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	16
1.3 Εκμετάλλευση της ενέργειας της θάλασσας .....	19
<u>2. Μηχανική της Θάλασσας</u> .....	21
2.1 Κίνηση της θάλασσας .....	21
2.1.1 Ορολογία και χαρακτηριστικά των κυμάτων .....	21
2.2 Κυματική ανάλυση .....	23
2.2.1 Γραμμική θεωρία κυμάτων .....	23
2.2.2 Αρμονικά κύματα σε βαθύ νερό .....	26
2.2.3 Ενέργεια αρμονικών κυμάτων .....	27
2.2.4 Πραγματικά κύματα σε βαθύ νερό .....	29
<u>3. Συστήματα Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας</u> .....	33
3.1 Παλλόμενη στήλη νερού .....	34
3.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	34
3.1.2 Σχεδιασμός εγκατάστασης .....	35
3.1.3 Ηλεκτρικό μέρος .....	35
3.2 Παλλόμενο σώμα .....	40
3.2.1 Σημειακός απορροφητής .....	40
3.2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	40
3.2.1.2 Γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια .....	41
3.2.2 Εξασθενητής .....	44
3.2.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	44
3.2.2.2 Ηλεκτρικό μέρος .....	45
3.2.2.3 Πάρκο εξασθενητών .....	46
3.3 Διάταξη υπερχειλίσης .....	47
3.3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	47
3.3.2 Σχεδιασμός εγκατάστασης .....	48
3.3.3 Υδροηλεκτρική μετατροπή .....	49

<u>4. Εφαρμογές Συστημάτων Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας</u> .....	51
4.1 Wavestar .....	51
4.2 Pelamis .....	51
4.3 WaveRoller .....	52
4.4 Wave Dragon .....	53
4.5 LIMPET .....	53
4.6 AWS .....	54
<u>5. Οικονομική αξιολόγηση Συστημάτων Μετατροπής     Κυματικής Ενέργειας</u> .....	55
5.1 Βασικές έννοιες .....	55
5.2 Χαρακτηριστικά πάρκου .....	56
5.3 Επιλογή καλωδίων .....	57
5.4 Υπολογισμός τιμής παραγωγής ενέργειας .....	59
5.5 Αξιολόγηση αποτελέσματος .....	61
<u>6. Το Μέλλον της Θάλασσας ως ΑΠΕ</u> .....	63
6.1 Συστήματα Μετατροπής Παλιρροιακής Ενέργειας .....	63
6.2 Συνδυασμός κυμάτων και ανέμου .....	66
<u>7. Επίλογος</u> .....	69
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	70

## Ευρετήριο εικόνων

- *Εικόνα 1: Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή.*
- *Εικόνα 2: Διάβρωση μεταλλικών ελατηρίων μετά από τοποθέτηση στη θάλασσα χωρίς προστασία.*
- *Εικόνα 3: Θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα πάνω σε κατασκευή γεννήτριας μέσα στη θάλασσα.*
- *Εικόνα 4: Κυκλική κίνηση ενός σωματιδίου του νερού κατά την διάδοση ενός κύματος.*
- *Εικόνα 5: Προσδιορισμός των μεταβλητών του προβλήματος.*
- *Εικόνα 6: Στοιχειώδης μάζα  $dm$  για τον υπολογισμό δυναμικής ενέργειας μια ποσότητας νερού σε κύμα.*
- *Εικόνα 7: Μέση ροή ισχύος στη θάλασσα παγκοσμίως σε [kw/m].*
- *Εικόνα 8: Βασικές κατηγορίες Μετατροπέων Κυματικής Ενέργειας.*
- *Εικόνα 9: Τρόπος λειτουργίας OWC.*
- *Εικόνα 10: Σύγκριση παραγωγής των τριών ειδών γεννητριών.*
- *Εικόνα 11: Τα δύο είδη παλλόμενου σώματος.*
- *Εικόνα 12: α) Στάτης περιστροφικής μηχανής β) ο στάτης γίνεται ευθύγραμμος γ) στάτης γραμμικής γεννήτριας δ) ο δρομέας και η κίνησή του.*
- *Εικόνα 13: Αρχή λειτουργίας γραμμικής γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.*
- *Εικόνα 14: Οδήγηση γραμμικής γεννήτριας από την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων.*
- *Εικόνα 15: Κίνηση εξασθενητή με δύο βαθμούς ελευθερίας.*
- *Εικόνα 16: Εσωτερικό υδραυλικό σύστημα άρθρωσης εξασθενητή.*
- *Εικόνα 17: Λειτουργία της διάταξης υπερχείλισης.*
- *Εικόνα 18: Κάτοψη διάταξης υπερχείλισης.*
- *Εικόνα 19: Τα τρία κυριότερα είδη υδροστροβίλου.*
- *Εικόνα 20: Αρχή λειτουργίας WaveRoller.*
- *Εικόνα 21: Τρόπος λειτουργίας AWS.*
- *Εικόνα 22: Ακτινικό δίκτυο πάρκου WaveRoller για οικονομική ανάλυση.*
- *Εικόνα 23: Συνάρτηση κόστους ενέργειας – συντελεστή χρησιμοποίησης.*
- *Εικόνα 24: Παλιρροιακό φράγμα.*
- *Εικόνα 25: Γεννήτρια παλιρροιακού ρεύματος.*
- *Εικόνα 26: Συνδυασμός αιολικής και κυματικής μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας.*

## Ευρετήριο πινάκων

- Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μονάδων *Wavestar*.
- Πίνακας 2: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά διαφόρων μοντέλων *Wave Dragon*.
- Πίνακας 3: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καλωδίων.
- Πίνακας 4: Υπολογισμός κόστους καλωδίωσης.
- Πίνακας 5: Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

# 1.Εισαγωγή

Ο βασικός σκοπός του κλάδου των μηχανικών εξ' ορισμού είναι η συμβολή της τεχνολογίας στην ανθρώπινη ζωή και την βιωσιμότητά της. Επειδή απαραίτητη προϋπόθεση για την βιωσιμότητα οποιουδήποτε οργανισμού στην γη είναι η αυτονομία του σε ότι αφορά τα υλικά αγαθά, έτσι και ο άνθρωπος θα πρέπει να βρει τρόπους να διατηρηθεί με τα αγαθά που διατίθενται σε αυτόν από την φύση. Τα τελευταία όμως χρόνια παρατηρείται ανά τον κόσμο μια σημαντική μείωση στις βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια από τις ανθρώπινες διεργασίες, όπως είναι ο άνθρακας ή το πετρέλαιο. Θεωρώντας ότι βασική κινητήρια δύναμη των περισσότερων διεργασιών αυτών είναι η ενέργεια σε όλες της τις μορφές (χημική, θερμική, ηλεκτρική κλπ.) βλέπουμε εύκολα ότι αν δεν γίνει καμία αλλαγή στον τρόπο που εκμεταλλεύονται αυτές οι πρώτες ύλες, σύντομα θα εκλείψουν εντελώς και μαζί τους και η σύγχρονη ανθρώπινη ζωή. Η παραπάνω πρόταση εν συντομία είναι η λεγόμενη “ενεργειακή κρίση”. Πέραν όμως των προβλημάτων που δημιουργούνται από την υπερβολική εκμετάλλευση των αγαθών αυτών, υπάρχει και το αντίκτυπο της χρήσης τους πίσω στην ίδια τη φύση. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), η ρύπανση του αέρα και των θαλασσών και άλλα περιβαντολογικά θέματα είναι μόνο επιγραμματικά τα προβλήματα που δημιουργούνται στην φύση και εν συνεχεία στην πανίδα και την χλωρίδα της γης. Η βασικότερη προσπάθεια των σύγχρονων μηχανικών για εύρεση λύσης σε αυτά τα προβλήματα είναι, όπως είναι γνωστό, η ανάπτυξη των τρόπων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική και η ενέργεια από την κίνηση του νερού. Η τελευταία είναι η βασική μορφή που αναλύεται στο παρόν κείμενο και συγκεκριμένα αυτή που προέρχεται από το νερό της θάλασσας, η οποία διαφέρει από την κλασσική υδροηλεκτρική ενέργεια από λίμνες και φράγματα.

## 1.1 Ενεργειακή κρίση

Γενικά, ενεργειακή κρίση ονομάζεται η έλλειψη ή η ραγδαία άνοδος των τιμών των απαραίτητων για την παραγωγή ενέργειας πρώτων υλών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για να πειστούμε ότι συμβαίνει κάτι τέτοιο στις μέρες μας είναι το εξής: Τον Σεπτέμβριο του 2003 η τιμή του αργού πετρελαίου ήταν στα 25\$/βαρέλι ενώ τον Ιούλιο του 2008 έφτασε τα 147\$/βαρέλι [1]. Τα βασικότερα αίτια που προκαλούν αυτήν την κρίση μπορούν να απαριθμηθούν στα εξής:

1. Υπερκατανάλωση. Για πολλά χρόνια οι άνθρωποι έχουν αλόγιστα εξαντλήσει τα περισσότερα αποθέματα πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου

2. Υπερπληθυσμός. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια σημαντική αύξηση του πληθυσμού της γης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα της αύξησης ζήτησης ενέργειας.
3. Κακή κατάσταση των συστημάτων παραγωγής, διανομής και μεταφοράς της ενέργειας με αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες.
4. Σπατάλη ενέργειας. Οι περισσότεροι άνθρωποι σήμερα δεν είναι πλήρως ενημερωμένοι για τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια (όπως π.χ. σχεδιασμός ενεργειακών σπιτιών, πλήρης εκμετάλλευση του ηλιακού φωτός στην διάρκεια της ημέρας κλπ.) και έτσι παρατηρείται τεράστια σπατάλη.
5. Φυσικές καταστροφές. Γεγονότα όπως σεισμοί, πλημμύρες και εκρήξεις ηφαιστείων μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα τόσο στην παραγωγή όσο και στην μεταφορά της ενέργειας με αποτέλεσμα μια ξαφνική αύξηση τιμών.
6. Πόλεμοι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι η κρίση στην Μέση Ανατολή που έχει ως αποτέλεσμα την μη χρησιμοποίηση των πλούσιων σε ορυκτά καύσιμα περιοχών.
7. Τυχαία γεγονότα, όπως κοινωνικοπολιτικά συμβάντα ή ραγδαία καιρικά φαινόμενα (πολύ συχνά τα πολύ ζεστά καλοκαίρια και τους πολύ έντονους χειμώνες υπάρχει κατακόρυφη αύξηση στην ζήτηση ενέργειας λόγω θέρμανσης) [2].

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ανανεώσιμη ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από πρώτες ύλες οι οποίες δεν εξαντλούνται (ή ανανεώνονται συνεχώς). Για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια που εκμεταλλεύονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα υπάρχει όσο υπάρχει και ο ήλιος (περίπου 5 δισεκατομμύρια χρόνια) ανεξάρτητα από το αν την συλλέγουμε ή όχι. Οι κυριότερες τεχνικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η βιομάζα. Τα τελευταία χρόνια έπειτα από την παραδοχή της ενεργειακής κρίσης έχουν αυξηθεί σημαντικά οι προσπάθειες για την ένταξη των φωτοβολταϊκών και των αιολικών πάρκων στην διαδικασία της παραγωγής ενέργειας, πρακτική που ολοένα και συνεχίζεται. Παράλληλα όμως υπάρχει μια συνεχής αναζήτηση για νέους τρόπους εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών καθώς και της βελτίωσης των ήδη χρησιμοποιούμενων. Χαρακτηριστική είναι η πρόσφατη συμφωνία των κρατών μελών της Ε.Ε. για το 2020 που στοχεύει στην συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) κατά 20% στην συνολική κατανάλωση ενέργειας, στην μείωση εκπομπών των Αερίων του Θερμοκηπίου κατά 20% και στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά 20% (λέγεται επίσης και στόχος 20-20-20). Επίσης υπάρχουν σενάρια για “carbon free” ηλεκτροπαραγωγή από το 2050 [3]. Φυσικά όπως σε όλα τα κοινωνικά και τεχνολογικά ζητήματα, έτσι και εδώ υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να σημειώσουμε για να μπορέσουμε να αναλύσουμε το θέμα με κριτική ματιά. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι:



1. Σταθερότητα στην τιμή της παραγόμενης ενέργειας. Αντίθετα με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής όπου η τιμή της ενέργειας είναι άμεσα ελεγχόμενη από την τιμή του καυσίμου, στην περίπτωση των ΑΠΕ το κόστος μπορεί δυνητικά να καταλήξει σε μια μέση τιμή και να μείνει σταθερό.
2. Αξιοπιστία για το μέλλον. Σε κάθε επένδυση, πριν πραγματοποιηθεί εκτιμάται η βιωσιμότητά της. Στην περίπτωση των ΑΠΕ είναι σίγουρο ότι αν δεν προκύψουν τεχνικά ζητήματα στο ίδιο το σύστημα, θα λειτουργεί ομαλά στο μέλλον αφού πάντα θα υπάρχει το “καύσιμο”, αντίθετα με πια επένδυση συμβατικού σταθμού όπου δεν υπάρχει καμία βεβαίωση ότι θα υπάρχουν ορυκτά καύσιμα στο μέλλον.
3. Χαμηλή εκπομπή ρύπων. Σχεδόν όλες οι ΑΠΕ έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και υδάτινης ρύπανσης σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς κυρίως επειδή δεν περιλαμβάνουν διαδικασίες καύσης.
4. Χαμηλό κόστος λειτουργίας. Μετά τα έξοδα εγκατάστασης, τα συστήματα αυτά λειτουργούν με πολύ χαμηλότερα έξοδα σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς αφού δεν υπάρχει αγορά καυσίμου. Τα έξοδά τους είναι κυρίως οι δαπάνες συντήρησης.
5. Ευκολότερη τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών. Η τροφοδότηση ηλεκτρικού ρεύματος σε μια απομακρυσμένη περιοχή μπορεί να γίνει εύκολη με την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού ή ενός αιολικού πάρκου κοντά σε αντίθεση με τις σημερινές τεχνικές μεταφοράς της ενέργειας σε τόση μεγάλη απόσταση που ισοδυναμεί με μεγάλες απώλειες.

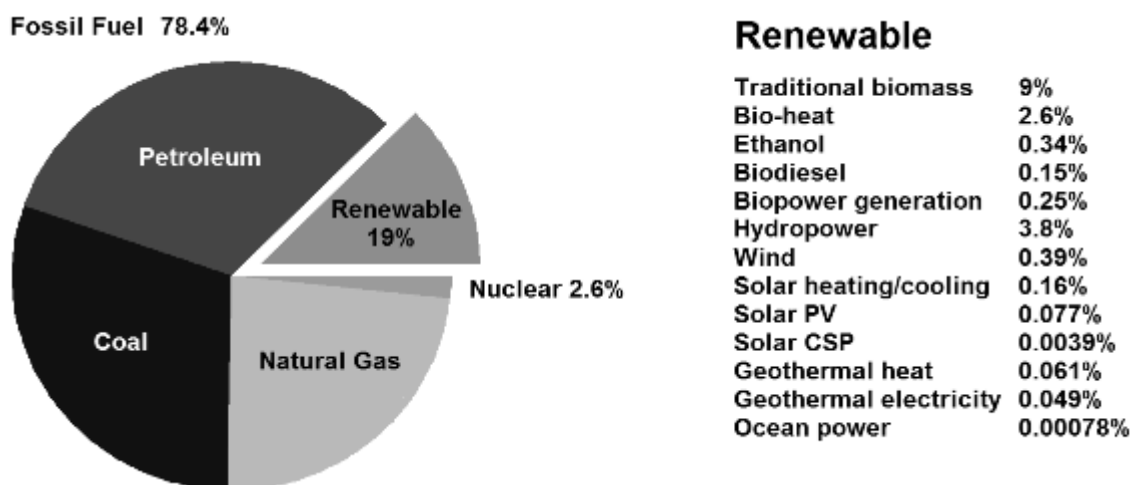
Ταυτόχρονα υπάρχουν τα παρακάτω μειονεκτήματα:

1. Υψηλό κόστος εγκατάστασης. Τόσο η έρευνα, όσο και η παραγωγή των μέσων που απαιτούνται σε κάθε εγκατάσταση έχουν πολύ υψηλά κόστη, κυρίως διότι κάθε περίπτωση είναι διαφορετική και εξαρτάται από την περιοχή που θα πραγματοποιηθεί αλλά και από τα γεωλογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Αντίθετα οι συμβατικοί σταθμοί υπάρχουν για τόσα πολλά χρόνια που η εγκατάστασή τους ακολουθεί κάποια ήδη υπάρχοντα πρότυπα.
2. Αδυναμία να παράξουν σε μεγάλες ποσότητες. Τα συστήματα αυτά όπως έχουν δείξει οι μέχρι τώρα έρευνες δεν μπορούν να συγκριθούν με τις συμβατικές γεννήτριες των σταθμών ορυκτών καυσίμων όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ.
3. Ασυνέχεια παραγωγής. Όπως είναι φυσικό, ένα σύστημα που η είσοδος του βασίζεται σε ένα τυχαίο μέσο όπως τα καιρικά φαινόμενα (ήλιος, άνεμος κλπ.) δεν δύναται να λειτουργεί αδιάκοπα και συνεχόμενα.
4. Γεωγραφική εξάρτηση. Μια μονάδα παράγωγης ΑΠΕ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με συγκεκριμένα μέρη. Δεν είναι λογικό π.χ. να εγκατασταθεί ένα μεγάλο ηλιακό πάρκο στις Σκανδιναβικές χώρες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση του δικτύου μεταφοράς το οποίο είτε είναι σχεδιασμένο για άλλους σταθμούς παραγωγής (άλλη

ονομαστική ισχύς) είτε πρέπει να σχεδιαστεί από την αρχή με τεράστιο κόστος.

5. Εξάρτηση της παραγωγής από το μέγεθος. Όπως γνωρίζουμε η ονομαστική ισχύς μιας ηλεκτρικής γεννήτριας είναι ανάλογη του φυσικού της μεγέθους. Έτσι ένα υδροηλεκτρικό σύστημα ή μια ανεμογεννήτρια πρέπει να έχει μεγάλο μέγεθος εάν η επιθυμητή παραγωγή είναι αναλόγως μεγάλη. Επίσης συνήθως ένα φωτοβολταϊκό πάνελ έχει συγκεκριμένη παραγωγή. Έτσι η παραγωγή ενός πάρκου είναι γραμμική με τον αριθμό των πάνελ, πράγμα που σημαίνει ότι θα χρειαστεί ένα μεγάλο μέρος στο έδαφος της γης.

Τελικά ένα σημαντικό ζήτημα πέρα από την εύρεση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, είναι η βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχοντων μεθόδων (για παράδειγμα η μείωση του κόστους εγκατάστασης ή η εύρεση αποθηκευτικών μέσων για εξισορρόπηση της ασυνέχειας παραγωγής) [3].



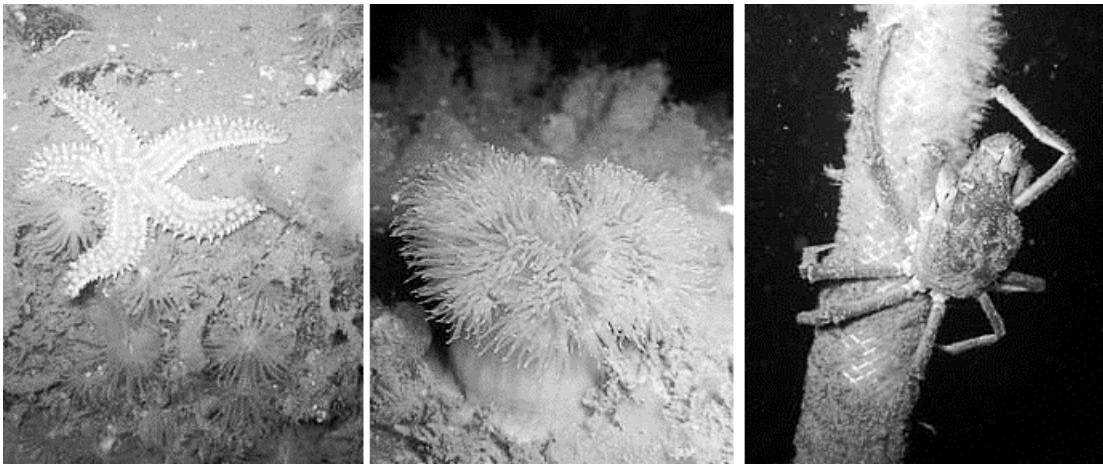
Εικόνα 1: Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή [4].

