



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

Βέλτιστος Έλεγχος στην Παραγωγή  
Ηλεκτρικής Ενέργειας από  
Θαλάσσια Κύματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ  
Φράγκου-Κωνσταντινίδη Δημήτριου

Επιβλέπουσα: Κακλαμάνη Δήμητρα-Θεοδώρα  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

Βέλτιστος Έλεγχος στην Παραγωγή  
Ηλεκτρικής Ενέργειας από  
Θαλάσσια Κύματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Φράγκου-Κωνσταντινίδη Δημήτριου**

Επιβλέπουσα: Κακλαμάνη Δήμητρα-Θεοδώρα  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την κάτωθι τριμελή επιτροπή την 29<sup>η</sup> Μαρτίου του 2024.

---

Δ-Θ. Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Γ. Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Η. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---

Δημήτρης Φράγκος-Κωνσταντινίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Δημήτρης Φράγκος-Κωνσταντινίδης, 2024

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

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε μία προσπάθεια να παρουσιαστεί η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα. Έτσι, στο 1ο κεφάλαιο έχουμε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά τη συγκεκριμένη τεχνολογία καθώς και η παράθεση μιας σειράς πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Παράλληλα, παρουσιάζονται δύο γνωστές εφαρμογές της συγκεκριμένης τεχνολογίας: η CorPower και η Waves4Power.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται η μαθηματική καταγραφή των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο της μεταφοράς ενέργειας από θαλάσσια κύματα, ενώ στο 3ο κεφάλαιο αναλύονται τα μοντέλα μετατροπών κυματικής ενέργειας. Ειδικότερα, γίνεται κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης και με βάση τη μέθοδο μετατροπής ενέργειας.

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται όλη η μαθηματική μοντελοποίηση της CorPower και της Waves4Power τεχνολογίας. Τέλος, έχουμε ένα κεφάλαιο συμπερασμάτων όπου γίνεται και μία πρόταση εφαρμογής της τεχνολογίας για την παραγωγή ενέργειας στα νησιά του Αιγαίου.

**Λέξεις-κλειδιά:** Κύματα, CorPower, Waves4Power, Μετατροπείς Κυματικής Ενέργειας



# Abstract

Within the framework of this thesis an attempt was made to present the technology of electricity generation from sea waves. Thus, in chapter 1 we have a literature review concerning this technology as well as the presentation of a number of advantages and disadvantages. At the same time, two well-known applications of this technology are presented: the CorPower and the Waves4Power.

In chapter 2 the mathematical description of the equations governing the phenomenon of energy transfer by sea waves is presented, while in chapter 3 the wave energy conversion models are analysed. In particular, a categorization based on the installation location and on the energy conversion method is made.

In chapter 4 all the mathematical modelling of CorPower and Waves4Power technology is done. Finally, we have a conclusion chapter where a proposal for the application of the technology for energy production in the Aegean islands is made.

**Key-Words:** Waves, CorPower, Waves4Power, Wave Energy Converters





# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής εργασίας κ.Κακλαμάνη Καθηγήτρια ΗΜΜΥ ΕΜΠ, επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ομότιμο Καθηγητή ΗΜΜΥ ΕΜΠ κ.Ουζούνογλου Νικόλαο για την υποστήριξή του σε ολή αυτή την προσπάθεια.Ευχαριστώ συναδέλφους, συνεργάτες και φίλους στα χρόνια φοιτησής μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου πολυτεχνείου. Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην μητέρα μου.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>15</b>
1.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση . . . . .	16
1.1.1	Γενικά . . . . .	16
1.1.2	Μηχανισμοί για τη Σύλληψη ενέργειας των Κυμάτων .	19
1.1.3	Πλεονεκτήματα Ενέργειας Κυμάτων . . . . .	28
1.1.4	Μειονεκτήματα Ενέργειας Κυμάτων . . . . .	29
1.2	Τεχνολογία Συγκομιδής Ενέργειας από τους Ωκεανούς . . . . .	30
1.3	CorPower . . . . .	33
1.3.1	Γενικά . . . . .	33
1.3.2	Επισκόπηση της τεχνολογίας . . . . .	34
1.3.3	Αρχή Λειτουργίας . . . . .	35
1.4	Waves4Power . . . . .	37
1.4.1	Γενικά . . . . .	37
1.4.2	Επισκόπηση Τεχνολογίας . . . . .	37
1.4.3	Αρχή Λειτουργίας . . . . .	38
1.5	Προσαρμογή των Συστημάτων άντλησης Ενέργειας από Θαλάσσια κύματα . . . . .	40
1.6	Επισκόπηση του υδραυλικού συστήματος συλλογής και του πύργου . . . . .	42
<b>2</b>	<b>Θεωρία</b>	<b>45</b>
2.1	Υδροδυναμικό Μοντέλο . . . . .	45
2.1.1	Συντεταγμένες . . . . .	45
2.1.2	Κύματα . . . . .	46
2.2	Ισοδύναμο Κύκλωμα-Παραμετρικό Μοντέλο . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Μοντέλα Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας</b>	<b>53</b>
3.1	Γενικά . . . . .	53
3.2	Συσκευές Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας . . . . .	55
3.2.1	Συσκευές χερσαίας ζώνης (onshore) . . . . .	56

3.2.2	Συσκευές παράκτιας ζώνης (nearshore) . . . . .	56
3.2.3	Συσκευές υπεράκτιας ζώνης (offshore) . . . . .	56
3.3	Κατηγοριοποίηση με βάση την μέθοδο μετατροπής της ενέργειας	57
3.3.1	Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)	57
3.3.2	Συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device)	58
3.3.3	Συσκευές μακρόστενης μορφής –Γραμμικοί αποσβεστήρες (attenuator) . . . . .	58
3.3.4	Συσκευές βυθισμένες με διαφορά πίεσης (Submerged pressure differential) . . . . .	59
3.3.5	Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Oscil- lating Wave Surge Converter) . . . . .	60
3.3.6	Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorbers) . .	60
3.3.7	OPT powerbuoy . . . . .	61
3.3.8	Aquabuoy . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Ανάλυση Ενεργειακών Μετατροπέων</b>	<b>63</b>
4.1	Ανάλυση της CorPower . . . . .	63
4.2	Ανάλυση του ενεργειακού μετατροπέα της Waves4Power . . .	68
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>75</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>79</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Attenuator [19] . . . . .	19
1.2	Point Absorber [19] . . . . .	20
1.3	O.W.S.C. [19] . . . . .	21
1.4	Water Column [19] . . . . .	21
1.5	Overtopping [19] . . . . .	22
1.6	Wave Dragon [19] . . . . .	23
1.7	Βυθιζόμενη Μηχανή Πίεσης [19] . . . . .	23
1.8	Bulge Wave [19] . . . . .	23
1.9	Rotating Mass [19] . . . . .	24
1.10	Pelamis [19] . . . . .	24
1.11	Power Buoy [19] . . . . .	25
1.12	AWS [19] . . . . .	26
1.13	Salter Duck [19] . . . . .	27
1.14	Μηχανισμός λειτουργίας Salter Duck [19] . . . . .	27
1.15	Sea Calm [19] . . . . .	28
1.16	Τομή Sea Calm [19] . . . . .	28
1.17	Συνδυασμός περιοχής και σημείου εγκατάστασης συσκευών [19] . . . . .	29
1.18	Πλατφόρμα συλλογής της ΟΗΤ με αποθήκευση με βαρύτητα	31
1.19	Σχεδιασμός της μονάδας κίνησης πύργου της ΟΗΤ. . . . .	32
1.20	Μπροστινή και άνω όψη της απολαβής ισχύος της ΟΗΤ. . .	33
1.21	Η σημαδούρα της CorPower με την απολαβή ισχύος στο εσωτερικό της [10]. . . . .	35
1.22	Σχέδιο του αποζεύκτη ισχύος της CorPower [6] . . . . .	36
1.23	Εικόνα του σημαντήρα W4P πλήρους κλίμακας, εγκατεστημένου στο Runde της Νορβηγίας [11] . . . . .	38
1.24	Σχέδιο του μετατροπέα κυματικής ενέργειας του W4P με τον αποζεύκτη ισχύος του [8]. . . . .	39
1.25	Ένα σύστημα WEC[9]. . . . .	41

2.1	Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων όπου φαίνονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας. . . . .	46
2.2	Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Μοντέλο Ροής. . . . .	51
2.3	Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός σωλήνα με 3 διαφορετικές διατομές . . . . .	52
3.1	Oscillating water column [37] . . . . .	58
3.2	Wave Dragon System [38] . . . . .	58
3.3	Pelamis Wave Energy System[39] . . . . .	59
3.4	Archimedes Wave Swing [39] . . . . .	60
3.5	Παλινδρομική κίνηση πτερυγίου (σύστημα Oyster) . . . . .	60
3.6	Oyster System . . . . .	61
3.7	OPT PowerBUOY System . . . . .	62
3.8	AquaBuoy System . . . . .	62
4.1	Εμβαδόν υδάτινου επιπέδου για κάθε μετατόπιση . . . . .	64
4.2	Χάρτης πόλων-μηδενικών της δυναμικής ανύψωσης χωρίς WaveSpring . . . . .	66
4.3	Διάγραμμα μοναδιαίας τιμής Hankel για το μοντέλο ανύψωσης της σημαδούρας της CorPower . . . . .	67
4.4	Διάγραμμα Bode με πλήρη και μειωμένη δυναμική του συστήματος . . . . .	68
4.5	Σχέση των ιδιοπεριοδών κλειστού βρόχου με τη δυσκαμψία του PTO . . . . .	72



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Ο βέλτιστος έλεγχος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία των θαλάσσιων ενεργειακών συστημάτων. Ο βέλτιστος έλεγχος προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες και να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Κάποια στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον βέλτιστο έλεγχο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα περιλαμβάνουν:

1. Τον σχεδιασμό του συστήματος: Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να λάβει υπόψη τοπικές κλιματικές συνθήκες, την τοπογραφία του ύδατος, τον τύπο κυμάτων και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα της ενέργειας.
2. Συστήματα ελέγχου: Πρέπει να αναπτυχθούν αλγόριθμοι ελέγχου που να επιτρέπουν την αποτελεσματική μετατροπή της κινητικής ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της θάλασσας.
3. Σύστημα αποθήκευσης: Ο βέλτιστος έλεγχος πρέπει να συνδυαστεί με αποθηκευτικά συστήματα που θα επιτρέπουν την αποθήκευση και τη διανομή της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με τις ανάγκες.
4. Συντήρηση και ασφάλεια: Ο βέλτιστος έλεγχος πρέπει να περιλαμβάνει μέτρα για τη συντήρηση των εξοπλισμών και την ασφάλεια του προσωπικού που εργάζεται σε αυτά τα συστήματα.

5. Οικονομική αποτελεσματικότητα: Ο βέλτιστος έλεγχος πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος και να προσπαθεί να εξασφαλίσει την οικονομική αποτελεσματικότητα.

Συνολικά, ο βέλτιστος έλεγχος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τεχνικές, οικονομικές, και περιβαλλοντικές παραμέτρους, προκειμένου να εξασφαλίσει τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

## 1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 1.1.1 Γενικά

Τα ωκεάνια κύματα παρέχουν τεράστιο ενεργειακό δυναμικό που ξεπερνά το ενεργειακό δυναμικό οποιασδήποτε άλλης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Αναμένεται ότι μόλις η κυματική ενέργεια καθιερωθεί ως ώριμη βιομηχανία, θα προσφέρει τη μεγαλύτερη συμβολή στη λύση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος. Η κυματική ενέργεια μελετάται από τη δεκαετία του 70 και έχουν εφευρεθεί και αναπτυχθεί πολλές έννοιες μετατροπής κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, λόγω της πολυδιάστατης και πολύπλοκης φύσης της ανάπτυξης μιας οικονομικά βιώσιμης λύσης για τη συγκομιδή αυτού του πόρου, μέχρι στιγμής καμία από αυτές τις έννοιες δεν έχει αποδειχθεί αρκετά καλή λύση. Ως εκ τούτου, το δυναμικό της κυματικής ενέργειας παραμένει ακόμη ανεκμετάλλευτο. Ένας από τους κύριους λόγους για την έλλειψη διάδοσης της κυματικής ενέργειας είναι ότι η αξιοποίηση της ακανόνιστης παλινδρομικής κίνησης της θάλασσας δεν είναι τόσο απλή όσο, για παράδειγμα, η άντληση ενέργειας από τον άνεμο. Η αποκτηθείσα ενέργεια από τα κύματα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις με αρκετά υψηλό λόγο αιχμής προς μέσο όρο. Επομένως, τα μηχανήματα πρέπει να διαστασιοποιηθούν έτσι ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις αιχμές της εισερχόμενης ισχύος. Ωστόσο, η αύξηση του μεγέθους των εξαρτημάτων αυξάνει τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και μειώνει τον συντελεστή χωρητικότητας του συστήματος, καθιστώντας την έτσι μη ελκυστική λύση. Προκειμένου να μειωθεί το κόστος του συστήματος, είναι ζωτικής σημασίας η αποτελεσματική εξομάλυνση της ισχύος σε ένα προηγούμενο στάδιο της μετάδοσης πριν



από τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ισχύ [1].

Η τεχνολογία εξομάλυνσης ισχύος πρέπει να εφαρμοστεί χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση δέσμευσης ισχύος του μετατροπέα κυματικής ενέργειας. Επομένως, η εξομάλυνση της μηχανικής ισχύος που εισάγεται στη γεννήτρια ταυτόχρονα με τη ρύθμιση της δύναμης απόσβεσης για κάθε κύμα ώστε να μεγιστοποιείται η δέσμευση ισχύος είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι προγραμματιστές μετατροπέων κυματικής ενέργειας και να δώσουν καλές λύσεις.

Επιπλέον, η αύξηση της ποιότητας της ισχύος και της δυνατότητας ελέγχου για την προσαρμογή της παραγωγής ισχύος στη ζήτηση γίνεται όλο και πιο σημαντική με την αυξανόμενη ανάμειξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Επί του παρόντος, οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας πληρώνονται μόνο για την ποσότητα ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο. Ωστόσο, στο μέλλον η εν λόγω τιμολογιακή πολιτική είναι πιθανό να αλλάξει ώστε να ενθαρρύνει επίσης την ποιότητα και τη δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας. Οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να παρακολουθούν με ακρίβεια τη ζήτηση είναι πιθανό να αποζημιώνονται με υψηλότερο ποσοστό από εκείνους που δεν μπορούν να παρέχουν το ίδιο επίπεδο λεπτομέρειας. Επομένως, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικοί στη μελλοντική αγορά, οι προγραμματιστές μετατροπέων κυματικής ενέργειας πρέπει να ασχοληθούν με το ζήτημα του τρόπου παροχής μεγαλύτερου ελέγχου της παραγόμενης ισχύος.

Είναι γνωστό ότι ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας πρέπει να βρίσκεται σε φάση με τα εισερχόμενα κύματα από την αρχή της έρευνας για την κυματική ενέργεια, ή αλλιώς, η φυσική συχνότητα του συστήματος πρέπει να είναι κοντά ή ίση με τη συχνότητα των κυμάτων, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απορρόφηση ισχύος. Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι η συχνότητα του κύματος μεταβάλλεται, είναι απαραίτητο είτε να μπορεί να ρυθμιστεί η φυσική συχνότητα του μετατροπέα κυματικής ενέργειας για κάθε κύμα είτε να σχεδιαστεί ένα σύστημα με ευρεία βασική ζώνη που να καλύπτει όλο το εύρος συχνοτήτων των κυμάτων. Μόλις επιτευχθεί η βέλτιστη συνθήκη φάσης, το πρόβλημα μειώνεται στην εύρεση της βέλτιστης δύναμης απόσβεσης/μηχανισμού για την εξαγωγή της μέγιστης ποσότητας ενέργειας από τα κύματα. Ωστόσο, οι περιορισμοί των εξαρτημάτων επιβάλλουν περιορισμούς

στο σύστημα που μειώνουν τις επιδόσεις σύλληψης ενέργειας.

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στον τομέα της κυματικής ενέργειας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μοντέλων και τεχνικών ελέγχου για μία μόνο σημαδούρα. Η μοντελοποίηση και ο έλεγχος συστοιχιών μετατροπών κυματικής ενέργειας έχει κερδίσει την προσοχή μόνο τα τελευταία χρόνια, λόγω του γεγονότος ότι αρκετές προ-εμπορικές και εμπορικές συστοιχίες ετοιμάζονται να εγκατασταθούν. Η μελέτη της συμπεριφοράς της συστοιχίας είναι σημαντική λόγω πολλών πτυχών. Για παράδειγμα, η κατανόηση των υδροδυναμικών κυματικών αλληλεπιδράσεων σε μια συστοιχία θα βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της διάταξης της συστοιχίας κατά τρόπο ώστε να μειωθεί η αρνητική επίδραση της συστοιχίας στην απορρόφηση ισχύος, να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μεταφοράς ισχύος κ.λπ. Επιπλέον, η μελέτη των μετατροπών κυματικής ενέργειας σε μια συστοιχία είναι απαραίτητη προκειμένου να κατανοηθεί η επίδραση εξομάλυνσης της ισχύος από όλες τις σημαδούρες της συστοιχίας. Αυτό με τη σειρά του βοηθά στη διαστασιολόγηση των μηχανημάτων στο σημείο συλλογής [3].

Η χρήση του νερού ως μέσω παραγωγής ενέργειας μπορεί να καλύψει κυρίως τις απαιτήσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το μετασχηματισμό της υδραυλικής ενέργειας σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια. Από τη φύση του το νερό ρέει από περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο σε περιοχές με μικρότερο υψόμετρο και με τη βοήθεια υδροηλεκτρικών έργων (υδροταμιευτήρες, φράγματα, κλειστούς αγωγούς πτώσεως, υδροστρόβιλους, ηλεκτρογεννήτριες) υφίσταται δυνατή η εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για κατανάλωση. Οι διατάξεις αυτές όμως μπορούν να τοποθετηθούν σε ποτάμια, τεχνητά ή φυσικά φράγματα. Το μεγαλύτερο ποσοστό νερού του πλανήτη μας βρίσκεται στους ωκεανούς, οι οποίοι καλύπτουν το 71% και η εκμετάλλευση αυτού του πόρου μπορεί να προσφέρει τεράστια ποσά ενέργειας και γίνεται με τρεις τρόπους [25]:

- Από τα κύματα
- Από τις παλίρροιας
- Από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού

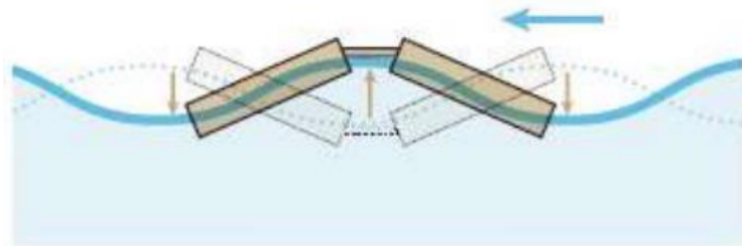
Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα επιτυγχάνεται μέσω της κίνησης της θαλάσσιας επιφάνειας λόγω των κατά τόπων ανέμων, ουσιαστικά είναι

ενέργεια η οποία προέρχεται από τον άνεμο. Η συνολική μηχανική ενέργεια των κυμάτων προκύπτει από το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής τους ενέργειας.

### 1.1.2 Μηχανισμοί για τη Σύλληψη ενέργειας των Κυμάτων

Υπάρχουν αρκετοί τύποι μηχανισμών που έχουν πειραματιστεί για την σύλληψη της ενέργειας των κυμάτων είναι οι ακόλουθοι [30]:

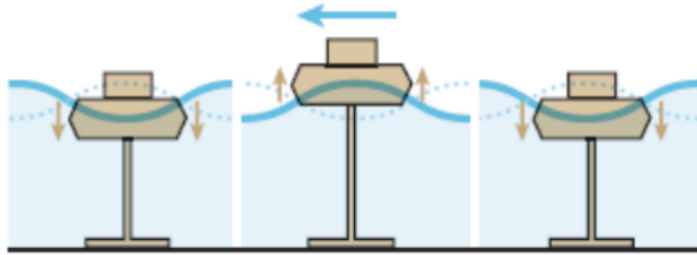
1. Επιμήκεις μετατροπείς παράλληλοι προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ή αποσβεστήρες (attenuators). Το σύστημα είναι μια ημιβυθισμένη κατασκευή αποτελούμενη από κυλινδρικά ασάλινα κομμάτια ενωμένα σε αρθρώσεις. Πρυμνοδεμένο, έτσι ώστε να ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση του ισχυρότερου κύματος, το σύστημα δέχεται τον Κυματισμό σε όλο του το μήκος του, πραγματοποιώντας μια σπαστή στις αρθρώσεις κίνηση. Υδραυλικά έμβολα σε κάθε άρθρωση αντιδρούν στην κίνηση αυτή και αντλούν υψηλής πίεσης υγρό σε υδραυλικούς κινητήρες, οι οποίοι με τη σειρά τους ενεργοποιούν τις ηλεκτρογεννήτριες. Υπάρχουν ήδη σχέδια για τη δημιουργία Κυματικών Πάρκων (Wave Parks) με μεγάλους αριθμούς τέτοιων συσκευών που θα τροφοδοτούν ένα υποβρύχιο καλώδιο μεταφοράς ρεύματος, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος μετατροπής.



Σχήμα 1.1: Attenuator [19]

2. Σημειακοί απορροφητήρες (point absorbers). Πλωτή κατασκευή η οποία απορροφά την κυματική ενέργεια από κάθε διεύθυνση μέσω των κινήσεων της στην επιφάνεια των υδάτων ή κοντά σε αυτή. Έχει μικρές διαστάσεις σε σχέση με το τυπικό μήκος κύματος, με διάμετρο συνήθως της τάξης των λίγων μέτρων. Το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφησης σημαίνει βασικά την ικανότητα απορρόφησης της

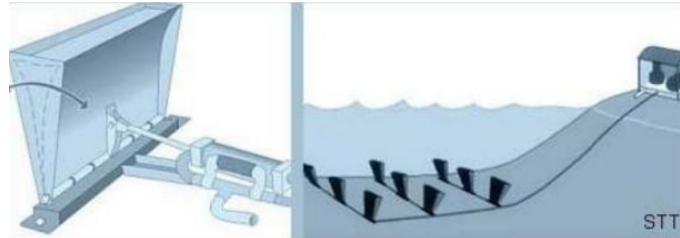
ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Σε σχέση με το ουσιαστικά ίδιο φαινόμενο, το οποίο παρουσιάζεται στα ραδιοκύματα, το φαινόμενο αυτό καλείται «φαινόμενο κεραίας». Οι σχεδιασμοί τύπου σημαδούρας, για παράδειγμα, ενεργούν ως σημειακοί απορροφητές. Τυπικά, όχι όμως και απαραίτητα, οι πλωτοί αυτοί σχεδιασμοί είναι αξονοσυμμετρικοί [13].



Σχήμα 1.2: Point Absorber [19]

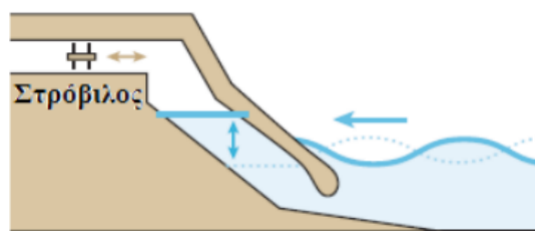
3. Επιμήκεις μετατροπείς τετραγωνικού τύπου (Oscillating Wave Surge Converter), δηλαδή παράλληλοι με το μέτωπο του κύματος. Εδώ εντάσσονται οι συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης, που έχουν τη μορφή υποθαλάσσιων επίπεδων πλακών αρθρωτά συνδεδεμένων με τον πυθμένα. Η πέρα δώθε μετακίνηση των κατώτατων Κυμάτων κινεί την πλάκα, και η παραγόμενη κινητική Ενέργεια συλλέγεται από μια εμβολοφόρο αντλία. Αυτή η Ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική Ενέργεια είτε από μια γεννήτρια που συνδέεται με τη μονάδα Oscillating wave Surge Converter, είτε από ένα κλειστό υδραυλικό σύστημα σε σχέση με ένα σύστημα γεννητριών/στροβίλων. Η Επιχείρηση που αναπτύσσει το O.W.S.C., έχει διευθύνει τις θαλάσσιες δοκιμές WaveRoller στο Ευρωπαϊκό Θαλάσσιο Ενεργειακό Κέντρο (EMEC) Orkney, στη Σκωτία. Με τις δοκιμές αυτές έχει ελεγχθεί η δυνατότητα της Ενεργειακής παραγωγής των κατώτατων κυμάτων και η καταλληλότητα της διάταξης O.W.S.C. στη μετατροπή αυτής της πηγής Ενέργειας σε ηλεκτρική Ενέργεια. Τα αποτελέσματα προτείνουν ότι η διάταξη αυτή θα είναι σε θέση να ξεπεράσει άλλες Ωκεάνιες Ενεργειακές Τεχνολογίες από την άποψη της απόδοσης και των οικονομικών εκτιμήσεων. Το O.W.S.C. είναι καταλληλότερο για τις θέσεις όπου οι περιόδοι κυμάτων είναι μεγάλες. Επιπλέον, λόγω της φύσης των κατώτατων κυμάτων, τα επίπεδα δύναμης που επιτυγχάνονται καθόλη τη διάρκεια του έτους σε αυτές τις θέσεις, κυμαίνονται αρκετά λιγότερο από ότι για τις συσκευές κυμάτων επιφάνειας ή την αιολική ενέργεια.

Με βάση μια κατ' εκτίμηση ονομαστική παραγωγή ισχύος 13 kW ανά μεμονωμένη πλάκα, το κόστος επένδυσης ανέρχεται σε περίπου δύο χιλιάδες εκατό (2100) ευρώ ανά kW ήδη στο πειραματικό στάδιο.



Σχήμα 1.3: O.W.S.C. [19]

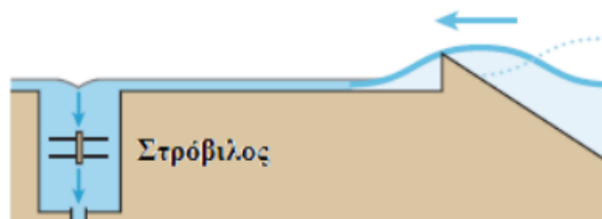
4. Διατάξεις παλινδρομούσας υδάτινης στήλης (Water Column). Οι διατάξεις αυτές είναι μερικώς βυθιζόμενες κατασκευές στη θάλασσα και είναι ανοιχτές κάτω από τη γραμμή ηρεμίας του νερού, περικλείοντας μια στήλη αέρα πάνω από μια στήλη νερού. Τα κύματα προκαλούν την άνοδο και την πτώση της στήλης νερού, η οποία κατά συνέπεια συμπιέζει και αποσυμπιέζει τη στήλη αέρα, συνδεδεμένη με έναν στρόβιλο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Εάν τοποθετηθεί ένας αεροστρόβιλος στην ανοιχτή πλευρά της στήλης, η ροή του αέρα θα παράγει ισχύ. Οι λεγόμενοι στρόβιλοι Wells κατέχουν την ικανότητα να περιστρέφονται μονίμως κατά την ίδια κατεύθυνση, όποια και αν είναι η φορά του ρεύματος του αέρα μέσω του στροβίλου. Μια τέτοια στήλη μπορεί να τοποθετηθεί είτε υπεράκτια είτε παράκτια. Διατάξεις της κατηγορίας αυτής έχουν εγκατασταθεί στις Πορτογαλικές Αζόρες και στη νήσο Islay στη Βόρεια Σκωτία.



Σχήμα 1.4: Water Column [19]

5. Υπερχειλιστής (Overtopping) Οι συσκευές αυτές συγκρατούν το νερό καθώς αυτό εισέρχεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Ύστερα το νερό επιστρέφει στη θάλασσα διερχόμενο μέσω ενός στροβίλου, ο οποίος παράγει ενέργεια. Η κατασκευή είναι απλή και έχει μόνο ένα είδος

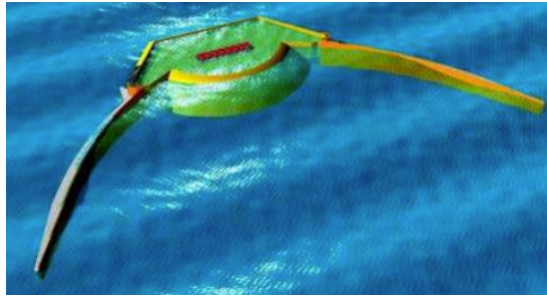
κινούμενων μερών, τους στρόβιλους. Αυτό ισχύει για οποιαδήποτε συσκευή που δεσμεύεται να λειτουργήσει παράκτια όπου οι ακραίες δυνάμεις έχουν σοβαρές επιπτώσεις σε οποιαδήποτε κινούμενο μέρος.



Σχήμα 1.5: Overtopping [19]

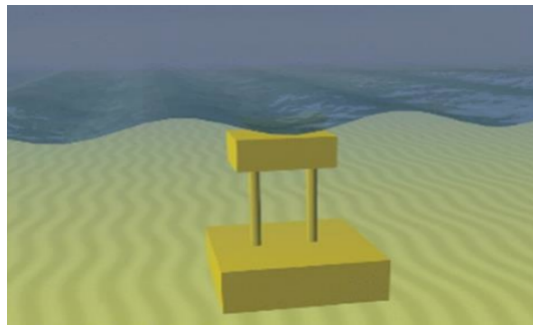
Το Wave Dragon είναι ένα είδος υπερχειλιστή και είναι μια επιπλέουσα συσκευή με σκοπό να είναι πολύ σταθερή στα Κύματα θύελλας. Ακόμα το Wave Dragon αντιπροσωπεύει ένα πολύ σύνθετο σχέδιο όπου μεγάλες προσπάθειες έχουν καταβληθεί στο σχεδιασμό στη διαμόρφωση, και στον έλεγχο προκειμένου να παραχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη ηλεκτρική Ενέργεια με όσο το δυνατόν χαμηλότερο πιθανό κόστος και με έναν αξιόπιστο και φιλικόν προς το περιβάλλον τρόπο. Ενώ οι περισσότερες παράκτιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν κυματοθραυστικές συσκευές, για να περιορίσουν τη υπερχείλιση του νερού, το Wave Dragon, με τους διπλά κυρτούς ανακλαστές κεκλιμένων ραμπών, έχει σα σκοπό να μεγιστοποιήσει την υπερχείλιση. Οι ανακλαστές κυμάτων συγκεντρώνουν την Ενέργεια των Κυμάτων και με αυτόν τον τρόπο η ροή του νερού ξεπερνά την κεκλιμένη ράμπα. Η κεκλιμένη ράμπα του Wave Dragon μπορεί να συγκριθεί με μια παραλία. Όταν ένα κύμα φθάνει σε μια παραλία χάνει ένα μέρος από την Ενέργειά του λόγω της τριβής με τα κατώτατα σημεία. Η κεκλιμένη ράμπα Ωαε Δραγον είναι πολύ κοντή και σχετικά απότομη προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι Ενεργειακές απώλειες. Το Κύμα αλλάζει τη γεωμετρία του και ανυψώνεται. Η ειδική ελλειπτική μορφή της κεκλιμένης ράμπας βελτιστοποιεί αυτήν την επίδραση και η πρότυπη δοκιμή έχει δείξει ότι αυξάνεται σημαντικά.

6. Οι βυθιζόμενες μηχανές πίεσης. Είναι συνήθως τοποθετημένες κοντά στις ακτές, προσαρτημένες στον πυθμένα της θάλασσας. Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, δημιουργώντας διαφορά πίεσης στη συσκευή παράγοντας με τον τρόπο αυτό ηλεκτρική ενέργεια. Όταν



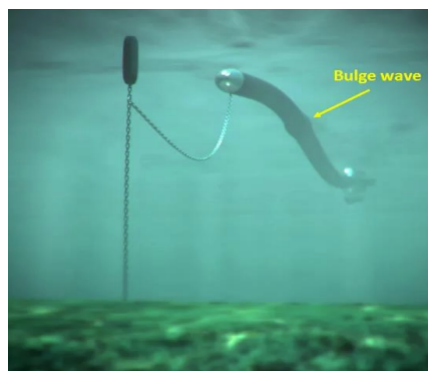
Σχήμα 1.6: Wave Dragon [19]

σχεδιαστεί σωστά για τη συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας, η κατηγορία αυτή διαθέτει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης.



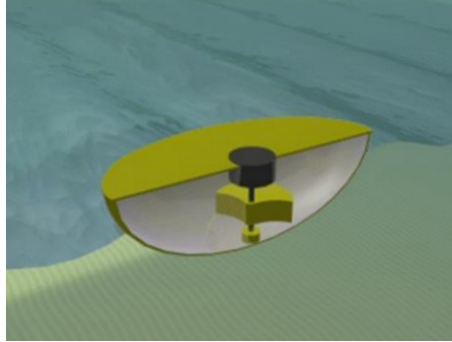
Σχήμα 1.7: Βυθιζόμενη Μηχανή Πίεσης [19]

7. Τα κυρτώματα (bulge wave) αποτελούνται από έναν σωλήνα από καουτσούκ γεμάτο με νερό και αγκυροβολημένο στον πυθμένα, προς την επιφάνεια της θάλασσας. Το νερό εισέρχεται από το πίσω μέρος του σωλήνα και το διερχόμενο κύμα προκαλεί μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του σωλήνα, δημιουργώντας μία διόγκωση. Καθώς η τελευταία κινείται μέσα στο σωλήνα αυξάνεται, συλλέγοντας ενέργεια.



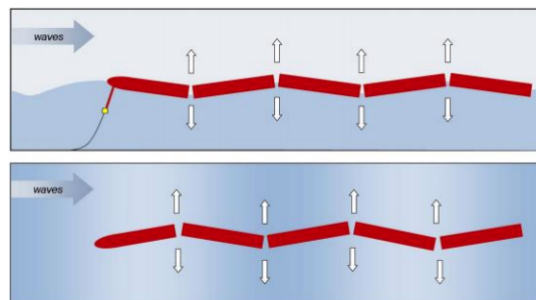
Σχήμα 1.8: Bulge Wave [19]

8. Το σύστημα περιστρεφόμενης μάζας (rotating mass), όπου χρησιμοποιούνται δύο μορφές περιστροφής προκειμένου να αποθηκευτεί ενέργεια από την κίνηση της συσκευής. Κινείται είτε ένα έκκεντρο βαρίδιο, είτε ένα γυροσκόπιο, τα οποία μέσω μίας γεννήτριας παράγουν ενέργεια.



Σχήμα 1.9: Rotating Mass [19]

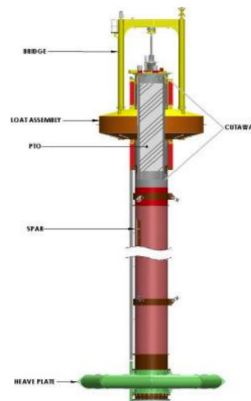
9. Η συσκευή Pelamis, χρησιμοποιεί την κίνηση των επιφανειακών κυμάτων για να παράγει ηλεκτρισμό. Η συσκευή αυτή αποτελείται από μισοβυθισμένες κυλινδρικές μονάδες, οι οποίες ταλαντεύονται ανάλογα με την κίνηση των κυμάτων. Μέσω αυτής της κίνησης παράγεται ηλεκτρισμός. Η τεχνολογία αυτή μελετάται στη Σκωτία και πρόκειται για τον πρώτο εξασθενητή κυμάτων και τοποθετείται σε βάθη μεγαλύτερα των 50 μ., δηλαδή σε απόσταση 2 – 10 Km από την ακτή. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από 5 σωλήνες οι οποίοι ενώνονται σε ορισμένα σημεία, τα οποία επιτρέπουν την κίνηση τους. Κατά τον κυματισμό, η κίνηση πάνω – κάτω μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό μέσω υδραυλικών συστημάτων που είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό του κάθε σωλήνα, ενώ η παραγόμενη ενέργεια μεταφέρεται στην ακτή με καλωδιώσεις και ειδικό εξοπλισμό.



Σχήμα 1.10: Pelamis [19]



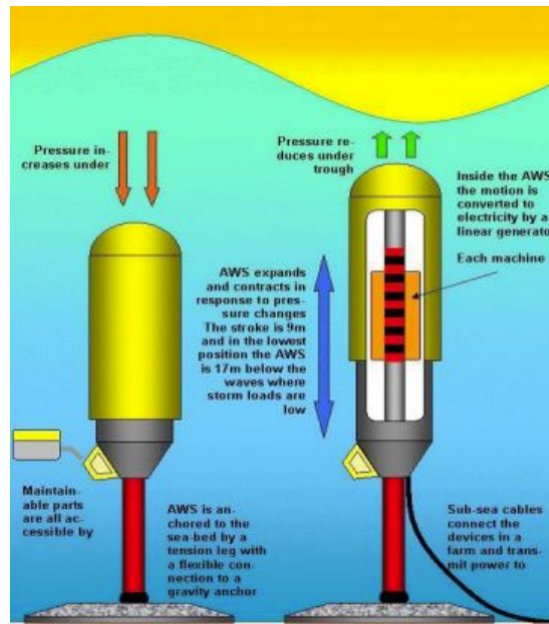
10. Το Power Buoy, πρόκειται για μία από τις πιο βασικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα, συνδυάζοντας αρχές υδροδυναμικής, ηλεκτρισμού καθώς και εξελιγμένα τεχνολογικά συστήματα προκειμένου να παρέχει καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Παράγει αξιόπιστο, καθαρό και φιλικό προς το περιβάλλον ηλεκτρισμό. Η συσκευή αυτή αποτελείται από μία δοκό, ένα φλοτέρ και από μία βαριά πλάκα. Το φλοτέρ ανεβοκατεβαίνει στη δοκό ανάλογα με τον κυματισμό της θάλασσας. Η βαριά πλάκα διατηρεί τη δοκό σε μία σταθερή θέση. Η κίνηση του φλοτέρ θέτει σε λειτουργία ένα μηχανικό σύστημα που βρίσκεται στη δοκό, το οποίο μετατρέπει την γραμμική κίνηση του φλοτέρ σε περιστροφική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση θέτει σε λειτουργία ηλεκτρικές γεννήτριες, οι οποίες παράγουν ηλεκτρισμό και με τη σειρά του αυτός στέλνεται με ειδικά καλώδια σε γειτονικό σύστημα.



Σχήμα 1.11: Power Buoy [19]

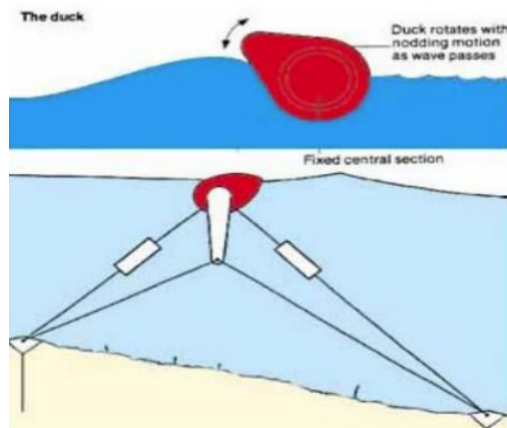
11. Τα συστήματα AWS (Archimedes Wavesing), είναι μηχανήματα παραγωγής ηλεκτρισμού από τη θάλασσα και έχουν βραβευτεί με την Τρίτη θέση στο διαγωνισμό US department of weave energy, αφού πρόκειται για μια μοντέρνα κατασκευή που μπορεί να καλύψει το 5% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Τοποθετείται σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς να επηρεάσει τους θαλάσσιους οργανισμούς. Η πρώτη πειραματική συσκευή τοποθετήθηκε το 2004 στην ακτή Ronoa de Vantim στη Πορτογαλία σε απόσταση 5 Km από την ακτή. Πρόκειται για μια βυθισμένη στη θάλασσα κατασκευή, η οποία χρησιμοποιεί τις αλλαγές της πίεσης του νερού που δημιουργείται όταν το κύμα περνάει πάνω από αυτή. Ένας εξωτερικός κύλινδρος κινείται σε συνδυασμό με έναν μικρότερο, με αποτέλεσμα η κινητική ενέργεια που

παράγεται, να μετατρέπεται στη συνέχεια μέσω γραμμικής γεννήτριας σε ηλεκτρισμό.

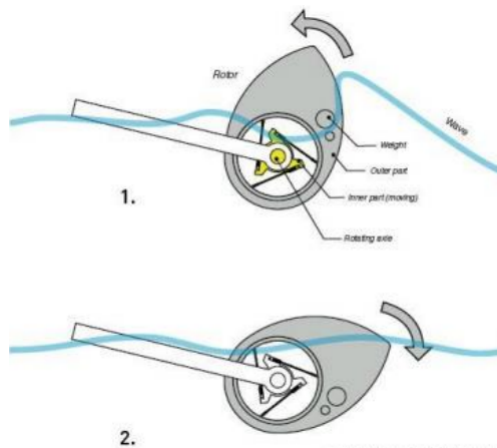


Σχήμα 1.12: AWS [19]

12. Η συσκευή Salter Duck η αλλιώς Edinburgh Duck, είναι μία συσκευή η οποία μετατρέπει την δύναμη των κυμάτων σε ηλεκτρισμό. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί την παλινδρομική κίνηση των κυμάτων για να περιστρέψει τα γυροσκόπια τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα στο εσωτερικό και στη συνέχεια η γεννήτρια μετατρέπει την περιστροφή αυτή σε ηλεκτρική ενέργεια. Το Salter Duck δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης το 1970 και πρόκειται για έναν από τους πρώτους μετατροπείς ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρισμό, ο οποίος προτάθηκε στο Wave Energy Program στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η συσκευή αυτή περιέχει στο εσωτερικό της ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού βασισμένη σε ένα γυροσκόπιο που συνδέεται με μία γεννήτρια. Κατά την κίνηση της συσκευής πάνω – κάτω, το γυροσκόπιο κουνιέται μπρος – πίσω παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.
13. Τα Sea Calm, είναι μια συσκευή παρόμοια με την Salter Duck, κατασκευάστηκε το 1978 και δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στο Loch Ness το 1982. Εκείνη την εποχή ανακηρύχθηκε η πιο υποσχόμενη κατασκευή που σχετιζόταν με την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα, καθώς είχε όλες τις προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή. Πρόκειται για μια κατασκευή που χρησιμοποιεί τον εκτοπισμό του αέρα για



Σχήμα 1.13: Salter Duck [19]



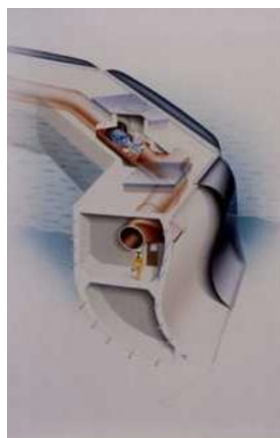
Σχήμα 1.14: Μηχανισμός λειτουργίας Salter Duck [19]

να παράγει ενέργεια από τα κύματα. Η πρώτη πειραματική συσκευή αποτελούνταν από 12 θαλάμους αέρα, το εξωτερικό των οποίων από τελούνταν από λαστιχένιες μεμβράνες και ήταν τοποθετημένο γύρω από μια κατασκευή σε σχήμα δακτυλίου, η οποία επέπλεε. Οι διάφοροι κυματισμοί κινούσαν τη μεμβράνη μέσα και έξω αναγκάζοντας τον αέρα να εναλλάσσεται μεταξύ των θαλάμων, παράγοντας ενέργεια μέσω ανεμογεννητριών που βρίσκονταν μεταξύ των θαλάμων αυτών, από τη ροή του αέρα.