### 1.3 Εκμετάλλευση της ενέργειας της θάλασσας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση των θαλασσών είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος που ερευνάται τα τελευταία χρόνια. Κύρια ιδέα αυτής της τεχνικής είναι η εγκατάσταση κάποιου είδους ηλεκτρικής γεννήτριας μέσα στο νερό και η κίνηση του δρομέα της από την κινητική ενέργεια του νερού, με άμεση οδήγηση αλλά όχι μόνο. Άλλοι τρόποι είναι με μηχανικά βοηθητικά συστήματα όπως πνευματικά ή υδραυλικά. Οι τρόποι αυτοί θα εξηγηθούν αναλυτικά στην συνέχεια αυτού του δοκιμίου. Ιστορικά, η πρώτη πατέντα για εκμετάλλευση της θάλασσας για ηλεκτροπαραγωγή έγινε το 1799 στο Παρίσι, ενώ η πρώτη εφαρμογή της ήταν μια συσκευή που χρησιμοποιούσε τα κύματα για να τροφοδοτήσει μια κατοικία στο Μπορντό της Γαλλίας το 1910. Μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973 υπήρξε ένα νέο ενδιαφέρον για αυτήν τη μέθοδο με πολλούς επιστήμονες της εποχής και πολλά πανεπιστήμια να ερευνούν ενεργά τις νέες προοπτικές. Σήμερα οι έρευνες έχουν αποφέρει πολλά αποτελέσματα τα οποία κατά κάποιο τρόπο μας δείχνουν το δρόμο για την βέλτιστη μέθοδο παραγωγής [5]. Πιο συγκεκριμένα έχουν σχεδιαστεί πολλές συσκευές και η κάθε μία εκμεταλλεύεται άλλο μέρος της θαλάσσιας ενέργειας, για παράδειγμα τα Oscillating Water Columns (παλλόμενες στήλες νερού) τα οποία αποτελούνται από ένα θάλαμο με αέρα ο οποίος βυθίζεται μερικώς σε νερό. Η ταλάντωση του νερού προκαλεί συμπίεση και εκτόνωση στον αέρα που βρίσκεται μέσα και αυτό με τη σειρά του προκαλεί κίνηση σε μια προπέλα συνδεδεμένη μηχανικά με τον ρότορα της γεννήτριας. Όμως όπως κάθε νέα τεχνολογική ανακάλυψη απαιτεί προσεκτική μελέτη, έτσι και εδώ υπάρχουν ακόμα πολλά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν προτού σιγουρευτούμε ότι η ηλεκτροπαραγωγή από την θάλασσα είναι μια βιώσιμη λύση. Τέτοια θέματα είναι οικονομικής φύσεως, όπως η αξιολόγηση μιας τέτοιας επένδυσης σε βάθος χρόνου καθώς και τα έξοδα συντήρησής της (μια εγκατάσταση σε θάλασσα είναι πολύ διαφορετική από τις υπόλοιπες αφού υπάρχουν θέματα όπως η οξειδωση των μεταλλικών μερών της και η αλληλεπίδραση έμβιων οργανισμών με εύθραυστες κατασκευές στο εσωτερικό της). Άλλα θέματα που προκύπτουν, κυρίως περιβαντολογικά είναι η διατήρηση της χλωρίδας και της πανίδας των ωκεανών, η ρύπανση που ίσως επιβαρύνει το περιβάλλον κλπ. Τέλος σαν εισαγωγικό σχόλιο είναι σκόπιμο να αποσαφηνίσουμε γιατί αυτή η μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί ανανεώσιμη. Βασική "πρώτη ύλη" της ηλεκτροπαραγωγής είναι η κίνηση της θάλασσας. Κινητήριες δυνάμεις της θάλασσας είναι ο άνεμος, η βαρύτητα (τόσο της Γης όσο και της Σελήνης) και η περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο και γύρω από τον άξονά της. Ο άνεμος ως γνωστόν δημιουργείται από τις θερμές αέριες μάζες στην επιφάνεια της Γης που δημιουργούνται από την θερμότητα του Ήλιου και ως συνέπεια οφείλεται και ο ίδιος ο άνεμος στον Ήλιο. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ενέργεια που θα παραχθεί από αυτή τη μέθοδο προέρχεται εξ'ολοκλήρου από τον Ήλιο, την Σελήνη και τη Γη.



Εικόνα 2: Διάβρωση μεταλλικών ελατηρίων μετά από τοποθέτηση στη θάλασσα χωρίς προστασία [6].



Εικόνα 3: Θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα πάνω σε κατασκευή γεννήτριας μέσα στη θάλασσα [6].

## 2. Μηχανική της Θάλασσας

### 2.1 Κίνηση της θάλασσας

Ο βασικός μηχανισμός που οδηγεί το νερό της θάλασσας σε κίνηση είναι ο άνεμος. Ο ήλιος θερμαίνει τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας, οι οποίες παρουσιάζουν έτσι διαφορά πιέσεων και κατ' επέκταση δημιουργείται το φαινόμενο του ανέμου. Ο άνεμος επειδή δεν παρουσιάζει μια σταθερή ροή αλλά μια τυρβώδη ροή, όταν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της θάλασσας δημιουργεί μικρές αυξομειώσεις πιέσεων. Έτσι δημιουργούνται κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας, δηλαδή περιοδικές κινήσεις των σωματιδίων του νερού. Στη συνέχεια ο άνεμος αυτός συνεχίζει να αλληλοεπιδρά με το νερό αλλά πολύ περισσότερο με τα σημεία που βρίσκονται στην κορυφή των κυμάτων, σε αντίθεση με αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια και έτσι τα κύματα γίνονται μεγαλύτερα. Καθ' όλη την διάρκεια αυτού του φαινομένου, υπάρχει μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στο νερό. Το τελικό μέγεθος των κυμάτων αυτών προκύπτει από τρεις συνιστώσες: την ταχύτητα του ανέμου, την χρονική διάρκεια του ανέμου και το μέγεθος της θαλάσσιας επιφάνειας στην οποία παρατηρείται ο άνεμος. Στη συνέχεια ωστόσο, μετά την παύση του ανέμου, τα κύματα αυτά συνεχίζουν να υπάρχουν έως ότου χαθεί όλη η ενέργειά τους λόγω τριβών μεταξύ τους, με τον πυθμένα ή με άλλα χερσαία τμήματα [7].

#### 2.1.1 Ορολογία και χαρακτηριστικά των κυμάτων

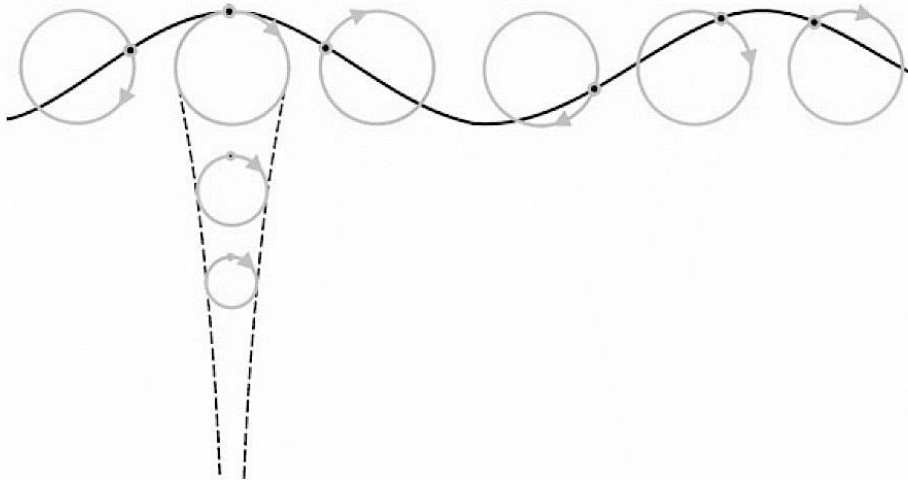
Τα κύματα που δημιουργούνται από τον άνεμο ονομάζονται *αιολικά κύματα* και η κατάσταση του ωκεανού κατά την διάρκεια της ύπαρξης ανέμου ονομάζεται *αιολική θάλασσα*. Αντίθετα όταν παύσει ο άνεμος χρησιμοποιούμε τον όρο *ελεύθερα κύματα*. Γενικότερα για την περιγραφή της φυσικής κατάστασης του ωκεανού χρησιμοποιούμε τους όρους *κατάσταση της θάλασσας* και *κλίμα της θάλασσας*. Η διαφορά είναι ότι το κλίμα της θάλασσας αναφέρεται σε αποτελέσματα μελέτης της κατάστασης της θάλασσας σε βάθος χρόνου, τα οποία ενδιαφέρουν για την ηλεκτροπαραγωγή καθώς περιέχουν πληροφορίες για τις ταχύτητες των κυμάτων, την περιεχόμενη ενέργεια κλπ σε μια περιοχή, έτσι ώστε να αξιολογηθεί μια επένδυση υδατογεννήτριας. Η μελέτη της αιολικής θάλασσας για τον παραπάνω σκοπό είναι αρκετά δύσκολο έργο καθώς στον ωκεανό δημιουργείται τεράστιος αριθμός κυμάτων με διαφορετικά μήκη κύματος, ύψη και κατευθύνσεις. Η πιο συνηθισμένη αντιμετώπιση είναι η ανάλυση όλων των κυμάτων αυτών με ημιτονοειδείς συναρτήσεις όπως η ανάλυση Fourier.

Μια ιδιότητα που προκύπτει από την μαθηματική ανάλυση της κίνησης, που θα γίνει παρακάτω, είναι ότι η ταχύτητα των κυμάτων είναι ανάλογη του μήκους κύματος βάσει της σχέσης:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.1)$$

όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $T$  η περίοδος του κύματος. Αυτό σημαίνει ότι όταν σταματήσει ο άνεμος τα κύματα διαφορετικού μήκους θα αρχίσουν να διαχωρίζονται μεταξύ τους καθώς και ότι στις ακτές φτάνουν πρώτα τα ταχύτερα και μεγαλύτερα κύματα.

Τέλος βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι κατά την διάρκεια της κυματικής κίνησης, δεν υπάρχει σημαντική μεταφορά μάζας στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος αλλά μόνο μεταφορά ενέργειας. Τα σωματίδια νερού που αποτελούν το κύμα στην πραγματικότητα κάνουν κυκλική κίνηση με τροχιά φθίνουσα ανάλογα με το βάθος στο οποίο βρίσκονται. Ένα απλό παράδειγμα αυτού του φαινομένου δίνεται παρατηρώντας ένα σώμα στην επιφάνεια της θάλασσας: αν αφήσουμε μια μπάλα στην θάλασσα αρκετά μακριά από την ακτή, παρατηρούμε ότι χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα να επιστρέψει στην ακτή, ενώ το νερό φαίνεται να καταλήγει εκεί συνεχώς. Επίσης κοντά στην ακτή η κυκλική κίνηση των σωματιδίων καταλήγει σε ελλειπτική λόγω τριβής με τον πυθμένα έως ότου μηδενιστεί τελείως, ενώ σε *βαθύ νερό* (όπου το βάθος είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος) η τροχιά είναι σχεδόν τέλειος κύκλος [6].



Εικόνα 4: Κυκλική κίνηση ενός σωματιδίου του νερού κατά την διάδοση ενός κύματος [7].

## 2.2 Κυματική ανάλυση

### 2.2.1 Γραμμική θεωρία κυμάτων

Η μαθηματική θεωρία για τα θαλάσσια κύματα βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις εξισώσεις της μηχανικής, την εξίσωση συνέχειας (διατήρηση μάζας):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.2)$$

και την εξίσωση Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho} \vec{f} \quad (2.3)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του υγρού,  $p$  η πίεση,  $\vec{v}$  το διάνυσμα ταχύτητας,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες και  $\vec{f}$  μια εξωτερική δύναμη που ασκείται σε αυτό.

Η εξίσωση (2.2) ορίζει ότι η μεταβολή της πυκνότητας ενός υγρού μέσα σε έναν όγκο ισοδυναμεί με την ροή μάζας μέσα στον όγκο, ενώ η (2.3) είναι μια παραλλαγή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα. Η αριστερή πλευρά ισούται με την επιτάχυνση και η δεξιά πλευρά με την δύναμη ανά μονάδα μάζας. Οι τρεις όροι διαδοχικά αντιπροσωπεύουν την μεταβολή της πυκνότητας, το ιξώδες και τις εξωτερικές δυνάμεις. Πρώτο βήμα για την ανάλυση είναι οι εξής πέντε παραδοχές θεωρώντας την θάλασσα ως το ρευστό:

1. είναι ομογενές δηλαδή  $\rho = \text{σταθερό}$
2. το υγρό είναι αστρόβιλο δηλαδή  $\nabla \times \vec{v} = 0$
3. το ιξώδες μπορεί να αμεληθεί,  $\nu = 0$
4. η μόνη εξωτερική δύναμη είναι η βαρύτητα με επιτάχυνση  $g$  δηλαδή  $\vec{f} = -g\rho\hat{z}$
5. μικρή ταχύτητα οπότε όροι ταχύτητας τάξεως  $>1$  μπορούν να αμεληθούν

Επειδή το υγρό είναι αστρόβιλο μπορούμε να ορίσουμε δυναμικό ταχύτητας  $\varphi$  τέτοιο ώστε  $\vec{v} = \nabla \cdot \varphi$  και μαζί με τις παραδοχές, η εξίσωση συνέχειας μετατρέπεται στην εξίσωση Laplace:

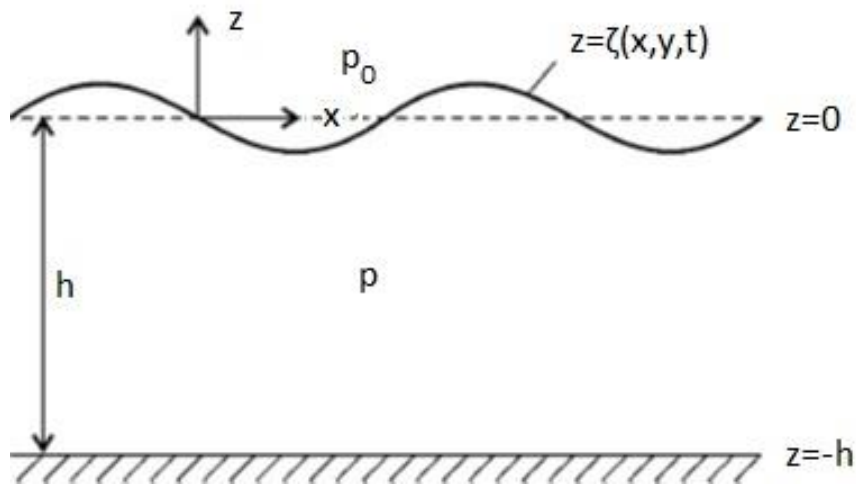
$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.4)$$

Η εξίσωση Navier-Stokes επίσης μετατρέπεται στην γραμμική εξίσωση Bernoulli

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\rho} p + gz = \xi \quad (2.5)$$

όπου  $\xi$  μια σταθερά

Για την επίλυση της εξίσωσης Laplace χρειάζεται να ευρεθούν οι οριακές συνθήκες.



Εικόνα 5: Προσδιορισμός των μεταβλητών του προβλήματος

Η εικόνα 5 δείχνει τα μεγέθη που χρησιμοποιούμε στην ανάλυση των κυμάτων.  $p$  η πίεση,  $p_0$  η ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της επιφάνειας,  $h$  το βάθος της θάλασσας,  $z = 0$  το επίπεδο της στάθμης όταν δεν υπάρχουν κύματα (ή η θέση ισοροπίας) και η συνάρτηση  $\zeta$ , η ανύψωση ή η βύθιση της στάθμης, όπου είναι συνάρτηση των μεταβλητών της επιφάνειας και του χρόνου,  $\zeta(x, y, t)$ . Το ανάπτυγμα της σειράς McLaurin της κάθετης ταχύτητας του νερού της επιφάνειας (δηλαδή της  $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ ) δίνει:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = v_z|_{z=\zeta} = \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=\zeta} = \frac{\partial \phi}{\partial z}|_{z=0} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}|_{z=0} \cdot \zeta + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 \phi}{\partial z^3}|_{z=0} \cdot \zeta^2 + \dots \quad (2.6)$$



Εάν οι τιμές της  $\zeta$  είναι μικρές τότε οι όροι  $>1$  μπορούν να αμεληθούν και να καταλήξουμε σε γραμμική προσέγγιση της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας (γραμμική θεωρία ωκεάνιων κυμάτων):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (2.7)$$

Αφού δεν υπάρχει κάθετη κίνηση νερού στον πυθμένα, η οριακή συνθήκη του πυθμένα λαμβάνεται ως:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0 \quad (2.8)$$

Η εξίσωση Bernoulli στην επιφάνεια γίνεται:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=\zeta} + \frac{\rho_0}{\rho} - \xi = -g\zeta \Rightarrow [\text{για μικρό } \zeta] \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \frac{\rho_0}{\rho} - \xi = -g\zeta \quad (2.9)$$

Στην ηρεμία, δηλαδή χωρίς κίνηση στην επιφάνεια, έχουμε:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \zeta = 0 \Rightarrow \xi = \frac{\rho_0}{\rho} \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = -g\zeta$$

οπότε

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (2.10)$$

η οποία σε συνδυασμό με την (2.7) δίνει την οριακή συνθήκη επιφάνειας:

$$\left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=0} = 0 \quad (2.11)$$

Τώρα η εξίσωση Laplace (2.4) μαζί με τις οριακές συνθήκες (2.8), (2.11) και την εξίσωση (2.10) δίνει τις παρακάτω ειδικές λύσεις:

$$\phi = \frac{gH}{2\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.14)$$

Η εξίσωση (2.12) είναι μια λύση της εξίσωσης Laplace, η εξίσωση (2.13) είναι η κάθετη κίνηση της επιφάνειας (εξίσωση του κύματος) και η εξίσωση (2.14)

είναι γνωστή ως εξίσωση διασποράς. Επίσης ο κυματάρριθμος  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $\omega = 2\pi f$  η κυκλική συχνότητα,  $f = \frac{1}{T}$  η συχνότητα,  $T$  η περίοδος του κύματος και  $H$  το ύψος του κύματος μετρούμενο από το χαμηλότερο έως το υψηλότερο σημείο του κύματος [6].

### 2.2.2 Αρμονικά κύματα σε βαθύ νερό

Για περαιτέρω απλοποίηση των παραπάνω σχέσεων, αλλά και επειδή η ηλεκτροπαραγωγή στον ωκεανό γίνεται μακριά από την ακτή, μπορούμε να θεωρήσουμε τα κύματα μόνο σε μεγάλο βάθος, εκεί δηλαδή που δεν επηρεάζονται από τον πυθμένα. Έτσι η εξίσωση διασποράς γίνεται:

$$\omega^2 = gk \quad (2.15)$$

Επίσης συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.15) και τον ορισμό του δυναμικού ταχύτητας  $\vec{v} = \nabla \cdot \phi$ , η κίνηση του νερού συναρτήσει του βάθους προκύπτει:

$$\vec{v} = \nabla \phi = \frac{\omega H}{2} e^{kz} (\cos(kx - \omega t), 0, \sin(kx - \omega t)) \quad (2.16)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι το νερό σε ένα κύμα κινείται σε κυκλική τροχιά που φθίνει ανάλογα με το βάθος όπως αναφέρθηκε νωρίτερα.

Η εξίσωση διασποράς μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της σχέσεως της ταχύτητας διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα,  $c$ , ενός κύματος ορίζεται ως:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} = [\text{βαθύ νερό}] = \frac{g}{\omega} = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.17)$$

Έτσι η ταχύτητα του κύματος είναι γραμμικά ανάλογη της περιόδου, πράγμα που σημαίνει ότι τα μεγάλα κύματα ταξιδεύουν ταχύτερα.

Στην πραγματικότητα τα κύματα του ωκεανού δεν είναι τελείως αρμονικά αλλά αποτελούνται από συνδυασμό αρμονικών κυμάτων. Η ταχύτητα με την οποία μια τέτοια ομάδα κυμάτων κινείται ονομάζεται *ταχύτητα ομάδας*  $c_g$  και ορίζεται ως:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.18)$$

και για βαθύ νερό μετατρέπεται σε:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial}{\partial k} \sqrt{gk} = \frac{g}{2\sqrt{gk}} = \frac{c}{2} \quad (2.19)$$

Η ταχύτητα ομάδας είναι επίσης η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει η ενέργεια των κυμάτων στον ωκεανό [7].