Ο συνδυασμός του σημείου εγκατάστασης της συσκευής με τον τρόπο τον οποίο αποσπούν την κυματική ενέργεια συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.



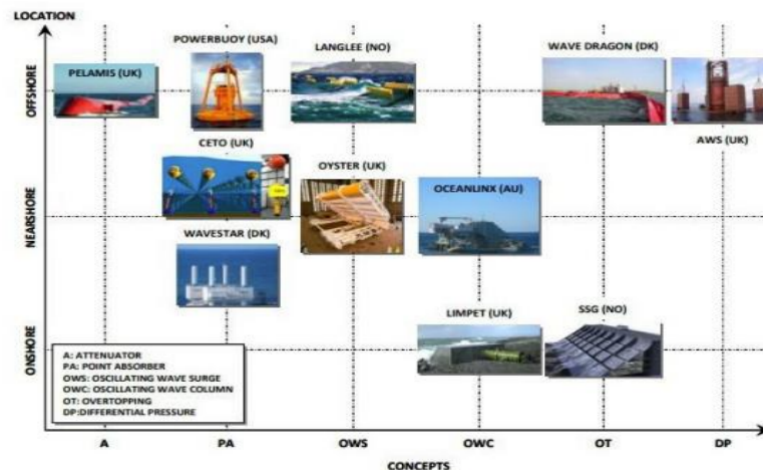
Σχήμα 1.15: Sea Calm [19]



Σχήμα 1.16: Τομή Sea Calm [19]

### 1.1.3 Πλεονεκτήματα Ενέργειας Κυμάτων

- Η ενέργεια είναι δωρεάν καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα είδος καύσιμης ύλης.
- Δεν είναι ακριβή η λειτουργία και η συντήρηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσω των θαλάσσιων κυμάτων
- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον καθώς κατά τη λειτουργία της μονάδας δεν παράγονται απόβλητα
- Δίνεται η δυνατότητα παράγωγης ενός μεγάλου ποσού ενέργειας
- Αποθέματα της πρώτης ύλης (νερό) υπάρχουν σε αφθονία σε παγκόσμια κλίμακα μιας και υδάτινο είναι το 70% της επιφάνειας του πλανήτη μας
- Μικρό χρονικό διάστημα ανάμεσα στην έρευνα, την εγκατάσταση και τη λειτουργία μίας τέτοιας μονάδας.



Σχήμα 1.17: Συνδυασμός περιοχής και σημείου εγκατάστασης συσκευών [19]

- Προστατεύουν την ακτή στην οποία βρίσκονται, πράγμα πολύ χρήσιμο σε λιμάνια
- Δεν δημιουργούν προβλήματα στις μετακινήσεις των ψαριών (εκτός από τα παλιρροϊκά φράγματα)
- Η κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία προστατευμένων υδάτινων περιοχών οι οποίες είναι ελκυστικές για διάφορα είδη ψαριών και υδρόβιων πουλιών.

#### 1.1.4 Μειονεκτήματα Ενέργειας Κυμάτων

- Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη δύναμη των κυμάτων, όπου άλλες φορές παίρνουμε μεγάλα ποσά ενέργειας και άλλες φορές μηδενικά.
- Απαιτείται προσεκτική επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης της μονάδας καθώς θα πρέπει να έχουμε δυνατά κύματα.
- Πολλές από τις εγκαταστάσεις είναι θορυβώδης
- Οι εγκαταστάσεις πρέπει να κατασκευάζονται με ειδικό τρόπο ώστε να αντέχουν στις δύσκολες καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπίσουν
- Το κόστος μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας στη στεριά είναι πολύ υψηλό.

## 1.2 Τεχνολογία Συγκομιδής Ενέργειας από τους Ωκεανούς

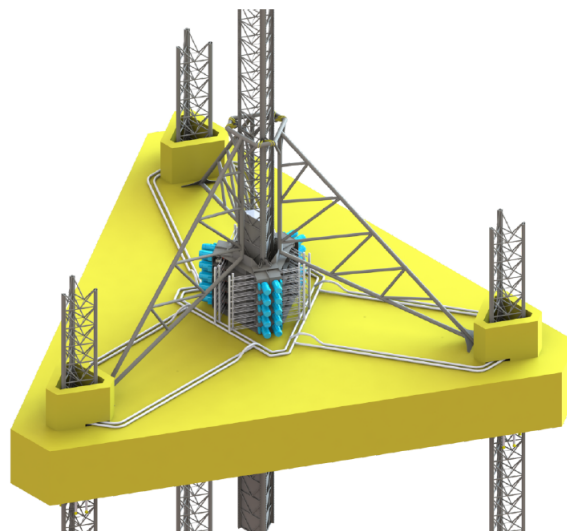
Οι πλέον ευνοϊκές τοποθεσίες για να συλλεχθεί η ενέργεια των κυμάτων είναι συγχρόνως οι τοποθεσίες όπου ο άνεμος είναι πολύ ισχυρός (ανάμεσα 40ο και 60ο γεωγραφικού πλάτους) και οι τοποθεσίες όπου η επιφάνεια του ωκεανού είναι αχανής. Οι Δυτικές ακτές των απέραντων ωκεανών Ατλαντικού και Ειρηνικού είναι σίγουρα προνομιούχες. Επομένως, στις δυτικοευρωπαϊκές ακτές επικρατεί ιδιαίτερα ισχυρός κυματισμός με μέση ισχύ της τάξεως των 40 – 70 ΚΩη ανά μέτρο μετώπου κύματος. Το κυματικό δυναμικό της χώρας μας είναι το υψηλότερο της Μεσογείου, με μέση ισχύ η οποία σε ορισμένες περιοχές του Αιγαίου ξεπερνάει τα 15 ΚW/m.

Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μας θα κάλυπτε στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Παρουσιάζει μεταξύ των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Για παράδειγμα, σε ημερήσια βάση, η ενέργεια κυματισμού ύψους 1 μ. μπορεί να ξεπεράσει τις 300 ΚWh. Από το ποσό αυτό ενέργειας το 5 – 10%, δηλαδή 15 – 30 ΚWh ημερησίως, μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό. Συγκριτικά αναφέρεται, ότι μια τετραμελής οικογένεια καταναλώνει κατά μέσον όρο 10 ΚWh ημερησίως. Ένα σύστημα κυματικής ενέργειας μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο στον ωκεανό και να παράγει ενέργεια, είτε αγκυροβολημένο στο πυθμένα είτε πλωτό στα ανοιχτά της θάλασσας. Ακόμη και σύστημα εγκατεστημένο στα παράλια ή στα ρηχά νερά, το οποίο μπορεί να είναι επίσης ολικά βυθισμένο στο νερό ή να είναι τοποθετημένο πάνω από τη θαλάσσια επιφάνεια σε μια πλωτή πλατφόρμα. Η αισθητική επίδραση ενός συστήματος στο περιβάλλον εξαρτάται από τον τύπο που θα υιοθετηθεί, έτσι ένα σύστημα μερικώς βυθισμένο ή τοποθετημένο λίγα χιλιόμετρα μακριά δεν επηρεάζει την εναρμόνιση του συστήματος στο περιβάλλον. Αντιθέτως, συστήματα κυματικής ενέργειας τοποθετημένα στις ακτές μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην όλη αισθητική και να μετατρέψουν ένα φυσικό περιβάλλον σε άκρως βιομηχανικό.

Η Ocean Harvesting Technology (OHT) προσφέρει ένα υδραυλικό σύστημα συλλογής υψηλής πίεσης για συστοιχίες κυματικής ενέργειας με αποθήκευση ενέργειας με βάση τη βαρύτητα και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια σε μια κεντρική πλατφόρμα. Ένα βάρος ανυψώνεται με μια κίνηση με οδοντω-

τό τροχό στην πλατφόρμα για την εξομάλυνση της συλλεγόμενης ενέργειας και την παραγωγή σταθερής ισχύος από ένα σύνολο γεννητριών. Η αποθήκευση παρέχει χρονική μετατόπιση της παραγωγής ενέργειας και μπορεί να φορτιστεί με ενέργεια από το δίκτυο σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, ώστε να αυξηθεί η αξιοποίηση της εγκατάστασης και τα έσοδα από την παροχή ποικίλων υπηρεσιών δικτύου σε πραγματικό χρόνο, όπως η ρύθμιση της συχνότητας. Το βάρος παρέχει επίσης στο υδραυλικό σύστημα συλλογής σταθερή πίεση, η οποία μπορεί να συνδυαστεί με αντλίες μεταβλητής εκτόπισης στις WEC's για τον έλεγχο της δύναμης απόσβεσης.

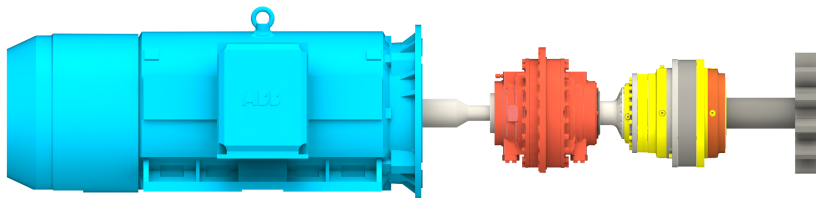
Η ΟΗΤ προσφέρει γενικές λύσεις PTO στους προγραμματιστές WEC με χαρακτηριστικά δύναμης απόσβεσης και ελέγχου φάσης που απαιτούνται για υψηλή απόδοση δέσμευσης ισχύος. Ο διακριτός έλεγχος της δύναμης απόσβεσης παρέχεται μέσω μιας διάταξης με πολλαπλές αντλίες σταθερής μετατόπισης συνδεδεμένες σε ένα κοινό ράφι. Υγρό υπό πίεση αντλείται από τους μετατροπείς κυματικής ενέργειας μέσω ενός υδραυλικού συστήματος σωληνώσεων προς τους υδραυλικούς κινητήρες σε ένα σύνολο μονάδων κίνησης που είναι τοποθετημένες γύρω από μια οδοντωτή σχάρα με ενσωματωμένο αντίβαρο στον πύργο συλλογής. Ένα εννοιολογικό σχέδιο της πλατφόρμας συλλογής με τις μονάδες κίνησης και το αντίβαρο παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί [3].



Σχήμα 1.18: Πλατφόρμα συλλογής της ΟΗΤ με αποθήκευση με βαρύτητα

Κάθε μονάδα κίνησης περιλαμβάνει έναν υδραυλικό κινητήρα, ένα γρανάζι,

μα γεννήτρια και ένα πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων 3 κατευθύνσεων με τη μορφή τροχού που συνδέει αυτά τα εξαρτήματα. Με αυτόν τον τρόπο ο συσσωρευτής μπορεί να φορτίζεται από τους υδραυλικούς κινητήρες ταυτόχρονα με την εκφόρτιση ή τη φόρτιση από τις γεννήτριες. Ο εννοιολογικός σχεδιασμός μιας μονάδας κίνησης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα [3].

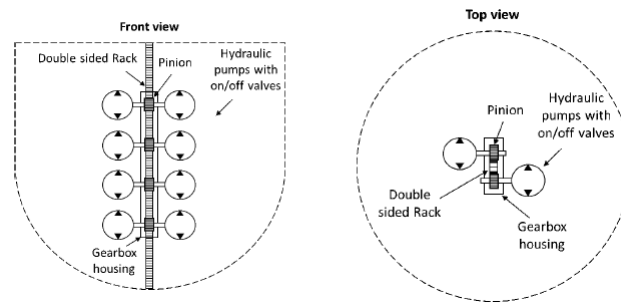


Σχήμα 1.19: Σχεδιασμός της μονάδας κίνησης πύργου της ΟΗΤ.

Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ ισχύος εισόδου και εξόδου είτε ανυψώνει είτε χαμηλώνει το βάρος για την αποθήκευση ή ανάκτηση ενέργειας. Η ροή εισόδου στους κινητήρες μεταβάλλεται ανάλογα με τις κυματικές κινήσεις και η ταχύτητα της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί ώστε η ισχύς εξόδου να αντιστοιχεί στη μέση συλληφθείσα ισχύ ανάλογα με την κατάσταση της θάλασσας. Η ισχύς εξόδου μπορεί επίσης να ελέγχεται ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβολές της ζήτησης στο δίκτυο, π.χ. για τη χρονική μετατόπιση της παραγωγής ενέργειας ανάλογα με τη συχνότητα του δικτύου. Σε ήπιες καταστάσεις θάλασσας με χαμηλή εισερχόμενη ισχύ από τη συστοιχία WEC, ο συσσωρευτής μπορεί να φορτίζεται από τη γεννήτρια με ισχύ από το δίκτυο κατά τη διάρκεια περιόδου χαμηλής ζήτησης, για να επιστρέψει όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Με αυτόν τον τρόπο τα έσοδα από τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να αυξηθούν από τη χρονική μετατόπιση της παραγωγής ενέργειας από τη συστοιχία κυματικής ενέργειας καθώς και από την αποθήκευση στο δίκτυο υπηρεσίες.

Ευνοούμενη από τη σταθερή πίεση στο σύστημα συλλογής, η ΟΗΤ είναι σε θέση να παρέχει λειτουργικότητα ΠΤΟ για τον έλεγχο της δύναμης απόσβεσης των μετατροπέων κυματικής ενέργειας με διακριτό τρόπο, χρησιμοποιώντας πολλαπλές αντλίες ακτινικού εμβόλου σταθερής μετατόπισης που συνδέονται μέσω οδοντωτών τροχών σε μια κοινή σχάρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.20 [4].





Σχήμα 1.20: Μπροστινή και άνω όψη της απολαβής ισχύος της ΟΗΤ.

Κάθε μονάδα αντλίας μπορεί να συνδεθεί ή να αποσυνδεθεί από το υδραυλικό κύκλωμα που είναι κοινό για όλες τις αντλίες και το οποίο έχει σταθερή πίεση, η οποία παρέχεται από το αντίβαρο. Με αυτόν τον τρόπο η συνολική μετατόπιση και, συνεπώς, η δύναμη που ασκείται στο ράφι μπορεί να μεταβάλλεται σε διακριτά βήματα. Για την αποφυγή κρουστικών φορτίων, η εμπλοκή και η αποσύνδεση των αντλιών πρέπει να γίνεται στα σημεία στροφής του ραφιού, δηλαδή όταν η ταχύτητα είναι ίση με μηδέν. Ο σχεδιασμός των επιλεγμένων ακτινικών εμβολοφόρων αντλιών καθιστά δυνατή την απεμπλοκή των αντλιών από το κύκλωμα χωρίς να κυκλοφορεί υγρό. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου απώλειες αντίστασης από τις αποσυνδεδεμένες μονάδες. Ως εκ τούτου, η διάταξη ελέγχου δύναμης πολλαπλών αντλιών είναι πολύ αποτελεσματική σε όλο το διαθέσιμο εύρος δύναμης.

## 1.3 CorPower

### 1.3.1 Γενικά

Η CorPower είναι μια εταιρεία που ειδικεύεται στην ανάπτυξη και την εμπορικοποίηση τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας από κύματα. Συγκεκριμένα, η εταιρεία αναπτύσσει και παράγει συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας. Η τεχνολογία της CorPower βασίζεται σε ένα ειδικό σύστημα βυθού, που εκμεταλλεύεται τις αλλαγές πίεσης που προκαλούνται από την κίνηση των κυμάτων, προκειμένου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Η τεχνολογία αυτή έχει ως στόχο την ανάπτυξη αποδοτικών και βιώσιμων λύσεων για την παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα, και μπορεί να χρη-

σιμοποιηθεί για την τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές ή για την υποστήριξη της ενεργειακής ανεξαρτησίας περιοχών με περιορισμένη πρόσβαση σε παραδοσιακές πηγές ενέργειας [5].

### 1.3.2 Επισκόπηση της τεχνολογίας

Η CorPower προσφέρει μια ελαφριά συσκευή απορρόφησης σημείων συντονισμού που απορροφά την ενέργεια από τη συνδυασμένη κίνηση ανύψωσης και κύματος. Ο σημαντήρας έχει ονομαστική ισχύ εξόδου 250 kW. Ένα αγκυροβόλιο ενός σημείου συνδέει το WEC με τον πυθμένα της θάλασσας. Μια πνευματική μονάδα προέντασης επιτρέπει στη σημαδούρα να έχει μικρό βάρος παρέχοντας την απαιτούμενη δύναμη για τη συγκράτηση της σημαδούρας στη θέση ισορροπίας. Ένα ελαφρύ ράφι διπλής όψης και ένα νέο ελαφρύ κιβώτιο ταχυτήτων, που ονομάζεται κιβώτιο ταχυτήτων Cascade, μετατρέπουν τη γραμμική κίνηση του ραφιού σε περιστροφή κατάλληλη για την κίνηση μιας συμβατικής ηλεκτρικής γεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων Cascade κατανέμει τη δύναμη απόσβεσης σε οκτώ γρανάζια, επιτρέποντας στο ράφι να έχει μικρό μέγεθος και μικρό βάρος. Ισοδύναμος αριθμός γραναζιών τοποθετείται σε κάθε πλευρά της οδοντωτής ράγας, δηλαδή τέσσερα γρανάζια σε κάθε πλευρά, γεγονός που επιτρέπει μια ισορροπημένη δύναμη.

Το κιβώτιο ταχυτήτων Cascade συνδέεται με δύο άξονες με δύο σύνολα σφονδύλων και γεννητριών. Ένας μηχανισμός ελεύθερου τροχού επιτρέπει την οδήγηση ενός σετ σφονδύλων και γεννητριών στην ανοδική κίνηση και του άλλου σετ στην καθοδική κίνηση. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη χρήση των σφονδύλων τόσο ως προσωρινή αποθήκευση ενέργειας για την εξομάλυνση της ισχύος όσο και ως μέσο εφαρμογής υψηλής δύναμης απόσβεσης χωρίς αύξηση του μεγέθους των γεννητριών. Μια νέα τεχνολογία ελέγχου φάσης με την ονομασία WaveSpring καθιστά το σύστημα εγγενώς συντονισμένο σε ένα ευρύ εύρος ζώνης αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση δέσμευσης ισχύος του μετατροπέα κυματικής ενέργειας χωρίς την ανάγκη για μεγάλη δύναμη μηχανής και για πληροφορίες και αλγόριθμο πρόβλεψης κυμάτων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, το WaveSpring έχει τη δυνατότητα να αποσυντονίζει τη συσκευή σε συνθήκες καταιγίδας. Ως αποτέλεσμα, το WaveSpring επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του μετατροπέα κυματικής ενέργειας και αυξάνει την επιβιωσιμότητα του συστήματος σε καταιγίδες. Στην εικόνα 1.21 παρουσιάζεται μια κομμένη άποψη του μετατροπέα κυμα-

τικής ενέργειας της CorPower με μεγέθυνση της απολαβής ισχύος και του κιβωτίου ταχυτήτων Cascade.

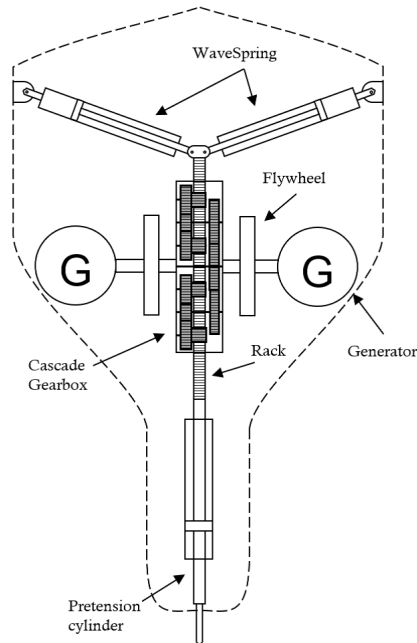


Σχήμα 1.21: Η σημαδούρα της CorPower με την απολαβή ισχύος στο εσωτερικό της [10].

### 1.3.3 Αρχή Λειτουργίας

Η CorPower αναπτύσσει έναν απορροφητή σημείου που περιλαμβάνει ένα ελατήριο προέντασης που παρέχει αμφίδρομη σύλληψη ισχύος, ένα κιβώτιο ταχυτήτων οδοντωτών τροχών και καταρράκτη που μετατρέπει τη γραμμική σε περιστροφική κίνηση, ένα διπλό σετ σφονδύλων και γεννητριών που παρέχει τόσο απόσβεση όσο και εξομάλυνση ισχύος και τη λεγόμενη τεχνολογία WaveSpring, η οποία δρα ως αρνητικό ελατήριο για τη μείωση της υδροστατικής ακαμψίας του σημαντήρα και καθιστά έναν ελαφρύ σημαντήρα να συντονίζεται με τα κύματα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Σχέδιο του ΠΤΟ της CorPower παρουσιάζεται στην εικόνα 1.22.

. Ο σημειακός απορροφητής της CorPower συλλαμβάνει ενέργεια από τη συνδυασμένη κίνηση των κυμάτων σε κύματα και κύματα ανύψωσης. Η σημαδούρα αγκυροβολεί στον πυθμένα της θάλασσας μέσω ενός μονοσήμαντου σχοινιού πρόσδεσης που συνδέεται με το ελατήριο αερίου προέντασης, το οποίο διατηρεί το σχοινί πρόσδεσης τεντωμένο τόσο κατά την ανοδική όσο και κατά την καθοδική κίνηση της σημαδούρας. Το ελατήριο αερίου προέντασης συνδέεται με το ράφι. Ένας άξονας με δύο σετ σφονδύλων και γεννήτρια περνάει μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων Cascade. Κάθε σετ συνδέεται με τον άξονα με ένα μονόδρομο έδρανο. Το ένα σετ ασφαλίζει στον άξονα κατά την ανοδική κίνηση, το άλλο σετ κατά την καθοδική κίνηση και κανένα από τα δύο αν η ταχύτητα του ρακόρ είναι μικρότερη από την ταχύτητα και των δύο σετ. Για παράδειγμα, όταν το ράφι αρχίζει να επιταχύνει



Σχήμα 1.22: Σχέδιο του αποζεύκτη ισχύος της CorPower [6]

προς τα πάνω και τα δύο σετ περιστρέφονται με τη δική τους ταχύτητα, και τα δύο σετ θα παραμείνουν απασφαλισμένα μέχρι η ταχύτητα του ραφιού να φτάσει την ταχύτητα του σετ που έχει σχεδιαστεί να απασφαλίζεται κατά την ανοδική κίνηση. Το σετ θα παραμείνει ενεργοποιημένο μέχρι το ράφι να αρχίσει να επιβραδύνει. Όταν συμβεί αυτό, το ράφι θα επιβραδύνει πιο γρήγορα από το αποσυνδεδεμένο σύνολο, το οποίο θα επιβραδύνει με ρυθμό ανάλογο της ροπής απόσβεσης από τη γεννήτρια, η οποία τώρα θα κινείται μόνο από την αποθηκευμένη ενέργεια στους σφόνδylους.

Παρομοίως, στο κάτω στέλεχος το άλλο σετ εμπλέκεται ή απεμπλέκεται ανάλογα με τη σχετική ταχύτητα του ραφιού και του σετ. Για να ενισχυθεί η κίνηση του σημαντήρα και η σύλληψη ισχύος, χρησιμοποιείται η λεγόμενη τεχνολογία WaveSpring που καθιστά το σύστημα εγγενώς συντονισμένο σε ένα ευρύ φάσμα κυματικών συχνοτήτων. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα άλλο σύστημα ελατηρίων αερίου, το οποίο είναι τοποθετημένο κάθετα στο ράφι και το οποίο αρχικά συμπιέζεται/προφορτίζεται όταν η σημαδούρα βρίσκεται σε μηδενική στάθμη θάλασσας. Για παράδειγμα, όταν η σημαδούρα κινείται προς τα πάνω, η γωνία μεταξύ της σχάρας και του ελατηρίου WaveSpring αυξάνεται και, ως εκ τούτου, το ελατήριο επεκτείνεται και ωθεί τη σημαδούρα προς τα πάνω. Ομοίως, όταν ο σημαντήρας κινείται προς τα κάτω, το ελατήριο WaveSpring ωθεί τον σημαντήρα προς τα κάτω.

## 1.4 Waves4Power

### 1.4.1 Γενικά

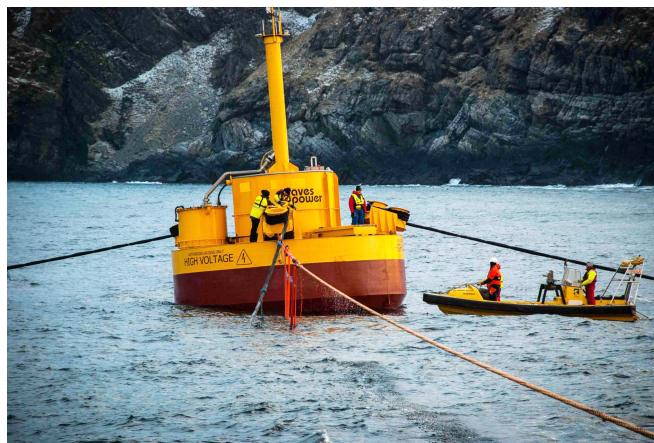
Η Waves4Power είναι μια εταιρεία που ειδικεύεται στην ανάπτυξη τεχνολογίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την κίνηση των κυμάτων της θάλασσας. Η εταιρεία αυτή επιδιώκει να αξιοποιήσει την ενέργεια των κυμάτων ως μια βιώσιμη πηγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τεχνολογία της Waves4Power συνήθως περιλαμβάνει συστήματα που τοποθετούνται στον βυθό της θάλασσας και χρησιμοποιούν ειδικούς αισθητήρες και αντλίες για να απορροφήσουν την ενέργεια από τα κύματα. Αυτή η ενέργεια μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τροφοδότηση ηλεκτρικού δικτύου ή για άλλες ενεργειακές ανάγκες.

Ο στόχος της Waves4Power είναι να προσφέρει βιώσιμες λύσεις για την παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα, συμβάλλοντας έτσι στην μείωση της εξάρτησης από τις παραδοσιακές, ρυπογόνες πηγές ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών θερμοκηπίου.

### 1.4.2 Επισκόπηση Τεχνολογίας

Η Waves4Power αναπτύσσει έναν μετατροπέα κυματικής ενέργειας με δύο σώματα που απορροφούν την ενέργεια των κυμάτων και αποτελείται από μια σημαδούρα με έναν μακρύ κατακόρυφο βυθισμένο σωλήνα κάτω από τη σημαδούρα με ανοικτά άκρα, ένα έμβολο νερού μέσα στη σημαδούρα που συνδέεται με ένα υδραυλικό σύστημα απόληψης ισχύος με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επί του σκάφους και ένα σύστημα πρόσδεσης που διατηρεί τη σημαδούρα σε θέση χωρίς να παρεμβαίνει στην κατακόρυφη κίνηση της σημαδούρας. Επιπλέον, το Waves4Power προσφέρει απλή λύση για την αποφυγή υψηλών δυνάμεων στα ακραία σημεία που αυξάνουν την επιβιωσιμότητα του συστήματος. Επί του παρόντος, η Waves4Power διεξάγει δοκιμές πλήρους κλίμακας της σημαδούρας 100kW στην περιοχή Runde στη Νορβηγία. Μια εικόνα του WEC στο Runde παρουσιάζεται παρακάτω.

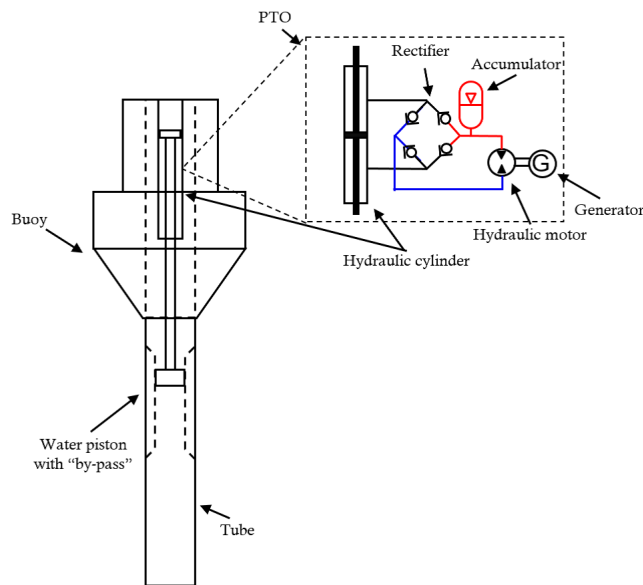


Σχήμα 1.23: Εικόνα του σημαντήρα W4P πλήρους κλίμακας, εγκατεστημένου στο Runde της Νορβηγίας [11]

### 1.4.3 Αρχή Λειτουργίας

Η συσκευή αντιπροσωπεύει μια γιγαντιαία αντλία όπου δύο σώματα δρουν το ένα εναντίον του άλλου. Το ένα σώμα του απορροφητή σημείων με δύο σώματα είναι η μονάδα σημαντήρα/σωλήνα και το άλλο σώμα είναι η αδρανής μάζα νερού είναι ο σωλήνας. Τα δύο σώματα έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν διαφορετικές φυσικές συχνότητες, κάνοντάς τα να ταλαντώνονται εκτός φάσης όταν υπάρχει διέγερση από τα κύματα και καμία απόσβεση από την απόλψη ισχύος. Η απόσβεση της σχετικής κίνησης από το ΠΤΟ τα αναγκάζει να αποκτήσουν την ίδια φάση και επιτρέπει τη δέσμευση ενέργειας από το σύστημα μετατροπής. Το σύστημα απολαβής ισχύος περιλαμβάνει έναν υδραυλικό κύλινδρο που χρησιμοποιείται ως αντλία, μια γέφυρα ανορθωτή που απολαμβάνει την απολαμβανόμενη ισχύ, έναν υδραυλικό συσσωρευτή που εξομαλύνει την απολαμβανόμενη ισχύ, έναν υδραυλικό κινητήρα, ο οποίος μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια, κινεί μια ενσωματωμένη ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ράβδος του εμβόλου του υδραυλικού κυλίνδρου συνδέεται με ένα μεγάλο έμβολο νερού που βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα. Η εννοιολογική σχεδίαση του σημαντήρα μαζί με το ΠΤΟ στο εσωτερικό του σημαντήρα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.24.

Η κίνηση του εμβόλου του νερού σε σχέση με τον σημαντήρα/σωλήνα αποσβένεται με την εφαρμογή πίεσης στο υδραυλικό σύστημα, η οποία κάνει το έμβολο του νερού να τραβάει τη στήλη του νερού, ακολουθώντας την κίνηση του σημαντήρα με κάποια διαφορά φάσης. Εάν δεν υπάρχει α-



Σχήμα 1.24: Σχέδιο του μετατροπέα κυματικής ενέργειας του W4P με τον αποξεύκτη ισχύος του [8].

πόσβεση, το έμβολο νερού και η στήλη νερού θα παραμείνουν ακίνητα. Επομένως, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ της μάζας του νερού και της μονάδας του σημαντήρα/σωλήνα θα είναι ίση με την ταχύτητα της μονάδας του σημαντήρα/σωλήνα. Ωστόσο, εφόσον δεν υπάρχει δύναμη απόσβεσης, δεν θα υπάρχει συλλαμβανόμενη ισχύς. Αυξάνοντας το πλάτος της δύναμης απόσβεσης, μειώνεται η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο σωμάτων και τελικά κλειδώνει τα δύο σώματα μεταξύ τους, καθιστώντας τη διαφορά ταχύτητας ίση με μηδέν, άρα δεν συλλαμβάνεται ισχύς. Επομένως, το πλάτος της δύναμης απόσβεσης στο έμβολο του νερού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ δύο ακραίων τιμών, προκειμένου να έχουμε σύλληψη ισχύος. Για την επίλυση του προβλήματος των τελικών φραγμών, το κεντρικό τμήμα του σωλήνα, κατά μήκος του οποίου ολισθαίνει το έμβολο, εξογκώνεται και στα δύο άκρα για να περιορίσει τη διαδρομή του εμβόλου. Το έμβολο νερού λειτουργεί στο στενωμένο τμήμα του σωλήνα. Τα μεγάλα κύματα αναγκάζουν το έμβολο του νερού να κινηθεί έξω από τη στένωση, γεγονός που αφήνει το νερό να ρέει γύρω από το έμβολο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα υψηλά φορτία διακοπής στο τέλος, τα οποία αποτελούν σημαντική δυσκολία για τους μετατροπείς κυματικής ενέργειας.

## 1.5 Προσαρμογή των Συστημάτων άντλησης Ενέργειας από Θαλάσσια κύματα

Η προσαρμογή των συστημάτων άντλησης ενέργειας από θαλάσσια κύματα αναφέρεται στη βελτιστοποίηση και την προσαρμογή τέτοιων συστημάτων προκειμένου να αυξήσουν την απόδοσή τους, την αξιοπιστία τους και την αντοχή τους στις αντίξοες καιρικές συνθήκες της θάλασσας. Αυτή η προσαρμογή μπορεί να συμπεριλαμβάνει τις ακόλουθες δράσεις [7]:

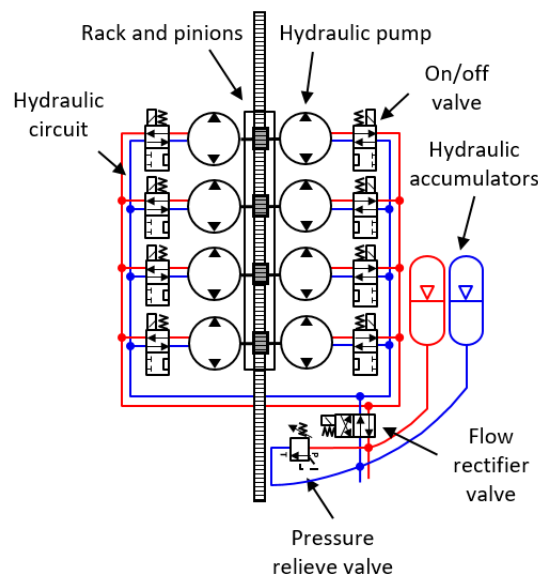
1. Σχεδιασμός και Μηχανική Βελτιστοποίηση: Ο σχεδιασμός των συστημάτων άντλησης πρέπει να είναι προσεκτικός και προσαρμοσμένος στις ειδικές συνθήκες της θάλασσας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση των δομικών στοιχείων, των αισθητήρων, και των μηχανικών συστημάτων για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης.
2. Αντοχή: Τα συστήματα που λειτουργούν στο περιβάλλον της θάλασσας πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν στην έκθεση στα ακραία κλιματικά φαινόμενα, τα κύματα, τις θαλάσσιες καταστάσεις και την θαλάσσια αλατότητα.
3. Συντήρηση και Αποκατάσταση: Τα συστήματα άντλησης ενέργειας από κύματα πρέπει να υποβάλλονται σε τακτική συντήρηση και επισκευές, προκειμένου να διατηρούν τη λειτουργικότητά τους και να αντιμετωπίζουν τυχόν βλάβες.
4. Βελτιστοποίηση της Απόδοσης: Οι τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από κύματα πρέπει να βελτιστοποιούν την απόδοσή τους ώστε να είναι οικονομικά ανταγωνιστικές με άλλες πηγές ενέργειας.

Η προσαρμογή των συστημάτων άντλησης ενέργειας από θαλάσσια κύματα αποτελεί σημαντικό στάδιο προς την επίτευξη της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας της τεχνολογίας αυτής, επιτρέποντας την αξιοποίησή της ως πηγή καθαρής ενέργειας.

Οι αρχικές μονάδες απόληψης ισχύος της CorPower και της Waves4Power τροποποιούνται προκειμένου να ενσωματωθούν στο σύστημα συλλογής της OHT, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.25.

Η ενσωμάτωση της σημαδούρας της CorPower με το υδραυλικό σύστημα συλλογής της OHT γίνεται με την αντικατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων





Σχήμα 1.25: Ένα σύστημα WEC[9].

Cascade, των διπλών σφονδύλων και των γεννητριών με πολλαπλές αντλίες σταθερής εκτόπισης που συνδέονται στο ίδιο ρακόρ με ένα γρανάζι για κάθε αντλία. Σε αντίθεση με το αρχικό ΠΤΟ της CorPower, στο οποίο μόνο ένα σετ σφονδύλων και γεννήτριας εμπλέκεται με τη σχάρα κάθε φορά, στη διάταξη με τις πολλαπλές αντλίες, όλες οι αντλίες εμπλέκονται πάντα με τη σχάρα, δηλαδή περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, αλλά μόνο επιλεγμένος αριθμός αντλιών ασκεί δύναμη απόσβεσης στη σχάρα κάθε φορά. Αυτό γίνεται με εμπλεκόμενες και απεμπλεκόμενες αντλίες από το υδραυλικό κύκλωμα για τον έλεγχο της εφαρμοζόμενης απόσβεσης στο ράφι με βάση μια επιλεγμένη στρατηγική ελέγχου. Αυτή η διάταξη αντλιών συνδυάζεται με τη μονάδα CorPowers WaveSpring που παρέχει έλεγχο φάσης και προένταση αερίου ελατηρίου για την αμφίδρομη σύλληψη ισχύος.

Παρομοίως, η ενσωμάτωση της σηματοδούρας της Waves4Power με το σύστημα συλλογής της OHT γίνεται με την αντικατάσταση του υδραυλικού κυλίνδρου με μια σχάρα και πολλαπλά γρανάζια με κάθε γρανάζι συνδεδεμένο με μια ακτινική εμβολοφόρο αντλία σταθερής μετατόπισης. Σε αντίθεση με τον αρχικό ΠΤΟ με υδραυλικό έμβολο που δεν μπορεί να παρέχει έλεγχο της δύναμης απόσβεσης, στη νέα διάταξη, η σχάρα είναι άκαμπτα συνδεδεμένη με το έμβολο νερού και η δύναμη απόσβεσης μπορεί να ελεγχθεί με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των μονάδων της αντλίας. Η αρχική σηματοδούρα W4P παράγει ηλεκτρική ενέργεια επί του σκάφους. Αντιθέτως,

η ΟΗΤ χρησιμοποιεί υδραυλικούς σωλήνες για τη συλλογή ενέργειας με τη μορφή υγρού υπό πίεση, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε μια κεντρική μονάδα της διάταξης. Ως εκ τούτου, ο υδραυλικός κινητήρας και η γεννήτρια αφαιρούνται από τον αρχικό ΠΟΤ. Επιπλέον, προστίθεται ένας συσσωρευτής χαμηλής πίεσης στον αποζεύκτη ισχύος Waves4Power, λόγω του γεγονότος ότι οι αντλίες ακτινικού εμβόλου απαιτούν ορισμένη πίεση φόρτισης σε αντίθεση με τους υδραυλικούς κυλίνδρους. Τέλος, στην περίπτωση του Waves4Power, οι βαλβίδες, που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση κάθε αντλίας, είναι εξοπλισμένες με ένα ακόμη λειτουργικότητα.

Όταν το έμβολο του νερού βγαίνει από το στενό τμήμα του σωλήνα, η δύναμη που ασκείται σε αυτό πρέπει να μειωθεί ώστε να μπορεί να κινηθεί ξανά στο στενό τμήμα, διαφορετικά το έμβολο θα κολλήσει στο ευρύτερο τμήμα του σωλήνα. Η δύναμη που ασκείται στο έμβολο νερού με τη νέα διάταξη μειώνεται με την αποσύνδεση όλων των μονάδων της αντλίας. Στην αρχική ΠΤΟ του Waves4Power, δεν υπήρχε ανάγκη για επιπλέον λειτουργικότητα, καθώς η πίεση στο κύκλωμα ρυθμίζεται από την ισχύ εισόδου από τον κύλινδρο και την ισχύ εξόδου από τη γεννήτρια. Ως εκ τούτου, όταν το έμβολο νερού βγαίνει από τη στένωση, η ισχύς εισόδου μειώνεται, ενώ η γεννήτρια συνεχίζει να παράγει ισχύ, με αποτέλεσμα η πίεση στο υδραυλικό σύστημα να μειώνεται σταδιακά. Στην περίπτωση του συστήματος της ΟΗΤ, η πίεση στη συλλογή ρυθμίζεται στον κεντρικό πύργο συλλογής και είναι πάντα λίγο πολύ σταθερή, ακόμη και όταν το έμβολο του νερού βγαίνει από τη στένωση και δεν υπάρχει ισχύς εισόδου στο σύστημα.