### 2.2.3 Ενέργεια αρμονικών κυμάτων

Η ροή ισχύος,  $[W/m^2]$ , ορίζεται ως το γινόμενο πίεσης επί ταχύτητας. Ολοκληρώνοντας στο βάθος από την επιφάνεια έως τον (άπειρο) πυθμένα λαμβάνουμε μια έκφραση της ροής ανά μέτρο ύψους του κύματος:

$$P = \int_{-\infty}^0 p \cdot v \cdot dz \quad [W/m] \quad (2.20)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli (2.5) για την πίεση, και την εξίσωση (2.16) για την ταχύτητα, έχουμε:

$$P = \frac{\rho \cdot g^2}{32\pi} T H^2 \quad (2.21)$$

Για τον υπολογισμό της δυναμικής ενέργειας εργαζόμαστε ως εξής(εικ.6):

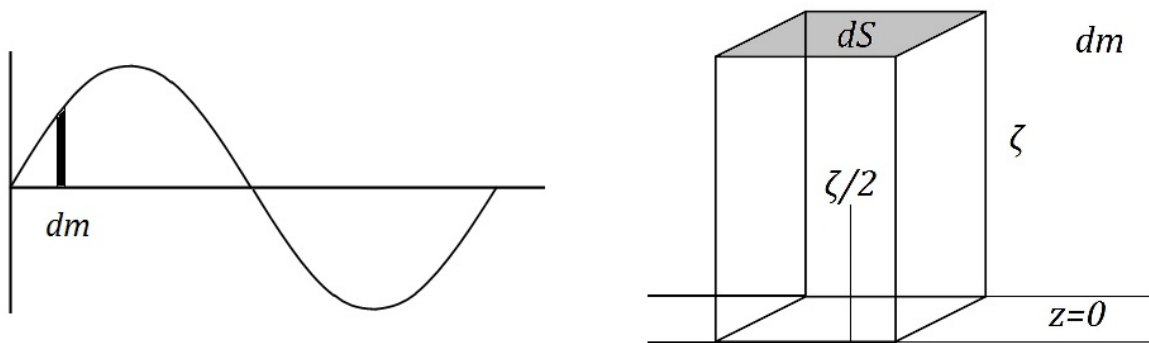
- Η δυναμική ενέργεια ακολουθεί τον γνωστό τύπο  $U = mgh$ , όπου  $m$  η μάζα της ποσότητας του νερού που μας ενδιαφέρει
- Την μάζα  $m$  μπορούμε να την υπολογίσουμε ως το ολοκλήρωμα της στοιχειώδους μάζας  $dm$  οπότε με διαφορικά  $dU = gh dm$
- Η μάζα  $dm$  ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας επί τον στοιχειώδη όγκο που καταλαμβάνει,  $dm = \rho dV$
- Ο στοιχειώδης όγκος ισούται με την απόσταση από το σημείο ηρεμίας επί την στοιχειώδη επιφάνεια,  $dV = \zeta dS$
- Το ύψος  $h$  ισοδυναμεί με την απόσταση του κέντρου αυτής της μάζας από την επιφάνεια δηλαδή με  $\zeta/2$ .

Επομένως η σχέση καταλήγει ως:

$$U = \int_0^S g \frac{1}{2} \zeta \rho \zeta dS = \frac{H^2}{16} \rho g \cdot S \quad [J]$$

και διαιρώντας με την επιφάνεια  $S$  υπολογίζουμε την δυναμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (πυκνότητα δυναμικής ενέργειας)

$$\bar{U} = \frac{H^2}{16} \rho g \quad [J/m^2] \quad (2.22)$$



Εικόνα 6. Στοιχειώδης μάζα  $dm$  για τον υπολογισμό δυναμικής ενέργειας μια ποσότητας νερού σε κύμα

Με ακριβώς ανάλογο τρόπο υπολογίζουμε την κινητική ενέργεια ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας (πυκνότητα κινητικής ενέργειας) από την σχέση  $K = \frac{1}{2} m v^2$  με τις ίδιες αντικαταστάσεις για την μάζα  $m$  και τον υπολογισμό της ταχύτητας  $v$  από το δυναμικό ταχύτητας  $\varphi$ :

$$\bar{K} = \frac{1}{s} \int_0^S \frac{1}{2} v^2 \rho dV = \frac{H^2}{16} \rho g \quad [J/m^2] \quad (2.23)$$

Χωρίς έκπληξη βλέπουμε ότι η μέση κινητική ενέργεια ισούται με την μέση δυναμική ενέργεια όπως είναι γνωστό από την φυσική των ταλαντώσεων. Η συνολική πυκνότητα ενέργειας είναι λοιπόν:

$$\bar{E} = \bar{K} + \bar{U} = \frac{H^2}{8} \rho g \quad [J/m^2] \quad (2.24)$$

Επίσης η πυκνότητα ενέργειας και η ροή ισχύος συνδέονται με τη σχέση:

$$P = \bar{E} \cdot c_g \quad (2.25)$$

Τέλος κάνοντας μια εισαγωγή στη στατιστική ανάλυση τόσο της ενέργειας όσο και της μετατόπισης  $\zeta$  από την επιφάνεια (κάτι που θα φανεί χρήσιμο στην επόμενη παράγραφο), μπορούμε να υπολογίσουμε την διακύμανση της κυματικής συνάρτησης  $\zeta(x, y, t)$  ως εξής:

$$\begin{aligned} Var(\zeta(t)) &= [\zeta^2(t)] - [\zeta(t)]^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \zeta^2(t) dt - \left( \frac{1}{T} \int_0^T \zeta(t) dt \right)^2 = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{H^2}{4} \cdot \cos^2(kx - \omega t) dt - \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) dt \right)^2 = \\ &= \frac{H^2}{4} \cdot \frac{1}{2} - 0 = \frac{H^2}{8} \end{aligned} \quad (2.26)$$

και έτσι μπορούμε να γράψουμε την συνολική πυκνότητα ενέργειας ως

$$\bar{E} = \rho g \frac{H^2}{8} = \rho g Var(\zeta(t)) \quad (2.27)$$

Παρατηρούμε ότι έτσι γράψαμε την συνάρτηση ενέργειας-χώρου ως συνάρτηση ενέργειας-χρόνου, πράγμα σημαντικό για την ανάλυση του φάσματος των κυμάτων [7].

#### 2.2.4 Πραγματικά κύματα σε βαθύ νερό

Τα περισσότερα κύματα στον ωκεανό δεν είναι αρμονικά αλλά μπορούν να παρασταθούν σαν άθροισμα αρμονικών κυμάτων, δηλαδή σαν σειρά Fourier. Σε διακριτή μορφή η μετατόπιση της επιφάνειας μπορεί να γραφεί ως:

$$\zeta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} z_n e^{in\omega_0 t} \quad (2.28)$$

όπου

$$z_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) e^{in\omega_0 t} dt \quad (2.29)$$

είναι οι συνιστώσες και  $\omega_0$  η βασική συχνότητα.

Υπολογίζοντας τώρα την διακύμανση της  $\zeta(t)$  έχουμε:

$$Var(\zeta(t)) = [\zeta^2(t)] = [\zeta\zeta^*] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} z_n z_n^* = \sum_{n=0}^{\infty} 2z_n z_n^* \quad (2.30)$$

η οποία αντιπροσωπεύει την μεταφορά στο πεδίο της συχνότητας.

Στη συνέχεια της ανάλυσης ορίζουμε μια συνάρτηση φασματικής πυκνότητας (ή φάσμα κύματος)  $S$ , τέτοια ώστε:

$$S(n\omega_0)\omega_0 = 2z_n z_n^* \quad (2.31)$$

και η διακύμανση σε διακριτή και συνεχή μορφή γίνεται:

$$Var(\zeta(t)) = \sum_{n=0}^{\infty} S(n\omega_0)\omega_0, \quad \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.32)$$

Επίσης ορίζουμε φασματικές ροπές, σε διακριτή και συνεχή μορφή ως:

$$m_j = 2f_0^j \sum_{n=0}^{\infty} n^j z_n z_n^*, \quad m_n = 2\pi \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (2.33)$$

Τώρα η εξίσωση (2.27) για την συνολική πυκνότητα ενέργειας με τη χρήση της ροπής τάξεως 0 γίνεται:

$$\bar{E} = \rho g Var(\zeta(t)) = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \rho g m_0 \quad (2.34)$$

Η φασματική ανάλυση επίσης μας δίνει ότι το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  ορίζεται ως:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.35)$$

και η περίοδος ενέργειας  $T_e$  ορίζεται ως:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.36)$$

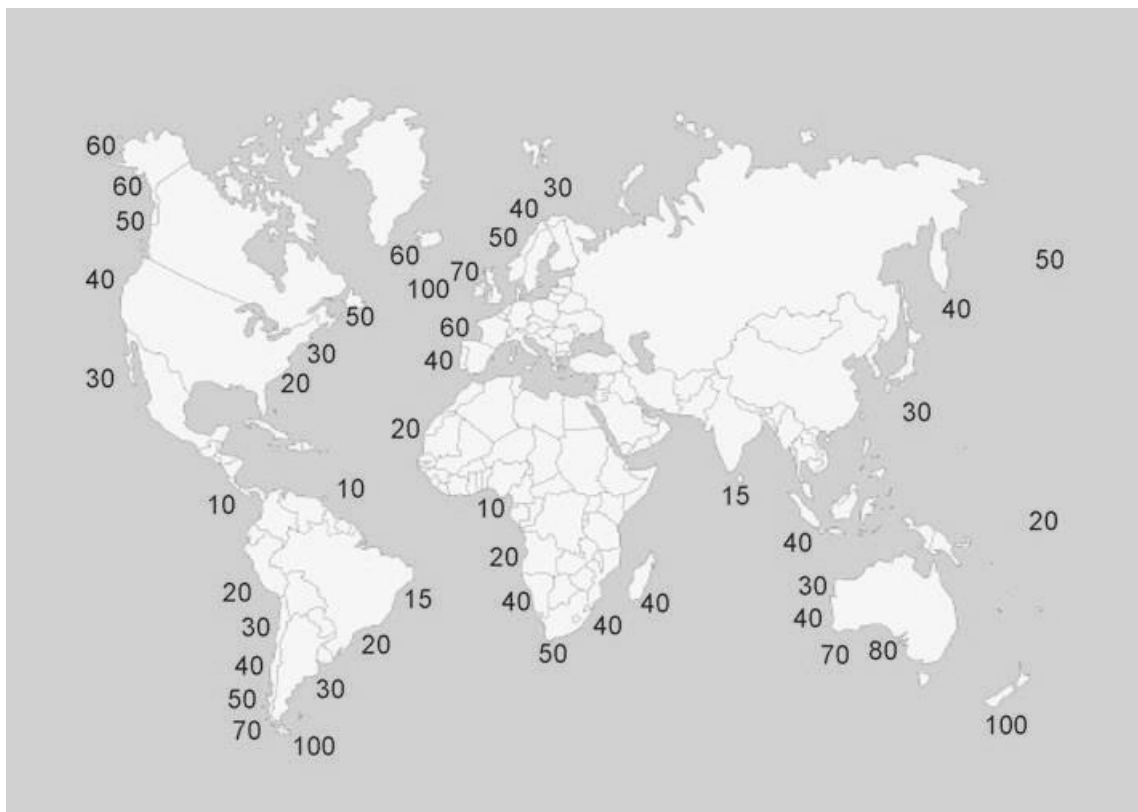
Η σημαντικότερη όμως σχέση που προκύπτει από αυτήν την ανάλυση πραγματικών κυμάτων, αυτή της ροής ισχύος δίνεται από τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.17), (2.19), (2.25), (2.34), (2.35) και (2.36):

$$P = \bar{E} \cdot c_g = \rho g m_0 \cdot \frac{c}{2} = \rho g \frac{H_s^2}{16} \cdot \frac{1}{2} \frac{g T_e}{2\pi} \Rightarrow$$

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad [W/m] \quad (2.37)$$

όπου δείχνει ότι η ροή ισχύος πραγματικού κύματος είναι η μισή αυτής ενός αρμονικού κύματος. Βέβαια τα μεγέθη  $H$  και  $H_s$  δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα [7].

Η σχέση (2.37) είναι πολύ σημαντική για την ηλεκτροπαραγωγή από τον ωκεανό, τόσο για τον σχεδιασμό της υδατογεννήτριας, όσο και για την ενεργειακή μελέτη ενός θαλάσσιου χώρου για σκοπούς αξιολόγησης της επένδυσης αυτής. Έτσι η γνώση της συνάρτησης φασματικής πυκνότητας σε μια περιοχή, δίνει αμέσως πολλές πληροφορίες όπως το σημαντικό ύψος κύματος, την περίοδο ενέργειας και την ροή ισχύος. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι για τον υπολογισμό του φάσματος αυτού, για παράδειγμα με χρήση συσκευών για την μέτρηση των κυμάτων, μέτρηση με τη βοήθεια δορυφόρων ή μέτρηση με χρήση μετεωρολογικών μοντέλων που υπολογίζουν το φάσμα με βάση την μέτρηση των ανέμων [6].



Εικόνα 7: Μέση ροή ισχύος στη θάλασσα παγκοσμίως σε [kw/m] [6].



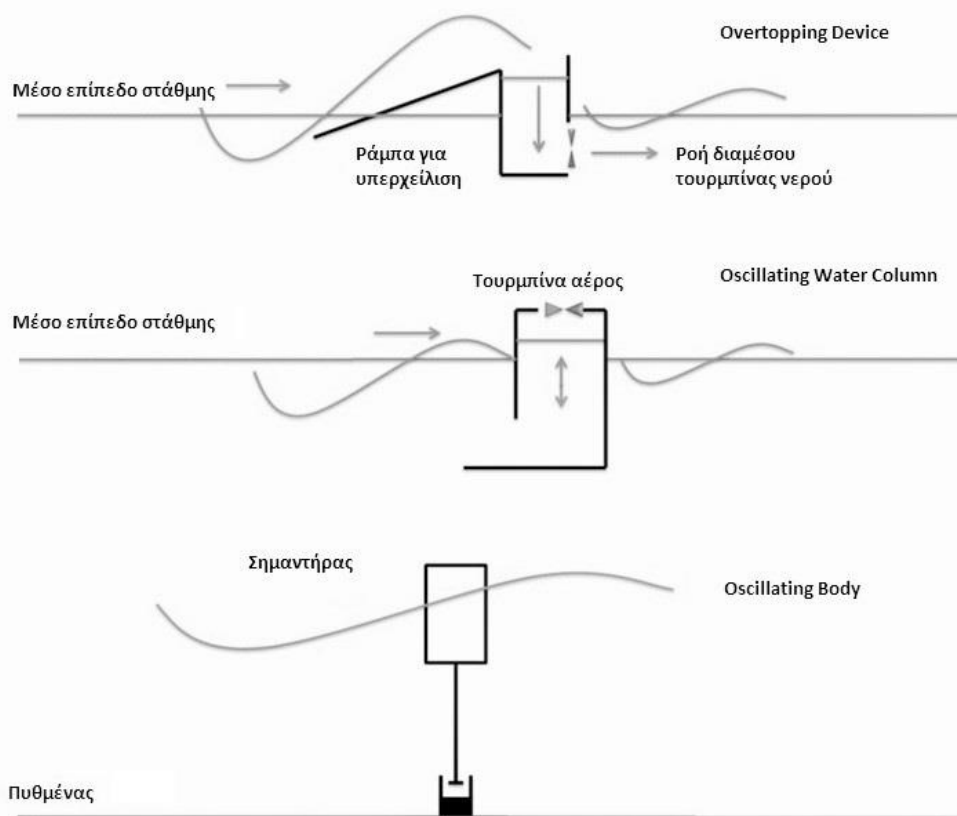


### 3. Συστήματα Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας

Επόμενο βήμα για την ηλεκτροπαραγωγή από την θάλασσα, μετά την ανάλυση της κίνησής της είναι η μοντελοποίηση και ο σχεδιασμός των συστημάτων εκείνων που θα απορροφήσουν και θα μετατρέψουν την κινητική αλλά και την δυναμική ενέργεια της σε ηλεκτρική. Τόσο στην θεωρία, όσο και στην πράξη υπάρχουν πολλά διαφορετικά μοντέλα για τον σκοπό αυτό, των οποίων η χρησιμότητα εξαρτάται από την περιοχή, τα χαρακτηριστικά της θάλασσας, του ανέμου, τον σκοπό που εξυπηρετούν (π.χ. τροφοδότηση του δικτύου ή όχι) και πολλά άλλα. Ωστόσο, με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο απορροφούν την ενέργεια, οι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας (*Wave Energy Converters, WEC*) κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Oscillating Water Column, OWC (*Παλλόμενη στήλη νερού*)
2. Oscillating Body (*Παλλόμενο σώμα*)
3. Overtopping Device (*Διάταξη Υπερχείλισης*) [8]

Στην συνέχεια θα αναλυθεί κάθε κατηγορία ξεχωριστά, τόσο για τον τρόπο λειτουργίας της, όσο και για τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής γεννήτριας που χρησιμοποιεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

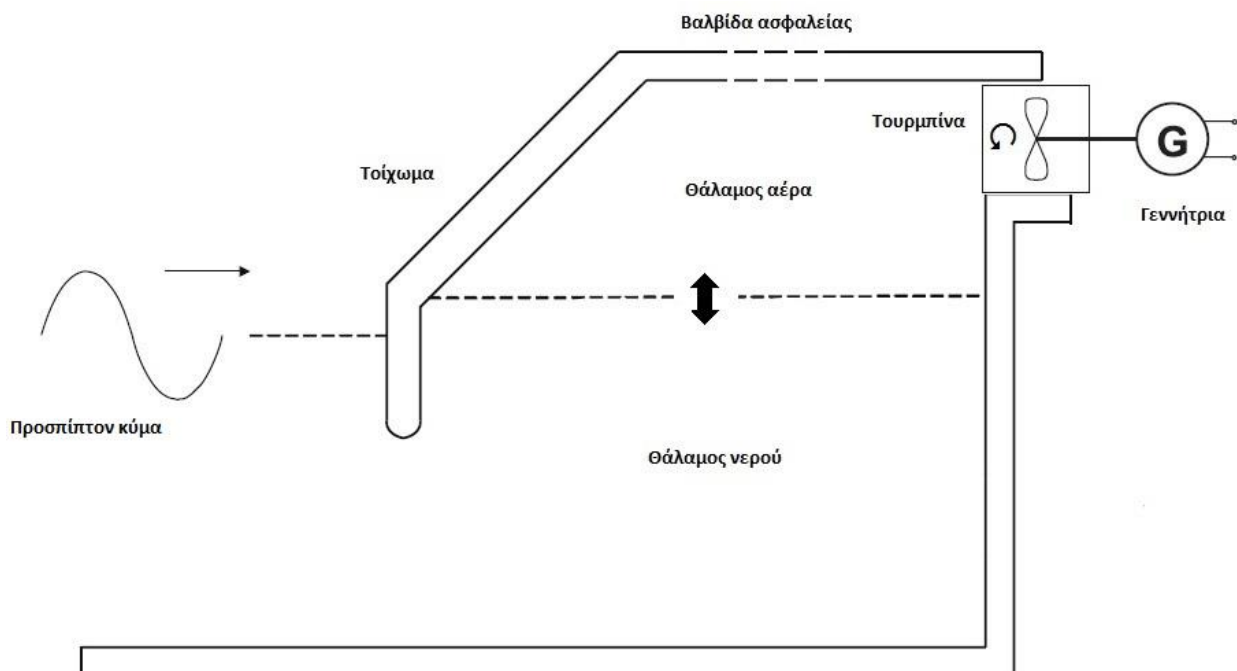


Εικόνα 8: Βασικές κατηγορίες Μετατροπέων Κυματικής Ενέργειας [8].

## 3.1 Παλλόμενη στήλη νερού

### 3.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Οι παλλόμενες στήλες νερού (για συντομία OWC) είναι ένας από τους σημαντικότερους τρόπους εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας με αρκετές εφαρμογές σε πραγματική κλίμακα και με σημαντικά αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Αποτελούνται από ένα ημιβυθισμένο θάλαμο στην επιφάνεια της θάλασσας στον οποίο επιτρέπεται η κίνηση του νερού κατά την διάρκεια του κυματισμού, μια τουρμπίνα αέρος, μια βαλβίδα ασφαλείας για τις περιπτώσεις υπερφόρτωσης (π.χ. σε ακραία κυματικά φαινόμενα) και μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η βασική αρχή λειτουργίας περιγράφεται ως εξής. Το νερό της θάλασσας κατά την διάδοση του κύματος ταλαντώνεται μέσα στο θάλαμο με αποτέλεσμα την συμπίεση και την εκτόνωση του αέρα που ήδη υπάρχει εκεί. Αυτή η κίνηση του αέρα τόσο στην συμπίεση όσο και στην εκτόνωση οδηγεί την τουρμπίνα αέρος σε περιστροφή και αυτή με τη σειρά της οδηγεί την γεννήτρια με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [9].



Εικόνα 9: Τρόπος λειτουργίας OWC [9].

### 3.1.2 Σχεδιασμός εγκατάστασης

Ολόκληρη η εγκατάσταση που περιεγράφηκε μπορεί να υπάρξει είτε σε παράλιο σημείο είτε πλωτή, όπως και τα υπόλοιπα συστήματα μετατροπής. Ωστόσο οι εγκαταστάσεις μακριά από την ακτή είναι περισσότερο αποδοτικές αλλά ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν δυσμενέστερες συνθήκες και απαιτούν συχνότερη συντήρηση. Το βασικό πλεονέκτημα των OWC σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους είναι ότι το κινούμενο μέρος της, η τουρμπίνα και η γεννήτρια βρίσκονται έξω από το νερό. Από την άλλη πλευρά όμως, κατά τον σχεδιασμό της, εξαιρετικά σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία και η κατασκευή του θαλάμου καθώς βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν η φυσική συχνότητα ταλάντωσης του βρίσκεται κοντά στη συχνότητα των κυμάτων που υπάρχουν στο σημείο αυτό της θάλασσας. Έτσι σε περίπτωση που το σημείο αυτό δεν παρουσιάζει σταθερότητα στο κλίμα της θάλασσας, η απόδοση δεν είναι πάντα η μέγιστη δυνατή καθώς δεν υπάρχει τρόπος αλλαγής του θαλάμου μετά την εγκατάσταση. Όσον αφορά την τουρμπίνα αέρος, το γεγονός ότι η συμπίεση και η εκτόνωση αλλάζουν την κατεύθυνση κίνησης του αέρα οδήγησε στην χρήση τουρμπινών που δεν αλλάζουν φορά περιστροφής ασχέτως της κατεύθυνσης αυτής με αντάλλαγμα την μικρότερη απόδοση (Wells Turbine). Τέλος, προσπάθειες για βελτιστοποίηση της απόδοσης των OWC έχουν οδηγήσει σε προτάσεις για εγκαταστάσεις με πολλούς θαλάμους για την αποφυγή των παραπάνω τουρμπινών. Η βασική ιδέα είναι ότι με βαλβίδες επιλογής, οι θάλαμοι "συνεργάζονται" για παραγωγή αέρα ενιαίας κατεύθυνσης που οδηγεί μια συμβατική τουρμπίνα [9] με παρόμοιο τρόπο με αυτό του ανορθωτή γέφυρας των ηλεκτρονικών ισχύος.