## **1.6 Επισκόπηση του υδραυλικού συστήματος συλλογής και του πύργου**

Το υδραυλικό σύστημα συλλογής με σταθερή πίεση από την αποθήκευση βαρύτητας και τα χαρακτηριστικά ελέγχου της δύναμης απόσβεσης και της φάσης για τις μονάδες WEC έχουν σχεδιαστεί για να συλλαμβάνουν και να μεταφέρουν την ισχύ από τις σημαδούρες στον κεντρικό πύργο με τη μορφή ρευστού υπό πίεση χωρίς να υποβαθμίζουν την απόδοση συλλογής ισχύος ή την αποδοτικότητα του συστήματος. Το σύστημα συλλογής και ο πύργος διαστασιολογούνται με βάση τις ακόλουθες κύριες προδιαγραφές [11]:

- 20 MW μέγιστη υδραυλική ισχύς εισόδου από τη συστοιχία WEC
- 10 MW μέγιστη συνεχής παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο
- χωρητικότητα αποθήκευσης 100 kWh με βάρος 500 τόνων και ύψος ανύψωσης 70 μέτρων, αντίστοιχα σε χρόνο εκφόρτισης περίπου 35 δευτερολέπτων



# Κεφάλαιο 2

## Θεωρία

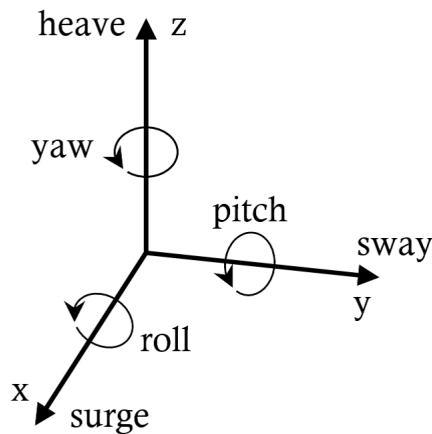
### 2.1 Υδροδυναμικό Μοντέλο

Στην ενότητα αυτή καθορίζονται οι βασικές έννοιες της γραμμικής θεωρίας αλληλεπίδρασης κύματος-σώματος.

#### 2.1.1 Συντεταγμένες

Παρόμοια με κάθε άκαμπτο σώμα, η δυναμική μιας σημαδούρας που αλληλεπιδρά με τα κύματα χαρακτηρίζεται από έξι βαθμούς ελευθερίας: μια μετατόπιση προς κάθε κατεύθυνση ενός ορθογώνιου συστήματος 3 αξόνων και μια περιστροφή γύρω από κάθε άξονα. Οι μετατοπίσεις στη διεύθυνση  $x$ ,  $y$  και  $z$  ονομάζονται συχνότερα ως κίνηση σε κύμα, ταλάντωση και ανύψωση, αντίστοιχα.

Ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας τύπου σημειακής απορρόφησης συλλαμβάνει ενέργεια κυρίως από την ταλαντευόμενη κίνηση στο κύμα. Δεδομένου ότι τόσο οι WEC της Waves4Power όσο και της CorPower είναι αυτού του τύπου, η δυναμική του σημαντήρα σε κυματισμό θα είναι το κύριο αντικείμενο της ανάλυσης. Επιπλέον, το μοντέλο προσομοίωσης, που παραλήφθηκε από την Waves4Power, λαμβάνει υπόψη μόνο την κίνηση ανύψωσης και το μοντέλο προσομοίωσης της CorPower λαμβάνει υπόψη την κίνηση ανύψωσης, καθώς και την κίνηση κύματος. Ωστόσο, για μια τοποθεσία με μεγάλο βάθος, όπως αυτό των 50 μέτρων, που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή, η κίνηση κύματος δεν επηρεάζει πολύ τη λήψη ισχύος και επομένως μπορεί επίσης να αγνοηθεί.



Σχήμα 2.1: Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων όπου φαίνονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας.

### 2.1.2 Κύματα

Τα ωκεάνια κύματα είναι αποτέλεσμα του ανέμου που φυσά πάνω από την επιφάνεια του νερού. Γενικά, προσδιορίζονται ως ακανόνιστα. Στη θεωρία των γραμμικών κυμάτων ένα ακανόνιστο κύμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμική υπέρθεση ενός συνόλου κανονικών κυμάτων.

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t - k_i \xi(x, y) + \phi_i) \quad (2.1)$$

όπου  $t$  είναι ο χρόνος,  $(x, y)$  η θέση κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης του κύματος,  $\phi_i$  είναι τυχαίες φάσεις ομοιόμορφα κατανεμημένες μεταξύ  $0$  και  $2\pi$ ,  $\omega_i$  είναι γωνιακές συχνότητες,  $k_i$  είναι κυματαριθμοί και  $a_i$  είναι τυχαία πλάτη τα οποία θεωρούνται κατανεμημένα κατά Rayleigh με μέση τετραγωνική τιμή:

$$E[a_i^2] = 2S(\omega)\Delta\omega_i \quad (2.2)$$

όπου  $S(\omega)$  είναι το φάσμα των κυμάτων και  $\Delta\omega_i$  είναι το βήμα συχνότητας μεταξύ δύο συνιστωσών συχνότητας. Τα πλάτη μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά ως εξής:

$$a_i \approx \sqrt{2 \cdot S(\omega) \cdot \Delta\omega_i} \quad (2.3)$$

Τα ωκεάνια κύματα είναι γενικά διασκορπιστικά, πράγμα που σημαίνει ότι κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα

φάσης. Η ταχύτητα φάσης είναι η ταχύτητα, με την οποία ταξιδεύει η φάση κάθε συνιστώσας συχνότητας του κύματος. Ορίζεται ως:

$$u_p = \frac{s}{t} \quad (2.4)$$

όπου  $s$  είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο  $t$ . Διαισθητικά μπορεί να βρεθεί ότι η ταχύτητα φάσης είναι ανάλογη της γωνιακής συχνότητας και αντίστροφα ανάλογη του μήκους κύματος,

$$u_p = \frac{\omega}{k} \quad (2.5)$$

Η γωνιακή συχνότητα και ο κυματαριθμός συνδέονται μέσω της εξίσωσης διασποράς [3]:

$$\omega^2 = gk \tan(kh) \quad (2.6)$$

όπου  $g$  η σταθερά βαρύτητας και  $h$  το βάθος του νερού. Για επαρκώς βαθύ νερό ( $kh \gg 1$ ) η εξίσωση διασποράς ανάγεται σε:

$$\omega^2 = gk \quad (2.7)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση διασποράς για βαθιά νερά, προκύπτει ότι η ταχύτητα φάσης είναι:

$$u_p = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (2.8)$$

Λόγω του φαινομένου της διασποράς η παρεμβολή δύο ή περισσότερων ημιτονοειδών κυμάτων με ελαφρώς διαφορετικά μήκη κύματος οδηγεί σε ένα μοτίβο παλμών, που ονομάζεται ομάδα κυμάτων, η οποία κινείται με ταχύτητα ομάδας  $U_g$ . Η ταχύτητα ομάδας ορίζεται τυπικά ως εξής:

$$u_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{u_p}{2} \quad (2.9)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση διασποράς για βαθιά νερά, προκύπτει:

$$u_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{u_p}{2} \quad (2.10)$$

Η ταχύτητα ομάδας είναι σημαντική, καθώς είναι η ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η ενέργεια από το κύμα. Στην παρούσα διατριβή, τα κύματα θεωρούνται μονοκατευθυντικά. Αυτό σημαίνει ότι σε μια συστοιχία μετατροπών κυματικής ενέργειας το ίδιο κύμα θα χτυπήσει κάθε σηματοδούρα μετά

από ορισμένη καθυστέρηση με βάση τη θέση των σηματοδούρων στη συστοιχία σε σχέση με μια αναφορά και τη διεύθυνση του κύματος. Η απόσταση της σηματοδούρας από το κύμα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\xi_{(x,y)} = x \cos(\beta) + y \sin(\beta) \quad (2.11)$$

όπου  $b$  είναι η γωνία του κύματος σε σχέση με μια επιλεγμένη κατεύθυνση αναφοράς. Το φάσμα των κυμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί από τις περιβαλλοντικές παραμέτρους σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  και μέγιστη περίοδος κύματος  $T_p$ . Το φάσμα προτείνεται στο [14], και διατυπώνεται αρχικά ως:

$$S(\omega) = \frac{a_j g^2}{\omega^2} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \right] \gamma \quad (2.12)$$

όπου  $a_j$  είναι μια μη διαστατική μεταβλητή που είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και του μήκους του φετση,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα του κύματος,  $\omega_p$  είναι η γωνιακή συχνότητα αιχμής του κύματος,  $\gamma$  είναι ο συντελεστής ενίσχυσης της αιχμής του κύματος και  $\Gamma$  είναι η  $\gamma$ -συνάρτηση που δίνεται από:

$$\Gamma = \exp \left[ -\left( \frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sqrt{2\sigma}} \right)^2 \right] \sigma = \begin{cases} 0.07 & , \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & , \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.13)$$

όπου  $\sigma$  καλείται συντελεστής ενίσχυσης κορυφής. Ωστόσο, όπως φαίνεται από αυτή την αναπαράσταση του φάσματος δεν ενσωματώνει το σημαντικό ύψος κύματος. Μια άλλη μορφή του φάσματος ως συνάρτηση του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  και της γωνιακής συχνότητας κύματος  $\omega$  είναι η εξής:

$$S(\omega) = A_\gamma \frac{5}{16} H_s^2 \frac{\omega_p^4}{\omega^5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \gamma^\Gamma \quad (2.14)$$

όπου  $A_\gamma$  είναι ένας κανονικοποιητικός παράγοντας που ισούται με:

$$A_\gamma = 1 - 0.289 \ln(\gamma) \quad (2.15)$$

Σύμφωνα με το [22], το φάσμα με  $\gamma = 3,3$  είναι ένα λογικό μοντέλο για το:

$$3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \quad (2.16)$$

και θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή εκτός του διαστήματος. Το



[22] προτείνει επίσης τη χρήση της ακόλουθης τιμής για την παράμετρο σχήματος κορυφής όταν δεν δίνεται συγκεκριμένη τιμή.

$$\gamma = \begin{cases} 5 & , \quad \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \cdot \frac{T_p}{H_s}\right) & , \quad 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \\ 1 & , \quad \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \geq 5 \end{cases} \quad (2.17)$$

Η μέγιστη τιμή του φάσματος ισχύος εμφανίζεται στο  $\omega = \omega_p$  και είναι ίση με:

$$S_{\max} = A_\gamma \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{\omega_p} e^{-\frac{5}{4\gamma}} \quad (2.18)$$

Προκειμένου να συλλεχθεί περισσότερη ενέργεια από τα κύματα, είτε η φυσική συχνότητα του μετατροπέα κυματικής ενέργειας πρέπει να συντονίζεται στη συχνότητα κάθε εισερχόμενου κύματος, είτε το εύρος ζώνης του WEC πρέπει να είναι ρυθμιζόμενο ώστε να καλύπτει το εύρος συχνοτήτων του φάσματος των κυμάτων σε κάθε θαλάσσια κατάσταση, είτε το εύρος ζώνης του WEC πρέπει να είναι αρκετά ευρύ ώστε να καλύπτει το εύρος συχνοτήτων όλων των θαλάσσιων σε μια δεδομένη θαλάσσια περιοχή.

Η ενέργεια ενός κύματος ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας είναι:

$$E = \rho g \int_0^\infty S(\omega) d\omega \quad (2.19)$$

Το σημαντικό ύψος κύματος, εκτός του ότι ορίζεται ως το μέσο ύψος του υψηλότερου τρίτου των κυμάτων, ορίζεται επίσης ως το τετραπλάσιο της τετραγωνικής ρίζας του ολοκληρώματος της συνάρτησης πυκνότητας ισχύος ως προς τη συχνότητα,

$$H_g = 4 \sqrt{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \quad (2.20)$$

Επομένως, η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας ως συνάρτηση του σημαντικού ύψους κύματος είναι:

$$E = \rho g \frac{H_g^2}{16} \quad (2.21)$$

Καθώς τα κύματα διαδίδονται, μεταφέρουν ενέργεια με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα ομάδας  $U_g$ . Η μεταφορά ενέργειας ορίζεται ως ισχύς ανά μονάδα πλάτους του μετώπου κύματος. Μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο της

ταχύτητας ομάδας και της ενέργειας του κύματος.

$$J = u_g E = \frac{\rho g^2}{64} H_s^2 T_e \quad (2.22)$$

όπου  $T_e$  είναι η περίοδος της κυματικής ενέργειας. Η περίοδος κυματικής ενέργειας μπορεί να ερμηνευθεί ως η περίοδος ενός κανονικού κύματος που έχει το ίδιο σημαντικό ύψος κύματος και την ίδια πυκνότητα ισχύος με την εξεταζόμενη ακανόνιστη θαλάσσια κατάσταση. Τυπικά ορίζεται ως:

$$T_e = 2\pi \frac{\int_0^\infty \omega^{-1} S(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \quad (2.23)$$

Η περίοδος ενέργειας και η περίοδος αιχμής σχετίζονται μεταξύ τους με μια προσεγγιστική σχέση για το φάσμα:

$$\frac{T_e}{T_p} = \frac{4.2 + \gamma}{5 + \gamma} \quad (2.24)$$

Ένας άλλος συχνά χρησιμοποιούμενος εκτιμητής κυματικής περιόδου στην κυματική ενέργεια είναι η περίοδος διέλευσης του μηδενός,  $T_z$ , η οποία ορίζεται τυπικά ως εξής:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega}} \quad (2.25)$$

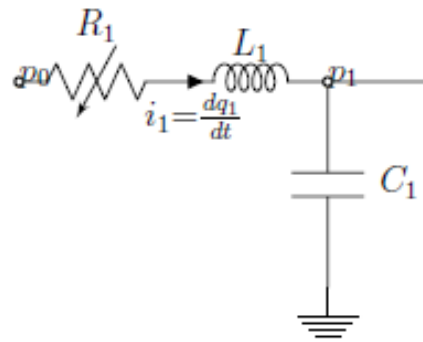
Η περίοδος μηδενικής διέλευσης και η περίοδος αιχμής σχετίζονται μεταξύ τους με μια προσεγγιστική σχέση για το φάσμα:

$$\frac{T_z}{T_p} = \frac{5 + \gamma}{11 + \gamma} \quad (2.26)$$

## 2.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα-Παραμετρικό Μοντέλο

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση με βάση τις παραμέτρους ως ένας τρόπος βελτίωσης της ακρίβειας των μοντέλων υδραυλικών σωλήνων. Ένας υδραυλικός σωλήνας μπορεί να αναπαρασταθεί από διαδοχικά συνδεδεμένα βασικά δομικά στοιχεία, που ονομάζονται τεμάχια, τα οποία αποτελούνται από συνιστώσες συμπίεστότητας, επαγωγής και τριβής. Στην παρακάτω εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα μοντέλο ενός όγκου με χρήση ηλεκτρικής αναλογίας.

Οι εξισώσεις του παραπάνω μοντέλου είναι:



Σχήμα 2.2: Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Μοντέλο Ροής.

$$\Delta p(t) = p_0(t) - p_1(t) = R_1 q_1(t) + L_1 \frac{dq_1(t)}{dt} \quad (2.27)$$

$$\frac{dq_1(t)}{dt} = \frac{1}{C} q_1(t)$$

όπου  $R_1 q_1(t)$  είναι η αντίσταση του ρευστού που εξαρτάται από τη γεωμετρία του σωλήνα, τις ιδιότητες του ρευστού και τη ροή,  $L_1$  είναι η αδράνεια του ρευστού και  $C_1$  είναι η χωρητικότητα του ρευστού. Για στρωτή ροή, η αντίσταση του ρευστού είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του σωλήνα και τις ιδιότητες του ρευστού.

Για κυκλικό σωλήνα:

$$R_f = \frac{128\rho\nu l}{\pi D^4} \quad (2.28)$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού είναι το κινηματικό ιξώδες και  $l$  είναι το μήκος του τμήματος του σωλήνα. Η αδράνεια του ρευστού  $L_f$  είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρευστού και του μήκους  $l$  της διατομής του σωλήνα και αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας της διατομής  $A$ .

$$L_f = \rho \frac{l}{A} \quad (2.29)$$

Υπάρχουν δύο παράγοντες που συμβάλλουν στη χωρητικότητα του ρευστού. Είναι η συμμόρφωση του σωλήνα και η συμπίεστικότητα του ρευστού. Υποθέτουμε ότι ο σωλήνας είναι άκαμπτος και συνεπώς δεν συμβάλλει στη χωρητικότητα του ρευστού. Η συμπίεστικότητα του ρευστού αντιπροσωπεύεται από μια γνωστή παράμετρο, που ονομάζεται μέτρο όγκου. Το bulk modulus είναι μια σταθερά/ιδιότητα κάθε ρευστού που εκφράζει τη δυσκαμψία του ρευστού. Επομένως, η χωρητικότητα του ρευστού είναι αντιστρόφως

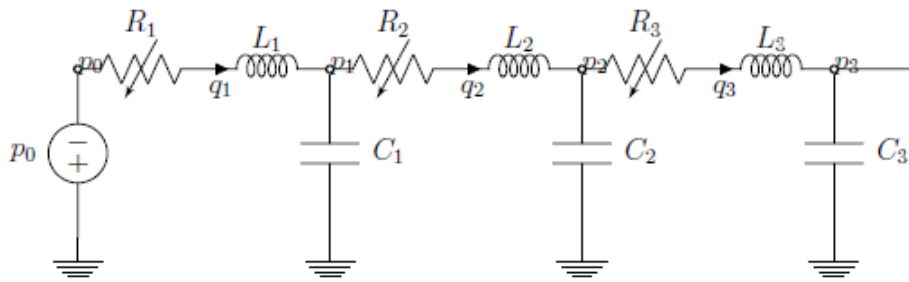
ανάλογη του bulk modulus και δίνεται από τη σχέση [19]:

$$C_f = \frac{V_f}{\beta} \quad (2.30)$$

όπου  $V_f$  είναι ο όγκος του τμήματος του σωλήνα. Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, το κομμάτι είναι ένα σύστημα δεύτερης τάξης. Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος:

$$\frac{P_1(s)}{P_0} = \frac{1/LC}{s^2 + R/Ls + 1/LC} \quad (2.31)$$

όπου  $L$ ,  $C$  και  $R$  είναι αντίστοιχα η αυτεπαγωγή, η χωρητικότητα και η αντίσταση του ρευστού. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η φυσική συχνότητα ενός τμήματος σωλήνα δεν εξαρτάται από τη διάμετρό του. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το μοντέλο ενός σωλήνα με τρία κομμάτια.



Σχήμα 2.3: Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός σωλήνα με 3 διαφορετικές διατομές

# Κεφάλαιο 3

## Μοντέλα Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας

### 3.1 Γενικά

Η κυματική ενέργεια είναι μια άφθονη και ανανεώσιμη πηγή καθαρής ενέργειας που διαθέτει τεράστιες δυνατότητες για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών του κόσμου. Για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα μετατροπών κυματικής ενέργειας. Τα μοντέλα αυτά, σχεδιασμένα με πολυπλοκότητα και ακρίβεια, αποσκοπούν στην αποτελεσματική σύλληψη της ενέργειας των ωκεάνιων κυμάτων και τη μετατροπή της σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διερευνήσουμε τους διάφορους τύπους μετατροπών κυματικής ενέργειας, τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις τους, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας.

#### 1. Ταλαντευόμενη στήλη νερού (OWC):

Το μοντέλο OWC είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους μετατροπείς κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιεί την άνοδο και την πτώση του νερού μέσα σε έναν μερικώς βυθισμένο θάλαμο για την παραγωγή ενέργειας. Καθώς τα κύματα εισέρχονται στον θάλαμο, συμπιέζουν τον αέρα στο εσωτερικό του, οδηγώντας έναν στρόβιλο που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι OWC είναι σχετικά απλοί στην κατασκευή, τη συντήρηση και φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς δεν περιλαμβάνουν τη χρήση κινητών εξαρτημάτων κάτω από το νερό.

#### 2. Σημειακός απορροφητής:

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας που absorber είναι πλωτές κατασκευές που συλλαμβάνουν την κυματική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από μια πλωτή δομή που συνδέεται με μια βυθισμένη μάζα και ένα σύστημα απόληψης ισχύος. Καθώς περνούν τα κύματα, η πλωτή δομή κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω, η οποία αντλεί υδραυλικό υγρό μέσω ενός συστήματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο του σημειακού απορροφητή είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για υπεράκτια ανάπτυξη λόγω του συμπαγούς σχεδιασμού του και της προσαρμοστικότητάς του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες κύματος.

3. Μετατροπείς ταλαντευόμενου κύματος κύματος (OWSC):

Οι συσκευές OWSC χρησιμοποιούν ένα υδραυλικό έμβολο συνδεδεμένο με μια γεννήτρια που επιτρέπει την αμοιβαία κίνηση των κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με κάθε κύμα, ο υδραυλικός κύλινδρος κινείται προς τα πίσω και προς τα εμπρός, οδηγώντας τη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετατροπείς OWSC έχουν υψηλή απόδοση και είναι σε θέση να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού κύματος, καθιστώντας τους μια στιβαρή επιλογή για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας.

4. Αποσβεστήρες:

Οι εξασθενητές είναι οι μακρύτεροι μετατροπείς κυματικής ενέργειας, που συνήθως αποτελούνται από πολλαπλά πλωτά τμήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα τμήματα αυτά κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο λόγω της κίνησης των κυμάτων, παράγοντας υδραυλική πίεση που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι εξασθενητές έχουν μεγάλη περιοχή δέσμευσης ενέργειας και μπορούν να αξιοποιήσουν την κυματική ενέργεια από πολλαπλές κατευθύνσεις, καθιστώντας τους ιδιαίτερα αποδοτικά και αξιόπιστα μοντέλα για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας.

5. Μετατροπείς κύματος:

Οι μετατροπείς κύματος μοιάζουν με υποβρύχια έμβολα, αξιοποιώντας την κυματική ενέργεια μέσω της κίνησης της επιφάνειας της θάλασσας μπρος-πίσω. Αυτοί οι μετατροπείς αποτελούνται από μια σειρά θαλάμων που συνδέονται με στενά ανοίγματα μέσα από τα οποία ταλαντώνεται το νερό. Η κίνηση του νερού κινεί τουρμπίνες που συνδέονται με γεννήτριες, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Ενώ οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας υπόσχονται πολλά για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, αντιμετωπίζουν επίσης ορισμένες προκλήσεις. Ένα σημαντικό εμπόδιο είναι η σκληρή και απρόβλεπτη φύση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, η οποία υποβάλλει τους μετατροπείς σε υψηλές δυνάμεις, διάβρωση και πιθανή βιολογική ρύπανση. Αυτές οι προκλήσεις καθιστούν αναγκαία τη συνεχή συντήρηση και την εξέταση της ανθεκτικότητας κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων μετατροπών κυματικής ενέργειας.

Συμπερασματικά, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα μετατροπών κυματικής ενέργειας για την αξιοποίηση της τεράστιας ισχύος των ωκεάνιων κυμάτων. Από τις ταλαντευόμενες στήλες νερού έως τους σημειακούς απορροφητές, κάθε μοντέλο προσφέρει τα μοναδικά του πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά. Ενώ τα μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω αναδεικνύουν την ποικιλομορφία των μετατροπών κυματικής ενέργειας, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη θα συνεχίσει να βελτιώνει και να προάγει αυτές τις τεχνολογίες. Με συνεχείς προσπάθειες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των μετατροπών κυματικής ενέργειας, μπορούμε να προσβλέπουμε σε ένα βιώσιμο μέλλον που θα τροφοδοτείται από καθαρή κυματική ενέργεια.

### 3.2 Συσκευές Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας

Επί του παρόντος, περισσότερα από εκατό έργα κυματικής ενέργειας βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης και ο αριθμός αυτός είναι πάντα μεγαλύτερος, γεννιούνται μεγαλύτερες ιδέες και υποβάλλονται προτάσεις για βελτίωση των προηγούμενων.

Υπάρχουν δύο βασικές ταξινομήσεις, οι οποίες είναι γενικές ταξινομήσεις που διακρίνουν τις συσκευές χρήσης ενέργειας κύματος.

1. Ταξινομούνται ανάλογα με τον τόπο και το βάθος όπου είναι κατασκευασμένα για να λειτουργούν.
2. Ταξινομούνται σύμφωνα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή κυματικής ενέργειας από τον ωκεανό. Παρακάτω θα μιλήσουμε

λεπτομερώς για τις κατηγορίες συσκευών που υπάρχουν σύμφωνα με τις κατηγορίες που αναφέρονται παραπάνω.

### 3. Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης

Οι τρεις κατηγορίες με βάση την τοποθεσία στην οποία βρίσκεται η κάθε εγκατάσταση είναι η χερσαία, η παράκτια και η υπεράκτια.

#### 3.2.1 Συσκευές χερσαίας ζώνης (onshore)

Αυτές οι εγκαταστάσεις είναι συνήθως ενσωματωμένες στην ακτογραμμή σε βάθος μικρότερο από 15 μέτρα, γεγονός που διευκολύνει την εγκατάσταση και τη συντήρηση. Δεν απαιτούν καλώδια αγκυροβόλησης ή υποβρύχιας ηλεκτρικής μετάδοσης. Ωστόσο, λόγω της θέσης τους κοντά στην ξηρά, χάνουν σημαντικά την ισχύ τους και ο οικισμός τους περιορίζεται συνήθως από τη γεωλογία της ακτογραμμής. Η πιο κοινή τεχνική σε αυτήν την περιοχή είναι ο τύπος της δονούμενης στήλης νερού.

#### 3.2.2 Συσκευές παράκτιας ζώνης (nearshore)

Το βάθος εγκατάστασης αυτής της συσκευής δεν υπερβαίνει τα 25 μέτρα και η συσκευή είναι σχετικά κοντά στην ακτή (περίπου 500 μέτρα). Αυτές οι συσκευές έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις χερσαίες συσκευές και αντιμετωπίζουν επίσης τη δυνατότητα για μεγαλύτερα κύματα από αυτά που βρίσκονται στην ακτογραμμή. Ειδικές κατασκευές αναπτύσσονται συνήθως με βάση τον βυθό της θάλασσας.

#### 3.2.3 Συσκευές υπεράκτιας ζώνης (offshore)

Στην περιοχή αυτή εγκαθίστανται πλωτά συστήματα που απαιτούν σταθεροποίηση. Το βάθος εγκατάστασης αυτής της συσκευής είναι 25-75 μέτρα για μικρές συσκευές έλξης και πάνω από 75 μέτρα για μεγάλες συσκευές έλξης. Σε μεγάλα βάθη, το δυναμικό κύματος φτάνει στο υψηλότερο επίπεδο, επειδή η απώλεια κύματος λόγω τριβής με τον βυθό είναι ελάχιστη. Επίσης, με την εγκατάσταση τέτοιου εξοπλισμού, δεν θα υπάρξουν προβλήματα με το πεδίο και το οπτικό πεδίο. Ωστόσο, το κόστος αυτής της συσκευής είναι πολύ μεγάλο και υπάρχει ο κίνδυνος να χαθεί εντελώς η συσκευή σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου.

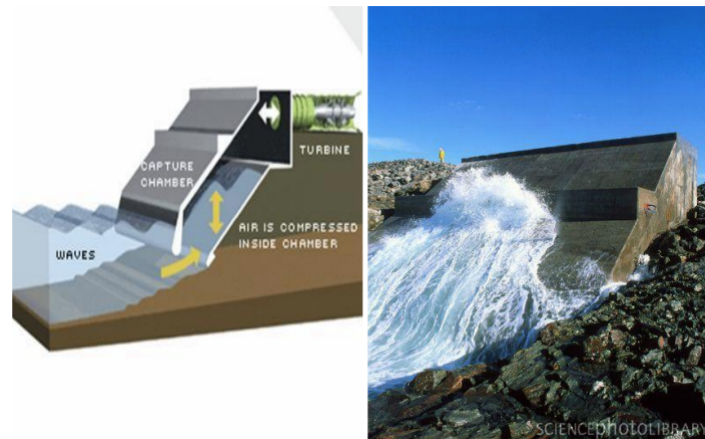


### 3.3 Κατηγοριοποίηση με βάση την μέθοδο μετατροπής της ενέργειας

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν κυματική ενέργεια μετατρέπουν οριζόντια και κάθετα ή κάθετα κύματα σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας τη δονητική σχετική κίνηση του σώματος, τις διακυμάνσεις της πίεσης του αέρα ή τη δυναμική συσσώρευση ενέργειας. Αυτή η δύναμη συνδέεται κυρίως με 4 τρόπους: στρόβιλος νερού, στρόβιλος αερίου, υδραυλική μηχανή ή γραμμική γεννήτρια. Με βάση τα παραπάνω, υπάρχουν 4 βασικές αρχές στις οποίες λειτουργεί η συσκευή.

#### 3.3.1 Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)

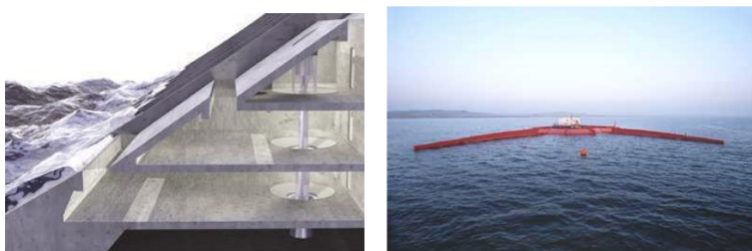
Είναι συσκευές που διαθέτουν μια ημιβυθισμένη κενή εσωτερικά κατασκευή σε μορφή θαλάμου. Ο θάλαμος είναι ανοικτός προς την μεριά της θάλασσας με το άνω τμήμα του ανοίγματος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Στο εσωτερικό του, πάνω από την επιφάνεια του νερού, έχει μια στήλη αέρα. Τα κύματα κινούν παλινδρομικά τη στήλη του νερού στο εσωτερικό του θαλάμου η οποία με τη σειρά της συμπιέζει και εκτονώνει την υπερκεκλιμένη στήλη αέρα. Όταν η στήλη νερού ανέρχεται ο εγκλωβισμένος αέρας οδηγείται προς και από την ατμόσφαιρα μέσω ενός αεροστροβίλου. Όταν η στήλη κατέρχεται, αναρροφάται αέρας από την ατμόσφαιρα μέσω του ίδιου αεροστροβίλου, που στρέφεται γενικά προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την φορά κίνησης του αέρα. Η ροπή από την περιστροφική κίνηση του αεροστροβίλου χρησιμοποιείται για την κίνηση μια γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσκευές αυτές αρχικά σχεδιάστηκαν για εγκατάσταση επί της ακτής σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές. Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν συσκευές αυτής της τεχνολογίας που επέτρεαν για εγκατάσταση στην ανοικτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το Wavegen, το Oceanlinx, το Ocean Energy Buoy.



Σχήμα 3.1: Oscillating water column [37]

### 3.3.2 Συσσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device)

Είναι συσκευές που βασίζονται στη φυσική συλλογή του νερού, που συλλαμβάνεται σε μια ανοικτή δεξαμενή, το χείλος της οποίας βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και γεμίζει με τον θαλάσσιο κυματισμό. Το νερό επιστρέφει στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροστροβίλου, μικρού ύψους πτώσης, ο οποίος μέσω γεννήτριας, παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια παράγεται με χρήση της δυναμικής ενέργειας του νερού, που βρίσκεται στην ανοικτή δεξαμενή ψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το Wave Dragon, το Waveplane, το Seawaveslot.

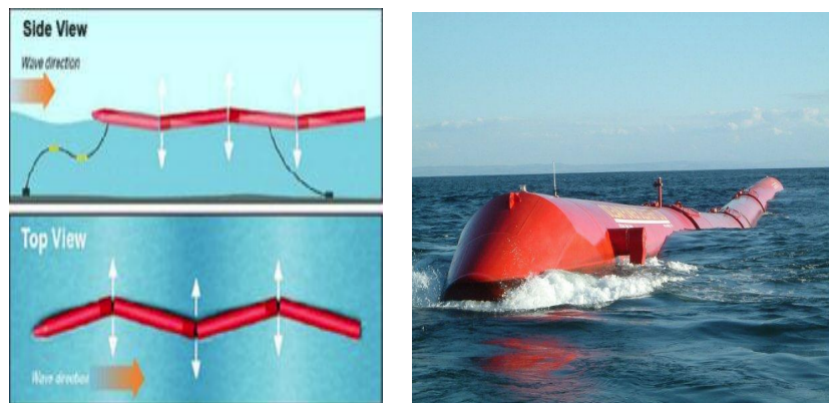


Σχήμα 3.2: Wave Dragon System [38]

### 3.3.3 Συσσκευές μακρόστενης μορφής –Γραμμικοί αποσβεστήρες (attenuator)

Είναι πλωτές αρθρωτές κατασκευές οι οποίες τοποθετούνται κάθετα προς τα επερχόμενα κύματα, παράλληλα όμως με την διεύθυνση διάδοσης του

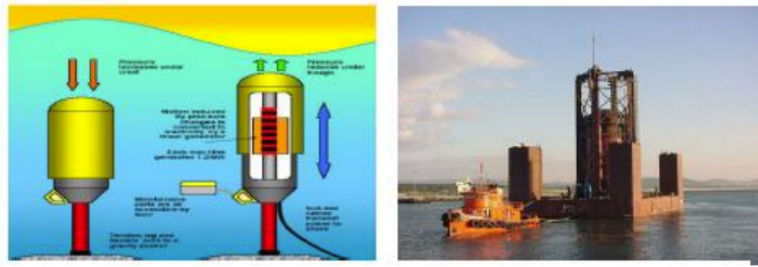
κύματος. Η Ενέργεια δεσμεύεται κατά την διέλευση των κυμάτων κατά μήκος όλου του συστήματος μέσω υδραυλικών κινητήρων που υπάρχουν στις αρθρώσεις. Θεωρητικά αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης από ότι στα συστήματα μικρού μήκους ή στα αξονοσυμμετρικά συστήματα. Άλλο ένα θετικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι έχουμε σχετικά μικρές καταπονήσεις επειδή η μετωπική επιφάνεια είναι μικρή. Η πιο αντιπροσωπευτική συσκευή αυτής της τεχνολογίας είναι η συσκευή Πελαμης. Γενικά χρησιμοποιείται για εφαρμογή υπεράκτια και έχει υποβληθεί σε δοκιμές πλήρους κλίμακας στις Πορτογαλικές θάλασσες. Γενικά στόχος είναι να κατασκευαστεί πάγκο με αυτήν την τεχνολογία η οποία να προσδίδει ισχύ 20 MW.



Σχήμα 3.3: Pelamis Wave Energy System[39]

### 3.3.4 Συσκευές βυθισμένες με διαφορά πίεσης (Submerged pressure differential)

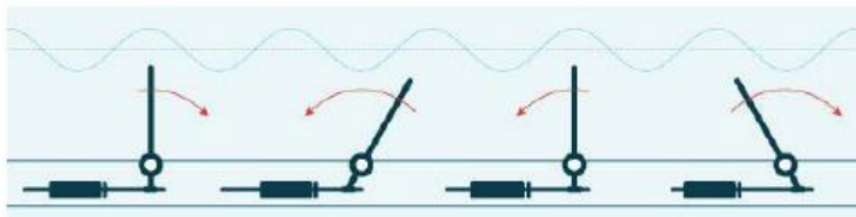
Τυπικά αυτές οι συσκευές βρίσκονται κοντά στην ακτή και στηρίζονται στο βυθό της θάλασσας. Χρησιμοποιούν την διαφορά πίεσης των διαδοχικών κορυφών και κοίλων του κύματος ώστε να προκαλέσουν την άνοδο και την κάθοδο ενός πλωτού σώματος. Η κίνηση αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια συνήθως μέσω μιας γραμμικής γεννήτριας. Κατασκευή αυτού του τύπου αποτελεί το Archimedes Wave Swing (AWS) που είναι εγκατεστημένο από το 2005 ανοιχτά των ακτών της Πορτογαλίας.



Σχήμα 3.4: Archimedes Wave Swing [39]

### 3.3.5 Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρομησης (Oscillating Wave Surge Converter)

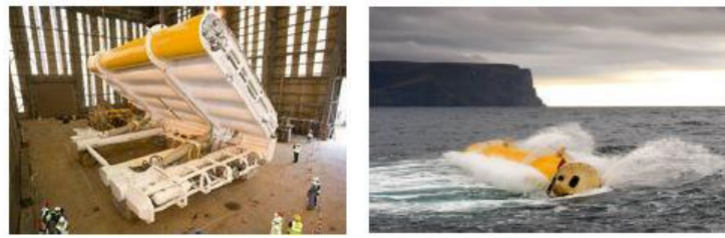
Οι συσκευές αυτές τις περισσότερες φορές στηρίζονται στο βυθό αλλά μπορεί να είναι και ημιβυθισμένες σε αυτόν. Προσλαμβάνουν ενέργεια από την οριζόντια κίνηση των στοιχείων του νερού ,μέσω ενός βραχίονα που παλινδρομεί σαν εκκρεμές στηριγμένος σε περιστρεφόμενη άτρακτο, η οποία είναι κάθετη στην κίνηση τόσο του νερού όσο και στην κίνηση του βραχίονα. Εμβολοφόρος αντλία χρησιμοποιείται για την λειτουργία αυτής της διάταξης. Σαν παράδειγμα αυτού του είδους λειτουργίας είναι το σύστημα Oyster του οποίου η έδρα είναι στον πυθμένα της θάλασσας και χρησιμοποιεί μία διάταξη η οποία είναι τύπου πτερυγίου. Η παλινδρομική κίνηση του πτερυγίου θέτει σε κίνηση ένα έμβολο που αντλεί το νερό από την θάλασσα και το οδηγεί στην ξηρά. Εφόσον το νερό είναι σε υψηλή πίεση μετά αυτό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω ενός στροβίλου ο οποίος είναι τύπου Pelton.



Σχήμα 3.5: Παλινδρομική κίνηση πτερυγίου (σύστημα Oyster)

### 3.3.6 Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorbers)

Αυτού του είδους οι διατάξεις είναι συνήθως αξονοσυμμετρικά, πλωτά συστήματα με διαστάσεις μικρότερες του ενός τρίτου του μέσου μήκους κύματος . Το γεγονός ότι πρόκειται για αξονοσυμμετρικά συστήματα ,σημαίνει ότι



Σχήμα 3.6: Oyster System

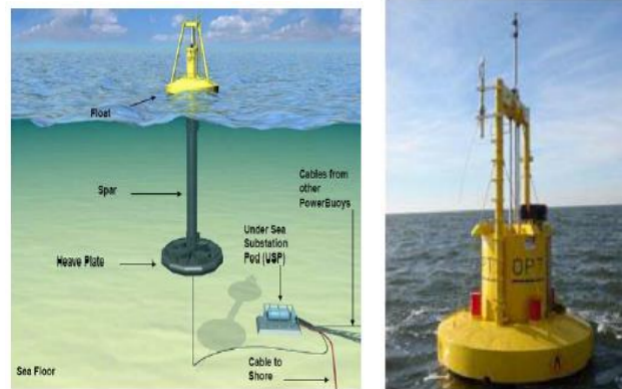
είναι λιγότερο ευσταθή στην κατεύθυνση προσέγγισης του μετώπου κύματος και σε ακραίες φορτίσεις. Μπορεί να είναι είτε πλωτές αγκυροβολημένες μονάδες είτε να εδράζονται στον πυθμένα. Τις περισσότερες φορές εκμεταλλεύονται κυρίως την παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα κατά την κατακόρυφη διέγερσή του, μετατρέποντας την μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική ή γραμμική κίνηση για την λειτουργία της γεννήτριας. Το σχετικά μικρό μέγεθος τους, κάνει πιο εύκολη την λειτουργία περισσότερων συστημάτων υπό κοινό υποθαλάσσιο καλώδιο για δημιουργία πάρκου επιθυμητής ονομαστικής ισχύος. Παρακάτω αναφέρουμε κάποια εφαρμοσμένα παραδείγματα της τεχνολογίας που περιγράψαμε παραπάνω.

### 3.3.7 OPT powerbuoy

Παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της σχετικής κίνησης ενός πλωτήρα στην επιφάνεια της θάλασσας και ενός άλλου ημιβυθισμένου, και χρησιμοποιείται υδραυλικό σύστημα ανάκτησης. Σκοπός του ημιβυθισμένου πλωτήρα είναι η αύξηση της δύναμης αδράνειας. Τα δύο σώματα ταλαντώνονται με διαφορετική φάση και η σχετική αυτή κίνηση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του υδραυλικού συστήματος που βρίσκεται στον αγωγό που τα συνδέει μεταξύ τους.

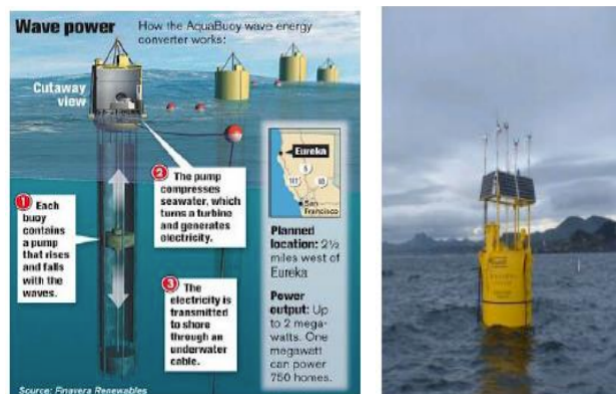
### 3.3.8 Aquabuoy

Αυτή η εφαρμογή παράγει ενέργεια μέσω νερού υψηλής πίεσης που δημιουργείται από την σχετική κίνηση ενός πλωτήρα και ενός εμβόλου, μέσω ενός υδροστρόβιλου. Το σύστημα αποτελείται από τον πλωτήρα, τον άκαμπτο καθοδικό αγωγό επιτάχυνσης, το έμβολο, τις αντλίες εύκαμπτου σωλήνα (hose rump) και τον υδροστρόβιλο. Το έμβολο επιταχύνεται μέσα στον μακρόστενο άκαμπτο αγωγό λόγω της κατακόρυφης δύναμης που έχει το κύμα. Ο αγωγός αυτός στηρίζεται στον πλωτήρα και είναι ανοιχτός και στα δύο



Σχήμα 3.7: OPT PowerBUOY System

άκρα ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του θαλασσινού νερού. Το έμβολο είναι ένας ημιβυθισμένος πλωτήρας σε σχήμα δίσκου και βρίσκεται στη μέση αγωγού σε κατάσταση ηρεμίας. Διαμέσου του εμβόλου, εισέρχεται ο εύκαμπτος αγωγός της αντλίας από τον οποίο το νερό, αποκτά πίεση λόγω μεταβολής του όγκου του σωλήνα, και οδηγείται από το κάτω άκρο στο επάνω όπου και φέρει υδροστρόβιλο για την ενεργειακή αξιοποίηση.



Σχήμα 3.8: AquaBuoy System

# Κεφάλαιο 4

## Ανάλυση Ενεργειακών Μετατροπών

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση του συστήματος των ενεργειακών μετατροπών της CorPower και της Waves4Power.