### 3.1.3 Ηλεκτρικό μέρος

Το ηλεκτρικό μέρος της εγκατάστασης μιας OWC αποτελείται από την ηλεκτρική γεννήτρια που συνδέεται με την τουρμπίνα αέρος και από τα ηλεκτρονικά ισχύος που μεταφέρουν την παραγόμενη ενέργεια στο δίκτυο ή στα μέσα αποθήκευσης. Ο βασικός σκοπός της OWC είναι η παραγωγή της ροής αέρος που θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ, όπως συμβαίνει στις ανεμογεννήτριες. Έτσι οι λύσεις που έχουν δοθεί σε αυτές τις εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αρκετή επιτυχία, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τουρμπίνα και ο μετατροπέας βρίσκονται υπό ακραίες περιβαλλοντολογικές συνθήκες, κυρίως λόγω της ύπαρξης αλμυρού νερού, δονήσεων, και σε πλωτές εγκαταστάσεις, ισχυρές μηχανικές δυνάμεις λόγω των μεγάλων κινήσεων της θάλασσας σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Για αυτό το λόγο, ενώ είναι δυνατό να συμπεριληφθούν κιβώτια ταχυτήτων, είναι προτιμότερη η άμεση οδήγηση της γεννήτριας, γεγονός που απαιτεί την χρήση μηχανών με μεγάλο αριθμό πόλων.

Μέχρι πρόσφατα, η προσοχή ήταν στραμμένη στην πρωταρχική μέθοδο απορρόφησης ισχύος (power take-off) επειδή αρχικά είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση ότι η μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε πνευματική είναι δυνατή και ότι η συμπεριφορά της θάλασσας είναι αξιόπιστη. Αφού η πρωταρχική μέθοδος απορρόφησης ωρίμασε, στόχος είναι η ηλεκτρική μέθοδος απορρόφησης ισχύος [9]. Για τον σκοπό αυτό έχουν εξεταστεί τα παρακάτω είδη γεννητριών και τα συμπεράσματα οδηγούν στην επιλογή του κατάλληλου είδους για την εγκατάσταση [10]:

- Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης
- Γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού
- Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη
- Σύγχρονη γεννήτρια με πεδίο διέγερσης

Τα σημεία στα οποία συγκρίνονται τα παραπάνω είναι η καταλληλότητα χρήσης σε εγκατάσταση μακριά από την ακτή, η ενεργειακή απόδοση και το κόστος.

#### A. Καταλληλότητα χρήσης μακριά από την ακτή

Η δυνατότητα χρήσεως μιας εγκατάστασης OWC σε σημείο της θάλασσας μακριά από την ακτή είναι ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της, καθώς εκεί βρίσκονται κύματα με μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο και η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο αποδοτική. Ωστόσο, πέραν των όσων προαναφέρθηκαν για αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν κριτήρια προς εξέταση και στο ηλεκτρικό κομμάτι. Αρχικό μειονέκτημα είναι η μηχανική φθορά των ψηκτρών των ηλεκτρικών μηχανών. Ο λόγος είναι ότι η λειτουργία της μηχανής με ρεύμα διαφορετικό του ονομαστικού προκαλεί διάβρωση του άνθρακα του δακτυλίου ολίσθησης με αποτέλεσμα την αύξηση της τριβής μεταξύ των ψηκτρών και του δακτυλίου. Μια γεννήτρια που χρησιμοποιείται σε ηλεκτροπαραγωγή από τα κύματα δεν λειτουργεί στα ονομαστικά χαρακτηριστικά της μονίμως καθώς η ταχύτητα των κυμάτων διαφέρει συνεχώς. Άλλος καθοριστικός παράγοντας που οδηγεί στην απόρριψη μηχανών με ψήκτρες είναι τα υψηλά επίπεδα υγρασίας του αέρα μέσα στον θάλαμο αφού έρχονται σε άμεση επαφή με το νερό. Ψήκτρες και δακτυλίους περιλαμβάνουν οι γεννήτριες επαγωγής διπλής τροφοδότησης και κάποιες σύγχρονες γεννήτριες. Επίσης η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη παρουσιάζει προβλήματα στη χρήση της στην θάλασσα. Βασικός λόγος είναι ότι το περιβάλλον της εγκατάστασης έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αλάτι το οποίο προκαλεί χημική διάβρωση στο υλικό της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη ο οποίος είναι συνήθως κατασκευασμένος από νεοδύμιο (NdFeB), ενώ ταυτόχρονα από τις υψηλές μηχανικές δυνάμεις που δέχεται η εγκατάσταση από την θάλασσα υπάρχει ο κίνδυνος να ραγίσει ο μαγνήτης της γεννήτριας εάν δεν ληφθούν

κατάλληλα μέτρα. Συμπερασματικά λοιπόν, όσον αφορά την επιλογή γεννήτριας με το παραπάνω κριτήριο καταλήγουμε είτε σε επαγωγική γεννήτρια κλωβού είτε σε σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες.

## B. Ενεργειακή απόδοση

Η ενεργειακή ανάλυση μιας εγκατάστασης μετατροπής κυματικής ενέργειας συνδυάζει τον τρόπο λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής με την στατιστική ανάλυση των κυμάτων της θάλασσας. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η μελέτη της συμπεριφοράς της θάλασσας γίνεται με στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων του κλίματός της σε βάθος χρόνου τα οποία αποτελούν τις καταστάσεις της θάλασσας. Οι καταστάσεις αυτές παρουσιάζουν τεράστιες διαφορές μεταξύ τους μέσα στον χρόνο, όπως για παράδειγμα μεταξύ Ιανουαρίου και Ιουλίου. Ωστόσο σημαντικές διαφορές υπάρχουν τόσο μέσα σε έναν μήνα όσο και μέσα σε μια ώρα. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που ενδιαφέρουν, είναι όπως έγινε γνωστό από την κυματική ανάλυση (Κεφ.2) το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  και η περίοδος ενέργειας  $T_e$ , τα οποία περιέχονται στις καταστάσεις της θάλασσας. Αν το κλίμα της θάλασσας ορίζεται από πεπερασμένες διαφορετικές καταστάσεις  $N = 1, 2 \dots N_{max}$ , τότε η ισχύς  $P_{GN}$  που εμφανίζεται στον άξονα της γεννήτριας κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης  $N$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_{GN}(t) = P_{WN}(t)\eta_{WECN}\eta_{turb}, \quad (3.1)$$

όπου  $P_{WN}(t)$  η ισχύς του προσπίπτον κύματος για την κατάσταση  $N$ ,  $\eta_{wecN}$  ο μέσος συντελεστής απόδοσης των συστημάτων μετατροπής κυματικής ενέργειας σε αυτήν την κατάσταση  $N$  και  $\eta_{turb}$  ο συντελεστής απόδοσης της τουρμπίνας αέρος, με συνήθεις τιμές μεταξύ 50-60%. Η συνολική παραγωγή της γεννήτριας  $E_N$  στην κατάσταση  $N$  στο διάστημα  $T$  της διάρκειάς της μπορεί να υπολογιστεί ως:

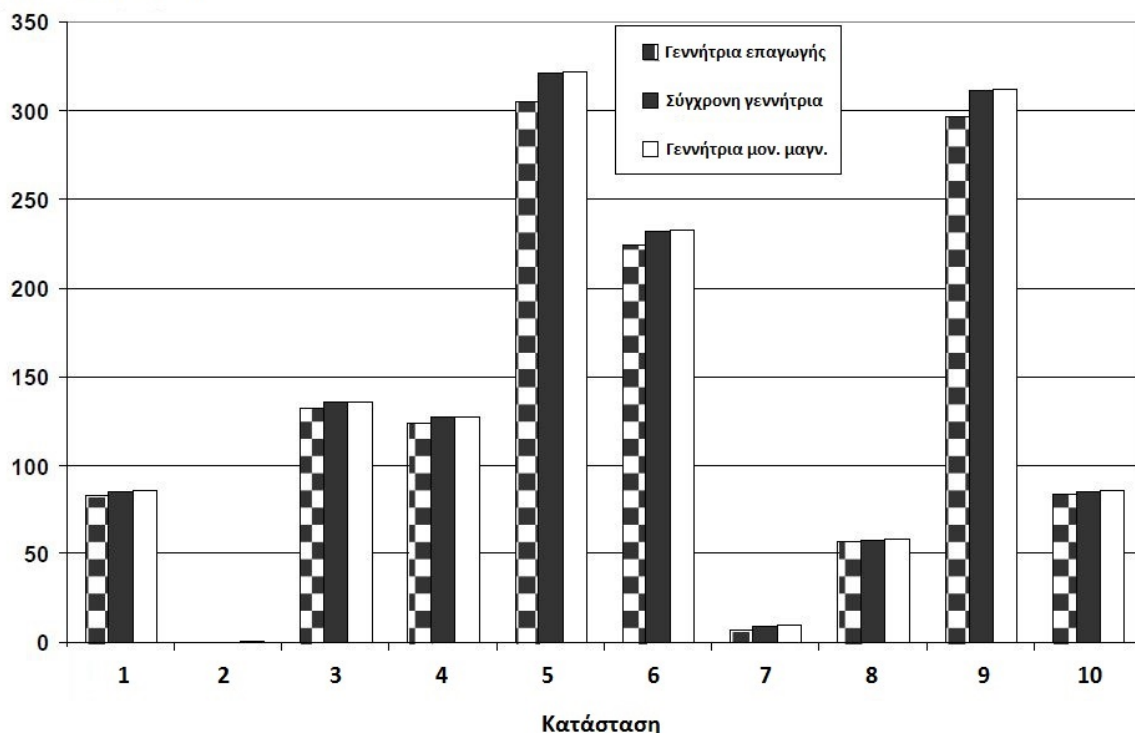
$$E_N = \int_0^T \eta_{gen}(t)P_{GN}(t) dt, \quad (3.2)$$

όπου  $\eta_{gen}$  η απόδοση της γεννήτριας συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρονικών ισχύος στην πλευρά της γεννήτριας. Η συνολική παραγωγή σε ένα χρόνο μπορεί να υπολογιστεί ως το άθροισμα των παραγωγών σε κάθε κατάσταση:

$$E_{1x} = \sum_{N=1}^{N_{max}} p_N E_N \frac{T_{1x}}{T}, \quad (3.3)$$

με χρήση της συχνότητας εμφάνισης της κάθε κατάστασης  $p_N$ . Οι παραπάνω εξισώσεις σε συνδυασμό με τα τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευής και με τον τρόπο λειτουργίας της κάθε γεννήτριας οδηγούν στην επιλογή της καταλληλότερης. Ωστόσο η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης δεν υπολογίζεται σε αυτήν τη σύγκριση καθώς είναι η καλύτερη επιλογή σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής όπου η κινητήρια δύναμη χαρακτηρίζεται από μεγάλη τυχαιότητα όπως η αιολική και η κυματική, λόγω της ικανότητάς της να μεταβάλει την ταχύτητά της σχεδόν άμεσα και με μεγάλα όρια σε σχέση με την σύγχρονη ταχύτητα (μεγάλα όρια ολίσθησης), αλλά όπως φάνηκε παραπάνω δεν είναι επιτρεπτή λύση λόγω του μειονεκτήματος των ψηκτρών. Πειραματικά αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης με μοντελοποίηση των γεννητριών και με 10 διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας έδειξαν ότι σε κάθε περίπτωση η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη είχε την μεγαλύτερη απόδοση και η γεννήτρια επαγωγής την μικρότερη [10].

Παραγόμενη ισχύς (kW)



Εικόνα 10: Σύγκριση παραγωγής των τριών ειδών γεννητριών [10].

### Γ. Κόστος

Με μια πρώτη σύγκριση από οικονομικής απόψεως υπάρχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ της επαγωγικής και της σύγχρονης γεννήτριας. Για ονομαστική ισχύ μικρότερη των 800kW η σύγχρονη γεννήτρια είναι λίγο πιο ακριβή αλλά αυτό παύει να ισχύει για μεγαλύτερα επίπεδα ονομαστικής ισχύος. Το κόστος και των δύο γεννητριών έχει εύρος 30-40€/kW στα επίπεδα ισχύος που ενδιαφέρουν την εγκατάσταση OWC [11]. Επίσης δυσκολία υπάρχει στον υπολογισμό του κόστους της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη μεγάλης ισχύος, κυρίως επειδή δεν συνηθίζεται η κατασκευή τους για τέτοιο επίπεδο ισχύος (μεγαλύτερο από 100kW). Αυτό συμβαίνει λόγω του αυξημένου κόστους και της δυσκολίας παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων μόνιμου μαγνητικού υλικού. Τα τελευταία χρόνια το κόστος των μετάλλων Νεοδύμιο και Δυσπρόσιο έχει αυξηθεί ραγδαία λόγω της χρήσης των κινητήρων μόνιμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης [10].

### Δ. Συμπεράσματα

Ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη έχει την μεγαλύτερη απόδοση, τόσο η δυσκολία χρήσης της μακριά από την ακτή, όσο και το αυξημένο κόστος της, την καθιστούν τελευταία επιλογή. Επίσης η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλωτή εγκατάσταση λόγω του μειονεκτήματος των ψηκτρών. Οι δύο επικρατέστεροι τύποι γεννήτριας είναι η σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες και η επαγωγική γεννήτρια κλωβού. Παρόλο που η τιμή τους είναι στο ίδιο σχεδόν επίπεδο, η πλέον καταλληλότερη επιλογή για εγκατάσταση OWC μακριά από την ακτή είναι η σύγχρονη γεννήτρια λόγω της καλύτερης απόδοσής της [10].

Αντίστοιχα σε μια εγκατάσταση στην ακτή, η καλύτερη επιλογή από άποψη κόστους και απόδοσης είναι η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης καθώς το μειονέκτημα της φθοράς των ψηκτρών είναι μικρότερης σημασίας (λόγω μικρότερων δυνάμεων και ευκολότερης συντήρησης). Η απόδοσή της σε ηλεκτροπαραγωγή τέτοιου είδους είναι αρκετά μεγαλύτερη και το κόστος είναι μικρότερο καθώς σε σύγκριση με την επαγωγική ή την σύγχρονη γεννήτρια, η διαφορά βρίσκεται στα ηλεκτρονικά ισχύος. Η διπλή σύνδεση με το δίκτυο απαιτεί διπλάσιο αριθμό μετατροπέων ισχύος με την μισή ονομαστική ισχύ, τα οποία γενικά έχουν μικρότερο κόστος.

## 3.2 Παλλόμενο σώμα

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, τα συστήματα μετατροπής κυματικής ενέργειας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η απορρόφηση της ενέργειας. Ωστόσο, στην κατηγορία του παλλόμενου σώματος υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη εγκαταστάσεων που ενώ απορροφούν την ενέργεια με βάση την ίδια αρχή, πέραν τούτου είναι τελείως διαφορετικές και είναι χρήσιμο να εξεταστούν ξεχωριστά. Στην πραγματικότητα ένα παλλόμενο σώμα είναι ένα σώμα στην επιφάνεια της θάλασσας το οποίο κινείται με τις δυνάμεις που δέχεται από τα κύματα και είναι συνδεδεμένο με μια γεννήτρια με τέτοιο τρόπο ώστε να την οδηγεί. Ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα, την γεωμετρία και τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας, τα παλλόμενα σώματα διακρίνονται σε *σημειακούς απορροφητές* (point absorber) και σε *εξασθενητές* (attenuator).



Εικόνα 11: Τα δύο είδη παλλόμενου σώματος [7][12].

### 3.2.1 Σημειακός απορροφητής

#### 3.2.1.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

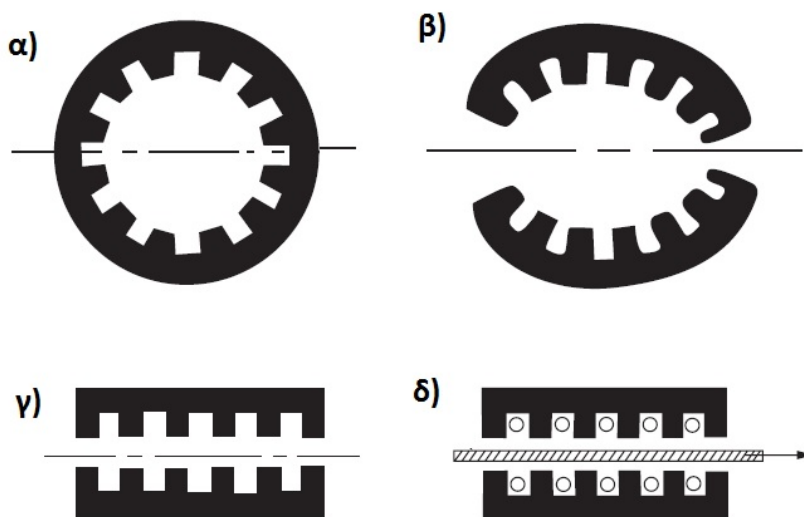
Ένας σημειακός απορροφητής αποτελείται από δύο τμήματα που συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους με έναν κάθετο άξονα. Το τμήμα που κινείται είναι μια σημαδούρα σχετικά μικρού μεγέθους (μικρότερου του μήκους κύματος) και μπορεί να βρίσκεται είτε στην επιφάνεια της θάλασσας είτε βυθισμένη και το τμήμα που δεν κινείται αποτελείται από μια γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια η οποία συνδέεται με την σημαδούρα και μπορεί να βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας ή πιο ψηλά αλλά πάντα κάτω από την σημαδούρα. Η σημαδούρα είναι ελεύθερη να δεχθεί δυνάμεις λόγω της θάλασσας προς όλες τις κατευθύνσεις με συνέπεια την κίνηση του κάθετου άξονα και την οδήγηση της γεννήτριας. Σε αντίθεση με την OWC, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης που παίζουν ρόλο στην παραγωγή της ενέργειας είναι πολύ



λιγότερα. Συγκεκριμένα είναι η γεωμετρία της σημαδούρας και τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας. Η σημαδούρα μπορεί να έχει μεγάλο εύρος μεγεθών και η σχέση μεγέθους-απόδοσης είναι ανάλογη. Ωστόσο υπάρχει ένα κρίσιμο μέγεθος το οποίο εάν ξεπεραστεί, οι δυνάμεις εξασθενούν λόγω διάθλασης των κυμάτων και η εγκατάσταση παύει να παράγει ενέργεια. Επίσης κατά την κατασκευή της σημαδούρας επιλέγεται η φυσική συχνότητα ταλάντωσής της κοντά στην συχνότητα των κυμάτων της θάλασσας στην οποία θα τοποθετηθεί [8]. Τέλος καθώς η απορρόφηση ενέργειας γίνεται με την σχετική κίνηση δύο σωμάτων που βρίσκονται σε ευθεία γραμμή μεταξύ τους, η γραμμική γεννήτρια είναι η μόνη επιλογή για την μετατροπή της ενέργειας αυτής και θεωρείται χρήσιμο να αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της.

### 3.2.1.2 Γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια

Η γεννήτρια που ενδιαφέρει σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής από την θάλασσα μέσω σημειακού απορροφητή είναι η γραμμική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Γενικότερα μια γραμμική γεννήτρια είναι εντελώς ανάλογη μιας περιστροφικής γεννήτριας αν φανταστούμε ότι ο στάτης έχει την ίδια κατασκευή με την διαφορά ότι είναι ευθύγραμμος και ότι ο δρομέας δεν στρέφεται αλλά κινείται ευθύγραμμα από το ένα άκρο στο άλλο όπως φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: α) Στάτης περιστροφικής μηχανής β) ο στάτης γίνεται ευθύγραμμος γ) στάτης γραμμικής γεννήτριας δ) ο δρομέας και η κίνησή του [13].

Η ανάλυση της μηχανής αυτής είναι σχετικά πιο απλή από τις υπόλοιπες καθώς δεν υπάρχουν περιστροφικά μεγέθη όπως γωνιακή ταχύτητα και ροπή αλλά η ταχύτητα είναι σε μία διεύθυνση και το μέγεθος που ενδιαφέρει είναι η δύναμη

Lorentz. Παρακάτω δίνονται οι βασικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία της γραμμικής γεννήτριας.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.4)$$

$$F = q(E + v \times B) \quad (3.5)$$

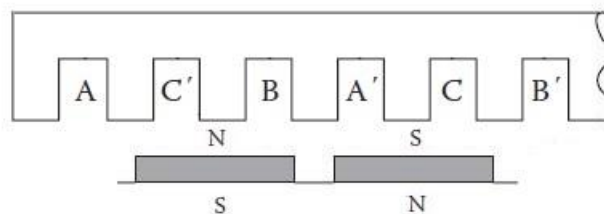
όπου  $\mathcal{E}$  η επαγόμενη τάση,  $\Phi$  η μαγνητική ροή και  $F$  η δύναμη Lorentz που ασκείται σε σώμα με ηλεκτρικό φορτίο  $q$  και ταχύτητα  $v$  υπό την επίδραση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου  $E$  και  $B$  αντίστοιχα. Από αυτές τις εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η τάση της γεννήτριας  $E_A$  και η δύναμη στον άξονα  $F$  ως:

$$E_A = k_v \phi u \quad (3.6)$$

$$F = k_f \phi I \quad (3.7)$$

όπου  $k_v$  η σταθερά τάσης που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά,  $\phi$  η ροή στα τυλίγματα του στάτη,  $u$  η ταχύτητα του δρομέα,  $k_f$  η σταθερά δύναμης όπως και με την σταθερά τάσης και  $I$  το ρεύμα της γεννήτριας.

Μια περιστροφική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη αποτελείται από τον στάτη, δηλαδή έναν σιδηροπυρήνα με αύλακες στους οποίους βρίσκονται τα τυλίγματα των ηλεκτρικών φάσεων, και από έναν δρομέα μόνιμου μαγνήτη του οποίου το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με τα επαγόμενα μαγνητικά πεδία των τυλιγμάτων στο στάτη και έτσι επιτυγχάνεται η περιστροφή του [14]. Εντελώς ανάλογα σε μια γραμμική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη υπάρχει ο στάτης από σιδηροπυρήνα με αύλακες για τα τυλίγματα των φάσεων και ο δρομέας που αποτελείται από τμήματα μαγνητικού υλικού σε συνδυασμό με διάκενα αέρα. Η αλληλεπίδραση των πεδίων του στάτη με το πεδίο του μαγνήτη ωθεί τον δρομέα και επιτυγχάνεται η κίνηση η οποία σε αυτήν την περίπτωση είναι ευθύγραμμη [13]. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την τοποθέτηση 3-φασικών τυλιγμάτων στον στάτη και την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα.

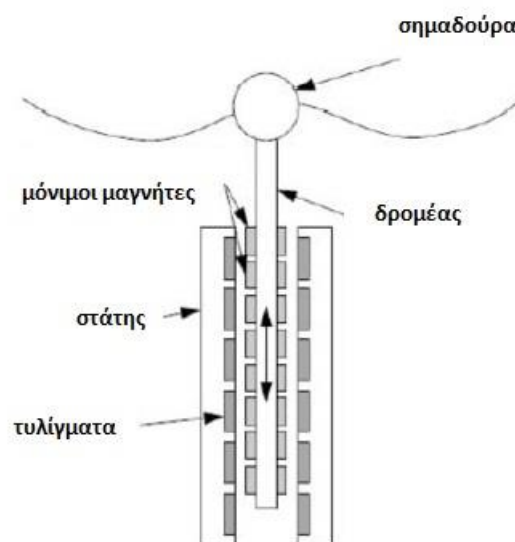


Εικόνα 13: Αρχή λειτουργίας γραμμικής γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη [13].

Χάριν πληρότητας ωστόσο, επισημαίνεται ότι υπάρχουν πολλές κατηγορίες γραμμικής ηλεκτρικής γεννήτριας εντελώς ανάλογες με τις περιστροφικές γεννήτριες. Συγκεκριμένα είναι οι γραμμικές γεννήτριες επαγωγής όπου ο δρομέας αποτελείται από μέταλλο στο οποίο δημιουργείται μαγνητικό πεδίο επαγωγής από τα τυλίγματα του στάτη και οι γραμμικές σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης όπου στον δρομέα τοποθετείται τύλιγμα διέγερσης για δημιουργία μαγνητικού πεδίου χωρίς την ανάγκη για μόνιμο μαγνήτη [13]. Εντούτοις για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σημειακό απορροφητή η καταλληλότερη επιλογή γραμμικής γεννήτριας είναι η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη για τους εξής δύο λόγους:

- Έχει μεγαλύτερη απόδοση καθώς δεν υπάρχουν απώλειες στον δρομέα σε αντίθεση με δρομέα επαγωγής ή με τύλιγμα διέγερσης.
- Η ταχύτητα κίνησης του δρομέα είναι πολύ μικρή (της τάξης των 2 m/s) πράγμα που απαιτεί μεγάλο αριθμό πόλων για την εκμετάλλευση της ενέργειας της θάλασσας. Η επίτευξη πολλών πόλων σε τυλιγμένο ευθύγραμμο δρομέα γίνεται με πολλά τυλίγματα σε σειρά. Σε αντίθεση όμως με τον περιστρεφόμενο δρομέα, εδώ ο δρομέας δεν βρίσκεται σε μια σταθερή θέση, επομένως ολόκληρο το σύστημα της διεγέρσεως θα πρέπει να μετακινείται ταυτόχρονα, ενώ με την τοποθέτηση μόνιμων μαγνητών αντιμετωπίζεται αμέσως το πρόβλημα [15].

Τέλος συνδυάζοντας τα παραπάνω και αφού αποσαφηνίστηκε η λειτουργία της γραμμικής γεννήτριας παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 ο συνδυασμός της με την πλωτή (ή βυθισμένη) σημαδούρα για παραγωγή ενέργειας.

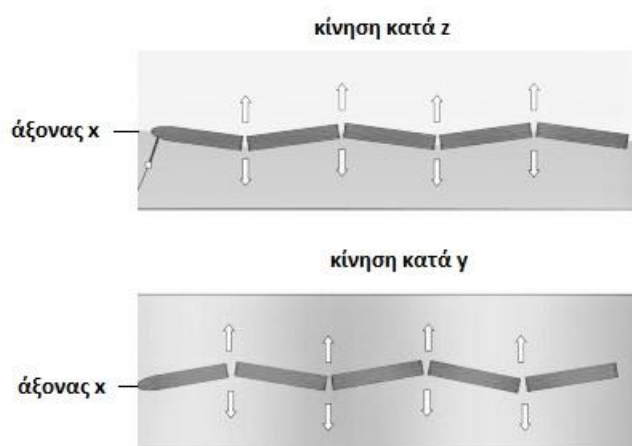


Εικόνα 14: Οδήγηση γραμμικής γεννήτριας από την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων [15].

## 3.2.2 Εξασθενητής

### 3.2.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Ο εξασθενητής είναι ένα πλωτό σύστημα απορρόφησης και μετατροπής της κυματικής ενέργειας μεγάλου μεγέθους (της τάξεως των 3 μέτρων ύψος και 150 μέτρων μήκος) το οποίο είναι ασθενέστερα “αγκυροβολημένο” σε ένα συγκεκριμένο σημείο σε σχέση με τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις. Αποτελείται από έναν μικρό αριθμό (3-4) ημιβυθισμένων κυλίνδρων ενωμένων μεταξύ τους με αρθρώσεις. Τα θαλάσσια κύματα με την κίνησή τους ασκούν δυνάμεις στους διαδοχικούς κυλίνδρους οι οποίοι με τη σειρά τους παρουσιάζουν μια σχετική κίνηση μεταξύ τους σε δύο κατευθύνσεις, μια παράλληλα και μια κάθετα στην επιφάνεια της θάλασσας (αν θεωρήσουμε ότι η εγκατάσταση ισορροπεί πάνω στον άξονα  $x$  τότε η σχετική κίνηση γίνεται στους άξονες  $y$  και  $z$ , Εικόνα 15.)



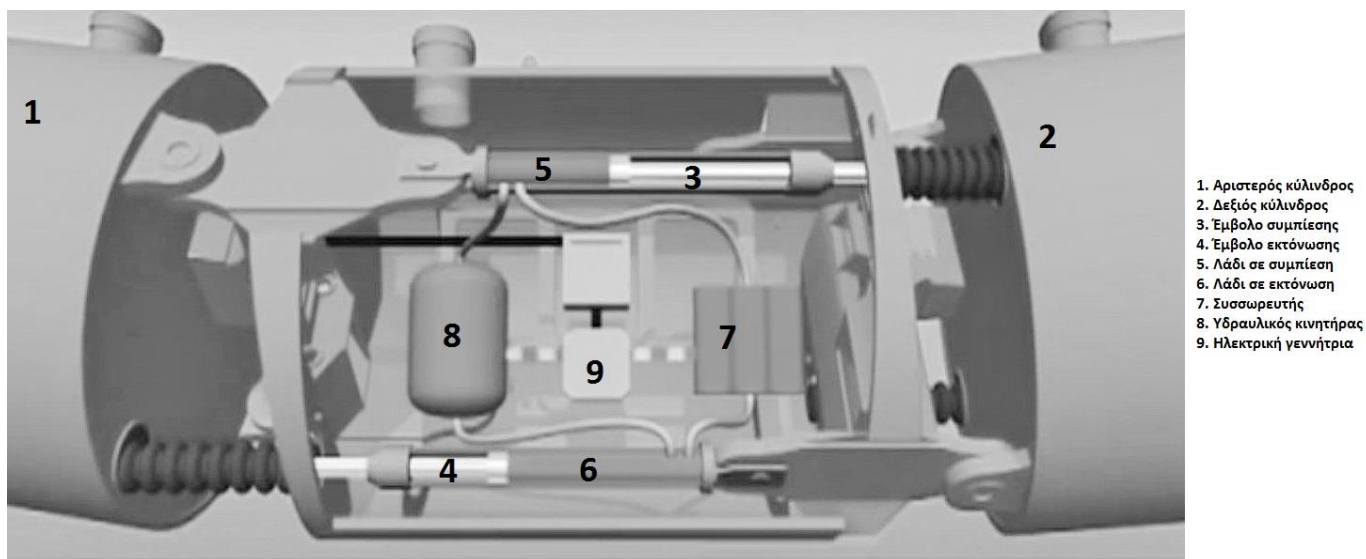
Εικόνα 15: Κίνηση εξασθενητή με δύο βαθμούς ελευθερίας [16].

Με μία αρχική παρατήρηση του μηχανισμού της λειτουργίας του εξασθενητή, φαίνεται να είναι όμοιος με τον σημειακό απορροφητή, όμως η διαφορά τους βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο η απορροφημένη κυματική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στο εσωτερικό των αρθρώσεων υπάρχει ένα υδραυλικό σύστημα το οποίο περιέχει:

- Ένα ζεύγος υδραυλικών εμβόλων, με το κάθε έμβολο συνδεδεμένο με έναν από τους δύο κυλίνδρους του εξασθενητή, έτσι ώστε κατά την κίνηση, το ένα έμβολο να συμπιέζεται και το άλλο να εκτονώνεται
- Ένα υδραυλικό μέσο, συνήθως λάδι
- Έναν συσσωρευτή υψηλής πίεσης για το μέσο
- Έναν υδραυλικό κινητήρα συζευγμένο με μια ηλεκτρική γεννήτρια

Κατά την κίνηση των κυλίνδρων, το λάδι συμπιέζεται στο ένα έμβολο και οδηγείται στον συσσωρευτή. Από εκεί εισέρχεται στον κινητήρα και προκαλεί την περιστροφή του και κατά συνέπεια την οδήγηση της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Έπειτα το λάδι καταλήγει στο άλλο έμβολο όπου εκτονώνεται μέχρι την αντίθετη κίνηση των κυλίνδρων όπου θα θέσει σε λειτουργία ξανά τον ίδιο μηχανισμό [16]. Παρατίθεται η παρακάτω εικόνα για αποσαφήνιση της διάταξης.



Εικόνα 16: Εσωτερικό υδραυλικό σύστημα άρθρωσης εξασθενητή [17].

### 3.2.2.2 Ηλεκτρικό μέρος

Η επιλογή του ηλεκτρικού μέρους του εξασθενητή είναι η πιο εύκολη από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις συστημάτων μετατροπής κυματικής ενέργειας αλλά και η πιο περιορισμένη. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχουν περίπου 4 με 5 αρθρώσεις όπου η κάθε μια περιέχει μια ηλεκτρική γεννήτρια και η παράλληλη σύνδεσή τους δίνει την συνολική παραγωγή ενέργειας [18]. Τα παρακάτω πλεονεκτήματα της γεννήτριας επαγωγής την καθιστούν όχι την καλύτερη επιλογή αλλά την μόνη επιτρεπτή:

- Η γεννήτρια επαγωγής έχει μικρότερο μέγεθος ανά εγκατεστημένη ισχύ, πράγμα χρήσιμο καθώς πρόκειται να τοποθετηθεί μέσα στην άρθρωση
- Πολλές γεννήτριες επαγωγής μπορούν χωρίς κανένα πρόβλημα να συνδεθούν παράλληλα ασχέτως της ταχύτητάς τους σε αντίθεση με τις σύγχρονες γεννήτριες όπου ο παραλληλισμός είναι δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία

Το δεύτερο είναι και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό καθώς 5 γεννήτριες που οδηγούνται από συνεχώς μεταβαλλόμενες δυνάμεις όπως αυτές των κυμάτων είναι αδύνατο να έχουν την ίδια ταχύτητα. Ωστόσο το μειονέκτημά της είναι ότι δεν μπορεί να παράξει την άεργο ισχύ που χρειάζεται και απαιτεί μια πηγή άεργου ισχύος [19].

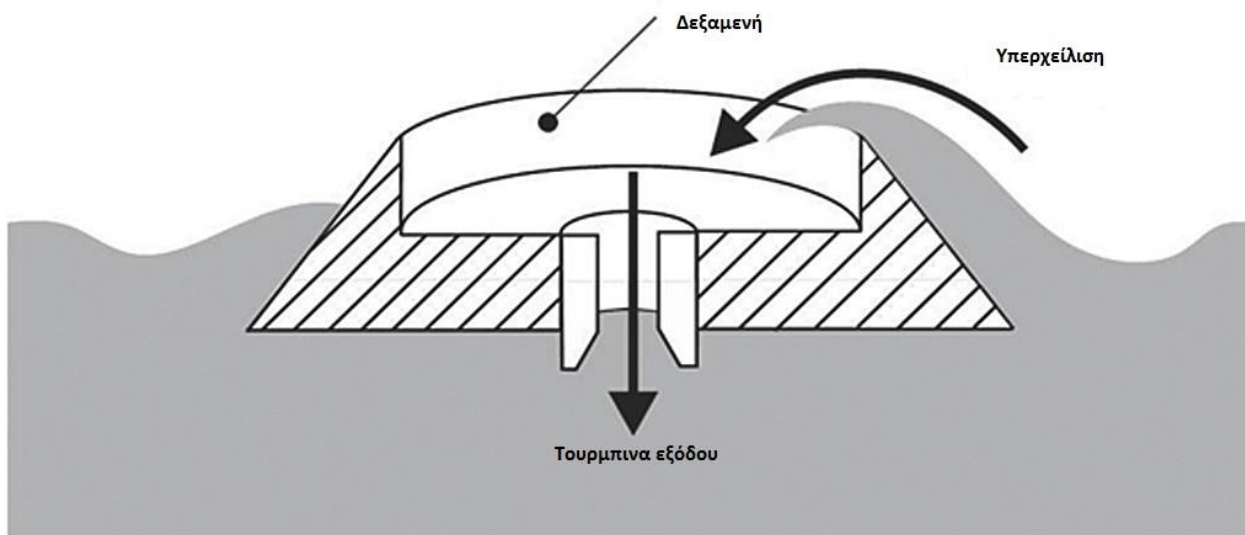
### 3.2.2.3 Πάρκο εξασθενητών

Το όνομα της συγκεκριμένης τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής από την θάλασσα προκύπτει από το γεγονός ότι οι κατασκευές αυτές δεν έχουν ως σκοπό την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από τα κύματα αλλά ενός μόνο μέρους τους, δηλαδή απλώς τα εξασθενούν. Στους εξασθενητές, παρόλο που έχουν μεγάλο μέγεθος και περίπλοκο μηχανισμό απορρόφησης της ενέργειας με το υδραυλικό σύστημα, ο περιορισμός της κίνησής τους σε δύο μόνο κατευθύνσεις (ενώ τα κύματα είναι τρισδιάστατα) αλλά και ο περιορισμός της γωνίας μεταξύ των κυλίνδρων λόγω της άρθρωσης καθιστούν αδύνατη την αξιοποίηση ολόκληρου του μέρους της ενέργειας των κυμάτων. Έτσι τα προσπίπτοντα κύματα αφού επιδράσουν πάνω τους συνεχίζουν να υπάρχουν και να έχουν ενεργειακό περιεχόμενο. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατό τον σχεδιασμό πάρκων παραγωγής ενέργειας μέσω εξασθενητών ακριβώς αντίστοιχα με τα αιολικά πάρκα. Βέβαια πρέπει και εδώ να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της σκίασης έτσι ώστε να λαμβάνεται η βέλτιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας. Εντούτοις, επειδή οι εξασθενητές είναι μια νέα τεχνολογία και συνεπώς έχει σήμερα πολύ υψηλό κόστος δεν υπάρχει ακόμα πάρκο αλλά θεωρητικές προσομοιώσεις έχουν δείξει πολύ θετικά αποτελέσματα.

### 3.3 Διάταξη υπερχειίλισης

#### 3.3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

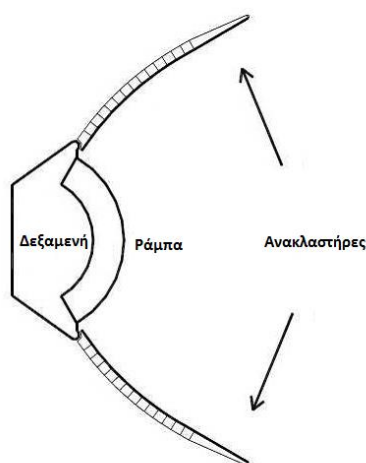
Μια διάταξη υπερχειίλισης είναι μια αρχική προσπάθεια για μεταφορά των γνώσεων παραγωγής ενέργειας από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, σε εγκαταστάσεις παραγωγής από κυματική ενέργεια της θάλασσας. Η διάταξη αποτελείται από μια μεγάλη δεξαμενή η οποία βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, ισχυρά αγκυροβολημένη ή στερεωμένη ώστε να μην έχει ελευθερία κίνησης. Στην μια πλευρά της δεξαμενής υπάρχει μια ράμπα που επιτρέπει στο νερό της θάλασσας να ανέβει στην δεξαμενή, καθώς και δύο ανακλαστήρες κυμάτων που οδηγούν τα κύματα στην ράμπα. Έτσι συλλέγεται μεγάλη ποσότητα νερού στην δεξαμενή, η οποία στην βάση της έχει μια τουρμπίνα νερού ανάλογη με αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως στις υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε ποτάμια ή φράγματα. Το νερό που έχει αποθηκευτεί στην δεξαμενή, στην συνέχεια επιστρέφει στην θάλασσα μέσω της τουρμπίνας και έτσι προκαλεί την περιστροφή της. Έπειτα η τουρμπίνα οδηγεί μια ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι επιτυγχάνεται η ηλεκτροπαραγωγή. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι ότι στην πραγματικότητα υπάρχει μόνο ένα κινούμενο μέρος, η τουρμπίνα νερού, και έτσι το κόστος συντήρησης είναι σχετικά μικρό [8].



Εικόνα 17: Λειτουργία της διάταξης υπερχειίλισης [20].

### 3.3.2 Σχεδιασμός εγκατάστασης

Στην περίπτωση ηλεκτροπαραγωγής με διάταξη υπερχειλίσης, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης έχει τον μεγαλύτερο ρόλο, όπως και στην περίπτωση της παλλόμενης στήλης νερού. Αρχικά πρέπει να μελετηθεί επακριβώς η περιοχή τοποθέτησής της τόσο ως προς το ενεργειακό περιεχόμενο και το κλίμα της θάλασσας, όσο και ως προς την κατεύθυνση κίνησης του νερού και το βάθος της θάλασσας. Παρόλο που υπάρχουν οι ανακλαστές κυμάτων, η γνώση της κυρίαρχης κατεύθυνσης του νερού έχει σημασία για την επιλογή της πλευράς στην οποία θα τοποθετηθεί η ράμπα. Επίσης το βάθος της θάλασσας έχει σημασία διότι σε μικρό βάθος η ράμπα πρέπει να βυθιστεί έως τον πυθμένα ενώ σε μεγάλο βάθος αρκεί να είναι λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια έτσι ώστε να εκμεταλλευτεί το μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού περιεχομένου. Άλλο χαρακτηριστικό της κατασκευής είναι φυσικά το μέγεθός της, το οποίο εξαρτάται από το κλίμα της θάλασσας μέσω του σημαντικού ύψους κύματος και του μήκους του κύματος. Η βέλτιστη ηλεκτροπαραγωγή επιτυγχάνεται στην περίπτωση που το νερό της δεξαμενής επιστρέφει πίσω στην θάλασσα πριν έρθει το επόμενο κύμα, πράγμα που εξαρτάται εξίσου από το μέγεθός της και από το μήκος του κύματος. Ταυτόχρονα το σημαντικό ύψος κύματος υπαγορεύει το ύψος της δεξαμενής καθώς εάν η δεξαμενή είναι πιο χαμηλά από την κορυφή του κύματος, τότε ένα τμήμα του νερού μετά την είσοδο στη δεξαμενή θα αρχίσει να επιστρέφει στην θάλασσα από την πλευρά αντίθετα της ράμπας και όχι από την τουρμπίνα. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι με υδραυλικά συστήματα που ελέγχουν το εκάστοτε σημαντικό ύψος και μετακινούν τα τοιχώματα της δεξαμενής μεταβάλλοντας το ύψος της. Το υλικό της κατασκευής -δεξαμενή, ράμπα και ανακλαστές- είναι είτε οπλισμένο σκυρόδεμα είτε χάλυβας και η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι ενδεικτικά  $5000 \text{ m}^3$  σε εγκατάσταση 4MW [8].

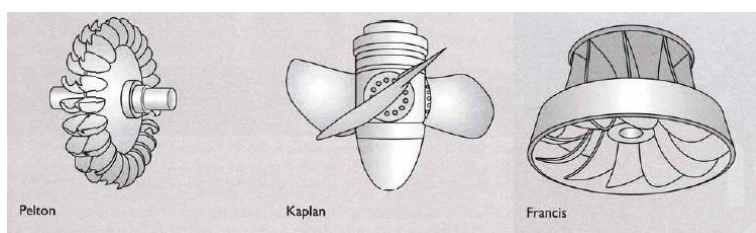


Εικόνα 18: Κάτοψη διάταξης υπερχειλίσης [20].



### 3.3.3 Υδροηλεκτρική μετατροπή

Έπειτα από τον αρχικό θεωρητικό σχεδιασμό και την μελέτη της διάταξης υπερχειίλισης, έχουν γίνει αρκετές πειραματικές εγκαταστάσεις και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μια τακτική για βελτιστοποίηση της παραγωγής είναι η χρησιμοποίηση πολλών διαφορετικών ζευγών τουρμπίνας-γεννήτριας και η άθροιση των παραγωγών τους. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι ανάλογα με τις συνθήκες της θάλασσας (ύψος κύματος, ταχύτητα, μήκος κύματος κλπ.) μπορεί να γίνει επιλογή του πλήθους των ζευγών που θα τεθούν σε λειτουργία. Έτσι όταν η παραγωγή είναι μικρή, λειτουργεί ένα ζεύγος και οι ηλεκτρικές απώλειες είναι μικρότερες, ενώ σε συνθήκες αντίθετες τίθενται σε λειτουργία όλα τα ζεύγη κ.ο.κ. Επίσης αυτή η τακτική έχει ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα, όσον αφορά την επιλογή γεννήτριας για την εγκατάσταση. Όπως είναι γνωστό η πιο αποδοτική επιλογή είναι η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Τα μειονεκτήματά της τα οποία σχολιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα είναι το μεγάλο βάρος της και η αυξημένη τιμή του μαγνητικού υλικού. Ωστόσο επειδή ακριβώς η παραγωγή μοιράζεται σε πλήθος γεννητριών, η κάθε μια από αυτές είναι μικρή σε μέγεθος και έτσι μπορεί να υλοποιηθεί με μόνιμο μαγνήτη [21]. Επίσης το βάρος δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία όσο σε άλλες εφαρμογές καθώς η πλατφόρμα της διάταξης που αποτελείται από σκυρόδεμα ή χάλυβα έχει βάρος της τάξεως των 1.000-10.000 τόνων [20]. Τέλος, η επιλογή της τουρμπίνας νερού είναι αποτέλεσμα πολλών χρόνων μελέτης των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής και είναι ήδη αρκετά ώριμη και αποδεδειγμένη τεχνολογία. Η θεωρία της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας υποδεικνύει ότι ενώ υπάρχουν τρία κύρια είδη υδροστροβίλων (Pelton, Francis, Kaplan), η επιλογή του στροβίλου για την κάθε εγκατάσταση είναι ανάλογη της υψομετρικής διαφοράς που διανύει το νερό, και επομένως στην περίπτωση της διάταξης υπερχειίλισης όπου η υψομετρική διαφορά είναι μικρή (<25m) η μόνη δυνατή επιλογή είναι ο υδροστρόβιλος προώσεως ή τύπου Kaplan. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό δεν προλαβαίνει να αναπτύξει μεγάλη ταχύτητα τόσο σύντομα ενώ ο υδροστρόβιλος Kaplan μπορεί να περιστραφεί με μεγαλύτερη ταχύτητα από τους υπόλοιπους σε αυτήν την περίπτωση. Επίσης τα πτερύγιά του έχουν την δυνατότητα αλλαγής της γωνίας τους ώστε να διατηρεί τις πιο αποδοτικές συνθήκες ροής σε κάθε περίπτωση [22].



Εικόνα 19: Τα τρία κυριότερα είδη υδροστροβίλου [22].



## 4. Εφαρμογές Συστημάτων Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια έχουν σχεδιαστεί περισσότερα από 100 συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από την θάλασσα, ωστόσο πολύ λίγα έχουν φτάσει σε ώριμο στάδιο ή έχουν ακόμη εγκατασταθεί και ακόμα λιγότερα παρήγαγαν ηλεκτρική ισχύ για το δίκτυο. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα τελευταία.

### 4.1 Wavestar

Το Wavestar (της εταιρίας Wave Star Energy) είναι μια συστοιχία από σημειακούς απορροφητές την οποία πρότειναν οι Niels και Keld Hansen το 2000. Προσπάθησαν να σχεδιάσουν μια μέθοδο παραγωγής ενέργειας από τα ελεύθερα και τα αιολικά κύματα. Επειδή οι απορροφητές είναι τοποθετημένοι σε συστοιχίες των 20, η εγκατάσταση θυμίζει περισσότερο έναν εξασθενητή, γεγονός που επιβεβαιώνεται καθώς η παραγωγή της ενέργειας γίνεται με υδραυλικό σύστημα και υδραυλικό κινητήρα συζευγμένο με ηλεκτρική γεννήτρια. Το Wavestar αποτελείται από δύο συστοιχίες των 20 πλωτήρων οι οποίοι κινούνται ανεξάρτητα καθώς ταξιδεύουν τα κύματα και τοποθετούνται παράλληλα με την κύρια διεύθυνση κίνησης των κυμάτων. Όταν οι πλωτήρες κινούνται προς τα πάνω, το υδραυλικό μέσο συμπιέζεται προς τον κινητήρα και οδηγείται η γεννήτρια. Έπειτα από τον αρχικό θεωρητικό σχεδιασμό, εγκαταστάθηκαν δύο πρότυπες μονάδες, με κλίμακες 1:10 και 1:2. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής [8]:

Κλίμακα	Έτος	Βάθος (m)	Μήκος (m)	Διάμετρος Πλωτήρα (m)	Ύψος κύματος (m)	Ισχύς (kW)
1:10	2006	2	24	1	0,5	1,8
1:2	2009	10	120	5	2,5	600

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μονάδων Wavestar [8].

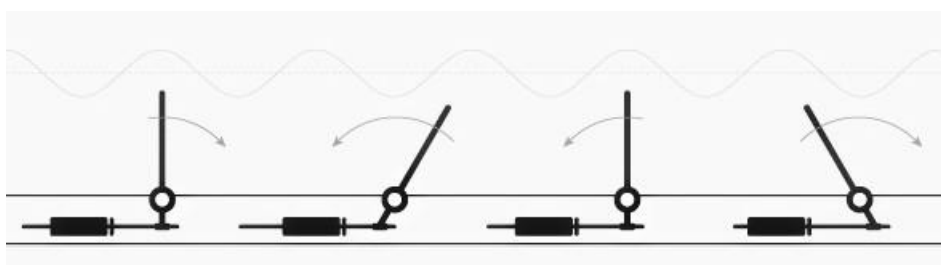
### 4.2 Pelamis

Ο εξασθενητής Pelamis της Pelamis Wave Power είναι μια πλωτή συσκευή παραγωγής ενέργειας που συχνά καλείται και Sea-snake (pelamis είναι ένα είδος θαλάσσιου φιδιού). Αποτελείται από τέσσερις πλωτούς κυλίνδρους συνδεδεμένους με τρεις αρθρώσεις που περιέχουν υδραυλικό σύστημα απορρόφησης της κυματικής ενέργειας. Ένα πρότυπο που δοκιμάστηκε το

2007 είχε μήκος 120m και διάμετρο 3,5m και ήταν στερεωμένο με σύστημα αγκυροβόλησης στον πυθμένα βάθους 50m και σε απόσταση μεγαλύτερη από 2km από την ακτή. Η ονομαστική του ισχύς είναι στα 750kW και όπως το Wavestar ήταν τοποθετημένο παράλληλα με την κυρίαρχη κατεύθυνση των κυμάτων. Το 2008 εγκαταστάθηκαν τρεις εξασθενητές σε μορφή πάρκου με συνολική ισχύ 2,25MW στην Πορτογαλία. Δυστυχώς το 2014 η εταιρία χρεοκόπησε λόγω μεγάλων επενδύσεων σε 5 νέα μοντέλα της συσκευής και αγοράστηκε από την κυβέρνηση της Σκωτίας. Σήμερα για λογαριασμό της εταιρίας ενέργειας E.ON και της ScottishPower Renewables γίνονται δοκιμές του σχεδίου Pelamis P2, το οποίο αποτελείται από πέντε κυλίνδρους και τέσσερις αρθρωτές [8][18].

### 4.3 WaveRoller

Το WaveRoller είναι ένας σημειακός απορροφητής που σχεδιάστηκε από την AW Energy. Η διαφορά με τους υπόλοιπους απορροφητές είναι ότι τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας και κοντά στην ακτή, περίπου 0,3-2km. Αποτελείται από ένα πτερύγιο στερεωμένο με άρθρωση στον πυθμένα, σε βάθος 8-20m το οποίο είναι ελεύθερο να ταλαντώνεται και η κίνησή του διεγείρει ένα υδραυλικό σύστημα. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι το γεγονός ότι η κίνηση των σωματιδίων του νερού κοντά στην ακτή δεν είναι κυκλική αλλά έχει μια ελλειπτική τροχιά (βλ. 2.1.1) επομένως η οριζόντια κίνησή τους είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη και περιέχει μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού περιεχομένου. Επίσης είναι δυνατή η συνεργασία πολλών συσκευών σε μορφή πάρκου. Αξιοσημείωτη είναι η εγκατεστημένη ισχύς που κυμαίνεται μεταξύ 0,5-2MW [8].



Εικόνα 20: Αρχή λειτουργίας WaveRoller [23].

## 4.4 Wave Dragon

Η διάταξη υπερχειλίσσης Wave Dragon της δανέζικης εταιρίας Wave Dragon Aps είναι η πρώτη πραγματική εφαρμογή στην κατηγορία των διατάξεων αυτών και έλαβε μέρος το 2003 κοντά σε μια ακτή της Δανίας, ενώ οι δοκιμές στο πρότυπο μοντέλο διήρκησαν από το 1998 μέχρι το 2001. Η δεξαμενή αποτελείται από συνδυασμό οπλισμένου σκυροδέματος και χάλυβα, και πάνω της βρίσκονται πολλά ζεύγη τουρμπινών Kaplan και γεννητριών μόνιμου μαγνήτη. Η παρακολούθηση της λειτουργίας του πρότυπου μοντέλου έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας μέσω διατάξεων υπερχειλίσσης καθώς τα αποτελέσματά της χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό μεγαλύτερων εγκαταστάσεων όπως φαίνεται στον πίνακα 2 [8].

Ενεργειακό περιεχόμενο κυμάτων (ανά σημαντικό ύψος κύματος)	0,4kW/m	24kW/m	36kW/m	48kW/m
Βάρος	237t	22.000t	33.000t	54.000t
Πλάτος, μήκος	58x33 m	260x150 m	300x170 m	390x220 m
Μήκος ανακλαστήρα	28m	126m	145m	190m
Ύψος	3,6m	16m	17,5m	19m
Χωρητικότητα δεξαμενής	55 m <sup>3</sup>	5.000 m <sup>3</sup>	8.000 m <sup>3</sup>	14.000 m <sup>3</sup>
Αριθμός τουρμπινών	7	16	16-20	16-24
Ισχύς κάθε γεννήτριας	2,3kW	250kW	350-440kW	460-700kW
Συνολική ισχύς	16kW	4MW	7MW	11MW
Βάθος θάλασσας	6m	>20m	>25m	>30m

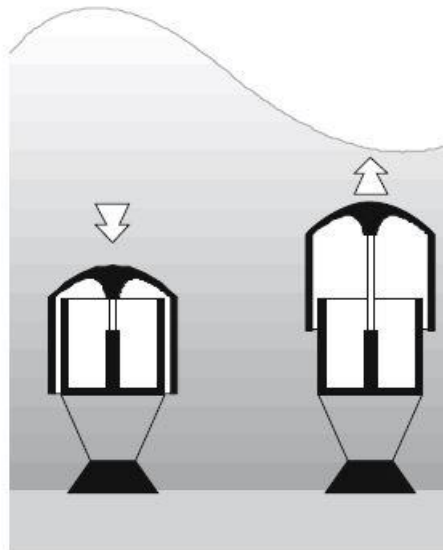
Πίνακας 2: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά διαφόρων μοντέλων Wave Dragon [8].

## 4.5 LIMPET

Το LIMPET είναι μια διάταξη παλλόμενης στήλης νερού εγκατεστημένη στην ακτή στο νησί Islay της Σκωτίας και είναι το πρώτο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την θάλασσα που συνδέθηκε στο εθνικό δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου, σχεδιασμένο από την Wavegen σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Μπέλφαστ. Το πρωτότυπο σχέδιο ήταν μια εγκατάσταση των 75kW το 1991, και βάσει αυτού κατασκευάστηκε μια μονάδα 500kW το 2000, η οποία στη συνέχεια υποβαθμίστηκε στα 250kW και βρίσκεται σε λειτουργία μέχρι σήμερα. Η ανάπτυξη της διάταξης LIMPET συνεχίστηκε με την εγκατάσταση σταθμού στον κόλπο του Mutriku της Ισπανίας το 2011, ο οποίος περιέχει 16 τουρμπίνες Wells και έχει την ικανότητα παραγωγής έως και 300kW συνολικά [8][24].

## 4.6 AWS

Το AWS (Archimedes Wave Swing) είναι μια παραλλαγή του σημειακού απορροφητή καθώς όλη η διάταξη βρίσκεται βυθισμένη. Αποτελείται από ένα θάλαμο στερεωμένο στον πυθμένα της θάλασσας, και από ένα κέλυφος το οποίο είναι ελεύθερο να κινείται υπό την επίδραση των κυμάτων και είναι αξονικά συνδεδεμένο με τον θάλαμο. Μέσα στον θάλαμο περιέχεται μια γραμμική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, της οποίας ο δρομέας οδηγείται από τον άξονα. Το πρότυπο της διάταξης σε κλίμακα 1:20 κατασκευάστηκε με την συνεργασία του Κέντρου Ενεργειακής Έρευνας της Ολλανδίας και των εταιριών Teamwork Technology B.V. και WL Delft Hydraulics, το 1995 στην Πορτογαλία. Μέχρι το 1997 οι παραπάνω ομάδες συγχωνεύτηκαν στην AWS B.V. και συνέχισαν την έρευνα πάνω στο σύστημα έως το 2004 όπου τέθηκε σε λειτουργία για ερευνητικούς σκοπούς και δοκιμές η διάταξη πλήρους κλίμακας στην Πορτογαλία, με μέγιστη παραγόμενη ισχύ τα 2MW. Τα πλεονεκτήματα του AWS σε σχέση με τους σημειακούς απορροφητές προκύπτουν από το γεγονός ότι βρίσκεται ολόκληρο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι είναι προστατευμένο από ακραία καιρικά φαινόμενα βροχής και ανέμου, ενώ ταυτόχρονα είναι πιο εύκολη η αποδοχή από τους κατοίκους της εγκατάστασης πάρκου καθώς δεν θα είναι ορατό [24].



Εικόνα 21: Τρόπος λειτουργίας AWS [24].

## 5. Οικονομική αξιολόγηση Συστημάτων Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μελέτη θεωρητικής εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή πάρκου μακριά από την ακτή. Σκοπός είναι η ανάλυση του κόστους του εξοπλισμού, τόσο του κάθε συστήματος, όσο και εξαρτημάτων του όπως καλώδια και συνδέσεις, ώστε να γίνει φανερή η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αυτής της μορφής και να γίνει σύγκριση με τις συμβατικές ή τις άλλες εναλλασσόμενες μορφές ενέργειας.

### 5.1 Βασικές έννοιες

Χρήσιμη θεωρείται η επεξήγηση κάποιων βασικών εννοιών απαραίτητων για την παρακάτω οικονομική ανάλυση:

- Συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor, CF): Ορίζεται ως το πηλίκο της πραγματικής παραγόμενης ενέργειας μιας εγκατάστασης προς την μέγιστη ενέργεια που θεωρητικά μπορεί να παράξει. Η πραγματική ενέργεια συνήθως υπολογίζεται σε έναν χρόνο και σε MWh, και έτσι η μέγιστη ενέργεια είναι η ονομαστική ισχύς επί τις συνολικές ώρες του χρόνου (8760) [3].

$$CF = \frac{\text{Παραγόμενη ενέργεια ενός χρόνου}(E)}{P_N \cdot 8760}, \quad (5.1)$$

- Υποβρύχια δυναμικά καλώδια: Στις εφαρμογές όπου το ηλεκτρικό μέρος βρίσκεται σε κίνηση μαζί με το μηχανικό μέρος, είναι απαραίτητη η χρήση δυναμικών καλωδίων, τα οποία είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αντέχουν τις τριβές, τις πιέσεις κλπ. και να έχουν ελαστικότητα. Στην θάλασσα, η χρήση του κυρίως είναι η σύνδεση των συστημάτων μεταξύ τους όταν η διάταξη αποτελεί πάρκο. Οι συνδέσεις στα τμήματα που δεν κινούνται γίνονται με στατικά καλώδια καθώς έχουν μικρότερο κόστος.
- Υποβρύχια ηλεκτρική σύνδεση: Η σύνδεση κάθε συσκευής στο πάρκο γίνεται με δυναμικά ή στατικά καλώδια, άλλα είναι απαραίτητοι σύνδεσμοι οι οποίοι θα λειτουργούν και θα αποκόπτουν τα καλώδια μέσα στο νερό. Επίσης, επειδή η τεχνολογία της ηλεκτροπαραγωγής στην θάλασσα είναι καινούρια, τα συστήματα αυτά χρειάζονται συνεχώς αποσύνδεση και επανασύνδεση για έλεγχο, μέτρηση, συντήρηση κλπ. Προς το παρόν η υλοποίηση υποβρύχιων συνδέσεων έχει πολύ μεγάλο κόστος καθώς δεν

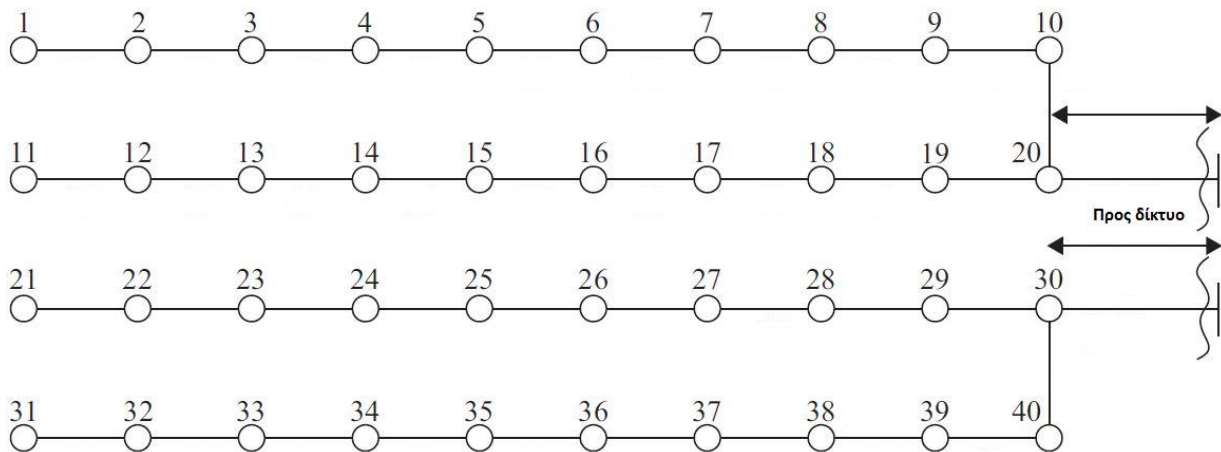
έχει ωριμάσει ακόμα. Για παράδειγμα στις πλωτές ανεμογεννήτριες δεν υπάρχουν τέτοια προβλήματα επειδή η γεννήτρια βρίσκεται έξω από το νερό και τα καλώδια σε ένα πάρκο δεν συνδέονται με την γεννήτρια υποβρυχίως.

- Τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: Εκφράζει τις χρηματικές μονάδες που απαιτούνται για την παραγωγή ενέργειας, και ορίζεται με το κλάσμα του συνολικού κόστους της εγκατάστασης προς την συνολική πραγματική παραγόμενη ενέργεια, συνήθως σε μονάδες €/MWh.
- Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας: Εκφράζει το ποσό σε χρηματικές μονάδες που λαμβάνει ο παραγωγός της ενέργειας από το δίκτυο για την ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδει σε εκείνο (€/MWh). Προφανώς εάν η τιμή πώλησης είναι μικρότερη από την τιμή παραγωγής, ο παραγωγός δεν έχει κέρδος. Ωστόσο, ο λειτουργός του δικτύου ΗΕ δίνει μεγαλύτερο αντάλλαγμα σε ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές σε σχέση με συμβατικές, καθώς υπολογίζεται και το περιβαλλοντολογικό κόστος.
- Αρχικό κόστος επένδυσης: Αποτελεί το άθροισμα του κόστους που δαπανήθηκε για την αγορά των τμημάτων του συστήματος, όπως οι συσκευές παραγωγής της ενέργειας, τα καλώδια, οι σύνδεσμοι, οι συσκευές αποθήκευσης της ενέργειας, η μεταφορά της στο δίκτυο κλπ.
- Τελικό κόστος επένδυσης: Αποτελεί το τελικό ποσό που στην πραγματικότητα δαπάνησε ο παραγωγός για την εγκατάσταση. Είναι δηλαδή το αρχικό κόστος, με κάποια επιπλέον έξοδα όπως τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, τα κόστη ασφάλισης κ.ο.κ. [25].

## 5.2 Χαρακτηριστικά πάρκου

Η οικονομική ανάλυση θα εφαρμοστεί σε ένα θεωρητικό μοντέλο πάρκου παραγωγής ενέργειας ονομαστικής ισχύος 40MW και τάσης 20kV, το οποίο αποτελείται από 40 συσκευές WaveRoller ισχύος 1MW. Στις συσκευές αυτές δεν υπάρχει κίνηση του ηλεκτρικού μέρους, επομένως χρησιμοποιούνται μόνο στατικά καλώδια χωρίς συνδέσμους. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 25-50% και γίνεται η παραδοχή ότι ο συντελεστής ισχύος είναι μοναδιαίος. Τέλος, οι συσκευές τοποθετούνται σε απόσταση 1km από την ακτή και σε βάθος 10m ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι 100m σε ακτινική διάταξη.





Εικόνα 22: Ακτινικό δίκτυο πάρκου WaveRoller για οικονομική ανάλυση [25].

### 5.3 Επιλογή καλωδίων

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να υπολογίσουμε για την επιλογή του είδους της καλωδίωσης είναι το φασικό ρεύμα που παράγει κάθε συσκευή. Έτσι λοιπόν από τις γνωστές σχέσεις:

$$P_N = 3P_\phi \quad , \quad P_\phi = I_\phi \cdot V_\phi \quad , \quad V_\phi = \frac{V_\Pi}{\sqrt{3}} \quad , \quad (5.2)$$

και με  $P_N = 1MW$ ,  $V_\Pi = 20kV$ , έχουμε:

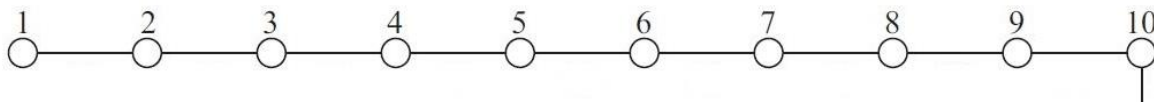
$$I_\phi = \frac{P_\phi}{V_\phi} = \frac{\frac{P_N}{3}}{\frac{V_\Pi}{\sqrt{3}}} = \frac{10^6 \cdot \sqrt{3}}{20 \cdot 10^3 \cdot 3} = 28,87 \text{ A}, \quad (5.3)$$

Το τριφασικό καλώδιο που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πλωτών ανεμογεννητριών, το οποίο θα θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιείται και εδώ για απλότητα καθώς υπάρχουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του και είναι σχετικά ώριμη τεχνολογία αποτελείται από 3 μονοφασικά καλώδια πολυαιθυλενίου (XLPE) με αγωγούς χαλκού και ένα επίπεδο προστασίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η αντοχή σε ρεύμα και η τιμή για κάθε διατομή του αγωγού, θεωρώντας ότι διατομή 35 χιλιοστών είναι η μικρότερη δυνατή για τέτοιες εγκαταστάσεις.

Διατομή (mm <sup>2</sup> )	Αντοχή (A)	Κόστος (€/m)
35	189	310
50	222	325
70	271	340
95	323	400
120	367	420
150	409	445
185	461	510
240	532	555
300	599	685
400	671	756
500	754	855

Πίνακας 3: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καλωδίων [26].

Στη συνέχεια υπολογίζονται αθροιστικά τα ρεύματα σε κάθε τμήμα του ακτινικού κυκλώματος με το παραγόμενο ρεύμα κάθε κόμβου  $I_{\phi} = 28,87 \text{ A}$ . Επιλέγουμε τους κόμβους 1-10 καθώς ανά 10 το κύκλωμα είναι ίδιο:



Η πρώτη σύνδεση, δηλαδή μεταξύ 1 και 2 γίνεται με καλώδιο 35mm<sup>2</sup> αφού η αντοχή του είναι 189 A και το ρεύμα  $2 \times 28,87 = 57,74 \text{ A}$ . Από τον κόμβο 2 στον 3 το ρεύμα είναι το άθροισμα του προηγούμενου και του παραγόμενου από την γεννήτρια 3, δηλαδή 86,61 A αλλά μικρότερο του ορίου επομένως δεν αλλάζει τάξη καλωδίου. Ομοίως στις συνδέσεις 3-4, 4-5 και 5-6 (115,48 A, 144,35 A και 173,22 A αντίστοιχα) χρησιμοποιείται καλώδιο 35mm<sup>2</sup>. Στην σύνδεση 6-7, το ρεύμα γίνεται 202,1 A επομένως πρέπει να τοποθετηθεί καλώδιο 50mm<sup>2</sup>. Επίσης στην σύνδεση 7-8 το ρεύμα ισούται με 231 A, επομένως πάλι γίνεται αλλαγή σε διατομή 70mm<sup>2</sup>. Χωρίς αλλαγή η σύνδεση 8-9 καθώς το ρεύμα είναι 259,83 A εντός του ορίου. Τέλος η σύνδεση 9-10 αλλά και η σύνδεση του 10 με τα υπόλοιπα τρία τμήματα του κυκλώματος γίνεται με καλώδιο 95mm<sup>2</sup> (288,7 A). Παρατηρώντας την Εικόνα 22, η δομή του κυκλώματος είναι τέτοια ώστε ανά δύο οι κλάδοι του να καταλήγουν σε αγωγό για μεταφορά στο δίκτυο της ξηράς. Έτσι το ρεύμα του αγωγού αυτού είναι  $2 \times 288,7 = 577,4 \text{ A}$  επομένως ο αγωγός αυτός είναι διατομής 300mm<sup>2</sup>.

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα κόστη των καλωδίων σε συνάρτηση με τα μήκη τους. Το μήκος μεταξύ δύο κόμβων είναι η απόσταση μεταξύ των δύο WaveRollers και δύο φορές η απόσταση από τον πυθμένα καθώς τα καλώδια θα βρίσκονται εκεί. Συνολικά υπολογίζουμε 120m για κάθε σύνδεση δύο κόμβων, ενώ το μήκος κάθε αγωγού 300mm<sup>2</sup> είναι 1km, όσο η απόσταση από

την ακτή. Αφού είναι γνωστές οι επιλογές των καλωδίων, τα μήκη τους και οι τιμές τους, μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του συνολικού κόστους ως εξής:

Καλώδιο (mm <sup>2</sup> )	Πλήθος συνδέσεων	Μήκος (Πλήθος x 120m ή 1km)	Τιμή μέτρου (€)	Συνολικό κόστος (€)
35	20	2400m	310	744.000
50	4	480m	325	156.000
70	8	960m	340	326.400
95	8	960m	400	384.000
300	2	2000m	685	1.370.000
Σύνολο				2.980.400

Πίνακας 4: Υπολογισμός κόστους καλωδίωσης.

Φυσικά πρέπει να σημειωθεί ότι το κύκλωμα είναι τριφασικό, επομένως το συνολικό κόστος της καλωδίωσης είναι 8,94 εκ. €. Επίσης ενώ τα στατικά καλώδια δεν έχουν μεγάλες διαφορές κόστους από τα δυναμικά, σε εγκαταστάσεις όπου χρησιμοποιούνται τα δυναμικά, είναι απαραίτητη η χρήση υποβρύχιων συνδέσμων, των οποίων η τιμή ενδεικτικά κυμαίνεται στα 60k-250k € ανά σύνδεσμο και κάθε κόμβος έχει δύο συνδέσμους (αν το πάρκο του παραδείγματος είχε 80 συνδέσμους μέσης τιμής 155k €, οι σύνδεσμοι μόνο θα κόστιζαν 12,4 εκ €) [25].

## 5.4 Υπολογισμός τιμής παραγωγής ενέργειας

Μια συσκευή WaveRoller ονομαστικής ισχύος 1MW κοστίζει περίπου 1,1εκ. € όταν αγοράζεται με σκοπό χρήσης σε πάρκο καθώς δεν υπολογίζεται η καλωδίωση, αφού υπολογίζεται ξεχωριστά και επειδή η μαζική παραγωγή 40 συσκευών είναι οικονομικότερη. Η τιμή μιας συσκευής υπολογίζεται περίπου στα 1,5εκ € όταν συμπεριλαμβάνεται η σύνδεση, η καλωδίωση και τα επιπλέον έξοδα παραγωγής και συντήρησης. Στο πάρκο του παραδείγματος θεωρούμε κόστος συσκευών 1,1εκ. €, επομένως συνολικό κόστος 44εκ. €. Το κόστος συντήρησης των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από την θάλασσα ανέρχεται στο 2-4% του αρχικού κόστους. Αν θεωρήσουμε ποσοστό 3% και αρχικό κόστος τα 44εκ. €, τότε προκύπτουν έξοδα συντήρησης 1,32εκ. €. Τέλος τα έξοδα ασφάλισης, είναι ένα πεδίο που δεν έχει ερευνηθεί αρκετά στην ηλεκτροπαραγωγή από την θάλασσα, όμως ενδεικτικά μεγέθη που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι της τάξης του 2% του αρχικού κόστους [25], επομένως στην περίπτωση του πάρκου WaveRoller, ανέρχεται στα 0,88εκ. €.

Αθροίζοντας τα κόστη που υπολογίστηκαν σε αυτήν και στην προηγούμενη παράγραφο λαμβάνουμε:

$$\text{Τελικό κόστος επένδυσης (TC)} = 44+8,94+1,32+0,88=55,14\text{εκ. €}$$

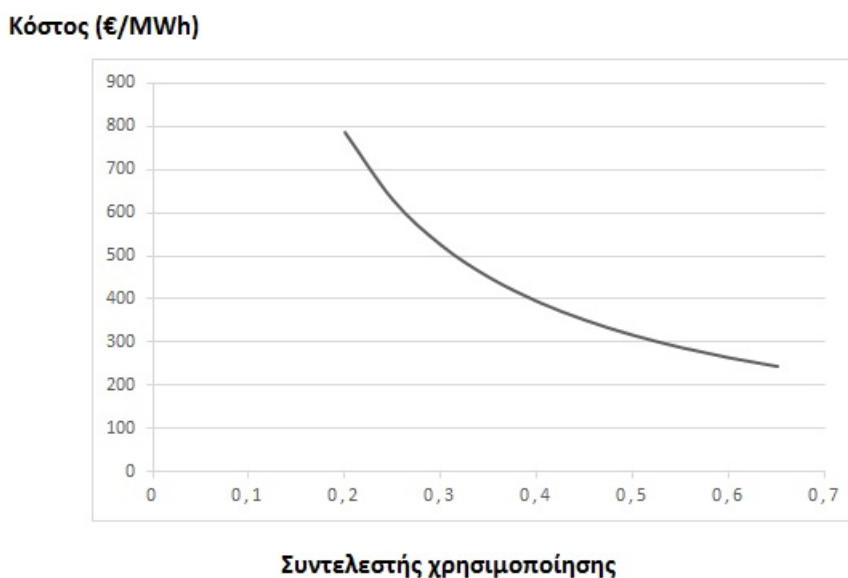
Έπειτα μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της τιμής της παραγόμενης ενέργειας (EC) ως εξής:

$$EC = \frac{TC}{E} = \frac{TC}{CF \cdot P_N \cdot 8760} , \quad (5.4)$$

όπου  $E$  η πραγματική παραγόμενη ενέργεια και  $P_N = 40\text{MW}$ . Τελικά η σχέση που προκύπτει είναι η:

$$EC = \frac{157,4}{CF} \text{ €/MWh} , \quad (5.5)$$

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2 ο συντελεστής χρησιμοποίησης παίρνει τιμές μεταξύ 25-50% επομένως η τιμή παραγωγής της ενέργειας είναι μεταξύ 315 – 630 €/MWh. Ωστόσο έχει ενδιαφέρον η απεικόνιση της σχέσεως (5.5) και με μεγαλύτερα όρια, καθώς μεγάλο μέρος της έρευνας είναι στραμμένο στην βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης.



Εικόνα 23: Συνάρτηση κόστους ενέργειας – συντελεστή χρησιμοποίησης.

## 5.5 Αξιολόγηση αποτελέσματος

Είναι προφανές από την τιμή παραγωγής της ενέργειας ότι η τεχνολογία μετατροπής της κυματικής ενέργειας δεν είναι ώριμη για μεγάλης κλίμακας χρήση προς το παρόν. Ως μέσο σύγκρισης αναφέρονται οι τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άλλα μέσα στον παρακάτω πίνακα (σταθμισμένοι μέσοι όροι 2017).

Μέσο	Τιμή σε €/MWh
Αιολική	50-110
Πλωτή αιολική	150-250
Ηλιακή	100-180
Υδροηλεκτρική	60-130
Συμβατική	40-100

Πίνακας 5: Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [27].

Για την μείωση του κόστους της εγκατάστασης, πράγμα που απαιτεί πολύ χρόνο και έρευνα πάνω στο θέμα, έχουν προταθεί οι εξής τρόποι:

- Αύξηση της ονομαστικής ισχύος της συσκευής μετατροπής ενέργειας. Όπως είναι προφανές, ένα πάρκο 40 MW που αποτελείται από 40 συστήματα 1 MW απαιτεί μεγαλύτερο κόστος καλωδίωσης, μόνωσης, εγκατάστασης, στήριξης κλπ. από ένα πάρκο ίδιας ισχύος αλλά λιγότερων συστημάτων μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος. Φυσικά, για την αύξηση της ισχύος του συστήματος απαιτούνται έρευνες και πειράματα σε βάθος χρόνου. Για παράδειγμα οι πλωτές ανεμογεννήτριες ξεκίνησαν από 1 MW και πλέον έχουν ονομαστική ισχύ >5MW.
- Αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης. Επίσης προφανές είναι το γεγονός ότι ο συντελεστής με τον οποίο απορροφά ισχύ από την θάλασσα η διάταξη, μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στο κόστος (Εικόνα 23). Η αύξηση αυτή θα προκύψει από δύο συντελεστές. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τον σχεδιασμό του συστήματος απορρόφησης, όπως π.χ. η τουρμπίνα νερού της διάταξης υπερχειλίσης ή το υδραυλικό σύστημα του εξασθενητή, και την αναλυτική μελέτη και εύρεση της κατάλληλης περιοχής για την τοποθέτηση του πάρκου. Στοιχεία όπως το βάθος, η γεωμορφολογία του πυθμένα, το ενεργειακό περιεχόμενο, το μήκος και το ύψος κύματος είναι μόνο μερικά από αυτά των οποίων η γνώση θα έχει τεράστια επίδραση στον συντελεστή χρησιμοποίησης. Βέβαια το θετικό είναι ότι, ενώ στατιστικές έρευνες όπως αυτή θέλουν βάθος χρόνου ώστε να έχουν βάσιμα αποτελέσματα, οι έρευνες αυτές έχουν ξεκινήσει ήδη αρκετά χρόνια, και τα

αποτελέσματα αυτά θα ωριμάσουν ταυτόχρονα με την τεχνολογία των συστημάτων επομένως μια πρόβλεψη είναι ότι θα υπάρξει μια ξαφνική θετική κλιμάκωση τέτοιων εγκαταστάσεων.

- Επιλογή καλωδίωσης χαμηλότερης αντοχής από την ονομαστική. Αν και από άποψη ασφαλείας, η σωστή επιλογή καλωδίων είναι εκείνη στην οποία το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα είναι κάτω από το όριο αντοχής, στην πράξη εφόσον είναι δεδομένο ότι ο συντελεστής απορρόφησης δεν πρόκειται να φτάσει το 100%, μια πρόταση είναι να χρησιμοποιηθούν καλώδια τα οποία θα έχουν αντοχή μικρότερη. Στην περίπτωση ονομαστικής φόρτισης βέβαια θα δημιουργηθεί πρόβλημα, καθώς θα πρέπει η εγκατάσταση να τεθεί εκτός λειτουργίας ή να βρεθεί ένας τρόπος μείωσης της παραγωγής με ηλεκτρονικά ή μηχανικά μέσα (όπως το stalling της Α/Γ). Μια ενδιαφέρουσα πρόταση επίσης, είναι η τοποθέτηση των συσκευών του πάρκου σε διαφορετικές κατευθύνσεις έτσι ώστε κάποιες να απορροφούν το μέγιστο δυνατό μέτωπο του κύματος ενώ κάποιες χαμηλότερο, έτσι ώστε κάθε στιγμή η συνολική παραγόμενη ισχύς να είναι στα ίδια περίπου επίπεδα. Βέβαια οι τεχνικές αυτές αντικρούουν το σχεδιασμό για αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης, όμως αποτελούν μια προσωρινή λύση έως ότου πραγματοποιηθούν τα παραπάνω.
- Κατασκευή συστήματος και καλωδίωσης για κάθε περιοχή ξεχωριστά. Είναι γεγονός ότι μια κατασκευή μέσα στην θάλασσα λαμβάνει υπόψιν χαρακτηριστικά όπως η αλατότητα, η πίεση, η θερμοκρασία κλπ. επομένως είναι χρήσιμη η γνώση της περιοχής στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί ένα τέτοιο σύστημα ώστε να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία ταιριάζουν σε αυτό το περιβάλλον, και το τελικό κόστος πιθανόν να είναι χαμηλότερο. Το ίδιο ισχύει και για την καλωδίωση, για παράδειγμα τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση του κεφαλαίου 5 ήταν σχεδιασμένα για θερμοκρασίες  $-20^{\circ}\text{C}$  έως  $+90^{\circ}\text{C}$  [26], ενώ είναι πιθανό η θάλασσα σε βάθος 10m που θεωρήσαμε, να έχει υψηλότερη θερμοκρασία από  $-20^{\circ}\text{C}$  και τα αντίστοιχα καλώδια έχουν χαμηλότερη τιμή [25].

Τα πραγματικά δεδομένα της IRENA (International Renewable Energy Agency), είναι αρκετά κοντά στην παραπάνω ανάλυση καθώς εγκαταστάσεις της τάξεως των 10MW σήμερα έχουν μέσο κόστος 330-630 €/MWh, ενώ υπολογίζεται ότι αν οι συνολικές εγκαταστάσεις το 2030 ξεπεράσουν τα 2GW παγκοσμίως, το μέσο κόστος θα είναι 113-226 €/MWh, τιμή πολύ ικανοποιητική για το μέλλον της τεχνολογίας [28].

## **6. Το Μέλλον της Θάλασσας ως ΑΠΕ**

Πέρα από τα συστήματα μετατροπής κυματικής ενέργειας που αναπτύχθηκαν σε αυτό το κείμενο, υπάρχουν άλλοι δύο τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν να γίνει εκμετάλλευση της θάλασσας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πρώτος τρόπος είναι η μετατροπή της παλιρροιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, ενώ ο δεύτερος έχει ήδη αναφερθεί και είναι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην θάλασσα. Παρόλο που ο δεύτερος τρόπος δεν εκμεταλλεύεται άμεσα την ενέργεια της θάλασσας, εκμεταλλεύεται την έκτασή της και έχει πολύ σημαντικές προοπτικές εξέλιξης καθώς υπάρχουν τρόποι συνδυασμού με τα συστήματα κυματικής ενέργειας.

### **6.1 Συστήματα Μετατροπής Παλιρροιακής Ενέργειας**

Η παλίρροια είναι η αύξηση και η μείωση της στάθμης της θάλασσας λόγω των βαρυτικών δυνάμεων του Ήλιου και της Σελήνης και λόγω της περιστροφής της Γης. Η διαφορά της από τις άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι η ευκολία πρόβλεψής της, καθώς εξαρτάται από λίγες δυνάμεις σχετικά εύκολα υπολογίσιμες χωρίς καθόλου τυχαιότητα. Η κίνηση αυτή, όμως, δεν είναι τόσο άμεση όσο ο κυματισμός, και έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν για παραγωγή ενέργειας, εκτός από λίγες εξαιρέσεις. Η ενέργεια αυτή ανήκει στην κατηγορία των ανανεώσιμων μορφών καθώς προέρχεται από μεταφορά ενέργειας από το σύστημα Γη-Σελήνη και Γη-Ήλιος, η οποία είναι τεχνικά ανεξάντλητη. Στην πραγματικότητα η ύπαρξη της παλίρροιας και η μεταφορά της βαρυτικής ενέργειας της Σελήνης στη Γη έχει προκαλέσει αλλαγή της ταχύτητας της περιστροφής της Γης και ως αποτέλεσμα του χρόνου περιστροφής από 21,9 ώρες σε 24 σε βάθος χρόνου 620 εκατομμυρίων ετών. Θεωρητικά η εκμετάλλευση της παλιρροιακής ενέργειας είναι αμελητέα και θα γίνει εμφανής μετά από εκατομμύρια χρόνια. Η εκμετάλλευση αυτή γίνεται σήμερα με δύο κυρίως τρόπους, ενώ έρευνα γίνεται για περισσότερους, και τα συστήματα αυτά ονομάζονται Συστήματα Μετατροπής Παλιρροιακής Ενέργειας (Tidal Energy Converters, TEC):

- **Παλιρροιακό φράγμα**

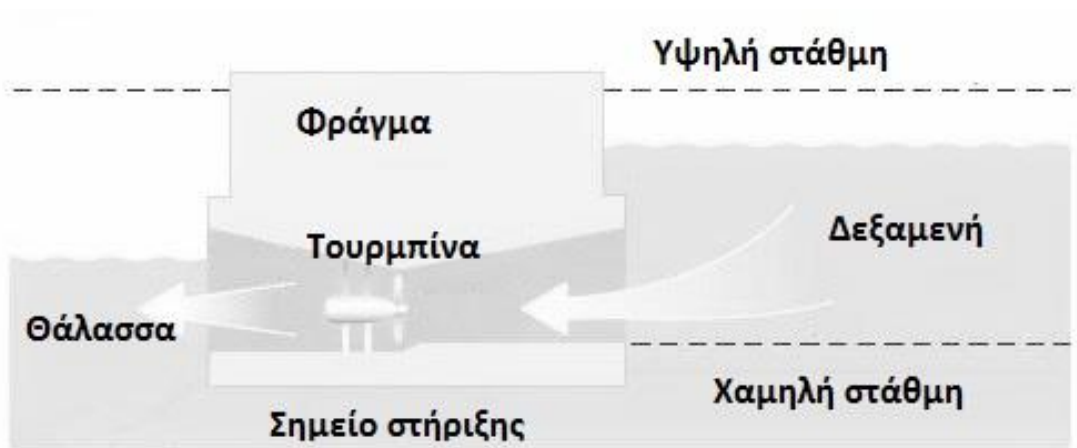
Το παλιρροιακό φράγμα θυμίζει πολύ μια εγκατάσταση υδροηλεκτρικού σταθμού. Η διαφορά είναι ότι δεν εξαρτάται από τον κύκλο του νερού ώστε να δημιουργηθούν ποτάμια αλλά αποτελείται από ένα φράγμα σε μια ακτή στην οποία είναι έντονο το φαινόμενο της παλίρροιας και

λειτουργεί ως εξής. Την περίοδο κατά την οποία αυξάνεται η στάθμη του νερού, το φράγμα ανοίγει και αφήνει το νερό να ανέβει ελεύθερα. Έπειτα κλείνει και υπάρχει περίοδος αναμονής έτσι ώστε η στάθμη του νερού έξω από το φράγμα να κατέβει όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Τότε δημιουργείται μια υψομετρική διαφορά και το φράγμα ανοίγει, οδηγώντας το νερό σε τουρμπίνα νερού όπως σε υδροηλεκτρικό σταθμό μέσω της οποίας οδηγείται η ηλεκτρική γεννήτρια. Χαρακτηριστικό είναι το ότι επειδή η παλίρροια αλλάζει κάθε 12 ώρες, η εγκατάσταση αυτή παράγει το μέγιστο δυνατό τότε, και τις υπόλοιπες ώρες τίποτα, επομένως έχει πολύ μικρό συντελεστή χρησιμοποίησης. Ωστόσο, όταν η χαμηλή στάθμη κυριαρχεί τις ώρες χαμηλής απαίτησης ισχύος από το δίκτυο (βράδυ), οι τουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν σαν αντλίες και να καταναλώσουν ισχύ ώστε να αποθηκεύσουν νερό στο φράγμα για χρήση σε ώρες αιχμής. Σήμερα υπάρχουν λίγες εγκαταστάσεις στον πλανήτη που παράγουν ισχύ για το δίκτυο και βοηθούν στην έρευνα για το μέλλον (Γαλλία 240MW, Καναδάς 20MW, Κίνα 5MW) [29].

- **Γεννήτρια παλίρροιακού ρεύματος**

Εκτός από το γεγονός ότι λόγω παλίρροιας αλλάζει η στάθμη του νερού, η διαδικασία αυτή πάνω στο νερό της θάλασσας και σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης, δημιουργεί κίνηση στο νερό της θάλασσας η οποία αποκαλείται *ρεύμα (sea current)*. Αυτό το ρεύμα είναι μια κατευθυνόμενη κίνηση νερού που θυμίζει πολύ τον άνεμο, ενώ το νερό επιπλέον έχει μεγαλύτερη πυκνότητα (αλλά μικρότερη ταχύτητα) από τον αέρα, και έτσι έχει σημαντικό ενεργειακό περιεχόμενο. Σε πλήρη αντιστοίχιση λοιπόν κατασκευάζονται γεννήτριες με παρόμοια μορφή με αυτή των ανεμογεννητριών, οι οποίες τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και λειτουργούν με αρκετά μεγάλο συντελεστή χρησιμοποίησης καθώς σε αντίθεση με την παλίρροια, τα ρεύματα δημιουργούνται συνεχώς απλά αλλάζουν φορά. Σήμερα υπάρχουν κάποιες τέτοιες εγκαταστάσεις της τάξεως του 1MW αλλά κυρίως γίνεται έρευνα για τοποθέτησή τους σε πάρκο [29].





Εικόνα 24: Παλιρροιακό φράγμα [30].



Εικόνα 25: Γεννήτρια παλιρροιακού ρεύματος [30].

## 6.2 Συνδυασμός κυμάτων και ανέμου

Μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα πρόταση που έχει γίνει τα τελευταία χρόνια είναι ο συνδυασμός συσκευών παραγωγής ενέργειας από τα κύματα και από τον άνεμο σε μια εγκατάσταση, δηλαδή η υλοποίηση πάρκων που περιέχουν ανεμογεννήτριες και συστήματα κυματικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνει είτε τοποθετώντας κυματικές συσκευές σε ένα ήδη υπάρχον πάρκο ανεμογεννητριών στη θάλασσα, είτε με κατασκευή νέου πάρκου με πολλές διαφορετικές διατάξεις. Όσον αφορά τον συνδυασμό, γίνεται τόσο στο ηλεκτρικό μέρος της εγκατάστασης, όσο και στην δομική κατασκευή. Είναι δυνατή η ενσωμάτωση των δύο συσκευών σε μια πλατφόρμα, η οποία αποκαλείται υβριδική, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους εγκατάστασης, ή η τοποθέτηση των κυματικών διατάξεων σε στρατηγικά σημεία ώστε να απορροφούν την κυματική ενέργεια και να προστατεύουν τις ανεμογεννήτριες από τις ταλαντώσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής ενέργειας σε βάθος χρόνου, καθώς υπάρχουν λιγότερα έξοδα συντήρησης, λειτουργίας, καλωδίωσης, εγκατάστασης, μεταφοράς ισχύος και στήριξης.
- Καλύτερη απόδοση ανεμογεννητριών επειδή η ενέργεια των κυμάτων απορροφάται, η θάλασσα είναι πιο ήρεμη και υπάρχουν μικρότερες ταλαντώσεις στον άξονα της Α/Γ.
- Περισσότερη απόδοση του πάρκου ανά εμβαδόν θάλασσας, με αποτέλεσμα καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου και προοπτικές για περαιτέρω εγκαταστάσεις.
- Λιγότερες συνολικές ώρες μηδενικής παραγωγής και καλύτερος συνδυασμός των τυχαίων παραγωγών των δύο μέσων. Είναι φυσικό ότι, ενώ και οι δύο τρόποι εξαρτώνται από τυχαία φυσικά φαινόμενα ως πρώτη ύλη, ο συνδυασμός τους έχει λιγότερες πιθανότητες για αστοχία. Επίσης, το γεγονός ότι η παραγόμενη ισχύς προέρχεται από δύο διαφορετικές πηγές, και σε συνδυασμό με τα ηλεκτρονικά ισχύος, η ποιότητα της ισχύος είναι καλύτερη και με λιγότερες απότομες αιχμές.
- Ένα υβριδικό πάρκο σε σύγκριση με ένα πάρκο Α/Γ ή ένα πάρκο κυματικής παραγωγής ίδιας ονομαστικής ισχύος έχει καλύτερη απόδοση. Αυτό συμβαίνει διότι γίνεται ανεξάρτητη εκμετάλλευση της κινητήριας δύναμης (άνεμος-κύμα) και έτσι μειώνεται το φαινόμενο σκίασης, τόσο στον αέρα όσο και στο νερό σε σχέση με τα άλλα πάρκα.

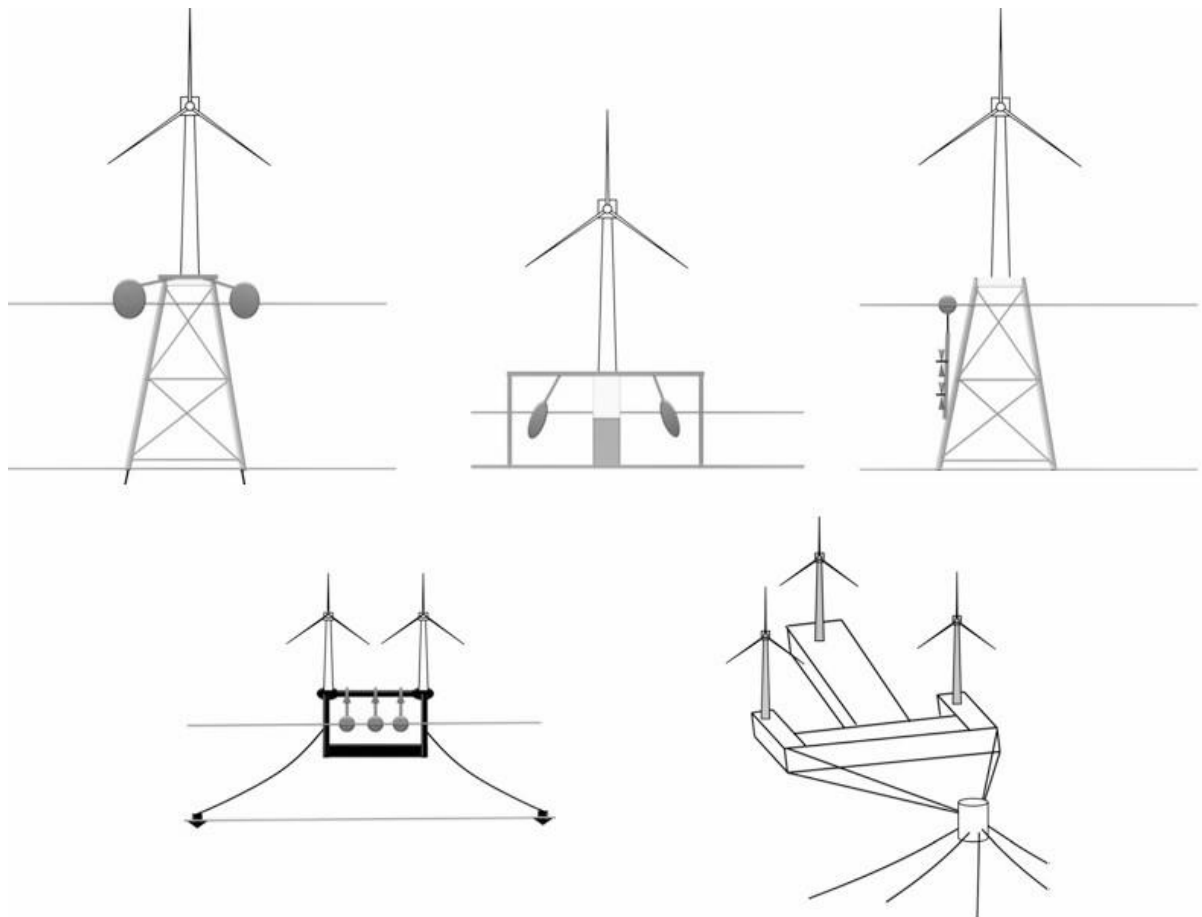
Φυσικά υπάρχουν και μειονεκτήματα, κάποια από τα οποία είναι:

- Διαφορά στην ανάπτυξη των δύο τεχνολογιών. Η αιολική παραγωγή έχει ωριμάσει αρκετά και εφαρμόζεται σε Α/Γ στην θάλασσα ενώ η

μετατροπή της κυματικής ενέργειας όχι το ίδιο, το οποίο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υστέρηση απόδοσης των Α/Γ σε υβριδικά συστήματα έναντι των απλών αιολικών πάρκων.

- Υπάρχει ο κίνδυνος μια βλάβη σε μια από τις δύο συσκευές να επηρεάσει και την άλλη σε μια υβριδική εγκατάσταση.
- Δυσκολία στην επιλογή κατάλληλου μέρους για την εγκατάσταση, καθώς είναι πιθανό τα μέρη που είναι ευνοϊκά για το ένα είδος να μην είναι για το άλλο και έτσι να βρεθεί μια συμβιβαστική μέση λύση, η οποία θα επιφέρει παραγωγή μικρότερη από το άθροισμα των ξεχωριστών παραγωγών.

Συμπερασματικά, οι υβριδικές εγκαταστάσεις, παρόλο που είναι πολύ νέα πρόταση, είναι πολλά υποσχόμενες και είναι πολύ πιθανό να ωριμάσουν στο μέλλον, ενώ ήδη υπάρχουν έρευνες και πρότυπα μοντέλα από αρκετές εταιρίες για δοκιμή, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 26 [8].



Εικόνα 26: Συνδυασμός αιολικής και κυματικής μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας [8].



## 7. Επίλογος

Σήμερα, είναι πλέον βέβαιο ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν και να εγκατασταθούν στην μεγαλύτερη δυνατή κλίμακα παγκοσμίως. Το βασικό τους ελάττωμα, δηλαδή η τυχαιότητα παραγωγής και η ασυνέχεια που παρουσιάζουν, μπορεί να λυθεί μόνο με ένα τρόπο. Με την αύξηση των φυσικών μέσων που χρησιμοποιούν ως κινητήρια δύναμη. Σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, πρέπει να γίνεται εκμετάλλευση των υπολοίπων μέσων και αντίστοιχα όταν δεν υπάρχει ταχύτητα ανέμου, κ.ο.κ. Επομένως είναι αναγκαία όχι μόνο η ανάπτυξη των ήδη υπαρχόντων μέσων, αλλά και η εύρεση νέων. Η θαλάσσια ενέργεια είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, φυσικά με τα ελαττώματά της και τα πλεονεκτήματά της. Στο παρόν κείμενο παρουσιάστηκαν αμφότερα και έγινε μια προσπάθεια κατανόησης των μηχανισμών της. Το επόμενο βήμα είναι, όπως αναφέρθηκε, αφενός η προσπάθεια για μείωση του κόστους των εγκαταστάσεων που περιεγράφηκαν, αφετέρου η συνεχής έρευνα και αναζήτηση νέων μηχανισμών, όπως η παλίρροια και η υβριδική χρήση τους. Ωστόσο είναι προτιμότερο να γίνει μια τεράστια δαπάνη ανθρώπινου και υλικού δυναμικού αφιερωμένη στην έρευνα αυτή, παρά στην συνέχιση χρήσης των ορυκτών πόρων της Γης. Επίσης, πολύ σημαντικό είναι οι ερευνητικές και οι παραγωγικές ομάδες αυτών των τεχνολογιών να συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό πρωτίστως την βοήθεια της ανθρωπότητας και του περιβάλλοντος και δευτερευόντως το χρηματικό κέρδος, πράγμα που φαίνεται να συμβαίνει προς το παρόν. Το παράδειγμα της Relamis Wave Power πρέπει να θυμίζει, όμως, ότι οι τεχνολογίες αυτές έχουν μικρό ρυθμό ανάπτυξης και είναι προτιμότερο οι άνθρωποι να ακολουθούν αυτόν τον ρυθμό χωρίς να παρασέρνονται από την αρχική επιτυχία και να καταλήγουν σε υπερβολές. Τέλος, οφείλεται να αναφερθεί, ότι κανείς δεν μπορεί να ισχυριστεί με βεβαιότητα ότι οι διατάξεις που περιεγράφηκαν στο κείμενο αυτό, και χρησιμοποιούνται ήδη ανά τον κόσμο, είναι οι βέλτιστες. Υπάρχουν διατάξεις που χρησιμοποιούν πνευματικά μέσα, μηχανικά μέσα, υδραυλικά μέσα, και τίποτα δεν υποδεικνύει ότι κάποιο είναι το καλύτερο, επομένως αυτό μπορεί να μην έχει καν ανακαλυφθεί, πόσο μάλλον να έχει ερευνηθεί και σχεδιαστεί. Όσο υπάρχουν στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας άνθρωποι οραματιστές και με φαντασία, όλα είναι πιθανά.

## **Βιβλιογραφία**

- [1] M. Guarnieri, *A Lesson from Past Energy Crises*, 2016
- [2] G. L. Richardson, *The Coming US Energy Crisis, Creating a Sustainable Energy Plan for America*, 2011
- [3] Σ. Παπαθανασίου, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, 2014
- [4] Renewable Energy Policy Network for the 21st century (REN21), *Global Status Report*, 2014
- [5] S. S. Prakash, K. A. Mamun, F.R. Islam, R. Mudliar, C. Pau'u, M. Kolivuso, S. Cadralala, *Wave Energy Converter. A Review of Wave Energy Conversion Technology*, 2016
- [6] R. Waters, *Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter*, 2008
- [7] J. Falnes. *Ocean Waves and Oscillating Systems*, 2004
- [8] M. Karimirad. *Offshore Energy Structures*, 2014
- [9] N. Delmonte, D. Barater, F. Giuliani, P. Cova, G. Buticchi, *Review of Oscillating Water Column Converters*, 2016
- [10] D.L. O' Sullivan, A.W. Lewis, *Generator Selection for Offshore Oscillating Water Column Wave Energy Converters*, 2008
- [11] L.H. Hansen, *Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines*, 2001
- [12] J. W. Foster, P. Garambois, R. Ghorbani, *Development and testing of a point absorber wave energy conversion device*, 2011
- [13] I. Boldea, *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*, 2013
- [14] S. D. Umans, *Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery*, 2014
- [15] J. Bard, P. Kracht, *Linear Generator Systems for Wave Energy Converters*, 2013

- [16] R. Henderson, *Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter*, 2005
- [17] [www.pelamiswave.com/pelamis-technology](http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology)
- [18] Pelamis Wave Power, *Pelamis brochure*
- [19] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 2005
- [20] J.C. Martins, M.M. Goulart, M.N. Gomes, J.A. Souza, L.A.O. Rocha, L.A. Isoldi, E.D. dos Santos, *Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design*, 2016
- [21] Z. Zhou, W. Knapp, J. MacEnri, H.C. Sorensen, E.F. Madsen, I. Masters, P. Ijic, *Permanent Magnet Generator Control and Electrical System Configuration for Wave Dragon MW Wave Energy Take-off System*, 2008
- [22] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας*, 2011
- [23] T.T. Loh, D. Simmonds, A. Kyte, *Numerical Modelling of the WaveRoller Device Using OpenFOAM*, 2017
- [24] J. Cruz, *Ocean Wave Energy, Current Status and Future Perspectives*, 2008
- [25] R. Alcorn, D. O'Sullivan, *Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems*, 2014
- [26] N2XS2Y XLPE PE - 12/20 (24) kV Cable Datasheet
- [27] International Renewable Energy Agency, *Renewable Power Generation Costs in 2017*, 2017
- [28] International Renewable Energy Agency, *Wave Energy, Technology Brief*, 2014
- [29] <http://www.oceanenergycouncil.com/ocean-energy/tidal-energy/>
- [30] The Royal Institution of Naval Architects, *Marine and Offshore Renewable Energy*, 2012