### 4.1 Ανάλυση της CorPower

Προτού ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας, πρέπει να σημειώσουμε ότι η ανύψωση είναι ο σημαντικότερος βαθμός ελευθερίας. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι η συνολική δύναμη ΠΤΟ προβάλλει στην κατεύθυνση του κύματος και της ανύψωσης αντίστοιχα κατά:

$$P_{\text{surge}} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + (h + z)^2}} \quad (4.1)$$

$$P_{\text{heave}} = \frac{x + z}{\sqrt{x^2 + (h + z)^2}} \quad (4.2)$$

Αυτό σημαίνει επίσης ότι η συμβολή των δυνάμεων ή μετατοπίσεων κύματος και ανύψωσης στην κατεύθυνση της κίνησης του ραφιού κλιμακώνονται αντίστοιχα με τις ίδιες προβολές. Λαμβάνοντας την οριακή περίπτωση όταν το βάθος νερού η πλησιάζει το άπειρο, προκύπτει:

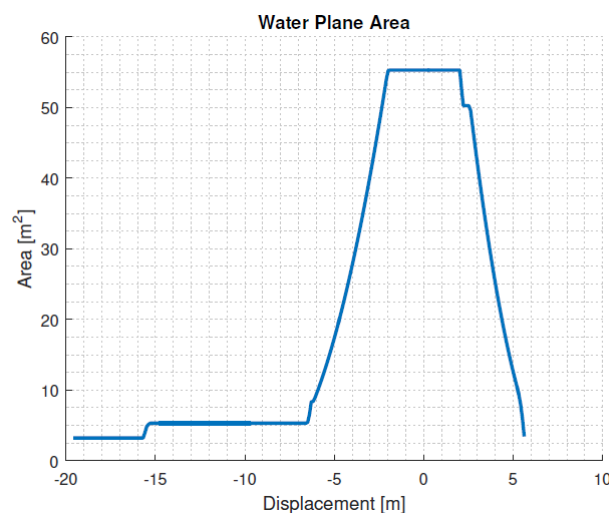
$$\lim_{h \rightarrow \infty} P_{\text{surge}} = 0 \quad (4.3)$$

$$\lim_{h \rightarrow \infty} P_{\text{heave}} = 1 \quad (4.4)$$

Για τις τοποθεσίες, που μελετήθηκαν, το βάθος του νερού είναι 50 μέτρα, το οποίο είναι σχετικά βαθύ για να έχει το κύμα σημαντική συμβολή στη σύλληψη ενέργειας, π.χ. μετατόπιση 1 μέτρου στο κύμα έχει ως αποτέλεσμα μετατόπιση περίπου 0,02 μέτρα του ραφιού. Επομένως, η δυναμική του κύματος μπορεί να αγνοηθεί με ασφάλεια κατά την ανάλυση του συστήματος ή τη σχεδίαση ενός ελεγκτή για λόγους απλούστευσης. Θα ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας θεωρώντας ότι δεν υπάρχει δύναμη PTO και WaveSpring προκειμένου να κατανοήσουμε τη δυναμική του ίδιου του σημαντήρα. Η συνολική μάζα της σημαδούρας στην ανύψωση είναι το άθροισμα της μάζας της σημαδούρας και της προστιθέμενης μάζας στο άπειρο στην κατεύθυνση της ανύψωσης και ισούται με:

$$m_h = m_b + m_\infty^{\text{heave}} = 1.1014 \cdot 10^5 \quad (4.5)$$

Η υδροστατική δυσκαμψία για έναν κυκλικό κύλινδρο είναι συνάρτηση της οριζόντιας επιφάνειας ή του επιπέδου του νερού. Το εμβαδόν του υδάτινου επιπέδου της σημαδούρας της CorPower δεν είναι ομοιόμορφο. Μπορεί να προκύψει από τη γεωμετρία της σημαδούρας για κάθε στάθμη νερού ή μπορεί να υπολογιστεί με τη λήψη της μερικής παραγώγου του βυθισμένου όγκου, που προκύπτει και πάλι από τη γεωμετρία, για κάθε στάθμη νερού σε σχέση με τη μετατόπιση της σημαδούρας κατά την ανύψωση. Η επιφάνεια του υδάτινου επιπέδου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.1: Εμβαδόν υδάτινου επιπέδου για κάθε μετατόπιση

Ένα πράγμα που μπορεί να σημειωθεί στο σχήμα είναι ότι η περιοχή είναι σταθερή γύρω από το σημείο ισορροπίας και είναι ίση με:



$$\begin{aligned} S &= 55.31\text{m}^2 \\ -2 < Z_{\text{wave}} - Z_{\text{buoy}} < 2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Επομένως, σε κινήσεις χαμηλού πλάτους, η φυσική περίοδος του ενεργειακού μετατροπέα είναι:

$$T_h = 2\pi\sqrt{\frac{m_h}{\rho h s}} = 2.8\text{s} \quad (4.7)$$

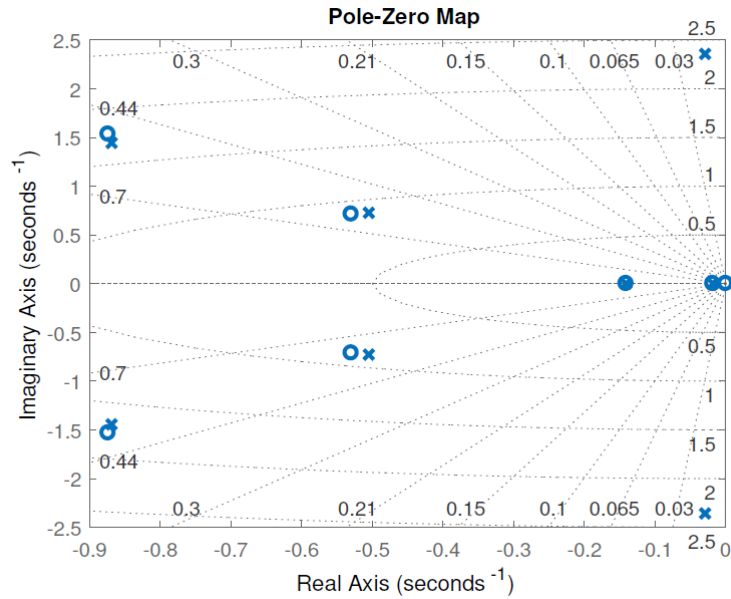
Σε κινήσεις μεγάλου πλάτους, αναμένεται ότι η φυσική περίοδος θα αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους της διέγερσης, καθώς η επιφάνεια, και συνεπώς η υδροστατική δυσκαμψία, μειώνεται με μεγαλύτερες μετατοπίσεις του σημαντήρα. Η συμπεριφορά αυτή αναμένεται να είναι ορατή γύρω ή πάνω από το πλάτος των 2m (ύψος 4m), δεδομένου ότι το εμβαδόν του σημαντήρα είναι σταθερό για μετατοπίσεις έως 2m. Επομένως, η ιδιοσυχνότητα θα είναι σταθερή για τις περισσότερες καταστάσεις της θάλασσας. Σε κύματα χαμηλού πλάτους, η δυναμική της ανύψωσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι γραμμική και μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο χώρου καταστάσεων:

$$\begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \dot{z} \\ \dot{\chi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\rho g S}{m_h} & -(1/m_h) \cdot C_r \\ 1 & 0 & 0^{1 \times 6} \\ B_r & 0^{6 \times 1} & A_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{z} \\ z \\ \chi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_h} \\ 0 \\ 0^{6 \times 1} \end{bmatrix} \cdot F_{\text{ext}} \quad (4.8)$$

όπου  $A_r \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ ,  $B_r \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ,  $C_r \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$  είναι πίνακες κατάστασης χώρου ακτινοβολίας. Ο χάρτης πόλων-μηδενικών του συστήματος, που παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί, εμφανίζει ακυρώσεις πόλων-μηδενικών κοντά στο μηδέν, επομένως, είναι ένας καλός υποψήφιος για μείωση του μοντέλου, η οποία απλοποιεί την ανάλυση και τον ελεγκτή. σχεδιασμό (4.2).

Προκειμένου να βρούμε μια κατάλληλη μείωση χαμηλής τάξης, εξετάζουμε τη σχετική ποσότητα ενέργειας ανά κατάσταση χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα της μοναδιαίας τιμής Hankel (HSV), το οποίο φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί 4.3.

Από το διάγραμμα HSV μπορεί να διαπιστωθεί ότι το σύστημα οκτώ τάξεων μπορεί να αναχθεί σε σύστημα δεύτερης τάξης. Αυτό μπορεί να γίνει με την εντολή `ballred(sys, order)` στο Matlab. Η εντολή `ballred()` παρήγαγε ένα θετικό μηδενικό, το οποίο δεν έπρεπε να υπάρχει (είναι γνωστό ότι το



Σχήμα 4.2: Χάρτης πόλων-μηδενικών της δυναμικής ανύψωσης χωρίς WaveSpring

σύστημα είναι δεύτερης τάξης και η συνάρτηση μεταφοράς μεταβλητότητας, δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς ταχύτητας προς δύναμη, έχει μηδενικό στην αρχή). Με τη χειροκίνητη αφαίρεσή του, επιτυγχάνεται καλύτερη εκτίμηση. Η συνάρτηση μεταφοράς του πλήρους και του μειωμένου συστήματος πριν και μετά την αφαίρεση του μηδενός παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί.

Μπορεί να φανεί ότι με ένα σύστημα δεύτερης τάξης, μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση του συστήματος ανώτερης τάξης. Η συνάρτηση μεταφοράς του μοντέλου μειωμένης τάξης είναι:

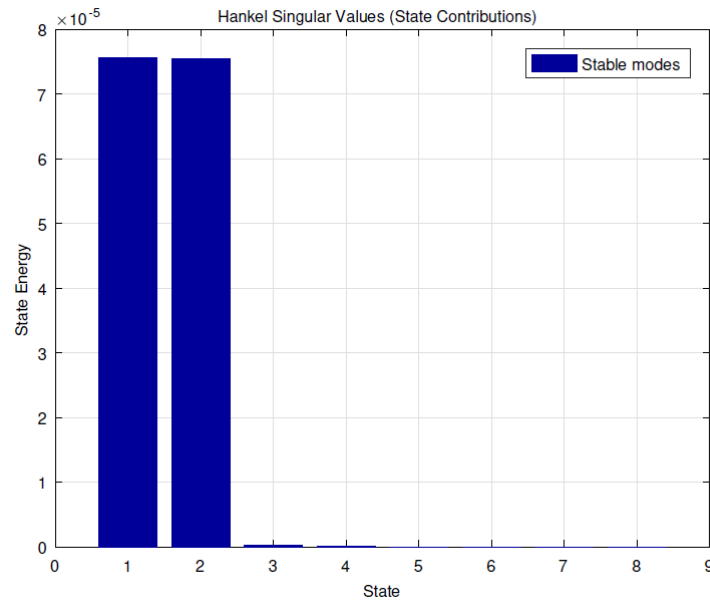
$$\frac{V(s)}{F_{exc}} = \frac{8.932 \cdot 10^{-6}s}{s^2 + 0.05916s + 5.556} \quad (4.9)$$

Η φυσική συχνότητα, η φυσική περίοδος και ο συντελεστής απόσβεσης του μειωμένου συστήματος μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν,

$$\omega_n = 2.35 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad (4.10)$$

$$T_n = 2.67s \quad (4.11)$$

$$\zeta = 0.0125 \quad (4.12)$$



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα μοναδιαίας τιμής Hankel για το μοντέλο ανύψωσης της σημαδούρας της CorPower

Δεδομένου ότι η συνάρτηση μεταφοράς είναι δεύτερης τάξης, μπορεί να αναπαρασταθεί ως η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος μάζας-ελατηρίου-αμορτισέρ:

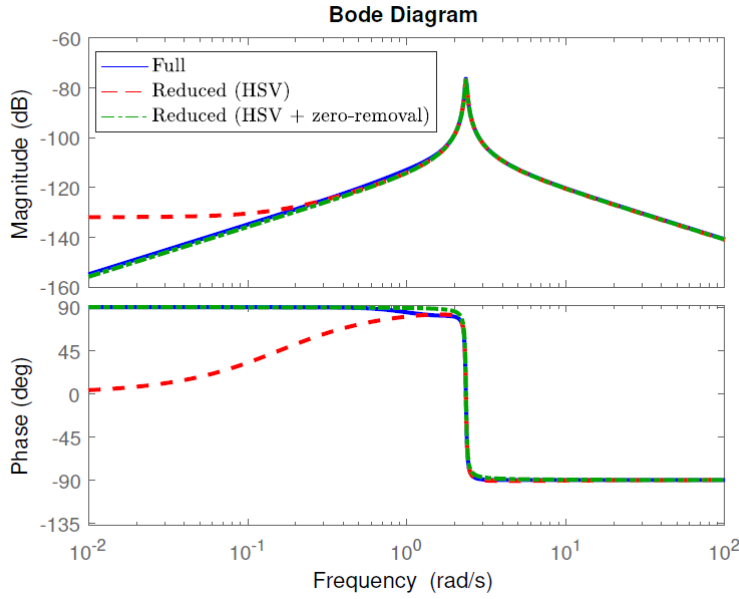
$$\frac{V(s)}{F_{exc}} = \frac{s}{m_e s^2 + b_e s + k_e} \quad (4.13)$$

όπου  $m_e$ ,  $b_e$  και  $k_e$  είναι αντίστοιχα η πραγματική μάζα, ο συντελεστής απόσβεσης και δυσκαμψία ίσες με:

$$m_e = 1.1195 \cdot 10^5 \text{kg} \quad (4.14)$$

$$b_e = 0.0662 \cdot 10^5 \text{Ns/m} \quad (4.15)$$

$$k_e = 6.22 \cdot 10^5 \text{N/m} \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Bode με πλήρη και μειωμένη δυναμική του συστήματος

## 4.2 Ανάλυση του ενεργειακού μετατροπέα της Waves4Power

Η δυναμική του συστήματος W4P διέπεται από τρεις εξισώσεις δεύτερης τάξης, οι οποίες αναδιατυπώνονται ως εξής:

$$m_b \ddot{z}_b + m_a (\ddot{z}_b - \ddot{z}_w) + b_a (\dot{z}_b - \dot{z}_w) + \rho g V + m_b g = F_{PTO} + F_{end-stop} + F_{lkb} \quad (4.17)$$

$$-(A_{wide} - A_{narrow} + A_p) \Delta p_{leak} - \rho g A_{wide} z_{tw} = \rho A_{wide} (l_{tube} + z_{tw} - z_b) \ddot{z}_{tw} \quad (4.18)$$

$$m_p \ddot{z}_p + \rho g A_{rod} (z_p - z_{tw}) = F_{lkp} - F_{PTO} \quad (4.19)$$

όπου:

$$F_{likp} = (A_{wide} - A_{narrow}) A_p \Delta p_{leak} \quad (4.20)$$

$$F_{lkp} = A_p \Delta p_{leak} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{leak}} = \frac{1}{2} \rho K \left( \frac{A_{\text{narrow}}}{A_{\text{wide}}} \dot{z}_{\text{tw}} - \left( \frac{A_{\text{narrow}}}{A_{\text{wide}}} \dot{z}_{\text{tw}} - 1 \right) \dot{z}_{\text{tw}} \right) \cdot \dots \\ \dots \left| \frac{A_{\text{narrow}}}{A_{\text{wide}}} \dot{z}_{\text{tw}} - \left( \frac{A_{\text{narrow}}}{A_{\text{wide}}} \dot{z}_{\text{tw}} - 1 \right) \dot{z}_{\text{p}} \right| \end{aligned} \quad (4.22)$$

Μπορεί να φανεί ότι η μόνη σύνδεση μεταξύ του σωλήνα του σημαντήρα και του εμβόλου γίνεται μέσω της δύναμης PTO, FPTO. Αυτό σημαίνει ότι όταν η δύναμη PTO είναι μηδενική, το έμβολο θα παραμείνει ακίνητο και μόνο ο σημαντήρας θα κινηθεί λόγω της διέγερσης των κυμάτων. Αυτό οφείλεται στην απλούστευση ότι το νερό στο εσωτερικό του σωλήνα είναι πλήρως απομονωμένο από το εξωτερικό του σωλήνα, επομένως δεν υφίσταται τις υδροδυναμικές δυνάμεις από τα κύματα. Το μοντέλο αμελεί επίσης τα κύματα ακτινοβολίας στο εσωτερικό του σωλήνα λόγω της κίνησης του σημαντήρα και κυρίως τις δυνάμεις αντίστασης που προκαλούνται από την τριβή μεταξύ των εσωτερικών τοιχωμάτων του σωλήνα και του νερού. Δεδομένου ότι το έμβολο του νερού θα παραμείνει ακίνητο όταν δεν υπάρχει δύναμη PTO, το νερό του σωλήνα θα παραμείνει επίσης ακίνητο σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα αναφοράς λόγω έλλειψης πίεσης διαρροής. Δεδομένου ότι το σύστημα αποτελείται από τρεις εξισώσεις δεύτερης τάξης, υπάρχουν τρεις τρόποι ταλάντωσης. Για τον εντοπισμό τους, το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων χρειάζεται να γραμμικοποιηθεί γύρω από τη μέση στάθμη του νερού, δηλ. στη θέση:  $z_b = z_w = z_p = z_{\text{tw}} = 0$ .

Ο ενεργειακός μετατροπέας της Waves4Power παράγει ενέργεια από τη σχετική κίνηση μεταξύ του σωλήνα της σημαδούρας και του εμβόλου του νερού. Επομένως, η δύναμη PTO θα είναι συνάρτηση της σχετικής θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του σωλήνα της σημαδούρας και του εμβόλου. Ας υποθέσουμε μια γενική γραμμική δύναμη PTO, που αποτελείται από μια μάζα, όρους απόσβεσης και ελατηρίου,

$$F_{\text{PTO}} = m_{\text{PTO}} (\ddot{z}_p - \ddot{z}_b) + b_{\text{PTO}} (\dot{z}_p - \dot{z}_b) + k_{\text{PTO}} (z_p - z_b) \quad (4.23)$$

όπου  $m_{\text{PTO}}$ ,  $b_{\text{PTO}}$  και  $k_{\text{PTO}}$  είναι αντίστοιχα η γραμμική μάζα PTO, ο συντελεστής απόσβεσης και ο συντελεστής ελατηρίου. Στο σημείο γραμμικοποίησης, η δύναμη τελικής στάσης,  $F_{\text{end}} - \text{stop}$ , είναι μηδέν. Η δύναμη βαρύτητας εξισορροπείται από τη δύναμη Αρχιμήδη από έως τον εκτοπισμένο όγκο στη μέση στάθμη του νερού. Οποιαδήποτε σχετική μετατόπιση μεταξύ κύματος και σημαντήρα, δημιουργεί μια υδροστατική δύναμη απο-

κατάστασης, ανάλογη της μετατόπισης αυτής, δηλ.

$$F_{hs}^{lin} = \rho g A_b (z_w - z_b) \quad (4.24)$$

όπου  $A_b$  είναι το εμβαδόν του σημαντήρα στη μέση στάθμη του νερού. Η περιοχή διαρροής,  $A_{leak}$ , είναι σταθερή και ίση με την ελάχιστη περιοχή διαρροής,  $A_{min\ leak} = A_{narrow} - A_p$ , γύρω από το σημείο γραμμικοποίησης. Λόγω του γεγονότος ότι η έκφραση για την πίεση διαρροής είναι μη ομαλή στο σημείο γραμμικοποίησης, δεν είναι δυνατή η γραμμικοποίησή της. Ωστόσο, μπορεί να κατασκευαστεί μια γραμμική καμπύλη που ελαχιστοποιεί το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής και της γραμμικής καμπύλης. Δεδομένου ότι η έκφραση της πτώσης πίεσης είναι drag – like, δηλαδή μία που αποτελείται από ένα προσημασμένο τετράγωνο της διαφοράς δύο ταχυτήτων, μπορεί να γραμμικοποιηθεί από τη μορφή:

$$f_{drag} = \frac{1}{2} \rho C_d (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \quad (4.25)$$

στη μορφή:

$$f_{drag}^{lin} = \frac{1}{2} \rho C_d \alpha u_{rms} (u_1 - u_2) \quad (4.26)$$

όπου  $C_d$  είναι ένας συντελεστής εκφόρτισης,  $\alpha$  είναι ένας παράγοντας που προκύπτει ότι είναι  $\sqrt{8/\pi}$ ,  $U_{rms}$  είναι η ρίζα του μέσου τετραγώνου της σχετικής ταχύτητας. Επομένως, η γραμμικοποιημένη διαρροή πτώση πίεσης είναι:

$$\Delta p_{leak}^{lin} = \frac{1}{2} \rho k \sqrt{\frac{8}{\pi}} u_{rms} \left( \frac{A_{wide}}{A_{narrow}} z_{tw} - \left( \frac{A_{wide}}{A_{narrow}} - 1 \right) z_p \right) \quad (4.27)$$

Οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις μπορούν τώρα να γραφούν σε μορφή πίνακα ως εξής:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F \quad (4.28)$$

όπου  $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  και  $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  είναι αντίστοιχα η μάζα, η απόσβεση και οι πίνακες δυσκαμψίας,  $x \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  είναι το διάνυσμα κατάστασης και  $F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  είναι το διάνυσμα εισόδου δυνάμεων. Οι τιμές των στοιχείων των πινάκων είναι:

$$M = \begin{bmatrix} m_b + m_a + m_{PTO} & -m_{PTO} & 0 \\ -m_{PTO} & m_a + m_{PTO} & 0 \\ 0 & 0 & \rho A_{wide} l_{tube} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_a + b_{PTO} & -b_{PTO} & 0 \\ -b_{PTO} & b_{PTO} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{A_p^2}{A_{leak}^{min}} \rho K u_{rms} & -\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{A_{wide}}{A_{narrow}} \rho K u_{rms} \\ 0 & -\sqrt{\frac{2}{\pi}} (A_{wide} - A_{leak}^{min}) \frac{A_{wide}}{A_{narrow}} \rho K u_{rms} & \sqrt{\frac{2}{\pi}} (A_{wide} - A_{leak}^{min}) \frac{A_{wide}}{A_{narrow}} \rho K u_{rms} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} \rho g A_b + k_{PTO} & -k_{PTO} & 0 \\ -k_{PTO} & \rho g A_{rod} + k_{PTO} & -\rho g A_{rod} \\ 0 & 0 & \rho g A_{wide} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_b \\ x_p \\ x_{tw} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$x = \begin{bmatrix} m_a \ddot{z}_w + b_a \dot{z}_w + \rho g z_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Προκειμένου το σύστημα να είναι ευσταθές, οι πίνακες μάζας και ελατηρίων πρέπει να είναι θετικά ορισμένοι και ο πίνακας απόσβεσης πρέπει να είναι θετικά ημιορισμένος. Οι μη αποσβεννόμενες ιδιοτιμές  $\lambda \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  του συστήματος βρίσκονται από την χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος:

$$\det(K - \lambda M) = 0 \quad (4.33)$$

Οι μη αποσβεσμένες ιδιομορφές του μη ελεγχόμενου συστήματος, δηλαδή όταν  $m_{PTO} = b_{PTO} = k_{PTO} = 0$  είναι:

$$\omega = \left[ \sqrt{\frac{\rho g A_b}{m_b + m_a}} \quad \sqrt{\frac{\rho g A_{rod}}{m_p}} \quad \sqrt{\frac{g}{l_{tube}}} \right]^T \quad (4.34)$$

Η πρώτη είσοδος του διανύσματος είναι η ιδιοσυχνότητα του σκάφους-σωλήνα, η δεύτερη - η ιδιοσυχνότητα του εμβόλου και η τρίτη - η ιδιοσυχνότητα του νερού στο εσωτερικό του σωλήνα. Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους του συστήματος πλήρους κλίμακας:

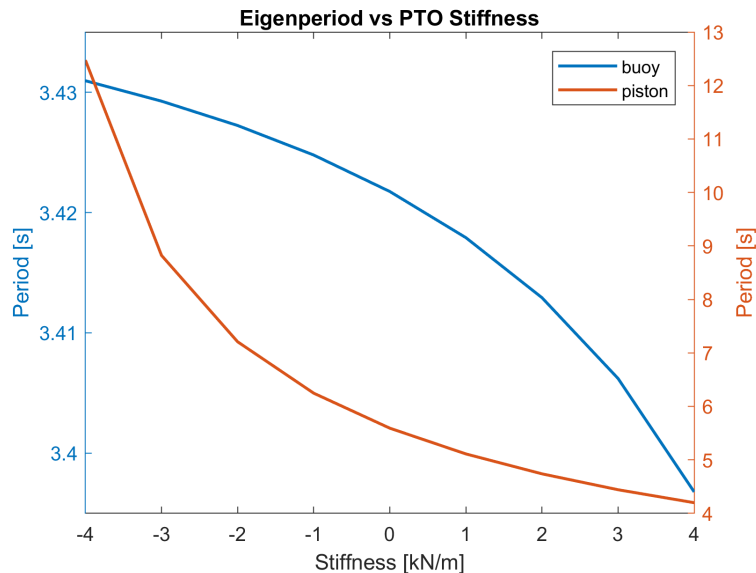
$$\begin{aligned} A_b &= 50.3 \text{m}^2 & A_{rod} &= 0.5 \text{m}^2 & l_{tube} &= 38 \text{m} \\ m_b &= 104 \text{t}_{on} & m_a &= 46 \text{t}_{on} & m_p &= 4 \text{t}_{on} \end{aligned} \quad (4.35)$$

οι ιδιοσυχνότητες και ιδιοπερίοδοι του μη ελεγχόμενου συστήματος υπολογίζονται ως εξής:

$$\omega_{uc} = [1.84 \quad 1.12 \quad 0.51]^T \text{ (rad/sec)} \quad (4.36)$$

$$T_{uc} = [3.42 \quad 3.59 \quad 12.37]^T \text{ (s)} \quad (4.37)$$

Δεδομένου ότι αρκεί ο έλεγχος είτε της μάζας του PTO είτε της δυσκαμψίας του PTO για τη ρύθμιση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος, επιλέξαμε να εκφράσουμε τη σχέση των ιδιομορφών του κλειστού βρόχου με τη δυσκαμψία του PTO θέτοντας τη μάζα του PTO στο μηδέν. Εξετάζοντας τον πίνακα δυσκαμψίας,  $K$ , είναι σαφές ότι η δυσκαμψία του PTO δεν έχει καμία επιρροή στην ιδιομορφή του νερού στο εσωτερικό του σωλήνα. Επομένως, παραμένει ίση με την ιδιομορφή του μη ελεγχόμενου συστήματος. Αντίθετα, η δυσκαμψία του PTO επηρεάζει τις ιδιομορφές της σημαδούρας και του εμβόλου. Η σχέση των ιδιοπεριοδών της σημαδούρας και του εμβόλου με τη δυσκαμψία του PTO παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.5: Σχέση των ιδιοπεριοδών κλειστού βρόχου με τη δυσκαμψία του PTO

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η ιδιοπερίοδος του ενεργειακού μετατροπέα δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη δυσκαμψία του PTO. Από την άλλη πλευρά, η ιδιοπερίοδος του εμβόλου αυξάνεται εκθετικά με



τη μείωση της δυσκαμψίας του ΡΤΟ και το σύστημα θα γίνει τελικά ασταθές με την περαιτέρω μείωση της δυσκαμψίας του ΡΤΟ. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ακόμη και αν ένας όρος αντιδραστικής δύναμης, όπως η ελατηριωτή δύναμη, εφαρμόζεται μέσω του ΡΤΟ, το buoyfloater δεν συμπεριφέρεται σαν ένας πλωτήρας με συντονισμό, αλλά μάλλον σαν ένας κυματοδρόμος, δηλαδή ένας που ακολουθεί το κύμα. Ωστόσο, η ιδιοσυχνότητα, και συνεπώς η φάση, του εμβόλου μπορεί να ελεγχθεί σε σχέση με τη φάση του σημαντήρα για τη βελτιστοποίηση της σύλληψης ισχύος. Εδώ ολοκληρώνουμε την ανάλυσή μας σχετικά με τον μετατροπέα κυματικής ενέργειας της Waves4Power. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ανάλυση που διενεργήθηκε έγινε με βάση το μοντέλο που παρείχε η Waves4Power χωρίς να αξιολογείται κατά πόσον η χρησιμοποιούμενη προσέγγιση μοντελοποίησης ήταν ορθή.



# Κεφάλαιο 5

## Συμπεράσματα

Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας όπως έχει προαναφερθεί διέπεται από πολλά μειονεκτήματα αλλά και πλεονεκτήματα. Δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποια επικρατέστερη θεωρία ή αντίληψη όσον αφορά για το ποια τεχνολογία θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας και για το ποια είναι η περισσότερο αποδοτική. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες και έρευνες οι οποίες είναι μέχρι σήμερα υπό εξέλιξη και δοκιμή. Παρακάτω αναφέρουμε συνοπτικά τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα που αφορούν την κυματική ενέργεια, και δυσκολεύουν την εξέλιξή της αλλά και την εφαρμογή της σε περισσότερες περιοχές και εφαρμογές.

Μειονεκτήματα:

- Τα κύματα έχουν ακανόνιστη μορφή (πλάτος, φάση, διεύθυνση) ο Δυσκολία στην κατασκευή διατάξεων που να καλύπτουν λειτουργικά πολλές μεταβλητές μεγάλου εύρους.
- Πιθανότητα κυμάτων ακραίας έντασης (10 φορές μεγαλύτερη της μέσης τιμής)
- ο Απαιτούνται διατάξεις ανθεκτικές σε παραγόμενη ισχύ 100 φορές μεγαλύτερης της μέσης ισχύος. (Αύξηση κόστους)
- Η μέγιστη ένταση συναντάται σε κύματα μακριά από την ακτή ο Δυσκολία στην κατασκευή, συντήρηση και ασφάλεια διατάξεων σε μεγάλες αποστάσεις από τις ακτές.
- Η περίοδος των κυμάτων είναι πολύ μικρή (0.1 Hz) ο Δυσκολία στον συνδυασμό με ηλεκτρογεννήτριες που λειτουργούν σε συχνότητες 500 φορές μεγαλύτερες.

- Μικρή προσφορά ισχύος σχετικά με τις συνήθεις ανάγκες της βιομηχανίας
- Η Τάση για δημιουργία γιγαντιαίων διατάξεων με εξαιρετικά υψηλό κόστος

Ο θαλάσσιος κυματισμός συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις ΑΠΕ: χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής, αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, απεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες ή/και υποβαθμισμένες περιοχές, τόνωση της βιομηχανικής παραγωγής, δημιουργία θέσεων εργασίας κ.ά.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, όπως ακουστική ή οπτική όχληση, επιπτώσεις σε χλωρίδα και πανίδα, παρενόχληση της ναυσιπλοΐας κ.ά θεωρούνται ήπιες. Αξιοσημείωτο είναι ότι η εγκατάσταση σταθμών κυματικής ενέργειας δεν απαιτεί δέσμευση γης. Η οπτική όχληση, καθώς και οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον, ενδεχομένως να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για παράκτιες εγκαταστάσεις, αν και, εν γένει, περιοχές με έντονη κυματική δραστηριότητα δεν ενδείκνυνται για άλλου είδους αξιοποίηση, όπως π.χ. ιχθυοκαλλιέργεια ή τουριστική εκμετάλλευση. Αντίθετα, παράκτιες εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας θα μπορούσαν με κατάλληλο σχεδιασμό να λειτουργήσουν παράλληλα σαν κυματοθραύστες για προστασία της ακτής ή λιμενοβραχίονες.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τεχνολογιών κυματικής ενέργειας αφορούν την αξιοπιστία τους και το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις στην περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι οποίες μπορούν να υπερβούν το 100-πλάσιο των μέσων καταπονήσεων. Τούτο απαιτεί υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με αποτέλεσμα μεγάλο κατασκευαστικό κόστος. Επιπλέον, η δυσπροσιτότητα υπεράκτιων ή υποβρύχιων εγκαταστάσεων δυσχεραίνει τον έλεγχο, την συντήρηση ή την επισκευή τους και αυξάνει το λειτουργικό κόστος.

Το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας μπορεί να αντισταθμισθεί μόνον με την αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού στον μέγιστο δυνατό βαθμό, δηλ. την επίτευξη υψηλών δεικτών απόδοσης. Η τεχνολογική εξέλι-

ξη έχει οδηγήσει μέχρι στιγμής σε σημαντική βελτίωση του δείκτη απόδοσης για τις περισσότερες τεχνολογίες, ενώ τα περιθώρια βελτίωσης παραμένουν μεγάλα. Για τον λόγο αυτό, εκτιμάται ότι η συνεχιζόμενη ΕΤΑ θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του ηλεκτροπαραγωγικού κόστους, σε επίπεδα συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών μορφών ενέργειας ή άλλων ΑΠΕ.

Η αξιοποίηση της κίνησης των κυμάτων για την παραγωγή ρεύματος παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως για παράδειγμα ότι είναι προβλέψιμη, αφού στους ανοικτούς ωκεανούς οι δορυφόροι μπορούν να υπολογίσουν έως και δύο ημέρες νωρίτερα πότε τα κύματα θα φτάσουν κοντά στη στεριά. Επίσης, καθώς η πλειονότητα του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε ακτίνα μικρότερη των 30 χιλιομέτρων από κάποια παράκτια περιοχή, τα «κυματικά πάρκα» θα μπορούσαν να καλύψουν τις ανάγκες τους σε ρεύμα χωρίς να χρειαστεί μεγάλη επέκταση των ηλεκτρικών δικτύων. Και βέβαια, τα κύματα είναι πιο ισχυρά το χειμώνα ; όταν είναι μεγαλύτερη και η ζήτηση για ηλεκτρισμό.

Εξάλλου, όλοι γνωρίζουμε ότι ακόμη κι όταν ο άνεμος κοπάσει και οι ανεμογεννήτριες πάψουν να λειτουργούν, ο κυματισμός της θάλασσας μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ακόμη ώρες. Μία πρόταση μελλοντικού σχεδίου είναι η εφαρμογή της μεθόδου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά του Αιγαίου. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από θαλάσσια κύματα στα νησιά του Αιγαίου αντιπροσωπεύει μια ενδιαφέρουσα και βιώσιμη εναλλακτική λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της περιοχής. Ορισμένα καίρια θέματα και προτάσεις για την εφαρμογή της παραγωγής ενέργειας μίας μονάδας της τάξεως των 500kWh από θαλάσσια κύματα στα νησιά του Αιγαίου περιλαμβάνουν:

1. Εξοικονόμηση Πόρων: Η χρήση των θαλάσσιων κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιεί τον ανανεώσιμο πόρο της θάλασσας, παρέχοντας συνεχή πηγή ενέργειας.
2. Καθαρή και Βιώσιμη Ενέργεια: Η παραγωγή ενέργειας από θαλάσσια κύματα είναι καθαρή και βιώσιμη, διασφαλίζοντας τη μείωση των εκπομπών  $\text{CO}_2$  και τον σεβασμό προς το περιβάλλον.
3. Αντιμετώπιση Ενεργειακής Απομόνωσης: Τα νησιά του Αιγαίου, λόγω της γεωγραφικής τους θέσης, αντιμετωπίζουν προκλήσεις στη μετα-

φορά ενέργειας. Η τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από θαλάσσια κύματα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της ενεργειακής απομόνωσης.

4. Ενίσχυση της Ασφάλειας Ενέργειας: Η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας με τη χρήση των θαλάσσιων κυμάτων συνεισφέρει στην αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας των νησιών.
5. Κοινωνική και Οικονομική Ανάπτυξη: Η δημιουργία εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας μπορεί να προωθήσει την τοπική απασχόληση και να συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη των νησιών.
6. Επικοινωνία με την Τοπική Κοινότητα: Είναι σημαντικό να συμπεριληφθεί η τοπική κοινότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και να ενημερώνεται σχετικά με τα οφέλη της παραγωγής ενέργειας από θαλάσσια κύματα.

Η επιτυχημένη υλοποίηση αυτών των προτάσεων θα απαιτήσει συντονισμό μεταξύ των τοπικών αρχών, του επιχειρηματικού τομέα, της κοινότητας και του κράτους. Επίσης, η προώθηση της έρευνας και της ανάπτυξης στον τομέα της τεχνολογίας θα συνεισφέρει στην αποτελεσματικότερη χρήση αυτών των πηγών ενέργειας.

## Βιβλιογραφία

[1] A. Rashid, A. Ghodrati, "Modelling and Simulation of a Power Take-off in Connection with Multiple Wave Energy Converters", Bachelor's Thesis in Electrical Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2015.

[2] M. Sidenmark, A. Rashid, A. Ghodrati, A. Hultgren, "Modelling and Simulation of a Collector Hub System Combining Core Technologies", Proc. 11th European Wave Tidal Energy Conf., Nantes, France, 2015

[3] J. Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems", Cambridge University Press, 2002.

[4] J. V. Ringwood, G. Bacelli, F. Fusco, "Energy-Maximizing Control of Wave- Energy Converters", IEEE Control Systems Magazine, vol. 34, no. 5, pp. 30-55, 2014.

[5] F. Fusco and J. Ringwood, "A simple and effective real-time controller for wave energy converters", IEEE Trans. Sust. Energy, vol. 4, no. 1, pp. 21–30, 2013.

[6] J. Hals, J. Falnes, and T. Moan, "Constrained optimal control of a heaving buoy wave-energy converter", J. Offshore Mech. Arct. Eng., vol. 133, pp. 011401.1–15, Nov. 2010.

[7] G. Li and M. Belmont, "Model predictive control of an array of wave energy converters," in Proc. 10th European Wave Tidal Energy Conf., Aalborg, Denmark, 2013.

[8] J. Cretel, A. Lewis, G. Lightbody, and G. Thomas, "An application of model predictive control to a wave energy point absorber", in Proc. IFAC Conf. Control Methodologies Technology Energy Efficiency, 2010, pp. 267–272.

[9] J. Hals, J. Falnes, and T. Moan, "A comparison of selected strategies for adaptive control of wave energy converters", J. Offshore Mech. Arct. Eng., vol. 133, no. 3, pp. 031101–031113, 2011.

[10] <http://www.corpowerocean.com>

[11] <http://www.waves4power.com>

[12] "Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe, Crane Valves", North America, Technical Paper No. 410M

[13] R. D. Blevins, "Applied Hydraulics Handbook", Kriegel Publishing Company, Malabar, Florida, 1984

[14] L. Ljung, T. G, "Modelling of Dynamical Systems", PTR Prentice Hall, New Jersey, 1994

[15] R. Zanasi, "Power Oriented Modelling of Dynamical System for Simulation", IMACS Symp. on Modelling and Control of Technological System, Lille, France, May 1991.

[16] West D. B., "Introduction to Graph Theory", Prentice Hall, 2001.

[17] A. Hultgren, M. Lenells, "Stability of a Nonlinear Hamiltonian Observer Applied to a General Electrical Network", 43rd IEEE Conference on Decision and Control, December 14-17, 2004, The Atlantis Paradise Island, The Bahamas, pp 4806-4811

[18] H.E. Koenig, W.S. Blackwell, "Linear graph theory – a fundamental engineering

discipline", IRE Transactions on Education 3 (1960) 42-49.

[19] A. Bozzetto, N. Bianchi, E. Tedeschi, "Modeling, Control and Performance Assesment of a Wave Energy Converter, equipped with an All-Electric Power Take-Off", M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2013

[20] E. Jansson, "Multi-buoy Wave Enegy Converter", M.Sc. Thesis, Uppsala University, Sweden, 2016

[21] K. Hasselman, T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K.



Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)". Technical Report 12, German Hydrographic Institute, 1973.

[22] Det Norske Veritas AS, "Environmental Conditions and Environmental Loads", 2014

[23] J. Falnes, "On non-causal impulse response functions related to propagating water waves", *Applied Ocean Research*, 17(6):379-389, 1995.

[24] W.E. Cummins, "The Impulse Response Function and Ship Motions" Technical Report, David Taylor Model Basin-DTNSRDC, 1962.

[25] S. Kung. "A new identification and model reduction algorithm via singular value decomposition". In *Proc. Twelfth Asilomar Conf. on Circuits, Systems and Computers*, pages 705–714, November 6-8 1978.

[26] M. Hall and A. Goupee, "Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data", *Ocean Engineering*, vol. 104, pp. 590–603, Aug. 2015.

[27] J. H. Todalshaug, G. S. Asgeirsson, E. Hjalmarsson, J. Maillet, P. Möller, P. Pires, M. Guerinel, M. Lopes, "Tank testing of an inherently phase controlled Wave Energy Converter", *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*, September 2015, Nantes, France

[28] Leon E. Borgman. "Random hydrodynamic forces on objects." *Ann. Math. Statist.*, pages 37–51, 1967

[29] Åström, Karl J. Hägglund, Tore. (2006). "Advanced PID Control." ISA.

[30] Carlos Vazquez, "Security of supply in the Dutch electricity market: the role of reliability options", Report IIT-03-084IC, 2003.

[31] Lazard, "Lazard's levelized cost of storage, v2.0", 2016.

[32] Australian Energy Market Operator, "Guide to ancillary services in the national electricity market", 2015

[33] Tianzhi Zhou, "Damping Profile Research for Corpower Ocean's Wave Energy Converter", Master's Thesis in Optimization and Systems Theory, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2016.

[34] <https://www.hydac.com/uploads/media/E3554-0-06-11DKSlq.pdf>

[35] <http://www.hydba.com/es/wp-content/uploads/2017/01/Ficha-t%C3%A9cnica-CAIngl%C3%A9s.pdf>

[36] <http://www.hydba.com/es/wp-content/uploads/2017/01/Ficha-t%C3%A9cnica-CAIngl%C3%A9s.pdf>

[37] Pontes, M. T. et. al. , "The European Wave Energy Resource", 3rd EWEC, Patras, Greece, September 1998.

[38] S. Petroncini, "Introducing Wave Energy into the Renewable Energy Market", Msc Thesis, Univ. of Edinburgh, 2002.

[39] G. Lemonis, et al., "Wave Power in Europe- Current Status and Perspectives", Renewable Sustainable Energy Reviews, accepted for publ., 2002

[40] Alatsathianos S., Fafali P., Wave and current energy: A viable scheme to exploit the energy potential of Greek seas

[41] Khan Jahangir and Bhuyan Gouri S., Powertech OCEAN ENERGY: GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT STATUS Final Technical Report.

[42] Mylonas E. M., Dipl. Mar. Eng. - Systems Analyst (Technical Director, DAEDALUS Informatics) WECA, Introduction to a Hybrid (Wave Wind) Renewable Energy, Technology Multipurpose Site

[43] Sørensen Hans Chr., Naef Stefan Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant)