ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καδόγλου Ευάγγελος (ΤΦ276)

Φρατζεσκάκη Αργυρώ (ΤΦ1092)

Τζιαμπαζίδης Απόστολος (ΤΦ277)

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Κατσίγιαννης

Χανιά 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών και θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όσους συνέβαλαν καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.
Αρχικά, οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή, Κατσίγιαννη Ιωάννη, για την άρτια επιστημονική καθοδήγηση, τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις και την ουσιαστική υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο στη διαμόρφωση της ερευνητικής προσέγγισης όσο και στην ανάπτυξη της τελικής μελέτης.
Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη συνεχή ενθάρρυνση, ψυχολογική υποστήριξη και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμβολή τους υπήρξε θεμελιώδης.
Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στην Αργυρώ και τον Απόστολο, με τους οποίους συνεργαστήκαμε στενά καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Η ουσιαστική συμβολή τους, η δημιουργική ανταλλαγή ιδεών και η αμοιβαία υποστήριξη υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την εύρυθμη πορεία και την επιτυχία του τελικού αποτελέσματος.

Καδόγλου Ευάγγελος

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων μου για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, παράρτημα Χανίων.
Με το πέρας πλέον αυτής της πορείας θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν άμεσα ή έμμεσα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, οικογένεια, φίλους και καθηγητές.
Κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή της διπλωματικής, αξιότιμο κύριο Κατσίγιαννη Ιωάννη, για τη βοήθεια, τη συνεχή καθοδήγηση και τις υποδείξεις του, που στάθηκαν πολύτιμες για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.
Ευχαριστίες οφείλω επίσης στους συναδέλφους Καδόγλου Ευάγγελο και Φρατζεσκάκη Αργυρώ για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.
Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στην γραμματεία του τμήματος και ιδιαίτερα στην κυρία Μαρκουλάκη Γιούλη για το ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι και το τέλος της πορείας μου στο πρόγραμμα σπουδών του τμήματος.

Τζιαμπαζίδης Απόστολος

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν στην πορεία προς την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Κατσιγιάννη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου αυτού.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς τη μητέρα μου, Πηνελόπη, για την αμέριστη αγάπη, την ασταμάτητη στήριξη και την πίστη της σε εμένα όλα αυτά τα χρόνια. Η παρουσία της αποτέλεσε για μένα πηγή δύναμης και ενθάρρυνσης.

Ιδιαίτερη αναφορά οφείλω στον πατέρα μου, Βύρωνα, ο οποίος δεν βρίσκεται πια κοντά μας. Η μνήμη του, οι αξίες που μου δίδαξε και η δύναμη του χαρακτήρα του με συνοδεύουν σε κάθε μου βήμα. Αυτή η εργασία είναι αφιερωμένη και σε εκείνον.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω στα αδέρφια μου, Φρόσω και Θοδωρή, για την αγάπη, την ενθάρρυνση και τη συνεχή τους παρουσία στη ζωή μου, που με στηρίζουν ψυχικά και συναισθηματικά.

Ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στον σύντροφό μου, Γιώργο, για την υπομονή, την αγάπη και τη στήριξή του σε κάθε δύσκολη και απαιτητική στιγμή αυτής της διαδρομής.

Ευχαριστώ επίσης τον Βαγγέλη και τον Απόστολο, που συνεργαστήκαμε από κοινού στην εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας. Η πολύτιμη συνεισφορά τους, οι ιδέες τους και η αλληλοϋποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της δουλειάς μας αποτέλεσαν βασικό παράγοντα για την επιτυχία του αποτελέσματος.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη Γιούλη, που με τη βοήθεια και την πολύπλευρη υποστήριξή της συνέβαλε καθοριστικά στο να καταφέρω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Χωρίς τη συμβολή της, η πορεία αυτή θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Ευχαριστώ, επίσης, όλους όσοι με οποιονδήποτε τρόπο συνέβαλαν και στάθηκαν δίπλα μου σε αυτό το σημαντικό ταξίδι.

Φρατζεσκάκη Αργυρώ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η βιωσιμότητα είναι μια έννοια που εδραιώνεται καθημερινά σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης ζωής. Η κοινωνία τον τελευταίο αιώνα, έχει στραφεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν παγκόσμιο θεμέλιο της ενεργειακής πολιτικής. Με απειλή την κλιματική αλλαγή, οι ΑΠΕ αποτελούν λύση για την κάλυψη των σημερινών ενεργειακών απαιτήσεων. Η θαλάσσια ενέργεια είναι ένας ανανεώσιμος και ανεξάντλητος πόρος, που προκύπτει από την ενέργεια των κυμάτων και των παλιρροιών. Η κατάλληλη τεχνολογική ανάπτυξη θα επιτρέψει την αξιοποίηση αυτού του πόρου με το βέλτιστο αποδοτικό και οικονομικό τρόπο.

Η εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη της κυματικής και παλιρροϊκής ενέργειας, καθώς και στις υπάρχουσες τεχνολογίες αξιοποίησής τους. Η μελέτη της του υδάτινου περιβάλλοντος και του ενεργειακού του δυναμικού είναι σημαντικό κριτήριο για την καθολική κατανόηση της βιωσιμότητας και της αειφορίας που προσφέρει αυτή η πηγή ενέργειας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ 6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 9
ABSTRACT 10
Κεφάλαιο 1^{Ο} : Εισαγωγή 11
1.1 Παλιρροιακή ενέργεια – Tidal Energy 12
1.2 Κυματική ενέργεια – Wave energy 15
1.2 Δομή Εργασίας 17
Κεφάλαιο 2^{ο}: Κύματα 19
2.1 Κύματα 20
2.2 Κυματική Θεωρία 21
2.2.1 Τυχαία Κύματα (Random Waves) 22
2.2.2 Γραμμικά Κύματα(Θεωρία Airy) 24
2.2.3 Θεωρία των κυμάτων του Stokes 27
2.2.4 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων 27
2.2.5 Τροποποίηση των κυμάτων (Wave Modification) 28
2.3 Δέσμευση κυματικής ενέργειας 30
2.3.1 Πλωτές διατάξεις 31
2.3.2 Συντονισμός 32
2.4 Είδη μετατροπέων κυματικής ενέργειας WEC 32
2.4.1 WECs και απόσταση από την ακτή 33
2.4.2 WECs και αρχή λειτουργίας 33
2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυματικής ενέργειας 35
Κεφάλαιο 3^{Ο} : Παλιρροιακή Ενέργεια 37
3.1 Παλίρροια 37
3.1.1 Στατική παλίρροια 37
3.1.2 Δυναμική Παλίρροια 38
3.1.3 Μετεωρολογική παλίρροια 39
3.1.4 Παλιρροιακή Ενέργεια 39
3.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης παλιρροιακής ενέργειας 41
3.2.1 Δυναμική ενέργεια παλίρροιας 41
3.2.2 Κινητική Ενέργεια Παλίρροιας 44
3.2.2.1 Στρόβιλοι αξονικής ροής (HATTs) 44

3.2.2.2 Στρόβιλοι εγκάρσιας ροής (VATTs) 45
3.2.2.3 Συσκευές Venturi 45
3.2.2.4 Στρόβιλος Darrieus 46
3.2.2.5 Στρόβιλος τύπου Savonius 47
3.2.2.6 Παλινδρομική συσκευή 47
3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παλιρροιακής ενέργειας 48
Κεφάλαιο 4ο Συστήματα Κυματικής Ενέργειας – WECs 50
4.1 Pelamis 50
4.2 PowerBuoy 51
4.3 Oyster 52
4.4 Limpet & Mutriku 54
4.6 WaveDragon 55
4.7 Penguin 56
Κεφάλαιο 5ο Συστήματα μετατροπής παλιρροϊκής ενέργειας 58
5.1 Andritz Hydro Hammerfest 58
5.2 Tidal Generation 59
5.3 Atlantis Resources 59
5.4 OpenHydro 60
5.5 Pulse Tidal 61
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 64

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων 20
Πίνακας 2: Κατηγορίες κυμάτων με κριτήριο τη χρονική περίοδο. 21
Πίνακας 3: Ορισμοί περιόδου κύματος 24
Πίνακας 4: Παραδοχές γραμμικής θεωρίας. 24
Πίνακας 5: Εξισώσεις ταχύτητας και μήκους κύματος. 25
Πίνακας 6: Περιστροφικές και μη κινήσεις. 31

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μεταφορά στροβίλου 11
Εικόνα 2: κύριες παλιρροϊκές συνιστώσες. 13
Εικόνα 3: Παλιρροϊκή Κατανομή. 14
Εικόνα 4: Έργα εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας. 15
Εικόνα 5: Ενέργεια κύματος. 16
Εικόνα 6:Ακτογραμμές με μεγάλο περιεχόμενο κυματικής ενέργειας. 17
Εικόνα 7: Αναπαράσταση κύματος 21
Εικόνα 8: Ακολουθία τυχαίων κυμάτων 22
Εικόνα 9 : Κατανομή Rayleigh 22
Εικόνα 10: Χαρακτηρισμός κυμάτων 25
Εικόνα 11: Κίνηση των μορίων του νερού 26
Εικόνα 12: Ενδεικτικές τιμές Τ, λ και c 26
Εικόνα 13: Χαρακτηριστικά γραμμικού κύματος 26
Εικόνα 14: Μεμονωμένο Κύμα 28
Εικόνα 15: Δημιουργία στατικού κύματος 28
Εικόνα 16: Κάμψη κύματος φωτός 29
Εικόνα 17: Περίθλαση κύματος 29
Εικόνα 18: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κινητική ενέργεια των κυμάτων 32
Εικόνα 19: Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης νερού 34
Εικόνα 20: Συσκευές overtopping 34
Εικόνα 21: AWS 35
Εικόνα 22: Είδη Παλίρροιας 38
Εικόνα 23: Δυναμικό πεδίο 39
Εικόνα 24: Σταθμός παλιρροιακής ενέργειας στη Rance 40
Εικόνα 25: Επίδραση της σελήνης στο εύρος της παλίρροιας. 40
Εικόνα 26: Τομή παλιρροιακού φράγματος 41
Εικόνα 27: Εγκαταστάσεις στην Αννάπολη 42
Εικόνα 28: Παλιρροιακή λιμνοδεξαμενή με τη χρήση λογισμικού. 43
Εικόνα 29: Τα μεγαλύτερα παλιρροιακά φράγματα. 43
Εικόνα 30: HATT (αριστερά), VATT (δεξιά) 44
Εικόνα 31: Σύστημα κατακόρυφου άξονα 45
Εικόνα 32: Σύστημα Venturi. 46
Εικόνα 33: Στρόβιλοι Savonius (αριστερά), Darrieus (δεξιά) 47
Εικόνα 34: 5 διαμορφώσεις του υδροστροβίλου Savonius 47
Εικόνα 35: Παλινδρομική συσκευή. 48
Εικόνα 36: Pelamis P2 50
Εικόνα 37: Αγωγός Pelamis. 51
Εικόνα 38: PowerBuoy 150 kW 51
Εικόνα 39: Διαστάσεις PB150. 52
Εικόνα 40: Oyster 52
Εικόνα 41: Oyster 800 53
Εικόνα 42: Διάγραμμα λειτουργίας Limpet & Mutriku 54
Εικόνα 43: Mutriku 54
Εικόνα 44:Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας Wave Dragon 55
Εικόνα 45: Χαρακτηριστικά Wave Dragon 56

Εικόνα 46: Penquin. 56
Εικόνα 47: Μοντέλο HS300 της εταιρείας Hammerfest..... 58
Εικόνα 48:Μοντέλο TGL 500kW 59
Εικόνα 49:Μοντέλο AR1000 60
Εικόνα 50:OpenHydro στρόβιλος 60
Εικόνα 51: Υδροπτέρυγα Pulse-Tidal 61

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθούν οι τεχνολογίες και τα συστήματα που σχετίζονται με την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας. Η θαλάσσια ενέργεια αποτελείται από την κυματική και τη παλιρροϊκή ενέργεια, τις οποίες θα μελετηθούν αναλυτικά. Σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να παρουσιασθούν οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης του θαλάσσιου πόρου ενέργειας.

Αρχικά, παρουσιάζονται το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο για τη κυματική και παλιρροϊκή θεωρία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες και οι διατάξεις εκμετάλλευσης και μετατροπής της κυματικής και παλιρροϊκής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά τα είδη των συσκευών που χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας τεχνικά έργα. Τέτοιες μελέτες περίπτωσης είναι το έργο Pulse Tidal, Pelamis, Penguin, OpenHydro κ.λπ. Σε κάθε περίπτωση αναφέρονται διάφορα ζητήματα που αφορούν την εγκατάσταση και τέλος, η έρευνα καταλήγει σε συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική μελέτη που διενεργήθηκε και παρουσιάζονται προτάσεις εδραίωσης των τεχνολογιών αυτών ως πηγή ενέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Κυματική ενέργεια, Παλιρροιακή ενέργεια, Θαλάσσια ενέργεια, Μετατροπείς κυματικής ενέργειας, Μετατροπείς παλιρροϊκής ενέργειας

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the marine energy technologies and systems. Marine energy consists of wave and tidal energy, which are studied thoroughly. The aim of this literature review is to present the technologies for harnessing the marine energy resource.

Initially, the theoretical background for wave and tidal theory is presented. Then, the technologies and systems for harnessing and converting wave and tidal energy into electricity are introduced. Furthermore, the types of devices used in large-scale technical projects are discussed in detail. Case studies, such as Pulse Tidal, Pelamis, Penguin, OpenHydro projects, etc., are examined. In each case, various issues related to installation of such systems are addressed. Finally, the research concludes with findings from the literature review and presents suggestions for the adoption of these technologies as viable energy sources.

Keywords: Renewable energy sources, Wave energy, Tidal energy, Ocean energy, Wave energy converters (WECs), Tidal energy converters (TECs)

Κεφάλαιο 1^{ο} : Εισαγωγή

Η διαταραχή των κλιματικών συνθηκών τα τελευταία χρόνια, βρίσκεται στο επίκεντρο των επιστημόνων, των κρατών και του εκάστοτε πολίτη, προκαλώντας ανησυχία και μελέτη για την αντιμετώπιση και τη πρόληψη από τη κλιματική αλλαγή. Η τάση των σύγχρονων κοινωνιών για έναν πιο βιώσιμο τρόπο ζωής έχει επιφέρει αλλαγές σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας. Όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια, η κύρια πηγή της στο πλανήτη μας τους τελευταίους αιώνες προέρχεται κυρίως από τα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας και σε κάποιες χώρες είτε από πυρηνικούς αντιδραστήρες είτε υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Ωστόσο, σήμερα οι περισσότερες χώρες βρίσκονται σε ένα μεταβατικό στάδιο προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στους όρους sustainable (βιώσιμος) και carbon free (χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα) στηρίζονται οι δράσεις των ερευνητών και των πολιτικών κάθε κράτους.

Από το 1990, ο κλάδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) έχει διαδραματίσει σημαντική πρόοδο σε παγκόσμιο επίπεδο με την αιολική, την ηλιακή και την υδροηλεκτρική ενέργεια να συμβάλουν στον ενεργειακό περιεχόμενο του πλανήτη σε μεγάλα ποσοστά. Ωστόσο, το ενεργειακό δυναμικό αυτών των μορφών δεν είναι περίσσιο και για αυτό το λόγο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί και προς νέες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι τα κύματα, οι παλίρροιες και τα παλιρροιακά ρεύματα, οι οποίες δεν συμβάλουν στη παραγωγή ανθρακικού αποτυπώματος και συμφωνούν με τις προδιαγραφές για αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.



Εικόνα 1: Μεταφορά στροβίλου.

Οι νέες αυτές τεχνολογίες ανανεώσιμων μορφών ενέργειας βασίζονται στο φυσικό ενεργειακό περιεχόμενο του πλανήτη. Οι μορφές αυτές είναι ανεξάντλητες και υπάρχουν ήδη στη φύση, άρα η εκμετάλλευση τους με έναν τεχνικά αποδοτικό, βιώσιμο και οικονομικό τρόπο ενισχύει το ενεργειακό περιεχόμενο του πλανήτη. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι ο όρος «ανανεώσιμη» πηγή ενέργειας εμπεριέχει τις έννοιες ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον. Στο βιβλίο «Ένα Ηλιακό Μανιφέστο», ο πλανήτης Γη χαρακτηρίζεται ως ένα σύστημα συνεχών μετατροπών μορφών ενέργειας.

Οι εφαρμογές υπεράκτιων ανέμων έχουν αναπτυχθεί περισσότερο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες της ενέργειας των κυμάτων και της παλίρροιας, διότι χρησιμοποιούνται παρόμοιες

τεχνικές με αυτές της αιολικής ενέργειας στη ξηρά. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση στη ενέργεια από τα κύματα και τη παλίρροια καθώς και τις εφαρμογές τους. Η αξιοποίηση της παλιρροιακής και της κυματικής ενέργειας αποτελούν αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το θαλάσσιο περιβάλλον καθιστά περίπλοκη την εκμετάλλευση της παλιρροιακής και της κυματικής ενέργειας και αποτελεί εμπόδιο στην τεχνολογική πρόοδο, αφού οι υφιστάμενες τεχνολογίες δεν κατέχουν τις προδιαγραφές για το δυναμικό υδάτινο περιβάλλον, αλλά υπερτερούν στο ότι η χρήση τους συμβάλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος, αφού παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματος. Αυτό ισχύει γενικά για τις ΑΠΕ, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και η κυματική και η παλιρροϊκή ενέργεια αλλά δεν παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας όπως άλλες ανανεώσιμες πηγές της ξηράς και αυτό σήμερα αποτελεί, επίσης, θέμα έρευνας.

1.1 Παλιρροιακή ενέργεια – Tidal Energy

Ως παλίρροια ορίζεται η περιοδική κίνηση των υδάτων που προκαλείται από τις ελκτικές δυνάμεις που τους ασκούν ορισμένα ουράνια σώματα, όπως ο ήλιος και η σελήνη. Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο ακραίων καταστάσεων, το άνω όριο που ονομάζεται πλήμμη και το κάτω όριο ως ρηχία. Η διαφορά μεταξύ αυτών των ορίων, δηλαδή μιας πλήμμης και της αμέσως επόμενης ρηχίας καλείται παλιρροιακό εύρος.

Με την άνοδο της στάθμης των υδάτινων μαζών προκαλείται και οριζόντια ροϊκή μετατόπιση που ονομάζεται πλημμυρίδα και αντίστοιχα με τη κάθοδο των υδάτων σχηματίζεται ροή, που ονομάζεται αμπώτιδα και έχει αντίθετη φορά. Κατά τη διαδικασία αυτή, δηλαδή κατά τη διάρκεια αλλαγής της φοράς της ροής της παλίρροιας και η εναλλαγή από πλημμυρίδα σε αμπώτιδα και το αντίστροφο, οι ταχύτητες οριζόντιας διεύθυνσης έχουν υπολογιστή μηδενικές. Λόγω των μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών ταχυτήτων τα θαλάσσια ύδατα ονομάζονται νεκρά.

Εντός μιας ημέρας έχουν παρατηρηθεί δύο πλήμμες, δηλαδή το άνω όριο της στάθμης των υδάτων και ρηχίες, δηλαδή η ελάχιστη στάθμη των υδάτων. Ο τύπος αυτός παλίρροιας ονομάζεται ημι-ημερήσιος. Επίσης, υπάρχουν σημεία σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, δηλαδή προς τους πόλους της Γης που προκαλείται μια πλήμμη και μια αμπώτιδα ανά ημέρα. Αυτός ο τύπος παλίρροιας καλείται ημερήσιου τύπου.

Στο περιοδικό φαινόμενο αλλαγής της στάθμης των υδάτων ενδιαφέρον μελέτης αποτελεί η κάθετη μετατόπισης των υδάτων, δηλαδή η παλίρροια και στον οριζόντιο άξονα το παλιρροιακό ρεύμα.

Το ύψος της στάθμης της πλήμμης δεν είναι σταθερό, μεταβάλλεται ανά τις ημέρες και έχει παρατηρηθεί ότι επαναφέρεται στην ίδια στάθμη προσεγγιστικά κάθε 29 μέρες, δηλαδή όσο το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η σελήνη για μια πλήρη περιστροφή γύρω από τη Γη. Η μέγιστη πλήμμη σημειώνεται όταν έχει πανσέληνο ή νέο φεγγάρι.

Η ευθυγράμμιση μεταξύ σελήνης – γης – ήλιου επιτρέπει τις ελκτικές δυνάμεις να πάρουν τις μέγιστες τιμές τους και το φαινόμενο αυτό των παλιρροιών ονομάζεται περίοδος συζυγίας. Ενώ, όταν η σελήνη βρίσκεται στη πρώτη ή τρίτη φάση, δηλαδή ο ήλιος και η σελήνη είναι σε

ορθή γωνία, παρατηρείται της πλήμμης και της ρηχίας και αναφέρεται ως περίοδος των τετραγωνισμών.

Η παλίρροια, λοιπόν, είναι συνισταμένη από ένα σύνολο κυμάτων, εκ των οποίων έκαστο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, δηλαδή συγκεκριμένη περίοδο και εύρος. Μέσα από τη μελέτη παλιρροιών έχουν προκύψει 390 συνιστώσες, από τις οποίες 160 είναι ημερήσιου τύπου, 115 ημι-ημερησίου, 100 συνιστώσες με περίοδο της τάξης του εικοσιτετράωρου και 14 του ενός τρίτου του ημερήσιου. Από όλες τις συνιστώσες, ουσιαστικά οι 19 έχουν πρακτική σημασία και συμβολίζονται με κάποιο γράμμα και έναν δείκτη το 1 ή 2 με βάση τον η συνιστώσα είναι ημερήσιου ή ημι-ημερήσιου τύπου, αντίστοιχα.

Όνομα	Σύμβολο	Περίοδος (ώρες)
Ημι-ημερήσιες συνιστώσες	(δύο μέγιστα/ελάχιστα ανά ημέρα)	
Κύρια Σεληνιακή	M_2	12,42
Κύρια Ηλιακή	S_2	12,00
Ελλειπτική Σεληνιακή	N_2	12,66
Συνδυασμός Ηλιακής-Σεληνιακής	K_2	11,97
Ημερήσιες συνιστώσες	(ένα μέγιστο/ελάχιστο ανά ημέρα)	
Συνδυασμός Ηλιακής-Σεληνιακής	K_1	23,93
Κύρια Σεληνιακή	O_1	25,82
Ηλιακή	P_1	24,07
Παλίρροιες μεγάλης περιόδου		
Σεληνιακή δεκαπενθημέρου	M_f	327,86
Ηλιακή - Σεληνιακή δεκαπενθημέρου	M_{Sf}	354,36
Σεληνιακή μηνιαία	M_m	661,30
Ηλιακή ημιετήσια	S_{Sa}	4384,90
Ηλιακή ετήσια	S_a	365,242

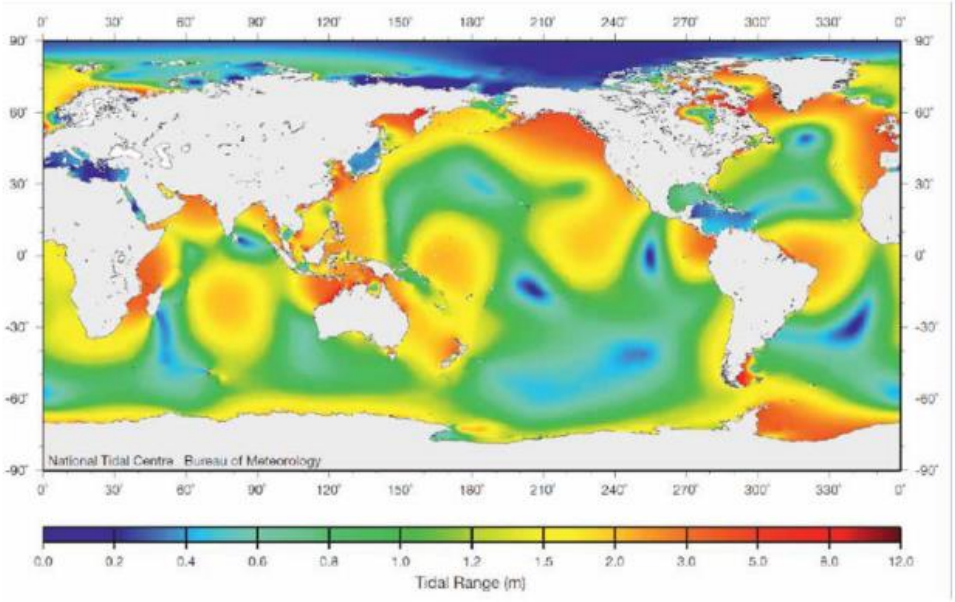
Εικόνα 2: κύριες παλιρροϊκές συνιστώσες.

Από το παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι η M_2 είναι η συνιστώσα που συμβάλει κυρίως στη μεταβολή της στάθμης των υδάτων. Οι παλιρροϊκοί υπολογισμοί βασίζονται στη συνιστώσα αυτή, η οποία έχει περίοδο T= 12,42 ώρες και είναι ημι-ημερήσιου τύπου.

Το φαινόμενο των παλιρροιών έχει και αυτό με τη σειρά του επηρεαστεί από την κλιματική αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα, το λιώσιμο των πάγων και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας έχουν ως αποτέλεσμα κοιλάδες ποταμών να πλημμυρίσουν από τη θάλασσα, δημιουργώντας παλιρροϊκές εκβολές ή ρίες. Ως ρία καλείται κάθε παράκτιος σχηματισμός, που προκύπτει από τη βύθιση κοιλάδας ποταμού και δημιουργείται στενός και μακρύς «διάδρομος» εισόδου. Η βαθυμετρία και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τη ταχύτητα διάδοσης των παλιρροϊκών κυμάτων και οι μέγιστες ταχύτητες αναπτύσσονται στο ανώτερο σημείο του κύματος.

Οι παλίρροιες εμφανίζουν έντονη περιοδικότητα γεγονός που επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη από παρατηρήσεις και δεδομένα. Ωστόσο, ένα παλιρροϊκός κύκλος δεν είναι συμμετρικός, αφού το χρονικό διάστημα μεταξύ της αμπώτιδας και την επόμενης πλημμυρίδας είναι πολύ μικρότερο από το χρονικό διάστημα μεταξύ πλημμυρίδας και της επόμενης αμπώτιδας.

Το φαινόμενο των παλιρροιών και η έντονη περιοδικότητα του το καθιστούν προβλέψιμο, αλλά όχι σταθερό. Σε ένα περιβάλλον ποταμού, τα παλιρροϊκά ρεύματα εμφανίζουν μεγάλες ταχύτητες σε εκβολές ποταμών και η μέγιστη ταχύτητα να συμπίπτει με την πλήμμης ενώ σε κάποιο άλλο σημείο του ποταμού η παλίρροια να αντιπροσωπεύει ένα στάσιμο κύμα. Σε ποτάμι, ωστόσο, τα ρεύματα αμπώτιδας έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό δυναμικό από τα παλιρροϊκά ρεύματα πλημμύρας και για αυτό σε πόλεις που τοποθετούνται κοντά σε εκβολές ποταμών βασίζονται σε αυτό το φαινόμενο ροής για να οδηγούν τα λύματα τους προς τη θάλασσα.



Εικόνα 3: Παλιρροϊκή Κατανομή.

Η ενέργεια από τις παλίρροιες προέρχεται από τα ρεύματα, το παλιρροιακό εύρος και τα ρεύματα κυκλοφορίας των υδάτινων μαζών σε ωκεανούς, θάλασσες και ποτάμια. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα ρεύματα σε ωκεανούς και θάλασσες προκύπτουν από παράγοντες όπως η περιστροφή της γης, τους ανέμους, τη θερμοκρασία, τη βαρύτητά και την αλατότητα. Η θέση τους, το πλάτος, το βάθος και η ροή τους καθορίζονται από το σχήμα της εν λόγω θαλάσσιας λεκάνης και τη δύναμη Coriolis, που προκαλείται από την περιστροφή της Γης, δρώσα τόσο στον αέρα όσο και στο νερό. Η ροή τους συνήθως θεωρείται συνεχής σχεδόν σε μία κατεύθυνση, και χαρακτηρίζονται από χαμηλή μεταβλητότητα και υψηλή προβλεψιμότητα. Από την ταχύτητα ροής των ρευμάτων εξαρτάται και η διαθέσιμη παλιρροιακή ενέργεια. σύμφωνα με το Khare (2019) ταχύτητες μεγαλύτερες από 1,1 m/s οικονομικά ευνοούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρουσία νησιών, ακρωτηρίων, κολπίσκων και η αυξημένη παροχή σε κόλπους και εκβολές συμβάλουν στην ενεργειακή διαθεσιμότητα από παλίρροιες. Η μορφολογία επίσης του εδάφους των κόλπων ενδεχομένως να δημιουργήσει μεγάλα παλιρροϊκά εύρη και άρα μεγάλα παλιρροιακά ρεύματα. Οι παράκτιες περιοχές με υψηλά παλιρροϊκά εύρη ή σημαντικά παλιρροϊκά ρεύματα οι οποίες είναι οικονομικά εφικτές για την παραγωγής είναι περιορισμένες. από την άλλη και σε περιοχές με υψηλές ταχύτητες άνω των 2,5 m/s, ως

γνωστόν από τη κίνηση των ρευστών, δημιουργείται τυρβώδης ροή, γεγονός που προκαλεί αστάθεια στη διαθεσιμότητα των πόρων με τη πάροδο του χρόνου και του χώρου.

Σε παγκόσμιο επίπεδο τοποθεσίες όπως το Pentland firth (Ηνωμένο Βασίλειο), ο κόλπος Fundy (Καναδάς), ο πορθμός Cook (Νεα Ζηλανδία) είναι σημεία ανάπτυξης της παλιρροιακής ενέργειας. Ευνοημένο σημείο στο κόσμο για εκμετάλλευση της παλιρροιακής ενέργειας είναι το Ηνωμένο Βασίλειο και πιο συγκεκριμένα η Σκωτία τόσο λόγω της γεωγραφικής θέσης, αλλά και της διαθέσιμης τεχνολογίας και της πολιτικής πρωτοβουλίας να λάβει ηγετική θέση στο τομέα των θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Χώρα	Περιοχή	Εταιρεία αξιοποίησης	Σύστημα λειτουργίας	Έτος έναρξης λειτουργίας	Αριθμός γεννητριών	Συνολική ισχύς (kW)	Κατάσταση έργου
Ισραήλ	Port of Jaffa Tel-Aviv	ECO Wave Power	Τεχνολογία υβριδικής παραγωγής θαλάσσιας ενέργειας και υδρογόνου	2014	10	12.5	Σε πλήρη λειτουργία
Ιταλία	Στα ανοιχτά της νήσου Γέλα	Wavepiston	Μετατροπέας ταλάντωσης κυμάτων	-	1	100	Πρώιμος σχεδιασμός
Ιταλία	Στενό της Μεσίνα	Ponte di Archimede - SeaPower scrl	Στρόβιλος κάθετου άξονα εγκάρσιας ροής τύπου Kobold ή H-Darrieus	2006	1	55	Σε πλήρη λειτουργία
Ιταλία	Λιμάνι του Σαλέρνο	WAVENERGY.it S.r.l.	Στήλη ταλαντευόμενου νερού σε κυματοθραύστη	-	3	-	Πρώιμος σχεδιασμός
Ιταλία	Port of Civitavecchia	WAVENERGY.it S.r.l.	Στήλη ταλαντευόμενου νερού σε κυματοθραύστη	-	124	2500	Σε μερική λειτουργία
Ιταλία	Μαρίνα πλησίον Πίζας	Enel Green Power S.p.A.	Μετατροπέας ταλάντωσης κυμάτων	2015	1	50	Σε πλήρη λειτουργία
Ιταλία	Αδριατική θάλασσα	Ocean Power Technologies (OPT)	Μετατροπέας ταλάντωσης κυμάτων με σημειακό απορροφητήρα ενέργειας	2018	1	3	Σε πλήρη λειτουργία
Ιταλία	Νήσος Πιάνα	Wavepiston	Μετατροπέας ταλάντωσης κυμάτων	-	1	150	Εξουσιοδοτημένη συναίνεση
Ελλάδα	Λιμάνι Ηρακλείου	SINN Power	Μετατροπέας ταλάντωσης κυμάτων με σημειακό απορροφητήρα ενέργειας	2018	4	8	Σε μερική λειτουργία

Εικόνα 4: Έργα εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας.

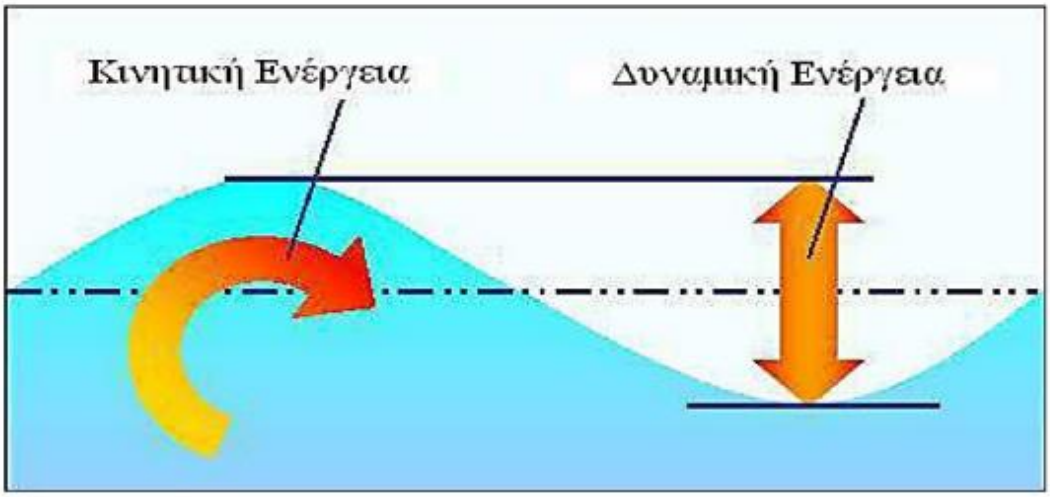
Ο ελλαδικός χώρος αν και εκτεθειμένος σε μεγάλους όγκους υδάτινων μαζών δεν επηρεάζεται έντονα από τις παλίρροιες. Το μοναδικό ισχυρό παλιρροϊκό ρεύμα απαντάται στο πορθμό του Ευρίπου, στο όποιο έχουν καταγράφει μέχρι και 7 κόμβοι, δηλαδή περίπου 3,6 m/s. Η παλίρροια συζυγίας στην Ελλάδα κυμαίνεται από 0,1-0,8 μέτρα.

1.2 Κυματική ενέργεια – Wave energy

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς, η παραγωγή της οποίας βασίζεται κυρίως στη καύση των ορυκτών πόρων. Η διαδικασία αυτή επηρεάζει άμεσα το περιβάλλον τόσο στη διαθεσιμότητα των πόρων όσο και στην διαχείριση των καυσαερίων τους στο πλανήτη. Μια λύση του προβλήματος αυτού όπως ήδη έχει επισημανθεί στη παρούσα μελέτη είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μια ακόμη πηγή ΑΠΕ αποτελούν οι θαλάσσιοι πόροι, δηλαδή η κυματική ενέργεια.

Πολλές φορές ο όρος κυματική ενέργεια και η δύναμη αυτών συνδέεται με αρνητικές συνέπειες για την κοινωνία λόγω καταστροφών που έχουν προκαλέσει πολλές φορές τα κύματα. Ωστόσο από τον 18^{ο} αιώνα οι επιστήμονες εντόπισαν τη δυναμική των κυμάτων και άρχισαν οι προσπάθειες εκμετάλλευσης της. Πιο συγκεκριμένα, το 1799 ο Γάλλος μηχανικός Pierre Girard και ο γιος του σχεδίασαν έναν μηχανισμό που αξιοποιούσαν την κυματική ενέργεια για την μεταφορά της ξυλείας, αλλά δεν βρήκε ευρεία εφαρμογή.

Ως κυματική ενέργεια ορίζεται το κινηματικής και δυναμικής ενέργειας. Η κινητική ενέργεια προέρχεται από την περιστροφική κίνηση των μορίων του νερού και η δυναμική ενέργεια οφείλεται στην ταλάντωσή τους περί τον κατακόρυφο άξονα.



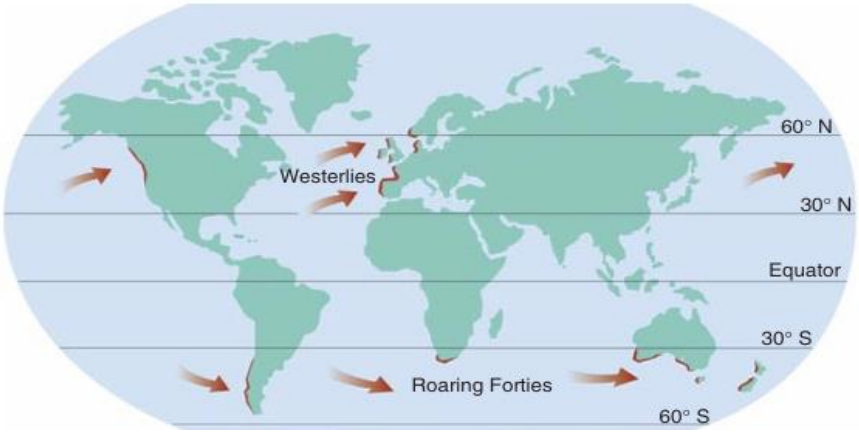
Εικόνα 5: Ενέργεια κύματος.

Όπως κάθε ΑΠΕ, έτσι και τα κύματα είναι μια ανεξάντλητη μορφή πηγής ενέργειας, δεν απαιτείται παραγωγή καυσαερίων για την αξιοποίηση της, άρα μια φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος. Πιο συγκεκριμένα, μελέτες έχουν δείξει ότι για κάθε MWh ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από τα κύματα εξοικονομούνται 136 Mtn διοξειδίου του άνθρακα. Αλλά σε αυτό που υπερτερεί η κυματική ενέργεια από τις άλλες ΑΠΕ είναι οι υψηλές τιμές των ενεργειακών πυκνοτήτων. Η ενεργειακή πυκνότητα στην επιφάνεια της θάλασσας μετράτε πέντε φορές υψηλότερη από την αιολική ενέργεια και περίπου είκοσι φορές μεγαλύτερη από την ηλιακή ενέργεια στην αντίστοιχη περιοχή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη πυκνότητα και το νερό από το οποίο παράγεται η κυματική ενέργεια είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από του αέρα (ρ_{water}=997 kg/m^3).

Η διαθεσιμότητα των πόρων κυματικής ενέργειας έχει υπολογιστεί σε 2TW ισοδυναμία με ηλεκτρική ισχύ και αντιστοιχεί στο ποσό παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό η κυματική ενέργεια αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον παγκόσμιο ενεργειακό τομέα.

Η κατανομή της κυματικής ενέργειας, ωστόσο, δεν είναι ισοδύναμα κατανεμημένη στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στους ανέμους κάθε περιοχής, οι οποίοι είναι η αιτία δημιουργίας των κυμάτων. Επίσης, οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης λόγω άνισης κατανομής της ηλιακής θέρμανσης ωθούν τον αέρα από τις περιοχές υψηλής πίεσης σε

χαμηλότερες πιέσεις., με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται άνεμοι οι οποίοι εξαρτώνται από τη περιστροφή της Γης και ωθούνται να καταλαμβάνουν συγκεκριμένα γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Τα μεγαλύτερα ποσά κυματικής ενέργειας έχουν μετρηθεί στις περιοχές του Νότιου Ειρηνικού και του Ανατολικού Ατλαντικού.



Εικόνα 6:Ακτογραμμές με μεγάλο περιεχόμενο κυματικής ενέργειας.

Η ισχύς των κυμάτων, δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης της κυματικής ενέργειας προς τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων μετράτε σε kW και πιο συγκεκριμένα σε kW/m (μέτρο μετώπου του κύματος).

Η σημασία των γεωγραφικών συντεταγμένων και της κατεύθυνσης των ανέμων εν συντομία σχηματίζουν τα παρακάτω:

- Δυτικοί άνεμοι (westerlies): Είναι αρκετά δυνατοί, απαντώνται σε γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 40 και 60 μοιρών, οφείλονται για το μεγαλύτερο ποσό κυματικής ενέργειας που είναι διαθέσιμο προς αξιοποίηση.
- Αληγείς άνεμοι (trade winds): Δημιουργούνται σε γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 10 και 30 μοιρών, παράγουν κύματα μικρότερου ενεργειακού δυναμικού από τους δυτικούς ανέμους, αλλά πιο σταθερούς.
- Πολικοί ανατολικοί άνεμοι (polar easterlies): Είναι μικρά κύματα με ενεργειακές απώλειες λόγω της σύγκρουσής τους με παγετώνες, οπότε δεν συμβάλουν σημαντικά στο ενεργειακό δυναμικό.

1.2 Δομή Εργασίας

Ο στόχος του ανθρώπου να στραφεί σε αειφόρες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σήμερα μια επιτακτική ανάγκη εξαιτίας της κλιμάκωσης της κλιματικής αλλαγής. Η επιδίωξη μείωσης των ρύπων, του ανθρακικού αποτυπώματος και η γενικότερη αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κατέστησαν αναγκαία την ανάπτυξη τεχνολογιών που αποτελούν τρόπους για βιώσιμες επιλογές. Μια τέτοια επιλογή είναι η ανάπτυξη συστημάτων εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας, δηλαδή που προέρχεται από την κυματική και παλιρροϊκή ενέργεια. Οι παραπάνω αποτελούν ανανεώσιμο, άφθονα διαθέσιμο πόρο προσφέροντας σημαντικά ποσά ενέργειας.

Η παρούσα εργασία μελετά τις τεχνολογίες μετατροπής της κυματικής και της παλιρροϊκής ενέργειας σε ηλεκτρική και στοχεύει στη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των συστημάτων.

Στο 1ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις έννοιες του κύματος και της παλίρροιας, καθώς και πως κατανέμονται ενεργειακά σε παγκόσμιο επίπεδο. Στη συνέχεια, στο 2ο κεφάλαιο, γίνεται διεξοδική ανάλυση της κυματικής θεωρίας και των τεχνολογιών μετατροπής κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επίσης, στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έννοια της παλιρροϊκής ενέργειας και τα συστήματα μετατροπής της σε ηλεκτρική όπως στρόβιλοι αξονική και εγκάρσιας ροής και με τη βοήθεια των εικόνων οι διατάξεις γίνονται εύκολα κατανοητές.

Στο 4ο και 5ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συστήματα μετατροπής κυματικής και παλιρροϊκής ενέργειας, αντίστοιχα μέσα από σημαντικά τεχνικά έργα. Τέλος, ακολουθεί μια ενότητα με συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα. Η μελέτη αυτή είναι μια συνολική παρουσίαση των συστημάτων, που υφίστανται για την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας και την εξέλιξη τους.

Κεφάλαιο 2ο: Κύματα

Οι ενεργειακές «απαιτήσεις» των σύγχρονων κοινωνιών για αν εκπληρωθούν απαιτούν μεγάλα ποσά διαθέσιμης ενέργειας. Κατά βάση η ενέργεια αυτή προέρχεται από θερμοηλεκτρικά και πυρηνικά εργοστάσια, τα οποία βασίζουν την παραγωγή ενέργειας στη καύση των συμβατικών καυσίμων, για παράδειγμα το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, το λιγνίτη, το γαιάνθρακα κ.λπ., που με τη καύση τους επιβαρύνουν το περιβάλλον με ρύπους. Επομένως, για την αποφυγή εξάντλησης των πόρων αυτών οι επιστήμονες στρέφουν το ενδιαφέρον τους σε νέες πηγές ενέργειας, όπως και η ενέργεια των κυμάτων που θα μελετήσουμε στο παρόν εδάφιο.

Η κυματική ενέργεια αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή πηγής ενέργειας, που δύναται με τις κατάλληλες εγκαταστάσεις να εξυπηρετεί πλήρως τις παγκόσμιες ανάγκες. Είναι φανερό, πως η χρήση των συμβατικών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει διττή επιβάρυνση στη κοινωνία, πρώτον, οικονομικά λόγω της εξάντλησης τους και δεύτερον περιβαλλοντολογικά, αν αναλογιστεί κανείς ότι για την παραγωγή 1000 kWh εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα 1 τόνος διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Η ατμοσφαιρική ρύπανση, η υπερθέρμανση του πλανήτη, η άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η αύξηση των όξινων βροχών και η γενικότερη υποβίβαση των συνθηκών του περιβάλλοντος, που επιδεινώνουν τη κλιματική αλλαγή. Η ανάπτυξη νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κρίνεται αναγκαία. Η χρήση ΑΠΕ είναι η λύση για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών και αυτό το διαπιστώνει κανείς από τις επενδύσεις των αναπτυγμένων χωρών στο κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι ΑΠΕ σύμφωνα με δημοσίευση του 2019 της Αμερικανικής Υπηρεσία Ενεργειακών Πληροφοριών προβλέπει ότι μέχρι το 2050 θα αποτελούν τη κύρια πηγή κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Ανάμεσα σε όλες τις υπάρχουσες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η κυματική ενέργεια είναι σε σχετικά πιο πρώιμο στάδιο και βάση του αποθέματος της έχει χαρακτηριστεί ως ανεκμετάλλευτος πόρος. Το παγκόσμιο απόθεμά της έχει υπολογιστεί περί 1-10 TW, ενώ το εκμεταλλεύσιμο ποσό εκτιμάται περί τις 29.500 TWh ανά ώρα, η οποία υπερβαίνει το ποσό ενέργειας που καταναλώθηκε κατά το 2018. Ωστόσο, σε σχέση με την αιολική και ηλιακή ενέργεια που αποτελούν τους πιο αξιοποιημένους ανανεώσιμους πόρους, η κυματική ενέργεια παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η ισχύς της κυματικής ενέργειας είναι υψηλότερη
- Το ποσοστό διαθεσιμότητας της κυματικής ενέργειας υπολογίζεται στο 90% έναντι της αιολικής και της ηλιακής που είναι 20% και 30% ,αντίστοιχα.
- Είναι πιο εύκολο να προβλέψεις την κυματική ενέργεια, άρα διευκολύνεται και η διαδικασία της κατανομής ισχύος.
- Οι συσκευές που μετατρέπουν της κυματική ενέργεια εύκολα ενσωματώνονται στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής και ηλιακής ενέργειας για την εξομάλυνση της παραγωγής ισχύος.

2.1 Κύματα

Ως κυματισμός ορίζεται *«ένα φυσικό φαινόμενο που παρουσιάζεται στην επιφάνεια της θάλασσας και προκύπτει από την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου».* Οι κύριοι λόγοι πρόκλησης των κυμάτων είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ των σημείων της επιφάνειας της θάλασσας, η επίδραση των ανέμων, οι υποθαλάσσιοι σεισμοί και οι διαφοροποιήσεις της πυκνότητας των θαλάσσιων μαζών. Τα κύματα παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 1.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ
Έχουν κορυφή, δηλαδή το υψηλότερο σημείο του
Παρουσιάζουν κοίλα, δηλαδή τα χαμηλότερα σημεία του
Έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος, που ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων της ίδιας φάσης, δηλαδή δυο διαδοχικών κορυφών ή κοίλων.
Το ύψος του κύματος, που είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ κορυφής και κοίλου
Η ταχύτητα του κύματος που υπολογίζεται ως ο λόγος της απόστασης που προχώρησε το κύμα σε συγκεκριμένο χρόνο προς το χρονικό αυτό διάστημα.
Η περίοδος και η συχνότητα ενός κύματος

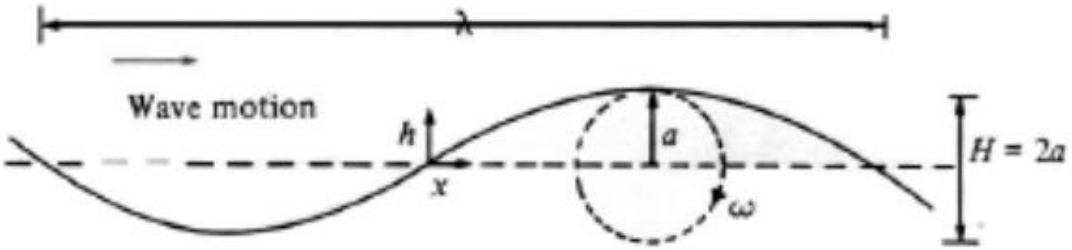
Πίνακας 1: Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων

Πλάτος κύματος (A) : $A=H/2$

Συχνότητα κύματος (f) : $f=1/T$

Κυκλική συχνότητα κύματος (ω) : $\omega=2\pi/T$

Ταχύτητα κύματος (c) : $c= \lambda/T= \omega/k$



Εικόνα 7: Αναπαράσταση κύματος

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι η ταχύτητα C, η περίοδος T και το μήκος του κύματος λ και εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου και την διάρκεια αλληλεπίδρασής τους με αυτά. Ένα κύμα, επίσης, εξαρτάται και από τη θαλάσσια μορφολογία όπως το βάθος, τη διαμόρφωση του πυθμένα, την ύπαρξη ή μη θαλάσσιων ρευμάτων. Η σχέση που συνδέει τα κύματα με τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι:

$$C=\frac{\lambda}{T}$$

Η περίοδος των κυμάτων αποτελεί το κύριο κριτήριο κατηγοριοποίησης τους. Με βάση, λοιπόν, την περίοδο των κυμάτων αυτά διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Περίοδος (sec)	**Ονοματολογία**
0,1	Τριχοειδή
0,1-1	Τριχοειδή – βαρύτητας
1-30	Βαρύτητας
30 – 300	Υποβαρύτητας
>300	Κύματα από παλίρροια ή τσουνάμι

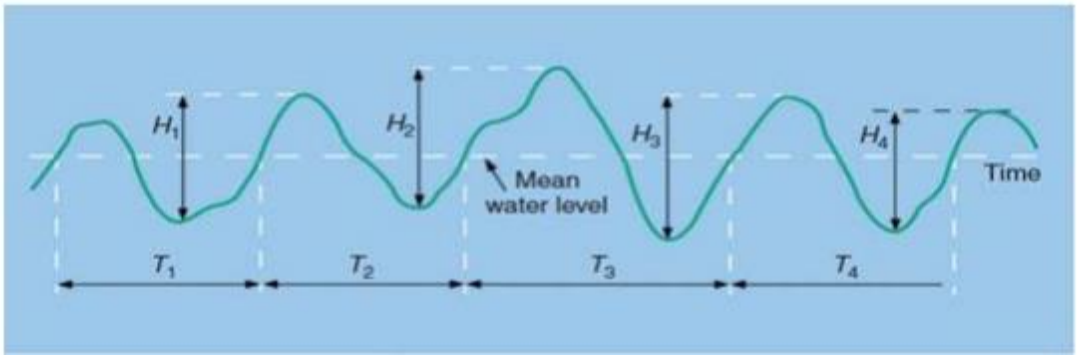
Πίνακας 2: Κατηγορίες κυμάτων με κριτήριο τη χρονική περίοδο.

2.2 Κυματική Θεωρία

Οι κυματισμοί βάση του τρόπου παραγωγής τους παρουσιάζουν ευρύ φάσμα μορφών των κυμάτων και γι΄ αυτό το λόγο δεν είναι αρκετή μια γενικευμένη θεωρία για την περιγραφή τους. Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθούν κάποιες θεωρίες- κατηγορίες των κυμάτων, οι οποίες έχουν δεχθεί κάποιες παραδοχές για την ανάπτυξή τους όσον αφορά τη σχέση μεταξύ των βασικών χαρακτηριστικών ενός κύματος, κυρίως τη σχέση ύψους κύματος και βάθους του νερού. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των θεωριών αυτών.

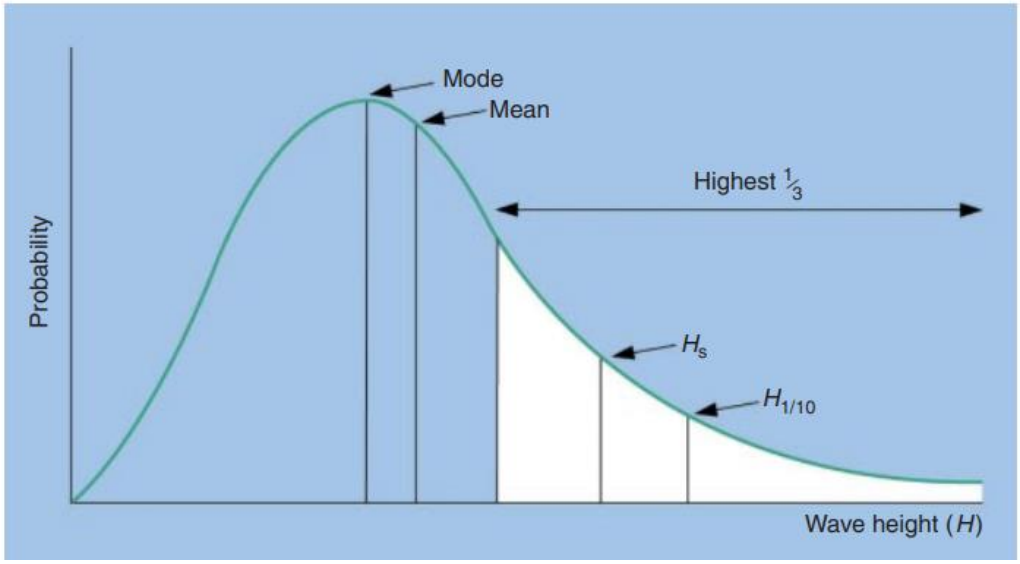
2.2.1 Τυχαία Κύματα (Random Waves)

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πιο σημαντικά κύματα, τα οποία είναι και αυτά που προσπίπτουν στους μετατροπείς της κυματικής ενέργειας και αυτά που ουσιαστικά είναι ικανά να αξιοποιηθούν και να παράγουν ενέργεια. Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται η μορφή ενός τυχαίου κύματος και όπως διαπιστώνεται ο υπολογισμός των βασικών χαρακτηριστικών του κύματος (ύψος και περίοδος) δεν είναι εφικτός. Για το παραπάνω λόγο η περιγραφή των τυχαίων κυμάτων βασίζεται σε στατιστικές μεθόδους.



Εικόνα 8: Ακολουθία τυχαίων κυμάτων

Το πιο ουσιώδες στατιστικό στοιχείο των τυχαίων κυμάτων είναι το ***σημαντικό ύψος κύματος*** (SWH- Significant Wave Height), το οποίο υπολογίζεται από τον μέσο όρο του ενός τρίτου από το σύνολο των υψηλοτέρων κυμάτων που έχουν καταγραφεί. Πιο συγκεκριμένα, εάν καταγραφούν 210 τυχαία κύματα, ο ζητούμενος μέσος όρος θα προκύψει από το ύψος των 70 υψηλότερων κυμάτων. Κατά αυτό τον τρόπο υπολογίζεται το SWH. Αυτός ο ορισμός, δόθηκε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, για τον εύκολο υπολογισμό της ταραχής της θάλασσας και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με τις υποθέσεις, που έκαναν οι εκπαιδευμένοι παρατηρητές. Το στοιχείο αυτό και η μέθοδος υπολογισμού έγινε ευρέως αποδεκτή και από μετεωρολόγους και από ναυτικούς, παρόλο που σήμερα δεν εναρμονίζεται απόλυτα με τις κλασσικές στατιστικές μεθόδους και με τις καταγραφές που κάνουν τα κατάλληλα μηχανήματα.



Εικόνα 9 : Κατανομή Rayleigh

Μια εναλλακτική για τον υπολογισμό των τυχαίων κυμάτων είναι η χρήση των μαθηματικών εξισώσεων για την διαταραχή της κίνησης που διατύπωσε ο Άγγλος φυσικός Rayleigh ανέπτυξε μια θεωρία πιθανοτήτων σχετικά με την διαταραχή των ραδιοκυμάτων. Οι εξισώσεις αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά φυσικά φαινόμενα όπως να περιγράφουν οι διακυμάνσεις των ανέμων που ωθούν σε κίνηση τους ανεμοστρόβιλους.

Υποθέτοντας μια κατανομή Rayleigh, το SWH σχετίζεται με στατιστικά μέτρα, όπως ο μέσος όρος, η διάμεσος και η τυπική απόκλιση (σ), επειδή είναι όλα αναλογικά. Για παράδειγμα, το Hs είναι πολύ κοντά σε 4·σ και, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, το SWH ορίζεται σήμερα συνήθως με αυτόν τον τρόπο, παρέχοντας αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά που υπολογίζονται με την παραδοσιακή μέθοδο. Για παράδειγμα, βάση της πρόγνωσης του καιρού υποθέτουμε SWH ίσο με 10m υποθέτοντας διαταραχές κατά Rayleigh λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές:

Μέσο ύψος κύματος	6,4 m
Πιθανό ύψος κάθε κύματος	5,1 m
Ύψος για το 10 % των κυμάτων	H > 12,7m
Ύψος για το 1% των κυμάτων	H >16.7 m

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των τυχαίων κυμάτων είναι η περίοδος T, το οποίο και αυτό στην περίπτωση των τυχαίων κυμάτων είναι μια στατιστική μεταβλητή. Ο ορισμός της περιόδου έχει δοθεί στη προηγούμενη υποενότητα. Στη περίπτωση των τυχαίων κυμάτων καλείται ως σημαντική περίοδος κύματος (SWP – Significant Wave Period), ο μέσος όρος του ενός τρίτου των περιόδων των υψηλότερων κυμάτων και άμεσα παραλληλίζεται με τον ορισμό του SWH.

Σημαντικό είναι να γίνει αναφορά και στη συχνότητα των τυχαίων κυμάτων, διότι δεν ισχύουν προφανώς οι σχέσεις μεταξύ περιόδου και συχνότητας που έχουμε μελετήσει σε σχετικά μαθήματα. Για τα τυχαία κύματα η συχνότητα αποτελεί το θεμελιώδες μέγεθος από το οποίο εξαρτώνται και οι τιμές τους και επίσης αποτελεί βασικός μέγεθος περιγραφής της τυχαιότητας των κυμάτων και των μεθόδων ανάλυσης τους.

Για την περιγραφή των τυχαίων κυμάτων μιας θάλασσας θεωρούμε ότι είναι η υπέρθεση ενός μεγάλου πλήθους τυχαίων κυμάτων αποτελούμενα από διαφορετικά ύψη και συχνότητες προς τυχαίες διευθύνσεις. Σε αυτή ακριβώς τη θεώρηση βασίζεται η μαθηματική ανάλυση Fourier. Σύμφωνα με τη θεωρία Fourier, ένα σύνθετο κύμα αποτελείται από την επαλληλία ημιτονοειδών κυμάτων με κατάλληλες τιμές συχνοτήτων, πλάτους και φάσης. Το φάσμα μια ημιτονοειδής κυματομορφής (συχνότητα, πλάτος, φάση), λοιπόν δίνει πληροφορίες σχετικά με το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στη θάλασσα.

Το φάσμα μιας κυματομορφής συμβολίζεται με S(f,θ) και όπως φαίνεται εξαρτάται από τη συχνότητα και τη γωνία της φάσης. Το φάσμα του κύματος συμβολίζεται κυρίως ως S(f). Με την ολοκλήρωση αυτής της συνάρτησης προς όλες τις συχνότητες του τυχαίου κύματος προκύπτει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από το κύμα προς τη θάλασσα.

$\int S(f,\theta)df = \frac{Hs^2}{16}$
όπου Hs: σημαντικό ύψος κύματος (SWH)

Είναι σημαντικό να τονιστεί η δισδιάστατη φύση των κυμάτων και ότι εργαζόμαστε στο πεδίο των συχνοτήτων, επομένως, η περίοδος των κυμάτων λαμβάνει τους παρακάτω ορισμούς που βοηθούν τον υπολογισμό της.

PWP - Peak Wave Period	Υπολογίζεται ως αντίστροφος της συχνότητας που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του S(f).
MWP- Mean Wave Period	Ιισούται με $\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$, στην οποία το m0 στη στιγμή που το S(f) μηδενίζεται και m2 η αντίστοιχα δεύτερη χρονική στιγμή.
EP- Energy Period	Αντιστοιχεί στη περίοδο ενός γραμμικού κύματος που μεταφέρει την ίδια συνολική ενέργεια.

Πίνακας 3: Ορισμοί περιόδου κύματος

Παρακάτω θα αναπτυχθούν δύο θεωρίες που περιγράφουν τα γραμμικά κύματα, τα οποία αποτελούν και μια πιο σπάνια περίπτωση κύματος, αλλά πιο εύκολη προς μελέτη και ανάπτυξη,

2.2.2 Γραμμικά Κύματα(Θεωρία Airy)

Η γραμμική θεωρία των κυμάτων ή θεωρία του Airy, όπως ονομάστηκε εφόσον αναπτύχθηκε από τον Άγγλο αστρονόμο και μαθηματικό Airy, ορίζει ότι το κύμα είναι ημιτονοειδούς κυματομορφής, με πλάτος Α, ύψος Η και μήκος κύματος λ. Οι παραδοχές που λαμβάνονται υπόψιν είναι ότι το Η (ύψος κύματος) είναι πολύ μικρότερο σε σχέση μα το βάθος και το λ, δηλαδή ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$H<<D \text{ και } H<<\lambda$$

Πίνακας 4: Παραδοχές γραμμικής θεωρίας.

Η γραμμική θεωρία των κυμάτων ισχύει για ανομοιογενή κύματα και η εξίσωση που περιγράφει τα γραμμικά κύματα είναι:

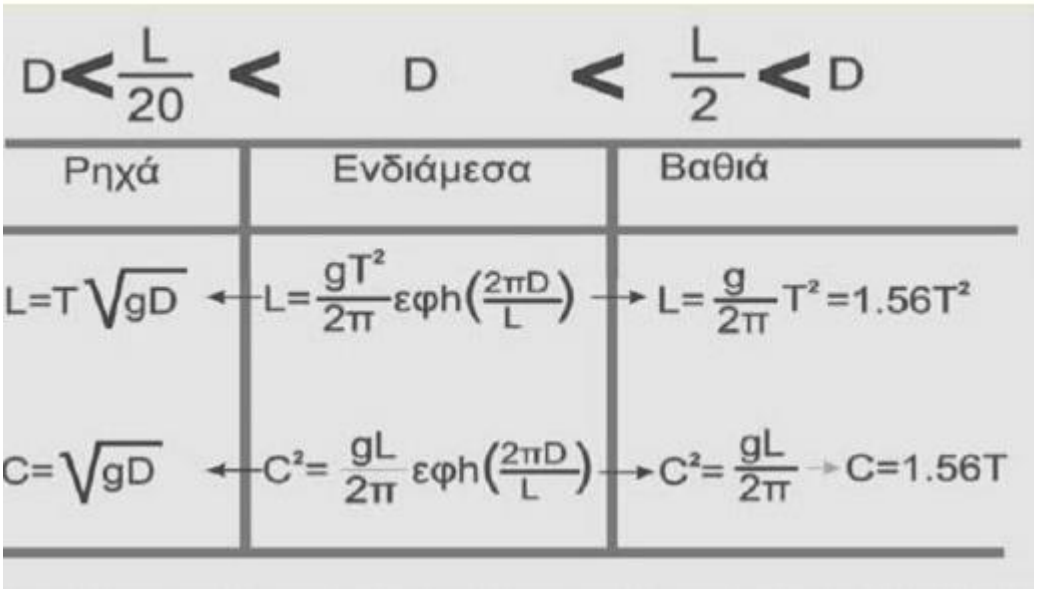
$$h=\frac{H}{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Επίσης σημαντικές εξισώσεις είναι οι εξισώσεις ταχύτητας και μήκους κύματος, οι οποίες φαίνονται στο πίνακα 5.

$C=\frac{g\lambda}{2\pi}\tanh(2\pi\frac{D}{\lambda})$
$\lambda=\frac{gT}{2\pi}\tanh(2\pi\frac{D}{\lambda})$

Πίνακας 5: Εξισώσεις ταχύτητας και μήκους κύματος.

Σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία κυμάτων (θεωρία Airy), οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να απλοποιηθούν βάση της τιμής του λόγου D / L, όπου L το μήκος κύματος και D το βάθος της θάλασσας. Ισχύουν τα παρακάτω, όπως φαίνονται στο πίνακα 6 και βάση της τιμής του λόγου D / L, τα κύματα χαρακτηρίζονται ως ρηχά, ενδιάμεσα και βαθιά :



Εικόνα 10: Χαρακτηρισμός κυμάτων

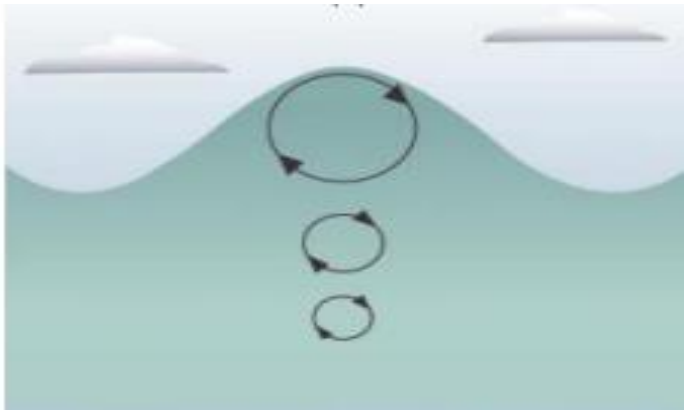
Η θεωρία του Airy μας δίνει πληροφορίες και για την κίνηση των μορίων του νερού, σύμφωνα με την οποία τα μόρια κινούνται κυκλικά με ακτίνα R που μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στη παρακάτω σχέση:

$$R=He^{\frac{-2\pi Z}{L}},$$

όπου:

Η το ύψος του κύματος.

Z το βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι το πυθμένα.



Εικόνα 11: Κίνηση των μορίων του νερού

Επίσης, σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία του κύματος το ποσό ενέργειας που μεταφέρουν εξαρτάται από το ύψος Η και δίνεται από την παρακάτω σχέση του πίνακα.. και διαπιστώνεται η αναλογία μεταξύ της περιόδου και του τετραγώνου του ύψους του κύματος.

$$J = \rho g^2 T \frac{H^2}{32\pi} = 0.986 T\, H^2 [kW/m]$$

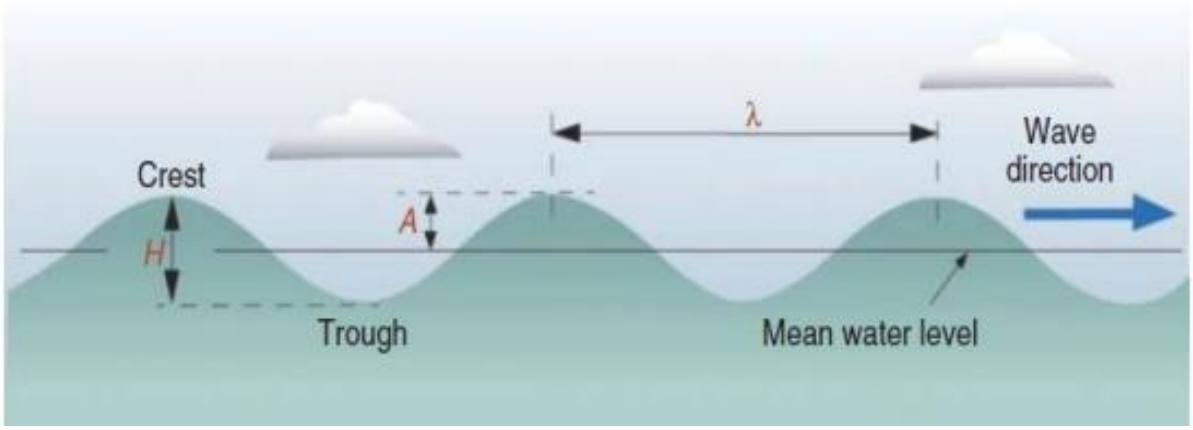
όπου ρ η ειδική πυκνότητα του θαλασσινού νερού .

Η θεωρία του Airy, εν κατακλείδι, προβλέπει μια σχέση μεταξύ της περιόδου Τ, του μήκους κύματος λ και της ταχύτητα διάδοσής τους. Επιπλέον, είναι μια θεωρία, που συμβάλει στη κατανόηση του μηχανισμού των κυμάτων, δηλαδή τη δημιουργία και τη μεταφορά τους. Στην εικόνα 12 δίνονται μερικές ενδεικτικές τιμές των παραπάνω μεγεθών.

Period T (s)	Wavelength λ (m)	Velocity c ($m\,s^{-1}$)
2	6.2	3.1
5	39	7.8
10	156	15.6

Εικόνα 12: Ενδεικτικές τιμές Τ, λ και c

Τα χαρακτηριστικά ενός γραμμικού κύματος φαίνονται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13: Χαρακτηριστικά γραμμικού κύματος

Είναι σημαντικό, λοιπόν, να θυμάται κανείς ότι η γραμμική θεωρία των κυμάτων θεωρεί δεδομένο την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή.

2.2.3 Θεωρία των κυμάτων του Stokes

Μια σημαντική παράλειψη της γραμμικής θεωρίας του Airy είναι πως δεν λαμβάνεται υπόψιν η μεταφορά μάζας κατά την μεταφορά των κυμάτων στην διεύθυνσης διάδοσής τους. Αυτό δεν θα μπορούσε να συμβαδίσει στη θεωρία του Airy, διότι αντιτίθεται στην υπόθεση ότι το ύψος του κύματος H πρέπει να είναι πολύ μικρότερο του μήκους κύματος λ, κάτι που δεν ισχύει πάντα.

Ο Stokes, λοιπόν, λαμβάνει υπόψιν στους υπολογισμούς και το ύψος H και για να ισχύει η θεωρία αυτή πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη ότι το βάθος D πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος λ, πιο συγκεκριμένα να ισχύει:

$$D/\lambda > 0{,}1$$

Επίσης, σύμφωνα με τη θεωρία του Stokes τα μόρια του νερού διαγράφουν κυκλικά τόξα και όχι κύκλους, όπως στη γραμμική θεωρία κυμάτων. Στην εικόνα.. παρουσιάζεται η κίνηση των μορίων του νερού σύμφωνα με τη θεωρία Stokes και προφανώς κινούνται στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Άρα, η θεωρία Stokes λαμβάνει υπόψιν τη μεταφορά μάζας σε αντίθεση με τη θεωρία του Airy που λαμβάνει στους υπολογισμούς της μόνο τη διάδοση ενέργειας.

Στη θεωρία αυτή η ταχύτητα υπολογίζεται ως εξής:

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

Η ταχύτητα διάδοσης της μάζας υπολογίζεται:

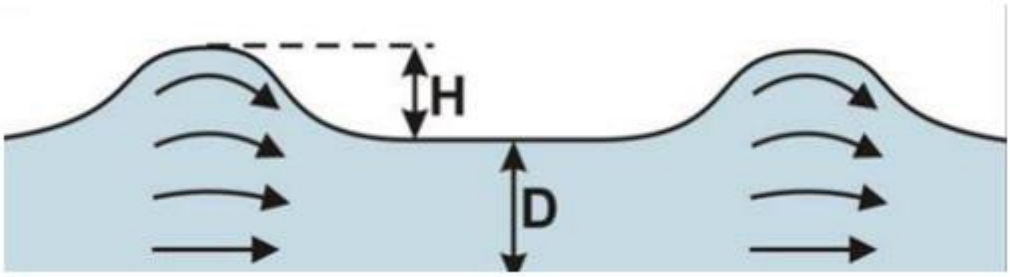
$$C_m = \frac{\pi H^2}{\lambda^2} C$$

όπου C η ταχύτητα του κύματος όπως υπολογίζεται από την εξίσωση παραπάνω.

Διαπιστώνεται ότι για μικρές τιμές ύψους H σε σχέση με τη τιμή του μήκους λ, η ταχύτητα της μάζας τείνει στο μηδέν, άρα προκύπτει η θεωρία του Airy. Η κυματομορφή φέρει σε ημιτονοειδή αλλά οι κορυφές είναι οξύτερες και οι κοιλίες πεπλατυσμένες.

2.2.4 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων

Είναι μια θεωρία περιγραφής των κυμάτων, που μελετά το κάθε κύμα ξεχωριστά. Θεωρείται ότι το κύμα διαδίδεται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας, τα μόρια του νερού είναι ακίνητα και μόλις τα προσκρούει το κύμα αρχίζουν να κινούνται. Αν η κίνηση λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια διαγράφουν τροχιά τόξου και αν η κίνηση βρίσκεται στον πυθμένα τα μόρια διαγράφουν ευθύγραμμη κίνηση.



Εικόνα 14: Μεμονωμένο Κύμα

Η ταχύτητα C των μεμονωμένων κυμάτων δίνεται από τη σχέση:

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

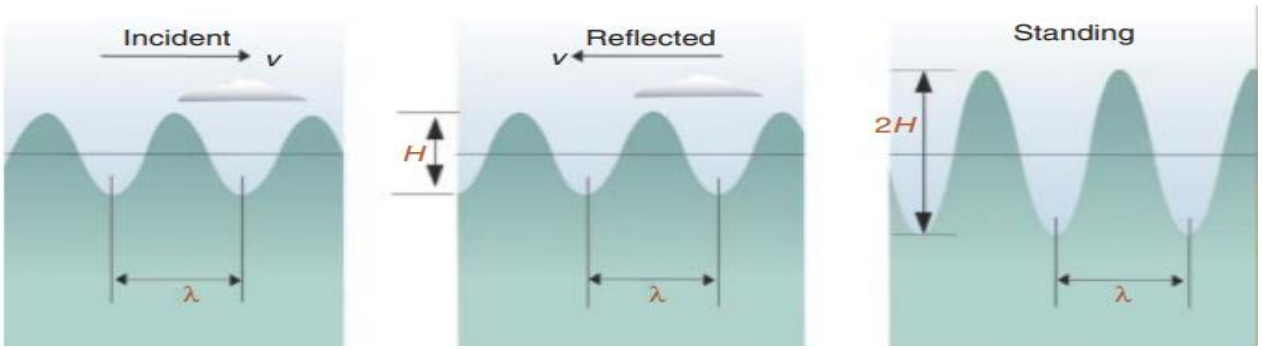
Ως μεμονωμένα κύματα μελετώνται αυτά που δημιουργούνται σε ρηχά νερά και οι κορυφές τους απέχουν περισσότερο από την απόσταση s, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$s\geq 2\pi D\sqrt{\frac{D}{3H}}$$

2.2.5 Τροποποίηση των κυμάτων (Wave Modification)

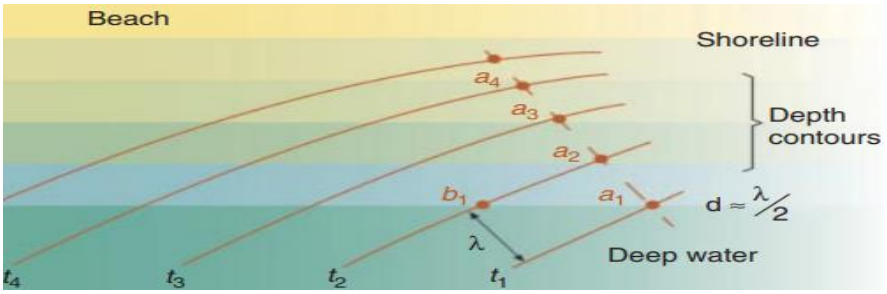
Η τροποποίηση των κυμάτων λαμβάνει χώρα, όταν ένα επιφανειακό κύμα συναντά κάποιο «εμπόδιο», είτε φυσικής προέλευσης είτε τεχνητό. Στη τροποποίηση των κυμάτων υφίστανται τρία φαινόμενα η ανάκλαση (*reflection*), η διάθλαση (*refraction*) και η περίθλαση (*diffraction*).

Ως ανάκλαση ορίζεται η αλλαγή στη κατεύθυνση του κύματος όταν συναντά εμπόδιο και κατευθύνεται πάλι προς τη πηγή του. Για παράδειγμα, όταν η ακτίνα του ήλιου προσπίπτει σε έναν καθρέφτη ή όταν το ηχητικό κύμα παράγει την ηχώ. Στην περίπτωση των κυμάτων, για παράδειγμα, όταν ένα κύμα προσπίπτει σε ένα φράγμα, η ενέργεια που φέρει το κύμα κατά το ήμισυ απορροφάτε από το τοίχος και το υπόλοιπο ανακλάται. Στην περίπτωση των γραμμικών κυμάτων όλη η προσπίπτουσα ενέργεια ανακλάται προς την κατεύθυνση από την οποία προήλθε και έτσι δημιουργείται ένα στατικό κύμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



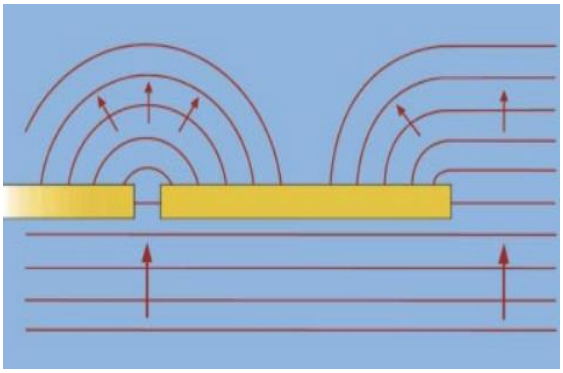
Εικόνα 15: Δημιουργία στατικού κύματος

Ως διάθλαση χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η μεταβολή της ταχύτητας του κύματος προκαλεί και μεταβολή στη κατεύθυνση του. Για παράδειγμα, η κάμψη ενός κύματος φωτός όταν διαπερνά ένα πρίσμα γυαλιού, σχηματίζει καμπύλη όπως φαίνεται και στην εικόνα 16. Σε ένα θαλάσσιο κύμα, αυτό γίνεται φανερό, όταν κινείται σε έδαφος διαφορετικού βάθους ανά σημείο και κυρίως καθώς πλησιάζει την ακτή. Το φαινόμενο της διάθλαση αρχίζει να υφίσταται όταν το βάθος D λαμβάνει τιμή ίση με το ήμισυ του μήκους κύματος λ, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί μείωση της φάσης της ταχύτητας. Άρα, με το φαινόμενο της διάθλασης επιτυγχάνεται η απλοποίηση του σχεδιασμού και η αύξηση της απόδοσης των συσκευών που είναι εγκατεστημένες κοντά στην ακτή, με βασική λειτουργία τους να αποσπούν ποσά ενέργειας από μικρό φάσμα κατευθύνσεων. Γι΄ αυτό, χρησιμοποιούνται συσκευές και τεχνικές διάθλασης, ώστε να είναι ικανές να συγκεντρώνουν την ισχύ των κυμάτων.



Εικόνα 16: Κάμψη κύματος φωτός

Τέλος, η περίθλαση ενός κύματος είναι όταν διαχέονται, αφού αυτά συναντούν στενούς διαδρόμους με μήκος ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος, για παράδειγμα να προσπίπτουν σε έναν θαλάσσιο τοίχο και το μήκος του τοίχους είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος του κύματος.

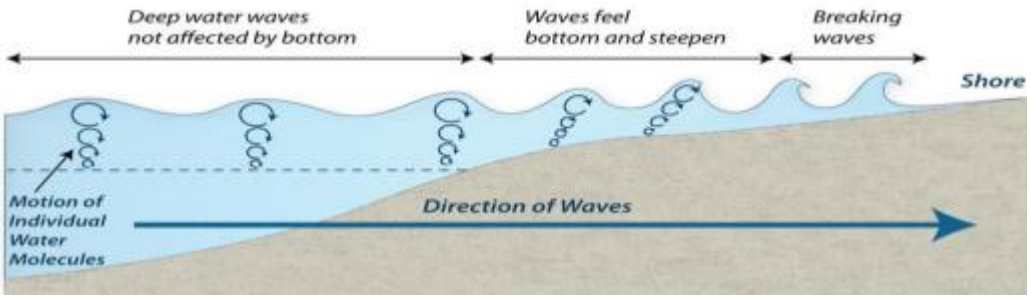


Εικόνα 17: Περίθλαση κύματος

Η ενέργεια των κυμάτων σε αυτή τη περίπτωση, δηλαδή τη διάχυση γύρω από κάποιο εμπόδιο με στενές διόδους, επηρεάζει την ενέργεια που φτάνει σε μια συσκευή και η περίθλαση είναι το κατάλληλο φαινόμενο να κατευθύνει την ενέργεια του κύματος προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση.

Σε αυτή την ενότητα θα ήταν σημαντικό να αναφερθεί το φαινόμενο θραύσης του κύματος (breaking waves). Είναι ένα φαινόμενο που οι ενεργειακές απώλειες είναι υψηλές και συμβαίνει στις εξής τρεις περιπτώσεις.

Πρώτον, σε ρηχά νερά και όταν το βάθος D είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος λ και όταν το ύψος H > 0,8 D.



Δεύτερον, σε θαλάσσια ύδατα με βάθος και όταν η κλίση του κύματος > 0,17.

Ως κλίση του κύματος ορίζεται ο λόγος του ύψους H προς το μήκος κύματος λ.



Τέλος, η θραύση κύματος υφίσταται όταν επικρατούν ισχυροί άνεμοι και είναι αυξημένο το ενδεχόμενο η ισχύς του αέρα να «σπάσει» τη κορυφή του κύματος.

2.3 Δέσμευση κυματικής ενέργειας

Οι ερευνητές δίνουν έμφαση στη ανάπτυξη και τον σχεδιασμό διατάξεων για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας με το πιο αποδοτικό τρόπο υπό οποιεσδήποτε συνθήκες περιβάλλοντος. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται ***μετατροπείς κυματικής ενέργειας*** (WEC - Wave Energy Converters).

Τα στοιχεία που επηρεάζουν τον τρόπο σχεδιασμού των διατάξεων μετατροπής κυματικής ενέργειας είναι η απόσταση της εγκατάστασης από την ακτή, το βάθος της θάλασσας σε αυτό το σημείο και το ενεργειακό περιεχόμενο των κυμάτων. Από την άλλη, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα μιας διάταξης WEC είναι η τεχνική απόδοση της διάταξης, το κόστος της κατασκευής, η ανθεκτικότητα του λόγω έκθεσης σε αντίξοες καιρικές συνθήκες (υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες) και τέλος, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό είναι η βιωσιμότητα της διάταξης αυτής, δηλαδή οι επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Οι διατάξεις μετατροπής της κυματικής ενέργειας βασίζονται σε κάποιες αρχές λειτουργίας, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

2.3.1 Πλωτές διατάξεις

Οι πλωτές διατάξεις WEC κατασκευάζονται είτε υπεράκτια είτε παράκτια, η κίνηση τους επηρεάζεται από τα κύματα και οι τρόποι κίνησής του ποικίλουν βάση του δυναμικού των κυμάτων. Η ορθή λειτουργία ενός συστήματος WEC προϋποθέτει μελέτη της κίνησης της πλωτής διάταξης που πρόκειται αν εγκατασταθεί. υπάρχουν δύο κατηγορίες κίνησης μιας πλωτής διάταξης είτε περιστροφικά είτε μη-περιστροφικά.

Παρακάτω, στον πίνακα 6 περιγράφονται οι δυο παραπάνω κατηγορίες.

Περιστροφική κίνηση
Κλυδωνισμός (pitch): ο οριζόντιος άξονας προκαλεί ταλάντωσ άκρων της πλωτής διάταξης και η κίνηση είναι περιστροφική γύρω από τον οριζόντιο άξονα.
Περιστροφή (yaw): περιστροφική κίνηση γύρω από τον κάθετο άξονα.
Κύλιση (roll): στη μηχανή μεταδίδεται περιστροφική κίνηση απ οριζόντιο άξονα και προκαλείται κίνηση γύρω από αυτόν.

Μη περιστροφικές κινήσεις
Ανύψωση (heave): ταλάντωση στο κάθετο επίπεδο.
Διόγκωση (surge): κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο, παράλληλα στη του κύματος.
Λίκνισμα (sway): κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο αλλά κάθετα στη διεύ διάδοσης του κύματος.

Πίνακας 6: Περιστροφικές και μη κινήσεις.

Το είδος της κίνησης επηρεάζεται ιδιαίτερα από το φυσικό μέγεθος της πλωτής διάταξης και η σχέση μεταξύ του μήκους στη κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος και του μήκους κύματος να είναι ίδιας τάξης μεγέθους. Έχουν αποδειχθεί οι παρακάτω σχέσεις.

Ανύψωση	$\ell << \lambda$ ή $\ell = N(\lambda/2)$, N= 1,3,5…
Κλυδωνισμός	$\ell = N\lambda$, N=1,2,3…

Η εξάρτηση από τη σχέση μήκους κύματος λ και του μήκους της πλωτής διάταξης ℓ είναι ιδιαίτερα κρίσιμες, όταν τα κύματα είναι μεγάλου μήκους λ με ημιτονοειδή κυματομορφή και προέρχονται από πλήρη ανεπτυγμένο θαλάσσιο κύμα.

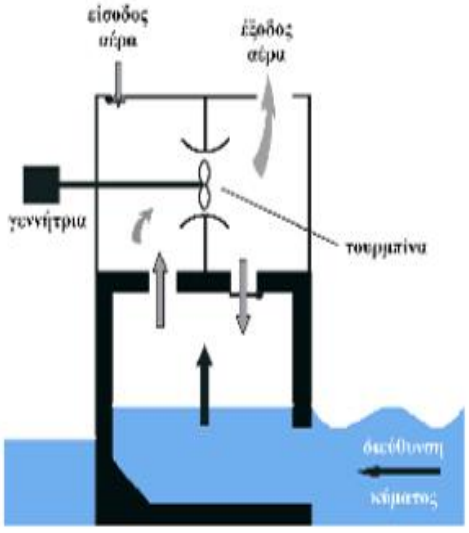
2.3.2 Συντονισμός

Τα συστήματα μετατροπής της κυματικής ενέργειας αποδίδουν με το βέλτιστο τρόπο όταν λειτουργούν σε συνθήκες συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα της κίνησης τους είναι ίδια με τη συχνότητα κίνησης των κυμάτων που διέρχονται από τη συσκευή. Όπως κάθε σύστημα έχει τα δικά του ονομαστικά χαρακτηριστικά, έτσι και τα WECs έχουν τη δική τους φυσική συχνότητα, η οποία εξαρτάται από τη μάζα του και την δύναμη άνωσης. Με μείωση της μάζας του WEC ή αυξάνοντας την άνωση ή συνδυασμός αυτών, η φυσική συχνότητα μεγαλώνει. Όταν τα διερχόμενα κύματα έχουν συχνότητα κοντά στη φυσική συχνότητα του WEC, η κίνηση της συσκευής σχεδόν μέγιστη. Αυτό ονομάζεται συντονισμός και αποτελεί βασική αρχή σχεδιασμού μια συσκευής WEC.

2.4 Είδη μετατροπέων κυματικής ενέργειας WEC

Τα είδη των συσκευών μετατροπής της κυματικής ενέργειας ποικίλουν, για το λόγο αυτό έχουν κατηγοριοποιηθεί με κριτήριο την αρχή λειτουργίας, την περιοχή λειτουργίας και το στάδιο ανάπτυξης. Οι κύριες κατηγορίες είναι με βάση την απόσταση από την ακτή και με βάση την αρχή λειτουργίας, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα στις παρακάτω υποενότητες.

Τα ποσοστά ενέργειας που προκύπτουν από το δυναμικό περιεχόμενο των ωκεανών είναι αρκετά μεγάλο για είναι συμφέρουσα η εκμετάλλευση του. Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας προέρχεται από την κινητική ενέργεια των κυμάτων, τα οποία έχουν το δυναμικό να περιστρέψουν μια τουρμπίνα, στη συνέχεια η ανυψωτική κίνηση του κύματος κινεί προς τα πάνω τον αέρα που βρίσκεται εντός του θαλάμου, κινείται η τουρμπίνα-στρόβιλος και η γεννήτρια παράγει ρεύμα.



Εικόνα 18: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κινητική ενέργεια των κυμάτων

2.4.1 WECs και απόσταση από την ακτή

Με βάση την απόσταση από την ακτή, οι διατάξεις WEC χαρακτηρίζονται ως:

- Υπεράκτιες (offshore): εγκαθίστανται σε σημεία με απόσταση του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας μεγαλύτερη των 40 m, για την εκμετάλλευση του μεγάλου ενεργειακού δυναμικού.
- Παράκτιες (coastal): ο μετατροπέας τοποθετείται σε σημεία βάθους μεταξύ 20-30m και απόσταση μέχρι 500 m από την ακτή.
- Επί της ακτής (shoreline): σταθερές εγκαταστάσεις επί της ακτής. Προφανώς δεν απαιτείται σύστημα αγκυροβόλησης ή καλωδίωση εντός της θάλασσας, ώστε να συνδεθεί με την ακτή. Είναι ευκολότερη η κατασκευή και συντήρηση αυτού του τύπου WEC. Ωστόσο, μειονεκτεί στο μικρό κυματικό δυναμικό και υπάρχουν περιορισμοί βάση της μορφολογίας του εδάφους της ακτογραμμής.

2.4.2 WECs και αρχή λειτουργίας

Η ταξινόμηση αυτή προκύπτει από μελέτη του Ευρωπαϊκού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας και προκύπτουν οι εξής τύποι:

- Εξασθενητές (Attenuators):

Πρόκειται για στενές διατάξεις μεγάλου μήκους που περιστρέφονται με τέτοιο τρόπο ώστε η πλευρά με το μεγαλύτερο μήκος να είναι παράλληλη στη κατεύθυνση κίνησης των κυμάτων. Είναι κυρίως αρθρωτές διατάξεις, είτε πλωτές είτε πλήρως βυθισμένες και κατά τμήματα κάμπτονται ή περιστρέφονται από τα κύματα. Οι εξασθενητές, ουσιαστικά, εκμεταλλεύονται το ενεργειακό περιεχόμενο των κυμάτων για να προκαλούν ταλάντωση στα επιμέρους τμήματα της διάταξης. Η συσκευή αυτή διαθέτει, επίσης, έμβολα που αντιστέκονται στη κίνηση και προωθούν υδραυλικά υγρά προς το κινητήρα για να παραχθεί ηλεκτρισμός. Επίσης, έχουν την λειτουργία να δεσμεύουν ενέργεια από τα κύματα έως ότου αυτά εξασθενίσουν.

- Σημειακοί απορροφητές (Point Absorbers):

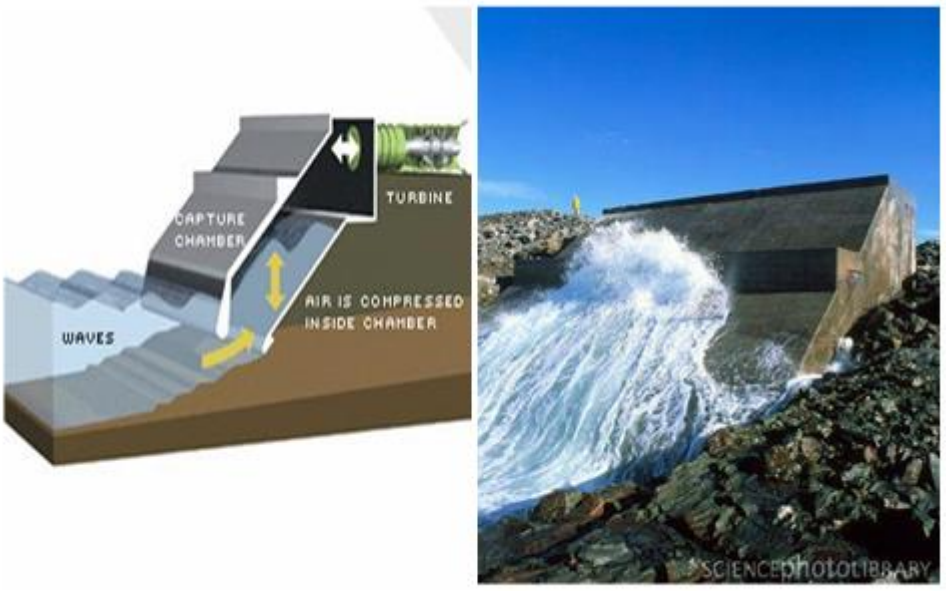
Αυτού του τύπου οι συσκευές εκμεταλλεύονται τη κίνηση της μάζας τους που προκαλείται από τη κίνηση των διερχόμενων κυμάτων. Αποτελούνται από δύο τμήματα, το κινούμενο και το σταθερό μέρος. Το κινητό τμήμα έρχεται σε επαφή με τα κύματα, είναι μικρού μήκους σε σχέση με το μήκος των κυμάτων που προσπίπτουν σε αυτό, ώστε να απορροφά την κυματική ενέργεια ανεξαρτήτου κατεύθυνσης. Το σταθερό μέρος είναι είτε αγκυροβολημένο είτε βυθισμένο λόγω της βαρύτητας, συνήθως είναι μερικώς βυθισμένο. Στόχος σε μια τέτοια διάταξη είναι να επέλθει συντονισμός.

- Ταλαντούμενοι μετατροπείς κύματος (oscillating wave surge converter)

Βασική αρχή λειτουργίας αυτής της διάταξης είναι η κίνηση των υδάτινων μαζών που μεταφέρονται με τη κίνηση των κυμάτων. Αυτή η διάταξη εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ρήχωσης κατά το οποίο τα μόρια του νερού κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές και για αυτό κατασκευάζονται κυρίως σε ύδατα μικρού βάθους και κάθετα στο επίπεδο κίνησης των κυμάτων. Επίσης, διαθέτουν πτερύγιο ή βραχίονα που ταλαντώνεται με τη διέλευση των κυμάτων και είναι σταθερές διατάξεις στο βυθό.

- Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης νερού (Oscillating Water Column):

Τα WECs τέτοιου τύπου λειτουργούν ως έμβολα και εκμεταλλεύονται την κυματική ενέργεια για να περιστρέψουν μια γεννήτρια, ώστε να παραχθεί ηλεκτρισμός. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από τρία μέρη έναν θάλαμο μερικώς βυθισμένο με άνοιγμα στο βυθισμένο τμήμα και ένα αεριοστρόβιλο. Τα προσπίπτοντα κύματα στη διάταξη προκαλούν ταλάντωση των υδάτων του θαλάμου. Με την αύξηση τη στάθμης του νερού αυξάνεται και η πίεση εντός του θαλάμου και αέρας με αυτή την πίεση εξέρχεται από τον θάλαμο και οδηγείται στο στρόβιλο της γεννήτριας. Με την πτώση της στάθμης του νερού ο αέρας κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση και εισέρχεται εντός του θαλάμου. Ο στρόβιλος λόγω πιέσεων και αποσυμπιέσεων περιστρέφεται και παράγει ηλεκτρισμό.



Εικόνα 19: Μετατροπείς ταλαντευόμενης στήλης νερού

- Συσκευές υπερανύψωσης (overtopping):

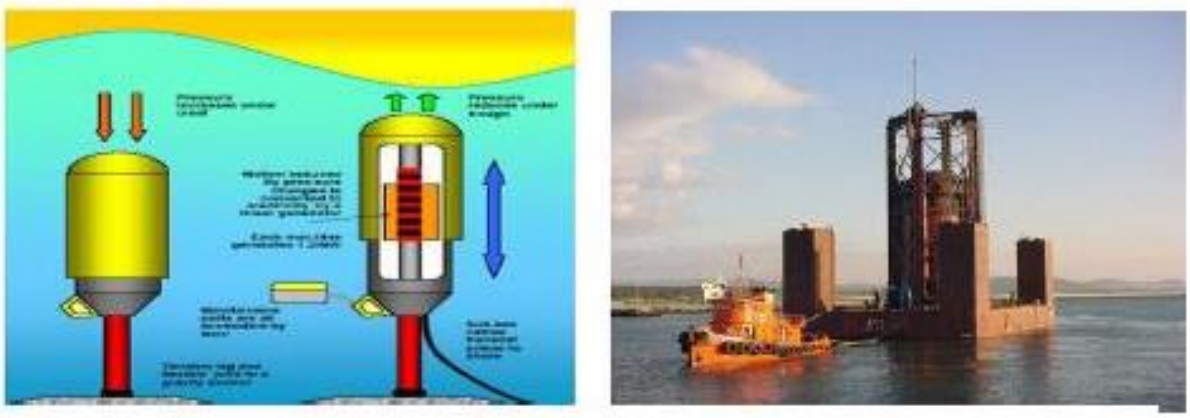
Ονομάζονται διαφορετικά καταληκτικές συσκευές – terminators. Η κυματική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική και έπειτα σε ηλεκτρική. Μέσω ειδικά τοποθετημένης ράμπας μάζα υδάτων που μεταφέρονται από τα κύματα δεσμεύονται σε δεξαμενές πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας και μέσω υδροστροβίλων το επιστρέφουν στη θάλασσα παράγοντας παράλληλα ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι συσκευές τοποθετούνται είτε στην ακτή είτε παράκτια.



Εικόνα 20: Συσκευές overtopping

- Συσκευές διαφορικής πίεσης (Submerged pressure differential devices):

Βασίζουν τη λειτουργία τους στις μεταβολές της υδροδυναμικής πίεσης και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι συσκευές αυτές είτε είναι πλήρως βυθισμένες είτε είναι πλωτές. Στις βυθισμένες συσκευές ασκούνται κάθετες δυνάμεις που δημιουργούνται από τα κύματα που διέρχονται στην άνω επιφάνεια της συσκευής. Από την άλλη, οι πλωτές συσκευές εκμεταλλεύονται την αύξηση της πίεσης από τα διερχόμενα κύματα με τη χρήση γεννήτριας συμπιέζουν τον αέρα και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 21: AWS

- Μετατροπείς περιστρεφόμενης μάζας (Rotating Mass):

Με την κίνηση των κυμάτων ασκούνται δυνάμεις στην πλωτή συσκευή, στης οποία το κέντρο έχει τοποθετηθεί μια μάζα, η οποία με την κίνηση της πλωτής διάταξης περιστρέφεται. Η περιστροφή αυτή είναι ικανή και αναγκαία για να δοθεί ενέργεια στη γεννήτρια και με αυτόν τον τρόπο να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυματικής ενέργειας

Αρχικά τα πλεονεκτήματα του κύματος ως πόρος ενέργειας είναι η αφθονία του, η άμεση και δωρεάν διαθεσιμότητα του και ότι δεν απαιτείται καμία καύσιμη ύλη για να είναι διαθέσιμο προς χρήση. Ως γνωστόν, το νερό αποτελεί το 70% της επιφάνειας του πλανήτη, άρα το καθιστά άμεσα προσβάσιμο ενεργειακό πόρο χωρίς τοπολογικούς περιορισμούς. Η εκμετάλλευση του προσφέρει μεγάλο ενεργειακό δυναμικό. Επίσης, σε οικονομικό επίπεδο η λειτουργία του δεν είναι ακριβή, ούτε η συντήρηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας. Αποτελεί μια συνολικά μια βιώσιμη επιλογή, που μπορεί μέσω έρευνας και ανάπτυξης να εγκατασταθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, η εγκατάσταση τέτοιων μονάδων παραγωγής ενέργειας αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον λύση, η οποία όχι μόνο δεν το επιβαρύνει αλλά είναι και τρόπος προστασίας της θαλάσσιας ζωής.

Από την μια τέτοια μονάδα δεν διαβεβαιώνει τη συνεχή παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας, αφού αυτό εξαρτάται από την δύναμη των κυμάτων που αναπτύσσεται και μπορεί να κυμαίνεται από πολλή μεγάλα ποσά ενέργειας έως μηδενικά. Πρέπει να έχει προηγηθεί προσεκτική μελέτη της επιλογής της τοποθεσίας εγκατάστασης ώστε να έχουμε τις επιθυμητές ταχύτητες και εύρη κύματος. Επίσης, μια τέτοια εγκατάσταση παράγει θόρυβο, που επιβαρύνει τη θαλάσσια ζωή και ενδεχομένως κάποιοι οργανισμοί να εγκαταλείπουν την περιοχή. Διεξοδικά θα πρέπει, επιπλέον, να έχουν μελετηθεί τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν σε αυτό το μέρος, διότι η διάταξη είναι πλήρως εκτεθειμένη σε αυτά.

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε γεωγραφικό μήκος και πλάτος, να τοποθετηθεί με οποιοδήποτε τρόπο και να παράγει ενέργεια. Ωστόσο, ο τρόπος εγκατάστασης του θα επηρεάσει

και την επίδραση του στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, μια εγκατάσταση συστήματος κυματικής ενέργειας στην ακτή μετατρέπει αυτομάτως το φυσικό περιβάλλον σε εγγενή βιομηχανικό. Γενικά, είναι μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή, με χαμηλούς δείκτες εκπομπής ρύπων, δεν απαιτεί χρήση καύσιμης ύλης. Οι συνέπειες εγκατάστασης μιας τέτοιας μονάδας στη χλωρίδα και τη πανίδα που έχουν παρατηρηθεί είναι αρκετά ήπιες. Με το κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί να έχουν διττή λειτουργία, δηλαδή παραγωγή ενέργειας και κυματοθραύστες ή λιμενοβραχίονας, προστατεύοντας έτσι τη διάβρωση του εδάφους των ακτών. Από την άλλη, τον υψηλό ενεργειακό δυναμικό των κυμάτων επιφέρει έντονες μηχανικές καταπονήσεις, αυξάνοντας τα κόστη και τη συχνότητα συντήρησης, με δυσκολία συντήρησης υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες και όταν απαιτείται πρόσβαση σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Όμως, η πλειοψηφία αυτών λειτουργεί σε πλωτές κατασκευές στην επιφάνεια της θάλασσας με τη καλωδίωση να επιδρά στο θαλάσσιο περιβάλλον και με την τεχνολογική εξέλιξη τα υδραυλικά έλαια έχουν αντικατασταθεί από νερό, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση των υδάτων μέσω διαρροής.

Κεφάλαιο 3^{Ο} : Παλιρροιακή Ενέργεια

Στο παγκόσμιο θαλάσσιο δυναμικό είναι εμφανής η μεταβολή της ηρεμίας των υδάτων, τα οποία ανέρχονται και κατέρχονται με σταθερό ρυθμό και συγκεκριμένη περίοδο. Αυτό το φαινόμενο έχει χαρακτηριστεί ως παλίρροια και προκύπτει λόγω των ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των ουράνιων σωμάτων και των υδάτων. Τα κύρια ουράνια σώματα είναι ο ήλιος και η σελήνη, γι΄ αυτό ονομάζεται και ως αστρονομική παλίρροια. Κατά τη κίνηση των υδάτων το σημείο στο οποίο ανέρχεται το κύμα ονομάζεται πλήμμη ή πλημμυρίδα (flood tide) και το κατώτατο σημείο άμπωτη (ebb ή low tide).

Στην παρούσα ενότητα θα εστιάσουμε στη μελέτη της έννοια της παλίρροιας και των τεχνολογιών αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου αυτού του φαινομένου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως οι τεχνολογίες σύλληψης της παλιρροιακής ενέργειας εκμεταλλεύονται το ενεργειακό περιεχόμενο που δημιουργείται από την κίνηση των υδάτων της παλίρροιας μεταξύ του σημείου ανόδου και καθόδου. Η εκμετάλλευση αυτή της παλιρροιακής ενέργειας χρονολογείται αρκετά χρόνια πριν, αν αναλογιστεί κανείς τον τρόπο λειτουργίας των νερόμυλων, όπου τα νερά δεσμεύονταν στις εκβολές των ποταμών λόγω των παλιρροιών. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη πλημμυρίδα τα νερά που φτάνουν στην ακτή αποθηκεύονται σε φράγματα, τα οποία κατά την άμπωτη μπορούν να κινήσουν οποιοδήποτε στρόβιλο.

3.1 Παλίρροια

Μέσω ερευνών έχει δειχθεί ότι η έλξη της Σελήνης και της υδάτινης μάζας της Γης είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από την έλξη που ασκεί ο Ήλιος. Με βάση αυτή την υπόθεση η υδάτινη μάζα της Γης θα συγκεντρωνόταν κυρίως προς το μέρος της Σελήνης και σε συνδυασμό με τη θεωρία της μηχανικής των ρευστών στο αντιδιαμετρικό σημείο της Γης θα παρατηρούνταν ίδια συγκέντρωση υδάτων και το σχήμα της Γης θα ήταν έλλειψη. Επίσης, στην περίπτωση που ο Ήλιος και η Σελήνη κινούνται στο ίδιο μέρος, η υπέρθεση τω ελκτικών τους δυνάμεων δίνει στην ελλειψοειδή Γη πιο πεπλατυσμένη μορφή. Τέλος, η περίπτωση τετραγωνισμού, όπου Γη, Σελήνη και Ήλιος σχηματίζουν ορθή γωνία, οι ηλιακές ελκτικές δυνάμεις εξουδετερώνουν μέρος των ελκτικών δυνάμεων της Σελήνης, με αποτέλεσμα η Γη να έχει μορφή ασθενέστερου ελλειψοειδούς προς τη σελήνη. αυτό καλείται «στατική θεωρία της παλίρροιας» και αναλύεται στην επόμενη υποενότητα.

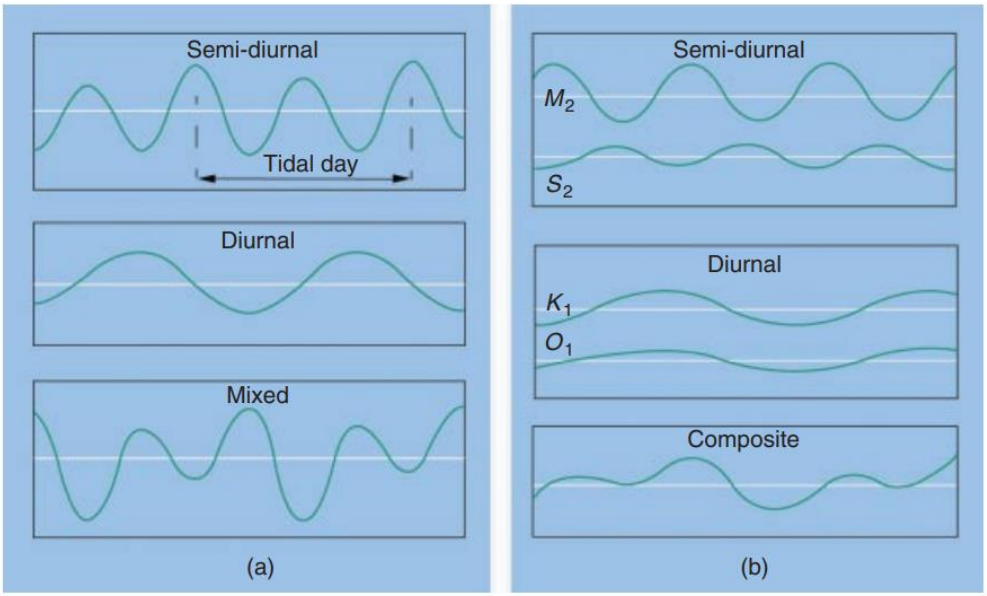
3.1.1 Στατική παλίρροια

Για να ισχύει η θεωρία της στατικής παλίρροιας πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής προϋποθέσεις: η τροχιά της Σελήνης είναι σχεδόν στο ίδιο επίπεδο με τον Ισημερινό, τα κύματα της παλίρροιας διαδίδονται σε ρηχά νερά, οι δυνάμεις που συμβάλουν στο φαινόμενο αυτό είναι η βαρυτική έλξη της Σελήνης και του Ήλιου καθώς και η φυγόκεντρος της Γης.

Η θεωρία της στατικής παλίρροιας ορίζει πως ένα παλιρροιακός κύκλος διαρκεί 12,25 ώρες, ίσο περίπου με μισή μέρα και για αυτό ονομάζεται ημιημερίσιος (semi-diurnal). Η αρμονική συνιστώσα που αντιστοιχεί στις ημιημερήσιες παλίρροιες συμβολίζεται με M_2. Από την άλλη, ένας παλιρροιακός κύκλος μπορεί να διαρκεί σεληνιακή μέρα, δηλαδή 27,55 ημέρες (lunar days). Ο κύκλος αυτός επιδρά στο εύρος της παλίρροιας, αφού όταν έχουμε απόγειο, δηλαδή η σελήνη βρίσκεται στη μέγιστη απόσταση από τη Γη οι πλήμμες λαμβάνουν τις μεγαλύτερες

τιμές, ενώ στη περίπτωση του περίγειου, δηλαδή η Σελήνη είναι στο πιο κοντινό σημείο με τη Γη, οι πλήμμες λαμβάνουν τις μικρότερες τιμές. Η μέγιστη ημιημερήσια παλίρροια συμβαίνει όταν οι παλίρροιες συζυγιών συμπίπτουν με το σεληνιακό περίγειο, ενώ η ελάχιστη ημιημερήσια παλίρροια συμβαίνει όταν οι παλίρροιες τετραγωνισμών συμπίπτουν με το σεληνιακό απόγειο. Η αρμονική συνιστώσα που περιγράφει τον παραπάνω κύκλο συμβολίζεται με N_2.

Το μέγεθος των παλιρροιών επηρεάζεται και από τη θέση της Γης σε σχέση με τον Ήλιο. Η θέση της Γης μεταβάλλεται σε σχέση με τον Ήλιο κατά 2,5% ανά ηλιακό έτος καθώς η Γη απομακρύνεται από αυτόν. Ο κύκλος αυτός διαρκεί ένα έτος, άρα κατά τις χειμερινές περιόδους και πιο συγκεκριμένα τον Ιανουάριο το εύρος της παλίρροιας να είναι μέγιστο. Η αρμονική συνιστώσα που περιγράφει τον παραπάνω κύκλο συμβολίζεται με S_2.



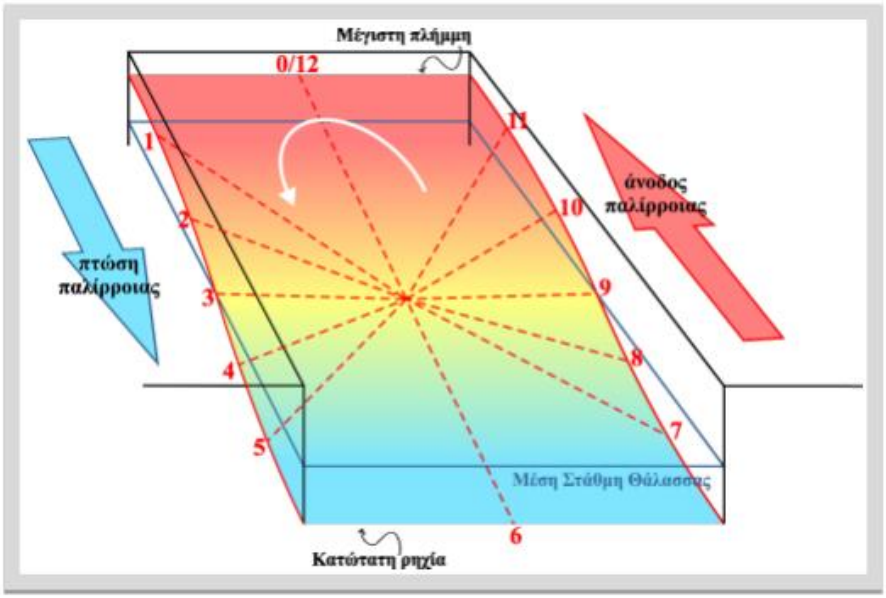
Εικόνα 22: Είδη Παλίρροιας

Letter	Name	Caused by	Period (h)
M_2	Principal lunar semi-diurnal	Earth's rotation with respect to Moon	12.42
S_2	Principal solar semi-diurnal	Earth's rotation with respect to Sun	12
K_1	Lunisolar diurnal	Moon's declination (together with O_1)	23.93
O_1	Principal lunar diurnal	(see K_1)	25.82

3.1.2 Δυναμική Παλίρροια

Το μοντέλο της δυναμικής παλίρροιας βασίζεται στην ανταλλαγή υδάτινων μαζών μεταξύ ωκεανών και θαλασσών. Οι προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται είναι οι εξής: η Γη έχει ενιαία ωκεάνια λεκάνη με ομοιόμορφο βάθος, επιδρά κυρίως η Σελήνη, η οποία βρίσκεται στο ζενίθ της ωκεάνιας λεκάνης.

Οι παλίρροιες που εμφανίζονται στα θαλάσσια και ωκεάνια ύδατα λόγω των ελκτικών δυνάμεων Σελήνης και Ήλιου, επηρεάζονται και από την περιστροφή της Γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια παλίρροια σε οποιοδήποτε σημείο να περιστρέφεται μαζί με τη Γη προς τα ανατολικά και λόγω του φαινομένου της αδράνειας να ωθείται στα δυτικά και δημιουργείται διαφορική κλίση της επιφάνειας της θάλασσας. Η μετακίνηση των παλιρροιών προκαλεί μια συνεχή απώλεια μηχανικής ενέργειας στο σύστημα Γης-Σελήνης λόγω της άντλησης του νερού μέσω των φυσικών περιορισμών γύρω από τις ακτές.



Εικόνα 23: Δυναμικό πεδίο

3.1.3 Μετεωρολογική παλίρροια

Ο όρος αυτός περιγράφει το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η στάθμη της θάλασσας εξαιτίας της ατμοσφαιρικής πίεσης και των ανέμων και γενικότερα των συνθηκών που επικρατούν κατά τη διάρκεια χαμηλού βαρομετρικού. Μια μετεωρολογική παλίρροια λαμβάνει τη μέγιστη τιμή, όταν η μέγιστη τιμή της στάθμης της θάλασσας είναι ίδια με τη μέγιστη τιμή της πλήμμης σε ένα παλιρροϊκό κύκλο. Αυτή η τιμή ονομάζεται Ανώτατη Στάθμη Θάλασσας (ΑΣΘ).

3.1.4 Παλιρροιακή Ενέργεια

Η παλιρροιακή ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας του νερού που μετατρέπεται μέσω κατάλληλων διατάξεων σε ηλεκτρική ή άλλη μορφή ενέργειας και αξιοποιείται κατάλληλα. Οι προσπάθειες για εκμετάλλευση της παλιρροιακής ενέργειας απαντάται από του μεσαιωνικούς χρόνους. Πιο συγκεκριμένα στο μουσείο της Βρετανίας έχει καταγραφεί στο «Domesday Book» ένας παλιρροιακός μύλος στο λιμάνι του Dover.

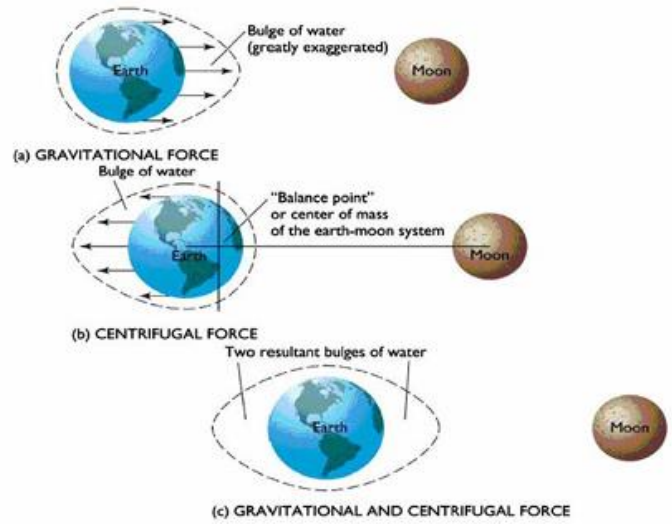
Σε νεότερα χρόνια, οι επιστήμονες αξιοποίησαν την άνοδο και την κάθοδο των υδάτων και εκμεταλλεύτηκαν αυτές τις διακυμάνσεις σε διάφορες εφαρμογές. Για παράδειγμα, η εκμετάλλευση των διακυμάνσεων για τη συμπίεση αέρα σε μεταλλικές δεξαμενές και

χρησιμοποιούσαν τον αέρα αυτό για την μετακίνηση μηχανών. Η πρώτη μεγάλη μονάδα παραγωγής ενέργειας από την αξιοποίηση των παλιρροιών άρχισε να λειτουργεί το 1966 και είναι ο σταθμός παλιρροιακής ενέργειας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στη Rance.



Εικόνα 24: Σταθμός παλιρροιακής ενέργειας στη Rance

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το φαινόμενο της παλίρροιας οφείλεται στις εναλλαγές της στάθμης των υδάτων, που προκαλούνται από την έλξη μεταξύ του Ήλιου και της Σελήνης. Άρα, το γεγονός ότι η παλιρροιακή ενέργεια οφείλεται στη βαρυτική σχέση μεταξύ Σελήνης και Ήλιου και της γήινης περιστροφής, την καθιστά ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.



Εικόνα 25: Επίδραση της σελήνης στο εύρος της παλίρροιας.

Στο κόλπο Fundy του Καναδά έχει καταγραφεί παλίρροια ύψους 17 m και γενικά καταγράφονται υψηλότερες μετατοπίσεις των κυμάτων σε θαλάσσια στενά και ποικίλων εδαφικών μορφολογιών. Οποιαδήποτε παράκτια περιοχή στην οποία καταγράφονται παλιρροιακά εύρη άνω των 7 m θεωρούνται κατάλληλα σημεία εγκατάστασης σταθμών εκμετάλλευσης της

παλιρροιακής ενέργειας. Από την άλλη, για να είναι κατάλληλο ένα παλιρροιακό ρεύμα πρέπει να έχει ταχύτητα άνω των 2,5 m/sec. Τέτοιες ταχύτητες δεν συνεπάγονται και εύρη παλίρροιας άνω των 7m, κάτι που συμβαίνει και στη χώρα μας. Η πλειοψηφία των περιοχών που πληρούν τις προϋποθέσεις για την εγκατάσταση σταθμών εκμετάλλευσης της παλιρροιακής ενέργειας απαντάται στο Ηνωμένο Βασίλειο και παράγουν συνολικά περί τις 48 TWh/ έτος.

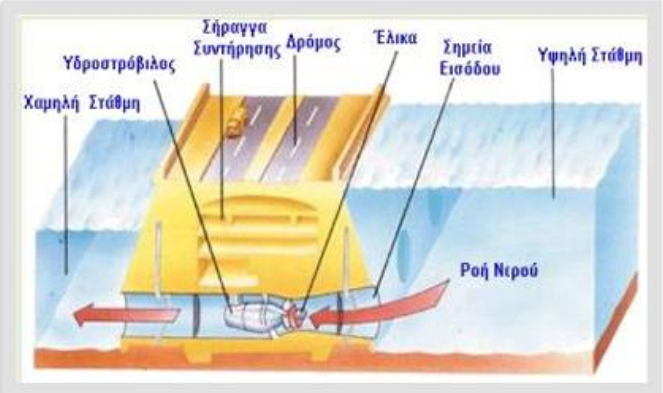
Η μέτρηση των ιδιοτήτων μιας περιοχής γίνεται μέσω κατάλληλων μηχανισμών μέτρησης παλίρροιας και διεξάγονται δεδομένα όπως η ταχύτητα, το παλιρροιακό εύρος (δηλ. οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται). Τέτοια όργανα μέτρησης είναι πλωτές συσκευές (drifters), ωκεανογραφικά μοντέλα, δορυφόροι και αριθμητικά υδραυλικά μοντέλα. Η σύγχρονη τεχνολογική εξέλιξη και η ανάπτυξη του σχεδιασμού των μονάδων παραγωγής, οι τεχνολογίες στροβίλων αποδεικνύουν ότι οι παλίρροιες είναι ένας ανεξάντλητος πόρος και η διαθεσιμότητα του είναι πιο άμεση και προβλέψιμη έναντι άλλων όπως η ηλιακή και ενέργεια. Επίσης, το παλιρροιακό δυναμικό επηρεάζεται από την υπερθέρμανση του πλανήτη και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Ωστόσο, για την αξιοποίηση των παλιρροιών το κόστος είναι αρκετά μεγάλο και οι περιοχές που πληρούν τις προϋποθέσεις για την δημιουργία εγκαταστάσεων είναι σχετικά περιορισμένες.

Στη παρακάτω ενότητα θα μελετήσουμε τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από τις παλίρροιας και τις κατηγορίες που αυτές διακρίνονται.

3.2 Τεχνολογίες αξιοποίησης παλιρροιακής ενέργειας

3.2.1 Δυναμική ενέργεια παλίρροιας

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι τεχνολογίες που αξιοποιούν τη δυναμική ενέργεια των θαλάσσιων υδάτων και πιο συγκεκριμένα, η κατασκευή θαλάσσιων φραγμάτων στις εκβολές των ποταμών.



Εικόνα 26: Τομή παλιρροιακού φράγματος

<u>Παλιρροιακό Φράγμα</u>

Το παλιρροϊκό φράγμα είναι μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που τοποθετείται κατά πλάτος ενός θαλάσσιου καναλιού με ενσωματωμένους στροβίλους. Η διαφορά τους με τα

κοινά φράγματα είναι στη δομή και στο ότι ροή σε ένα τέτοιο φράγμα ελέγχεται από φρεάτια και στροβίλους. Στα παλιρροϊκά φράγματα δύο είναι οι παράγουσες μέθοδος ενέργειας, η παραγωγή μέσω άμπωτης και η παραγωγή μέσω πλημμυρών.

Πρώτον, η παραγωγή ισχύος μέσω άμπωτης είναι ένας τρόπος παραγωγής ενέργειας με αρχή λειτουργίας κατά την υποχώρηση της παλίρροιας. Τα ύδατα ρέουν από τα κατάλληλα διαμορφωμένα αυλάκια στη λεκάνη κατά τη διάρκεια της πλημμυρίδας και όταν φτάσει στη πλήμμη, τα θυροφράγματα κλείνουν, με αποτέλεσμα σχηματίζεται λεκάνη νερού. Οι Garret & Cummins υποστηρίζουν ότι κατά την άμπωτη η διαφορά της στάθμης δημιουργεί ένα ωφέλιμο ύψος, το οποίο προκαλείται από την αντίστροφη ροή των υδάτων σε ένα κανάλι.

Δεύτερον, η παραγωγή ενέργειας μέσω πλημμυρίδας, κατά την οποία αξιοποιείται η ενέργεια που δημιουργείται κατά τις πλημμυρίδες. Με κλειστά τα θυροφράγματα και κατά την άνοδο της παλίρροιας, η διαφορά των ανισοσταθμιών με χαμηλότερη αυτή στη λεκάνη. Όταν τα ύδατα είναι στο μέγιστο ύψος το νερό οδηγείται μέσω των στροβίλων στη λεκάνη όπου αφήνονται ως την υπερχείλιση. Είναι λιγότερο αποτελεσματική μέθοδος από την πρώτη, λόγω μικρότερων τιμών του ωφέλιμου ύψους. Το μεγαλύτερο φράγμα παλιρροϊκής ισχύος στον κόσμο, το Sihwa Tidal Power Plant στη Νότια Κορέα, χρησιμοποιεί την παραγωγή ενέργειας μέσω πλημμυρίδων, για να τροφοδοτήσει δέκα υδροστροβίλους ισχύος 25,4 MW ο καθένας.

Τέλος, υφίσταται και συνδυασμός των δύο ανωτέρω τρόπων, δηλαδή η παραγωγή μέσω πλημμυρίδων και άμπωτης. Ο συνδυασμός και των δυο μεθόδων αυξάνει τα χρονικά διαστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, άρα και αυξάνει και τη συνολική παραγωγή ισχύος. Έπειτα, τα φρεάτια ανοίγουν, ώστε το υπόλοιπο νερό να ρέει πίσω στη λεκάνη.

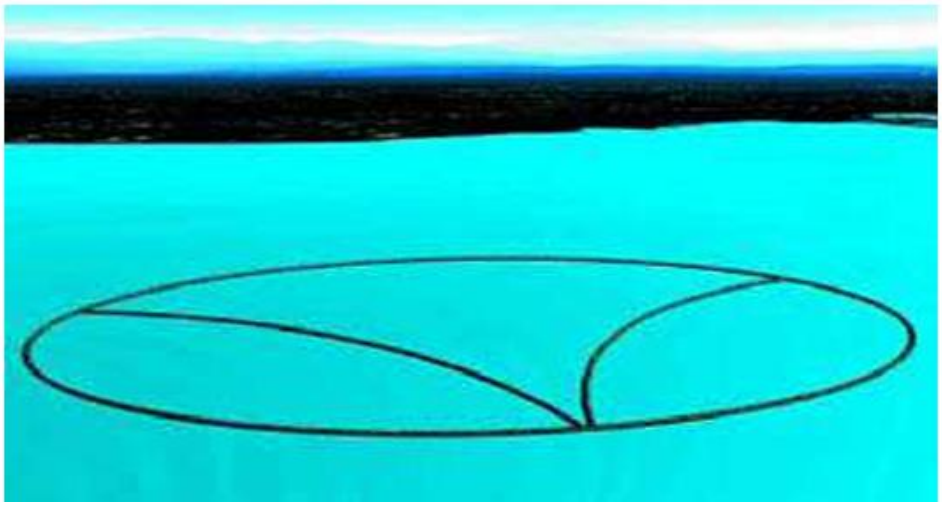
Εν κατακλείδι, τα παλιρροιακά φράγματα κατασκευάζονται στις εκβολές των ποταμών και εκμεταλλεύονται την ενέργεια που προκαλείται λόγω της διαφοράς ύψους μεταξύ των υψηλών και χαμηλών παλιρροιών. Σημαντικά έργα αυτής της κατηγορίας είναι το φράγμα του La Rance (φράγμα διπλής παραγωγής), ο σταθμός Annapolis Royal στο Καναδά και η πειραματική μονάδα στο Kislaya της Ρωσίας.



Εικόνα 27: Εγκαταστάσεις στην Αννάπολη.

Επίσης, η δυναμική ενέργεια των παλιρροιών αξιοποιείται από τις παλιρροιακές λιμνοθάλασσες. Η παλιρροιακή λιμνοθάλασσα (tidal lagoon) είναι μια κατασκευή αναχώματος

σε αβαθής θαλάσσιες εκτάσεις, οπου εισέρχεται το νερό από την παλίρροια κατά τις πλημμυρίδες. Όταν η στάθμη των υδάτων έχει φθάσει σε χαμηλά επίπεδα το νερό που έχει αποθηκευτεί αφήνεται από τα τοιχώματα των αναχωμάτων μέσω διατάξεων από στροβίλους.



Εικόνα 28: Παλιρροιακή λιμνοδεξαμενή με τη χρήση λογισμικού.

Location	Mean range (m)	Basin area (km^2)	Potential mean power (MW)	Potential annual production (GW h/year)
North America				
Passamaquoddy	5.5	262	1800	15,800
Cobscook	5.5	106	722	6330
Bay of Fundy	6.4	83	765	6710
Minas-Cobequid	10.7	777	19,900	175,000
Amherst Point	10.7	10	256	2250
Shepody	9.8	117	520	22,100
Cumberland	10.1	73	1680	14,700
Petitcodiac	10.7	31	794	6960
Memramcook	10.7	23	590	5170
South America				
San Jose, Argentina	5.9	750	5870	51,500
United Kingdom				
Severn	9.8	70	1680	15,000
Mersey	6.5	7	130	1300
Solway Firth	5.5	60	1200	10,000
Thames	4.2	40	230	1400
France				
Aber-Benoit	5.2	2.9	18	158
Aber-Wrac'h	5	1.1	6	53
Arguenon	8.4	28	446	3910
Frenaye	7.4	12	148	1300
La Rance	8.4	22	349	3060
Rotheneuf	8	1.1	16	140
Mont St Michel	8.4	610	9700	85,100
Somme	6.5	49	466	4090
Ireland				
Strangford Lough	3.6	125	350	3070
Russia				
Kislaya	2.4	2	2	22
Lumbouskii Bay	4.2	70	277	2430
White Sea	5.65	2000	14,400	126,000
Mezen Estuary	6.6	140	370	12,000
Australia				
Kimberley	6.4	600	630	5600
China				
Baishakou	2.4	No data	No data	No data
Jiangxia	7.1	2	No data	No data
Xinfuyang	4.5	No data	No data	No data

Εικόνα 29: Τα μεγαλύτερα παλιρροιακά φράγματα.

3.2.2 Κινητική Ενέργεια Παλίρροιας

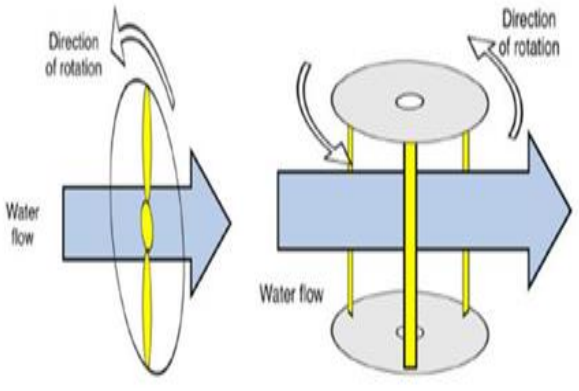
Σε αυτήν την κατηγορία οι μονάδες παραγωγής ενέργειας εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων. Οι μέθοδοι εκμετάλλευσης των υδάτινων ρευμάτων εννοούν την τοποθέτηση στροβίλων. Στο σύνολο το σύστημα περιλαμβάνει μια στροβιλομηχανή, ένα ρότορα, πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων και μια γεννήτρια. Εμφανίζονται δύο εξέχουσες διαμορφώσεις: υποβρύχιες μηχανές οριζόντιου άξονα, όπου τα πτερύγια ευθυγραμμίζονται παράλληλα με τη ροή του νερού, και υποβρύχιες μηχανές κάθετου άξονα, με πτερύγια κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής.

Οι παλιρροιακές γεννήτριες ή TSGs - Tidal stream generators, λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως οι γνωστές σε όλους ανεμογεννήτριες, δηλαδή χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια από την κίνηση των υδάτων και τα κατευθύνουν προς στροβίλους. Είναι μια διαδικασία με χαμηλό κόστος και πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με τα παλιρροϊκά φράγματα.

Γενικά, τα τελευταία έτη οι τεχνολογίες παλιρροϊκών γεννητριών έχουν εξελιχθεί σημαντικά, με την κινητική ενέργεια να μετατρέπεται αποτελεσματικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μετατροπείς ενέργειας των παλιρροιών σε ηλεκτρική ισχύ διακρίνονται σε στροβίλους αξονικής ροής (Horizontal Axis Tidal Turbine -HATTs) και σε εγκάρσιας ροής (Vertical Axis Tidal Turbine-VATTs), όμως υπάρχουν και άλλες συσκευές όπως συσκευές παλινδρόμησης, αγωγός Venturri κ.λπ., που θα περιγραφούν παρακάτω.

3.2.2.1 Στρόβιλοι αξονικής ροής (HATTs)

Η βασική λειτουργία τους είναι σαν αυτή των ανεμογεννητριών, αλλά αντί για άνεμο φέρου νερό. Η κινητική ενέργεια των υδάτων αξιοποιείται από τα πτερύγια προς που έχουν κατεύθυνση προς τη ροή των υδάτων. Η περιστροφική δύναμη που δημιουργείται μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αν και η ταχύτητα του νερού είναι μικρότερη από αυτή του ανέμου, η μεγαλύτερη πυκνότητα του καλύπτει αυτή τη διαφορά, παράγοντας μεγαλύτερα επίπεδα ενέργειας σε σχέση με την αιολική. Επίσης, η παλιρροιακή ενέργεια σε σχέση με την αιολική δεν έχει ακραίες μεταβολές της ταχύτητας.



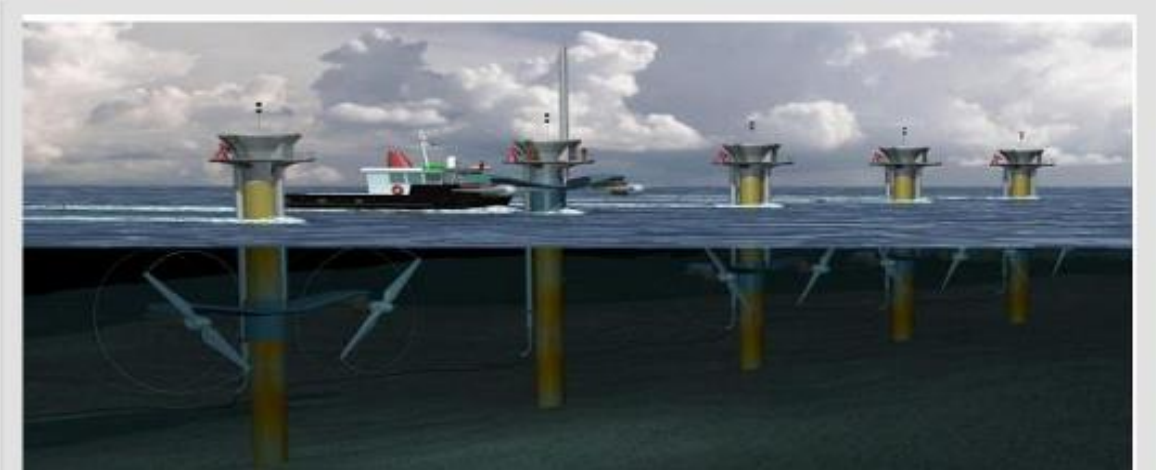
Εικόνα 30: HATT (αριστερά), VATT (δεξιά)

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός στροβίλου τύπου HATT είναι ότι ο άξονας περιστροφής του στροβίλου είναι τοποθετημένος παράλληλα στη ροή της παλίρροιας. Ο αριθμός των πτερυγίων

ποικίλοι, καθώς και ότι μπορεί να έχει ανοιχτούς ή κλειστούς αγωγούς. Τέλος, η απόδοση του επηρεάζεται από τον συντελεστή ισχύος του στροβίλου, την απόδοση του κιβωτίου ταχυτήτων και την απόδοση της μετάδοσης, αλλά επηρεάζεται και από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

3.2.2.2 Στρόβιλοι εγκάρσιας ροής (VATTs)

Σε σχέση με τα HATT, τα VATT διαφέρουν στο ότι τα υδροπτέρυγα είναι τοποθετημένα κάθετα στη ροή κίνησης των υδάτων. Με τη κατακόρυφη τοποθέτηση επιτυγχάνεται η οικονομικότερη λειτουργία του στροβίλου, αφού δεν απαιτείται σύστημα αυτοματισμού παρακολούθησης της ροής των ρευμάτων. Συνήθως η διατομής τους είναι κυλινδρική και για αυτό είναι κατάλληλες για τοποθέτηση σε στενά κανάλια, υδατορεύματα και εκβολές ποταμιών. Ο μηχανισμός παραγωγής ισχύος μοιάζει με αυτόν της οριζόντιας ροής και η απόδοσή τους είναι ιδανική, αφού σε χαμηλές ταχύτητες έχουν υψηλές ροπές καθώς και ο λόγος ταχύτητας δίδει βελτιωμένο ωστικό συντελεστή και άρα μεγαλύτερη δύναμη ανέλκυσης.



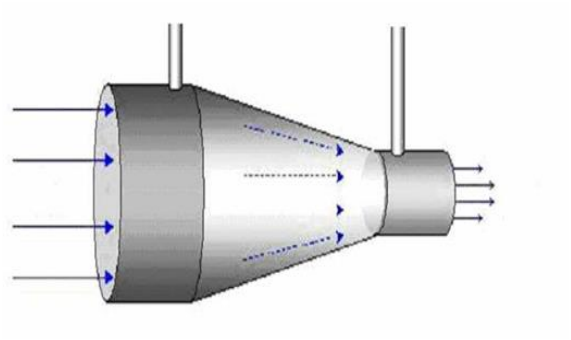
Εικόνα 31: Σύστημα κατακόρυφου άξονα

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθούμε στο **όριο Betz** και πως σχετίζεται με την εξαγωγή ενέργειας. Οι στρόβιλοι μιας γεννήτριας έχουν σκοπό να μετατρέψουν από τη συνολική κινητική ενέργεια τη μέγιστη δυνατή σε ωφέλιμη. Το ερώτημα στο οποίο απάντηση έδωσε ο μηχανικός του ναυτικού Albert Betz είναι το *«πόση κινητική ενέργεια μπορεί να εξαχθεί;»* .

Σύμφωνα με το όριο Betz, ένας στρόβιλος τοποθετημένος σε σταθερό ρεύμα ρευστού είτε νερό είτε άνεμο δεν μπορεί να μετατρέψει πάνω από περίπου το 59% της συνολικής κινητικής ενέργειας σε μηχανική.

3.2.2.3 Συσκευές Venturi

Σε έναν αγωγό τέτοιου τύπου δηλαδή με εναλλαγή της διατομής παρατηρούνται μέγιστες ταχύτητες, εκεί που η διατομή είναι ελάχιστη και οφείλεται στο φαινόμενο της αρχής διατήρησης της μάζας.



Εικόνα 32: Σύστημα Venturi.

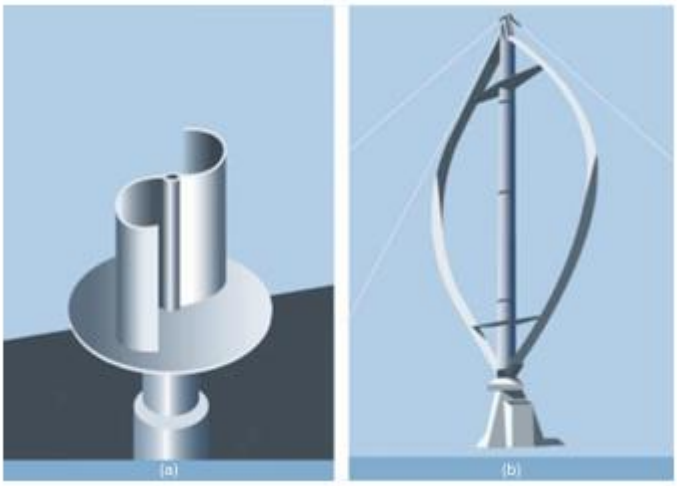
Για την παραγωγή ισχύος από τις παλίρροιες υφίστανται δύο μορφές συσκευών που αξιοποιούν το φαινόμενο του Venturi. Πρώτον, πρόκειται για ένα στρόβιλο τύπου HATT που του έχει εγκατασταθεί αγωγός σαν χοάνη, όπου συγκεντρώνεται η ροή του ρεύματος και αυξάνει έτσι τη ταχύτητα του. Δεύτερον, είναι ένας αγωγός Venturi με βασική αρχή λειτουργίας τη διαφορά πίεσης εντός του αγωγού λόγω αλλαγής της διατομής. Στο σημείο που δημιουργείται λαιμός στον αγωγό, η πίεση του ρευστού μειώνεται. Η πτώση της πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άντληση άλλου ρευστού από άλλο στρόβιλο και στη συνέχεια να το ενσωματώσει στη κύρια ροή. Αυτού του τύπου στρόβιλο είναι ο «φασματικός μετατροπέας θαλάσσιας ενέργειας». Άλλο παράδειγμα στροβίλου με αγωγό Venturi είναι στρόβιλος Rotech, ο οποίος είναι αμφίδρομου τύπου HATT, τοποθετημένος εντός πλαισίου που επιτρέπει την τοπική ανύψωση στην επιφάνεια για συντήρηση χωρίς να απαιτείται πρόσβαση σε όλη τη μονάδα. Η ισχύς μεταφέρεται μέσω υδραυλικού συστήματος.

3.2.2.4 Στρόβιλος Darrieus

Ο στρόβιλος τύπου Darrieus είναι μια υποκατηγορία στροβίλων VATT και γενικά ο πιο αποδοτικός σε αυτή τη κατηγορία, με απόδοση μέχρι και 35%. Η λειτουργία του βασίζεται στα καμπύλα πτερύγια του και εφευρέθηκε από το αεροναυπηγό μηχανικό Georges Darrieus το 1927. Κάποια μειονεκτήματα του στροβίλου αυτού είναι οι αυτοδημιούργητοι στροβιλισμοί, απότομες ταλαντώσεις των πτερυγίων και η κυμαινόμενη ροπή. Το πρόβλημα της ροπής περιορίζεται από τη μόρφωση των υδροπτερυγίων σε μορφή έλικας.

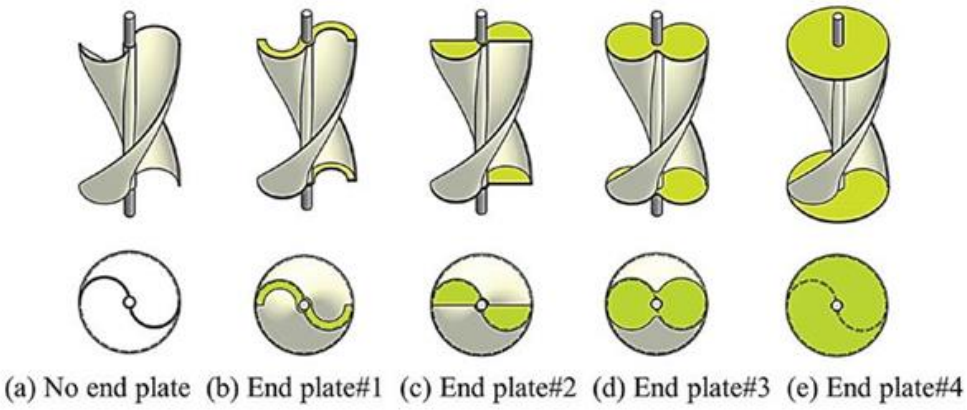
Βασικά χαρακτηριστικά του είναι ότι μετατρέπει την ισχύ της ροής σε περιστροφική. Είναι ένας σταθερός υδροστρόβιλος προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της ροής. Ένας στρόβιλος τέτοιου τύπου αποτελείται από υδροπτέρυγα, που είναι γύρω από το δρομέα σε κατακόρυφη θέση και συνδέονται με ελάσματα-τραβέρσες, τα οποία συγκολλούνται στις αρχές και τα πέρατα των υδροπτέρυγων και του άξονα.

Τέλος οι στρόβιλοι Darrieus διακρίνονται σε στρόβιλους H-Darrieus, Squirrel Cage Darrieus κ.λπ. λόγω διαφοροποιήσεων στο τρόπο λειτουργίας τους.



Εικόνα 33: Στρόβιλοι Savonius (αριστερά), Darrieus (δεξιά)

3.2.2.5 Στρόβιλος τύπου Savonius

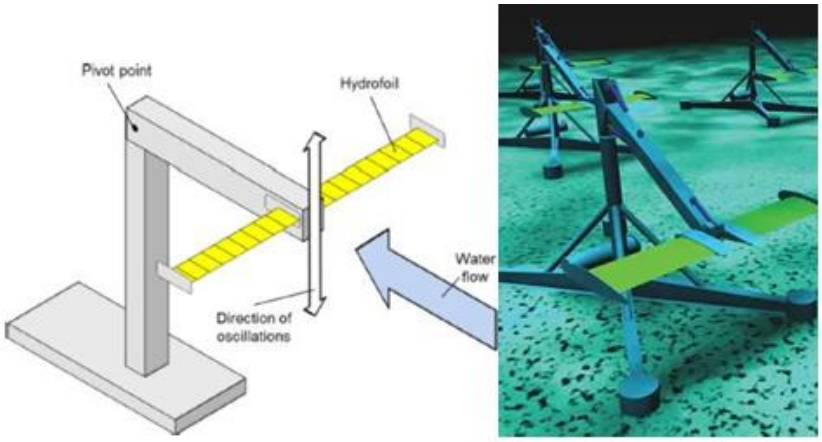


Εικόνα 34: 5 διαμορφώσεις του υδροστροβίλου Savonius.

Μια εφεύρεση του μηχανικού Sigurd Savonius το 1922 είναι αυτού του τύπου ο στρόβιλος όπου όταν η ροή των υδάτων προσκρούει στα περιστρεφόμενα υδροπτέρυγα και η κατά τη κίνηση τους το σχήμα τους θυμίζει σχήμα «S». Ο στρόβιλος Savonius είναι ο πιο αποδοτικός σε μικρές ταχύτητες ροής ρευμάτων, διότι έχει γρήγορο ρυθμό ανάκτησης εξαιτίας του σχήματός τους. Τα υδροπτέρυγα είναι με τέτοιο τρόπο διαμορφωμένα ώστε σε μια πλευρά να είναι οι εσωτερικές επιφάνειες κοίλες, που ονομάζονται σέσουλες, ενώ αντιδιαμετρικά οι εξωτερικές επιφάνειες είναι κυρτές. Όσο αυξάνεται η διάμετρος του στροβίλου τόσο αυξάνεται και ο χρόνος που χρειάζεται για την ανάκτηση της ταχύτητας του θαλάσσιου ρεύματος.

3.2.2.6 Παλινδρομική συσκευή

Είναι μια συσκευή στην οποία το υδροπτέρυγο ταλαντεύεται, απορροφούν ενέργεια από τα παλιρροϊκά ρεύματα και ταλαντώνεται η συσκευή πάνω-κάτω. Το υδροπτέρυγο προκαλεί υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω της διαφοράς πίεσης. Οι υδροδυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται είναι τύπου ανέλκυσης και οπισθέλκουσας και έχουν ημιτονοειδή μορφή.



Εικόνα 35: Παλινδρομική συσκευή.

Η μέγιστη τιμή της δύναμης ανέλκυσης επιτυγχάνεται στη βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης, κάτι που είναι εφικτό με τη χρήση PLC -Programmable Logic Controller (ελεγκτή προγραμματισμένης λογικής). Το PLC παρακολουθεί τις παραμέτρους, την υδραυλική πίεση, τη ταχύτητα ροής και τη θέση του βραχίονα, καθώς και ένα υδραυλικό έμβολο που βρίσκεται στο κινούμενο βραχίονα, που άμεσα ενεργοποιεί τη γωνία πρόσπτωσης του πτερυγίου.

Οι συσκευές παλινδρόμησης είναι πιο αργές από τους στροβίλους, αλλά έχουν μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων εντός των υδάτων, που πολλές φορές οδηγεί σε συγκρούσεις. Επίσης, βάση του σχεδιασμού οι παλινδρομικές συσκευές παράγουν θόρυβο και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία έχουν σημαντικές επιδράσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον.

3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παλιρροιακής ενέργειας

Ένα κοινό πλεονέκτημα της θαλάσσιας ενέργειας είναι ότι δεν απαιτείται καύσιμη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, άρα δεν εκπέμπονται περαιτέρω ρύποι στο περιβάλλον. Οι παλίρροιες, ωστόσο, είναι ένα πιο προβλέψιμο φαινόμενο από τα κύματα και το ποσό παραγόμενης ενέργειας είναι σχετικά σταθερό. Οι εγκαταστάσεις μετατροπής της παλιρροιακής ενέργειας έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επέκτασή τους και όχι η εκ νέου κατασκευή. Ωστόσο, τέτοιες κατασκευές κοστίζουν αρκετά και οι περιοχές, που η παλίρροια πληροί τις προϋποθέσεις ταχύτητας ρεύματος και εύρους είναι περιορισμένες.

Η κατασκευή ενός φράγματος διαβρώνει το περιβάλλον, μεταβάλλοντας το μήκος κύματος της παλίρροιας μεταβάλλεται και το εύρος του κύματος της παλίρροιας έξω από το φράγμα. Επίσης, επηρεάζεται άμεσα η ποιότητα του νερού. Πιο συγκεκριμένα, η αλατότητα ανάντη του φράγματος μειώνεται, αφού μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα θαλασσινών υδάτων μέσω της παλίρροιας. Έτσι τα είδη του γλυκού νερού θα επεκταθούν κατάντη καθώς επίσης κατάντη θα μεταφερθεί και η υφάλμυρη ζώνη. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ένα φράγμα έχει και το ρόλο του φίλτρου, αφού μειώνοντας το εύρος της παλίρροιας κάποιες ποσότητες ιλύος καθιζάνουν. Αυτός είναι ένα τρόπος, η ηλιακή ακτινοβολία να διαπερνά το θαλάσσιο περιβάλλον σε μεγαλύτερο βάθος, αυξάνοντας τα ποσά διαθέσιμης πρωτογενούς τροφής για

πουλιά και ψάρια. Επίσης, η αντιπλημμυρική προστασία που προσφέρει ένα φράγμα είναι σημαντική σε μια παράκτια περιοχή.

Η δημιουργία ενός φράγματος είναι ένα τεχνητό εμπόδιο για την ναυσιπλοΐα, ακόμη και οι διώρυγες δεν διευκολύνουν το πέρασμα όλων των τύπων πλοίων. Αλλά ναι μεν χάνεται το εμπορικό πλεονέκτημα με τη μείωση της διέλευσης πλοίων, αλλά από την άλλη είναι ένας τρόπος ανάπτυξης του τουρισμού και των θαλάσσιων σπορ.

Στη περίπτωση εκμετάλλευσης της παλιρροιακής ενέργειας με τη χρήση υδροστροβίλου οι συνέπειες έγκειται στη ταχύτητα του ρεύματος του κύματος που μειώνεται κατά 10%, άρα χάνονται σημαντικά ποσά ενέργειας, αλλά δεν είναι επηρεάζει το θαλάσσιο περιβάλλον. Οι προπέλες των υδροστροβίλων κινούνται στα μέγιστα με ταχύτητα 10 στροφές/ min, μια τιμή που δεν αποτελεί απειλή για την υδρόβια ζωή. Εν κατακλείδι, αυτή η επιλογή είναι η σχετικά πιο ήπια και είναι πιο γενικά αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα.

Κεφάλαιο 4ο Συστήματα Κυματικής Ενέργειας – WECs

4.1 Pelamis



Εικόνα 36: Pelamis P2

Μια κατασκευή της εταιρείας *Pelamis Wave Power LTD*, είναι ένας μετατροπέας τύπου εξασθενητή με αρθρωτή διάταξη, που αποτελείται από τμήματα σωληνοειδούς μορφής συνδεδεμένα σε ελεύθερες αρθρώσεις. Σε κάθε τμήμα έχει τοποθετηθεί ξεχωριστό σύστημα μετατροπής ενέργειας μαζί με συσσωρευτές πίεσης, υδραυλικούς κυλίνδρους. Επίσης η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με το κινητήρα. Ο μηχανισμός αυτός αντιδρά στη καμπύλη μορφή των κυμάτων και όχι στο ύψος τους και έκαστο τμήμα κινείται σε δυο άξονες κάθετους μεταξύ τους, που έχουν υποστεί περιστροφή. Οι άξονες ονομάζονται άξονας ταλάντωσης και ανύψωσης. Ενώ τα τμήματά κινούνται στους άξονες βρίσκουν εμπόδιο τη κίνηση των εμβόλων.

Η διάταξη Pelamis λόγω του σχήματος της και της αγκυροβόλησης από τη μια πλευρά έχει τη δυνατότητα ελεύθερης περιστροφής, ώστε να συγκροτείται παράλληλα στη διεύθυνση των κυμάτων. Στους άξονες λόγω των ελεύθερων κινήσεων δεν προκαλείται συντονισμός, που αποτελεί κίνδυνο καταστροφής της διάταξης. Επίσης, λόγω μικρής μετωπιαίας επιφάνειας απορροφάται ενέργεια σε όλο το μήκος της διάταξης. Η διάταξη αυτή είναι κατάλληλη για μεγάλα βάθη.

Το Pelamis P2 είναι μήκους 180m, διαμέτρου 4m και αποτελείται από πέντε τμήματα σωληνοειδούς μορφής, τα οποία παράγουν ηλεκτρισμό, που με τη σειρά του μεταφέρεται στο ελεύθερο άκρο και ανυψώνεται στα 6,5 kV. Τα υδραυλικά υγρά καταλήγουν σε γεννήτριες ισχύος 125 kW.



Εικόνα 37: Αγωγός Pelamis.

4.2 PowerBuoy

Μια ακόμη διάταξη μετατροπής κυματικής ενέργειας είναι το PowerBuoy και ανήκει στη κατηγορία των σημειακών απορροφητών. Η κατασκευάστρια εταιρεία είναι η *Ocean Power Technologies,* η οποία αρχικά κατασκεύαζε συσκευές με μέγιστη ισχύ τα 40 kW, πολύ χαμηλότερη. Όμως το 2012, κατασκεύασε το PowerBuoy ισχύος 150 kW και έπειτα το PowerTower 500 kW.

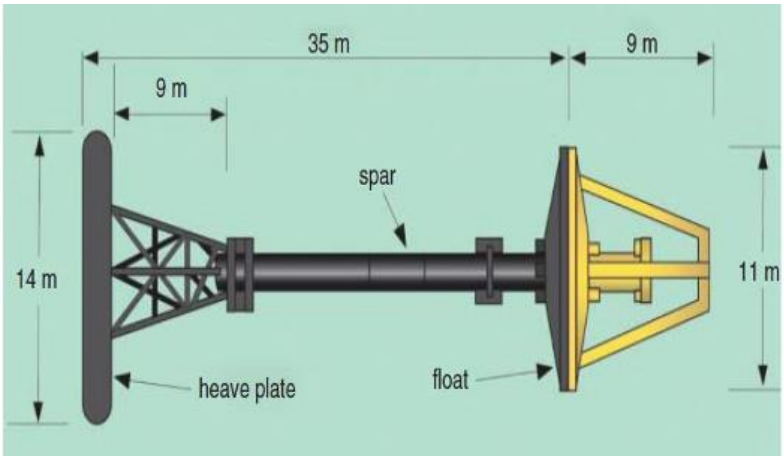


Εικόνα 38: PowerBuoy 150 kW

Η διάταξη αυτή είναι πλωτή, τύπου σημαδούρα και κινείται υπό την επίδραση των κυμάτων. Επίσης, αποτελείται από πλωτό μέρος, μια πλάκα και το στύλο. Η γραμμική κίνηση μετατρέπεται σε περιστροφή και οδηγείται στη γεννήτρια. Στο στύλο τοποθετούνται οι μπαταρίες για παροχή ενέργεια ακόμη και όταν η υδάτινη επιφάνεια είναι λεία.

Σημαντικό ρόλο κατέχουν οι διαστάσεις του πλωτού μέρους, αφού δεν πρέπει να ξεπερνά το 1/5 του μήκους των κυμάτων με τα οποία αλληλεπιδρά.

Η PB150 εγκαταστάθηκε πρώτη φορά το 2011 στη Σκωτία, σε σημείο βάθους 55 m. Η παρακάτω εικόνα 40 είναι ένα σκαρίφημα του PB150 που φαίνονται οι διαστάσεις του και όπως φαίνεται είναι κατάλληλο για μεγάλου μήκους κύματα.

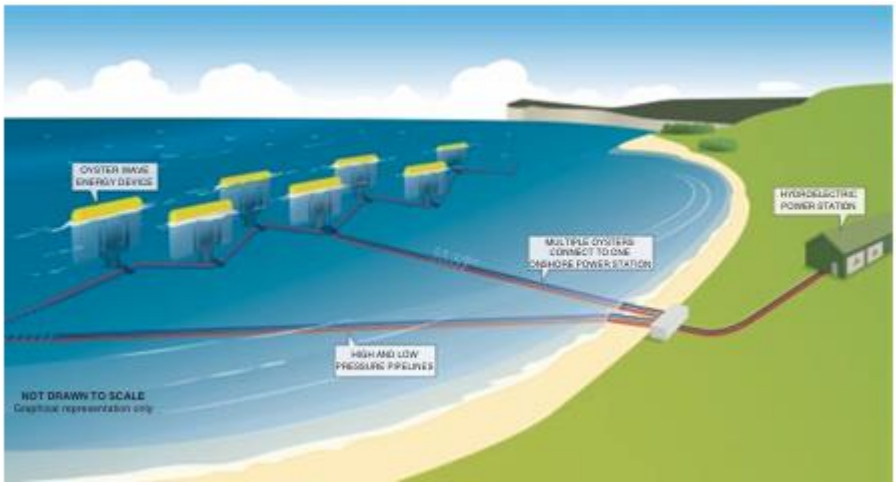


Εικόνα 39: Διαστάσεις PB150.

Όπως φαίνεται, το PB150 είναι αξονικά συμμετρικό άρα δεν επηρεάζεται από τη κατεύθυνση των κυμάτων και για αυτό υπερτερεί έναντι άλλων διατάξεων.

4.3 Oyster

Είναι ένας μετατροπέας ενέργειας που κατασκευάστηκε από την εταιρεία *Aquamarine Power.* Ο μετατροπέας Oyster ανήκει στην κατηγορία των ταλαντευόμενων μετατροπέων και η μορφή του ένα αρθρωτό πτερύγιο, συνδεδεμένο με μία βάση, που έχει τοποθετηθεί στο πυθμένα. Ουσιαστικά, η διάταξη αυτή αποτελεί μια αντλία την οποία ενεργοποιούν τα κύματα.



Εικόνα 40: Oyster

Το μεγαλύτερο κομμάτι του πτερυγίου είναι κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, κινείται μπρος-πίσω, όταν προσπίπτουν τα κύματα και με τη σειρά του ενεργοποιεί δυο έμβολα. Στη συνέχεια, τα έμβολα ωθούν νερό υψηλής πίεσης και ενεργοποιούν την ηλεκτρογεννήτρια. Το πτερύγιο λαμβάνει κυματική ενέργεια, την οποία μετατρέπει σε ροπή και τη μεταφέρει στα έμβολα. Οι συσκευές Oyster τοποθετούνται σε παράκτιες περιοχές και σε βάθος 10-15 m και σε απόσταση ως 1 km από την ακτή, ενώ ο κινητήρας και η γεννήτρια είναι εγκατεστημένα στην ακτή.

Το Oyster1 λειτούργησε το 2009 ήταν ισχύς 315 kW, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για έρευνα και λειτούργησε για 6000 ώρες μέχρι να αναπτυχθεί το Oyster 800, ο οποίος λειτουργεί από το 2012 με ονομαστική ισχύ 800 kW.



Εικόνα 41: Oyster 800

Ένας μετατροπέας τύπου Oyster πληροί τις προϋποθέσεις ενός αποτελεσματικού μετατροπέα κυματικής ενέργειας. Επίσης, είναι μια αξιόπιστη πλωτή κατασκευή λόγω της στιβαρής κατασκευής των στύλων, του πτερυγίου, αλλά και η ασφάλεια που προσδίδει ένας WEC τέτοιου τύπου, αφού τα ηλεκτρικά μέρη του είναι εγκατεστημένα στη ξηρά. Επίσης, η αντοχή του σε ακραία καιρικά φαινόμενα είναι μεγάλη χωρίς να μειώνεται η απόδοση του, αφού για έντονο κυματισμό το πτερύγιο βυθίζεται περισσότερο και αυτοί περνούν πάνω από την συσκευή χωρίς να την επηρεάζουν και να μην φθείρεται ο μετατροπέας. Οι διατάξεις Oyster τοποθετούνται σε ρηχά νερά.

Είναι γνωστό πως σε μεγαλύτερη βάθη το ενεργειακό δυναμικό είναι μεγαλύτερο και μια παράκτια διάταξη δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλο αυτό το ποσό ενέργειας, αλλά έχει παρατηρηθεί ότι το ποσό κυματικής ενέργειας που είναι αξιοποιήσιμο από ένα παράκτιο WEC για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερο. Επίσης μια τέτοια παράκτια διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι καθώς μειώνεται το βάθος, η κατεύθυνση των κυμάτων παραμένει σταθερή και έτσι ο μετατροπέας Oyster δεν περιστρέφεται. Επίσης, προκαλείται και το φαινόμενο της ρήχωσης (shoaling) που συμβάλει στην αύξηση της οριζόντιας δύναμης των κυμάτων κατά το μισό. Αυτό όμως δεν ισχύει σε βάθη μικρότερα των 10 m, διότι σε αυτή την περίπτωση το φαινόμενο της θραύσης των κυμάτων φέρει απώλειες ενέργειας.

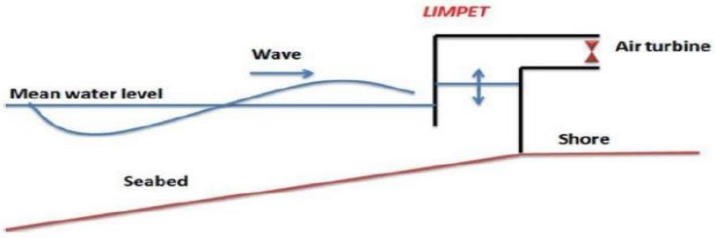
Για τη βέλτιστη απόδοση ενός μετατροπέα Oyster σημαντική είναι η ορθή σχεδίαση του πτερυγίου, το φαρδύ πτερύγιο είναι καταλληλότερο για την εξαγωγή κυματικής ενέργειας σε σχέση με ένα κατασκευασμένο πιο στενά. Αλλά για κύματα με μικρό μέτωπο και ένα φαρδύ πτερύγιο τότε η απόδοση μειώνεται. Η απόδοση που δίνει ένα πτερύγιο μπορεί να βελτιωθεί με την εγκατάσταση καμπύλων άκρων. Το πτερύγιο πρέπει να είναι τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί τη μέγιστη ροπή, αλλά και να μην υπάρχει διαρροή νερού μέσα από το πτερύγιο ειδικά όταν ο κυματισμός είναι ήπιος.

Μετά το Oyster 800 μετατρέπει τη κυματική ενέργεια σε περιστροφική ενός υδροστροβίλου Pelton, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια επαγωγική γεννήτρια. Επίσης στον άξονα είναι τοποθετημένο ένα βολάν στο οποίο αποθηκεύεται η περιστροφική ενέργεια.

4.4 Limpet & Mutriku

Είναι δυο διαφορετικές εγκαταστάσεις της κατηγορίας ταλαντευόμενης στήλης νερού, έχουν κατασκευαστεί από την εταιρεία *Voith Hydro Wavegen*. Το Limpet είναι εγκαταστάθηκε στο Islay της Σκωτίας το 2000 και το Mutriku έχει τοποθετηθεί στη περιοχή Mutriku της βόρειας Ισπανίας.

Αρχικά, ο μετατροπέας Limpet είναι τοποθετημένο 17 m εσωτερικά της ακτής. Είναι μια κοίλη διάταξη που αφήνει τα κύματα να εισέρχονται από υποθαλάσσιο άνοιγμα. Στη συνέχεια, τα κύματα ανεβαίνουν υπο κλίση 40 μοιρών, δηλαδή από τη στήλη νερού, προκαλώντας επάλληλες συμπιέσεις και αποσυμπιέσεις της στήλης αέρα.



Εικόνα 42: Διάγραμμα λειτουργίας Limpet & Mutriku

Το πάνω τμήμα της διάταξης είναι ενισχυμένο με στηρίξεις, οι οποίες διαχωρίζουν τη στήλη νερού σε τρία τμήματα. Στο άνω τμήμα τα τρία τμήματα ενώνονται εσωτερικά και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη γεννήτρια. Ο στρόβιλος που χρησιμοποιείται είναι τύπου Wells, ο οποίος έχει την ικανότητα να αυξάνει ή να μειώνει ταχύτητα σε σχέση με το εάν ο αέρας συμπιέζεται ή αποσυμπιέζεται.



Εικόνα 43: Mutriku

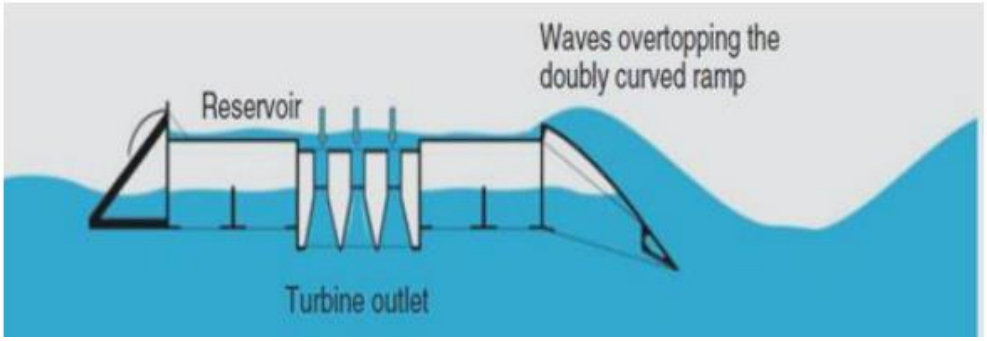
Το 2004 στη βόρεια Ισπανία αποφασίστηκε η κατασκευή ενός κυματοθραύστη μήκους 400 m. Η απόφαση αυτή συνδυάστηκε με τη στροφή των κοινωνιών προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα το ενδιαφέρον για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας. Ωστόσο προϋπόθεση για την εγκατάσταση ενός WEC ταλαντευόμενης στάθμης νερού, ήταν ότι δεν θα επηρεαστεί η απόδοση του κυματοθραύστη.

Το σχέδιο του Mutriku έχει 16 θαλάμους ταλαντευόμενης στήλης νερού με υποθαλάσσια ανοίγματα για την είσοδο των κυμάτων, όπως και ο Limpet. Επίσης έχει 16 κάθετα τοποθετημένους στροβίλους Wells, έκαστος συνδεδεμένος με γεννήτρια ονομαστικής ταχύτητας 18,5 kW. Ο μετατροπέας Mutriku αποδίδει συνολικά μέχρι και 600 MWh / έτος.

4.6 WaveDragon

Ο μετατροπέας κυμάτων WaveDragon κατασκευάστηκε από την ομώνυμη εταιρεία στη Δανία, έπειτα από σειρά μελετών που ξεκινούν από το 1986 και ολοκληρώνονται το 2003. Είναι ένας μετατροπέας τύπου υπερπήδησης και είναι μια μικρογραφία των γνωστών υδροηλεκτρικών εργοστασίων.

Τα κύματα που προσπίπτουν σε μια συσκευή WaveDragon ανυψώνονται μέσω ράμπας και το νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενή πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Έπειτα, το νερό αφήνεται ελεύθερο και οι στρόβιλοι το επιστρέφουν στη θάλασσα, οι οποίοι είναι παράλληλα συνδεδεμένοι με της γεννήτριες και κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 44:Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας Wave Dragon

Είναι μια στατική διάταξη και δεν απαιτεί ανώτατο όριο ύψους ή μήκους κύματος, όπως οι άλλοι μετατροπείς, για να τεθεί σε λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιεί τη δυναμική ενέργεια των κυμάτων που έχει δεσμευτεί στο νερό της δεξαμενής. Επίσης ένας μετατροπέας WaveDragon κατασκευασμένος από σκυρόδεμα για κυματικό δυναμικό 36 kW/m ζυγίζει 33.000 tn και έχει μήκος 300 m. Μπορεί να εγκατασταθεί σε βάθος άνω των 25 m, με βέλτιστη επιλογή τα 40 m. Αποτελείται από το βασικό τμήμα, που είναι η πλατφόρμα, δυο ανακλαστικά φτερά, τους υδροστροβίλους και τις γεννήτριες. Τα κύματα προσπίπτουν στη ράμπα ανύψωσης και φθάνουν έτσι στη δεξαμενή που είναι τοποθετημένη στη πλωτή πλατφόρμα.

Οι υδροστρόβιλοι διώχνουν το νερό από τη δεξαμενή στη θάλασσα, ουσιαστικά, η υδραυλική πίεση μετατρέπεται σε περιστροφική. Ο τύπος στροβίλου που χρησιμοποιείται σε αυτόν τον WEC είναι στρόβιλος Kaplan, ο οποίος χρησιμοποιείται και στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια και

περιστρέφεται με μικτή μεταβλητή ταχύτητα. Ο τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται είναι μόνιμου μαγνήτη που συνδέεται σε κάθε στρόβιλο.

Στην περίπτωση ήπιων κυματισμών ο μετατροπέας πλέει χαμηλά, ώστε να τον ξεπερνούν τα κύματα ενώ σε υψηλά κύματα ανυψώνεται ώστε να αποθηκεύσει και να αξιοποιήσει τα αυτά τα κύματα που φέρουν μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο.

Wave Dragon key figures	Nissum Bred-ning 0.4 kW/m	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m
Weight, a combination of reinforced concrete, ballast, and steel	237 t	22,000 t	33,000 t	54,000 t
Total width and length	58 × 33 m	260 × 150 m	300 × 170 m	390 × 220 m
Wave reflector length	28 m	126 m	145 m	190 m
Height	3.6 m	16 m	17.5 m	19 m
Reservoir	55 m^3	5,000 m^3	8,000 m^3	14,000 m^3
Number of low-head Kaplan turbines	7	16	16–20	16–24
Generator's capacity for each turbine[a]	2.3 kW	250 kW	350–440 kW	460–700 kW
Rated power for a unit	20 kW	4 MW	7 MW	11 MW
Annual power production/unit	–	12 GWh/y	20 GWh/y	35 GWh/y
Water depth	6 m	>20 m	>25 m	>30 m

[a] Permanent magnet generator (PMG)

Εικόνα 45: Χαρακτηριστικά Wave Dragon

4.7 Penguin

Μελετήθηκε και αναπτύχθηκε το 2008 από την εταιρεία *Wello Oy* και ανήκει στη κατηγορία μετατροπέων στρεφόμενης μάζας. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα σκάφος που είναι ασύμμετρο, περιέχει έκκεντρη στρεφόμενη μάζα και τη γεννήτρια στον ίδιο άξονα.



Εικόνα 46: Penquin.

Η κίνηση του σκάφους από την επίδραση των κυμάτων, προκαλεί περιστροφή της έκκεντρης μάζας, η οποία με τη σειρά μεταδίδει την ενέργεια στη γεννήτρια μέσω κοινού άξονα και έτσι παράγεται ηλεκτρισμός. Μια τέτοια συσκευή ναυπηγήθηκε πρώτη φορά στη Ρίγα, με ονομαστική ισχύ 1MW.

Η διάταξη Penguin έχει μήκος 30m και ύψος 9 m, ζυγίζει 1600 tn εκ των οι 1300 tn είναι ερμάρια. Έρμα είναι τα βάρη που χρησιμοποιούνται στη συσκευή για την αύξηση της ευστάθειάς της.

Στη συσκευή αυτή για τη αύξηση της απόδοσης έχει εγκατασταθεί σύστημα αυτομάτου ελέγχου, το οποίο αυξάνει τη ροπή του άξονα, δηλαδή επιδιώκει μια διαφορά φάσης, συγκεκριμένα καθυστέρηση μεταξύ της γωνίας του άξονα και της θέσης της μηχανής κάθε χρονική στιγμή.

Κεφάλαιο 5ο Συστήματα μετατροπής παλιρροϊκής ενέργειας

5.1 Andritz Hydro Hammerfest

Η εταιρεία Hammerfest Strom εγκατέστησε το πρώτο παλιρροϊκό στρόβιλο το 2003. Το πρώτο μοντέλο HS300 λειτουργούσε για 17.000 ώρες, διαθεσιμότητα περί το 98% και ήταν ο πρωτοπόρος για ανάπτυξη στο επόμενο μοντέλο HS1000 με ισχύ 1 MW, το 2011. Είναι μια συσκευή οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, μήκους εννιά μέτρων και περιστρέφονται 280ο για την εύρυθμη λειτουργία σε όλες τις ταχύτητες ρευμάτων, είτε κατά τη διάρκεια της πλημμυρίδας είτε της άμπωτης.



Εικόνα 47: Μοντέλο HS300 της εταιρείας Hammerfest

Το 2011, ξεκίνησε η εγκατάσταση συστοιχίας στροβίλων τύπου HS1000 στο κόλπο Islay και ακολούθησαν έτη έρευνας και ανάπτυξης. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας των συστοιχιών ήταν 10 MW, ενώ επιδιώκουν και πρόκειται να κατακτήσουν ποσά ενέργειας 30 GWh, που αντιστοιχούν στις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων του Islay.

Η εγκατάσταση της διάταξης στο πυθμένα της θάλασσας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, πρέπει οι στρόβιλοι να τοποθετηθούν σε σημεία με υψηλές ταχύτητες ρευμάτων για την απορρόφηση μέγιστων ποσών ενέργειας. Ωστόσο, δεν είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του στροβίλου, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η μορφολογία του πυθμένα και η ροή που δημιουργείται από τη βαθυμετρία του καναλιού. Επίσης, για λόγους συντήρησης ο στρόβιλος πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμος, ενώ στη περίπτωση της άμπωτης τα πτερύγια κατά τη κίνηση τους δεν πρέπει να εμποδίζουν τη ναυσιπλοΐα.

Η ANDRITZ HYDRO Hammerfest, όπως μετονομάστηκε η πρωτοπόρος εταιρεία και η ScottishPower Renewables εκτιμούν ότι η συστοιχία HS1000 θα καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του Islay και ότι στο μέλλον θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες συστοιχίες σε τοποθεσίες όπως ο Πορθμός Pentland, στα βόρεια της Σκωτίας.

5.2 Tidal Generation

Η διάταξη αυτή εγκαταστάθηκε στο Bristol της Αγγλίας το 2005 από την *Tidal Generation Ltd.* Ήταν το πρώτο εγχείρημα μετατροπής παλιρροϊκής ενέργειας που έλαβε πιστοποίηση ROC – Renewable Obligation Certificate.

Ο στρόβιλος αποτελείται από τρία πτερύγια και είναι συνδεδεμένα με το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Η συσκευή στηρίζεται σε μια τρίποδη χαλύβδινη κατασκευή, ώστε να τοποθετηθεί στο πυθμένα της θάλασσας.

Το 2013 στο σύστημα αυτό τοποθετήθηκε νέος στρόβιλος ισχύος 1 MW, ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία πάνω στην ίδια κατασκευή. Γενικά, είναι μια διάταξη που αξιοποιεί την απόδοση των υδροπτερύγων διότι η άτρακτος ευθυγραμμίζει το δρομέα στη ροή του ρεύματος της παλίρροιας. Αυτό είναι σημαντικό, διότι μπορεί να αξιοποιεί την ενέργεια των παλιρροιών και ε περιόδους άμπωτης και πλημμυρίδας. Επίσης, η μεταβλητή κλίση των πτερυγίων και η περιστροφή της ατράκτου καθιστούν τον στρόβιλο ανθεκτικό και βιώσιμο στο υδάτινο περιβάλλον και τις αντίξοες καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 48:Μοντέλο TGL 500kW

5.3 Atlantis Resources

Η εταιρεία Atlantis Resources Corporation εδράζεται στην Αυστραλία και πραγματεύεται σχεδιασμό και ανάπτυξη στροβίλους εκμετάλλευσης παλιρροιακής ενέργειας. Οι πρώτες έρευνες έγιναν το 2002 και έπειτα από πολλές δοκιμές χαμηλής ισχύος το 2006 εγκατέστησε στο San Remo συσκευή 500 kW ισχύος μετατροπής της παλιρροϊκής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ακολούθησε σειρά επενδυτικών εξελίξεων και επιχειρησιακής ανάπτυξης με ορόσημο τη μεταφορά της εταιρείας στην Αγγλία. Οι έρευνες κορυφώνονται με τη συσκευή ισχύος 1 MW, οριζόντιου άξονα με πτερύγια μορφής έλικα, δύο ρότορες αντιδιαμετρικούς, ένα μοντέλο της Atlantis Resources που ονομάστηκε AK1000.

Ωστόσο βλάβες στις έλικες έφεραν το 2011 το νέο βελτιωμένο μοντέλο AR1000 με νέους έλικες ενισχυμένους με ίνες γυαλιού και έναν ρότορα.



Εικόνα 49:Μοντέλο AR1000

Ο κατασκευαστής έχε δημιουργήσει μια δομή που επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση της διάταξης στο πυθμένα και επιτρέπει την εγκατάστασή του σε λιγότερο από ενενήντα λεπτά, χωρίς τη χρήση ROV ή δυτών.

Η εταιρεία Atlantis από το 2012 και έπειτα επενδύει σε ολοένα και περισσότερα έργα αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, με γνώμονα τη χρήση των στροβίλων οριζόντιου άξονα, βελτιώνοντας τον .

5.4 OpenHydro

Η OpenHydro είναι ιρλανδική εταιρεία που εξαγόρασε το2005 τη τεχνολογία του στροβίλου Opencenter και το 2006 είναι η πρώτη εταιρεία, που αναπτύσσει παλιρροϊκό στρόβιλο ισχύος 250 kW. Στόχος της εταιρείας είναι η πώληση υδροστροβίλων εκμετάλλευσης της παλιρροϊκής ενέργειας στη διεθνή αγορά, η εγκατάσταση τους και η μετέπειτα συντήρηση.

Ο στρόβιλος Opencenter έχει ονομαστική ισχύ 250 kW και διάμετρο 6 m, τοποθετείται στο πυθμένα της θάλασσας και είναι σχεδόν αόρατη, αποτελούμενη από εα τρίποδο στήριξης, έναν αγωγό και ένα ρότορα. Η μόρφωση του αγωγού αυξάνει την απόδοση, η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη είναι τοποθετημένη εντός του αγωγού και η διαμόρφωση του είναι ασφαλή για τη προστασία του θαλασσινού κόσμου.



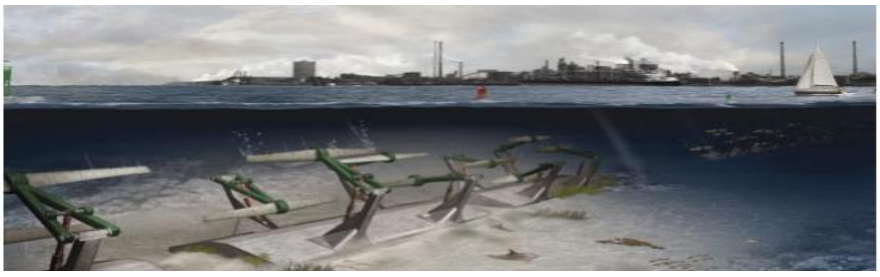
Εικόνα 50:OpenHydro στρόβιλος

Η εταιρεία άρχισε σταδιακά να βελτιώνει τις λειτουργίες του στροβίλου, να αυξάνει την ονομαστική ισχύ και να συμμετέχει σε έργα ανα το κόσμο όπως στο νησί Alderney, στο Bay of Fundy του Καναδά, Pentland της Σκωτία κ.α.

Προϋπόθεση για έναν πετυχημένο στρόβιλο είναι η ακριβής τοποθέτηση στο πυθμένα, επίσης, η εύκολη πρόσβαση και ανάκτηση του στη επιφάνεια, όταν είναι απαραίτητο. Ωστόσο, τα παλιρροϊκά ρεύματα και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται καθιστούν αυτή τη διαδικασία δύσκολη και επικίνδυνη. Με αφορμή αυτό το πρόβλημα η OpenHydro αναπτύσσει έναν «εγκαταστάτη» για τη μεταφορά και την ακριβή τοποθέτηση των στροβίλων. Συνολικά η διάταξη ζυγίζει 1000 tn και ύψος μεταξύ 20 και 25 m.

5.5 Pulse Tidal

Η εταιρεία Pulse Tidal ανέπτυξε μια πρωτοπόρα συσκευή εκμετάλλευσης της παλιρροϊκής ενέργειας. Η συσκευή χρησιμοποιεί ζεύγη υδροπτερύγων οριζόντια τοποθετημένων, τα οποία ταλαντώνονται πάνω κάτω, δηλαδή διασχίζουν το παλιρροϊκό ρεύμα. Κάθε υδροπτέρυγο συλλαμβάνει ενέργεια από μια τετραγωνική περιοχή των υδάτων και σε περιπτώσεις εγκατάστασης δύο ζευγών υδροπτερύγων η ενέργεια που αντλείται από τα παλιρροϊκά ρεύματα διπλασιάζεται.



Εικόνα 51: Υδροπτέρυγα Pulse-Tidal

Το 2009 η Pulse Tidal εγκατέστησε τη πρώτη της συσκευή *Pulse-Stream 100*, ισχύος 100 kW. Για την εύκολη συντήρηση και πρόσβαση στη συσκευή, η διάταξη αποτελείται από στύλους που στο καθένα έχει τοποθετηθεί ένα ζευγάρι υδροπτερύγων και στο άνω μέρος καλύπτονται από μια οριζόντια πλατφόρμα. Η συσκευή αυτή αποσύρεται έπειτα από δυο έτη και τώρα πια έχει εξελιχθεί σε ισχύ 1 MW και άνω.

Η εταιρεία γνωστοποίησε μέσω ενός άρθρου χαρακτηριστικά της συσκευής που τα καθιστούν κατάλληλη έναντι των οριζόντιων διατάξεων. Αρχικά, το γεγονός ότι το υδροπτέρυγο κινείται σε περιοχή ορθογωνίου σχήματος και όχι κυκλικού, την καθιστά κατάλληλη συσκευή για ρηχά νερά. Επίσης, το μήκος των υδροπτερύγων δεν επηρεάζεται από το βάθος των υδάτων και η βάση έχει τέτοιο σχήμα, ώστε ν ενισχύει τη κίνηση των πτερύγων. Το γεγονός ότι μπορούν να εγκατασταθούν σε ρηχά νερά και να είναι εύκολα προσβάσιμες συσκευές για συντήρηση, μειώνει αρκετά το κόστος σε σχέση με τις άλλες συσκευές. Τέλος, η συσκευή δεν αποτελεί απειλή για τη θαλάσσια ζωή, σημαντικό κριτήριο επιλογής μια ανανεώσιμης πηγής ενέργειας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θαλάσσια ενέργεια θα μπορούσε να αποτελεί τη κύρια μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά δεν έχει ακόμη αξιοποιηθεί στο βέλτιστο δυνατό βαθμό. Οι υπάρχουσες διατάξεις παρέχουν ελπιδοφόρα ποσά ενέργειας, που μελλοντικά θα μπορούσαν πλήρως να καλύπτουν την ενεργειακή ζήτηση. Επίσης, η σχέση κόστους και απόδοσης είναι αρκετά θετική σε σχέση με άλλους ανανεώσιμους πόρους.

Η παρούσα μελέτη ανέλυσε το πεδίο εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας, δίνοντας έμφαση στις τεχνολογίες και τα συστήματα που υπάρχουν και πως μπορούν να αξιοποιηθούν οι ενεργειακοί πόροι που προσφέρονται από τη θαλάσσιο περιβάλλον. Στις παραπάνω ενότητες, έλαβε χώρα εκτενής ανάλυση της θεωρίας των κυμάτων και των παλιρροιών και των τρόπων εκμετάλλευσης του ενεργειακού δυναμικού τους. Δόθηκε έμφαση στο βιώσιμη χαρακτήρα της θαλάσσιας ενέργειας και ότι αποτελεί σημαντική λύση στην αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας. Στο 1ο κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στις έννοιες της παλίρροιας και του κύματος. Στη συνέχεια στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάσθηκε αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο της κυματικής θεωρίας και ο τρόπος λειτουργίας των υπαρχουσών τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματική ενέργειας. Αντίστοιχα ακολούθησε στο 3ο κεφάλαιο, εμβάθυνση στο φαινόμενο της παλίρροιας και της παλιρροιακής ενέργειας και των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της δυναμικής και κινητικής ενέργειας της παλίρροιας. Στο 4ο και 5ο κεφάλαιο παρουσιάσθηκα μελέτες περίπτωσης συστημάτων παραγωγής ενέργειας από τη θαλάσσια ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζονται εγκαταστάσεις αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική όπως το Pelamis, Penguin, Limpet & Mutriku, Oyster, WaveDragon και PowerBuoy. Τέλος, στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάσθηκαν οι τεχνολογίες υδροστροβίλων εγκάρσιας και οριζόντιας ροής ή και των δύο , που εκμεταλλεύονται ανά τον κόσμο την ενέργεια των παλιρροιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Τέτοια έργα είναι τα : Atlantis Resource, Tidal Generation, Andritz Hydro Hommerfest, OpenHydro, Pulse Tide και Marine Current Turbines.

Τις τελευταίες δεκαετίες σημαντική τεχνολογική εξέλιξη έχουν λάβει οι συσκευές εκμετάλλευσης της κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας. Συσκευές από το πρώιμο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξη εντός λίγων ετών εγκαταστάθηκα σε έργα μεγάλης κλίμακας που αναπτύσσονται στη θάλασσα. Η βιομηχανία τέτοιων συσκευών αποκτά ολοένα και περισσότερη εμπειρία στη κατασκευή ανθεκτικότερων στις αντίξοες καιρικές συνθήκες. Επίσης, στα επόμενα χρόνια αναμένεται να λειτουργήσουν περισσότερες συστοιχίες τέτοιων συσκευών, που θα έχουν ισχύ άνω των 100 MW. Η ανάπτυξη τέτοιων έργων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν μπορεί ο χρονικός προγραμματισμός να είναι ακριβής.

Σημαντικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει και η κρατική παρέμβαση με παγκόσμια στρατηγική την κατεύθυνση της αξιοποίησης της παγκόσμιας θαλάσσιας ενέργειας για την παραγωγή ηλεκττρικής ενέργειας θα ήταν ένα ενεργό βήμα. Επίσης, η κεφαλαιακή υποστήριξη από τις εθνικές κυβερνήσεις τέτοιων έργων θα προσελκύσουν το ενδιαφέρον των πολιτών και ένα οικονομικό κίνητρο θα αύξανε την επιθυμία των πολιτών. Επίσης, σε περιοχές με υψηλό ενεργειακό δυναμικό θαλάσσιας ενέργειας η μείωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος θα ενθάρρυνε, με στόχο της εγκατάσταση συστημάτων μετατροπής θαλάσσιας ενέργειας θα ενίσχυε το ενδιαφέρον των

πολιτών. Αλλά και σε επίπεδο γραφειοκρατίας, οι διαδικασίες έγκρισης και αδειοδότησης θα πρέπει να είναι άμεσες, ειδικά αφού είναι μια πράξη φιλική προς το περιβάλλον και σε σχέση με τους σημερινούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, βέλτιστη επιλογή.

Για να συμβάλουν ουσιαστικά στην εθνική και παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι διατάξεις κυματικής και παλιρροϊκής ενέργειας πρέπει να φτάσουν σε επίπεδο ισχύος της τάξης των MW και να αναπτυχθούν σε μεγάλο αριθμό. Το υψηλό κόστος των μηχανών πλήρους κλίμακας καθιστά αναγκαία τη διεξοδική έρευνα και ανάπτυξη, η οποία περιλαμβάνει προσομοιώσεις με υπολογιστές και φυσικές δοκιμές, πριν από τη μαζική κατασκευή.

Εν κατακλείδι, σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας, η αξιοποίηση της θαλάσσιας ενέργειας έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι διαθέσιμες για παραγωγή όλο το 24ωρο με μόνες διακυμάνσεις τα ποσά ενέργειας. Είναι μια βιώσιμη επιλογή σε οικονομικό και περιβαλλοντολογικό επίπεδο. Η απουσία καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας από τις γεννήτριες τη καθιστά μια αειφόρος μέθοδο παραγωγής ενέργειας. Συνολικά, όλοι αυτοί οι παράμετροι καθιστούν τα κύματα και τις παλίρροιες μια Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που μπορεί να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους και να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Buldu, G., Canbolat, H., and Tutar, M., (2011). The Design of a Palette-type Wave Energy Converter System Supported by Buoys, 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italy.
2. Ιωάννης Ψαράς, Κωνσταντίνος Μέμος. "Η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών στην ενεργειακή αξιοποίηση της παλίρροιας των στενών του Ευρίπου".
3. Ευθυμίου, Καραγιαννάκης, 2005, "Ενέργεια από Κύματα" Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Ι του τμ. ΗΜΜΥ ΑΠΘ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ντοκόπουλου και τη συνεπικουρία των υπ. Δρ κκ. Νταγκούμα Αθ. , Μαρινόπουλο Αν.
4. Καραμπάς Θ., (2004), «Υπολογιστική Κυματομηχανική και Ακτομηχανική – Θεωρητική προσέγγιση, Εκπαιδευτικό και Επιχειρησιακό Λογισμικό». Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή περιβάλλοντος, Τμήμα Επιστημών Θάλασσας, Μυτιλήνη.
5. Κατσιφαράκης Κ. (2013), «Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων - Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις», Σημειώσεις μαθήματος: Αποτίμηση και Διαχείριση περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.
6. Sheng, W. (2019). Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 400-500
7. Al Mahfazur, A. R., Moniruzzaman, M., and Al Mamun, M., (2017). Estimation of Energy Potential of Point Absorber Buoy type Wave Energy Converter, 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh, pp. 1-5.
8. Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & Van Den Belt, M.,(1997), «The value of the world's ecosystem services and natural capital».
9. García-Tabarés, L., Lafoz, M., Blanco, M., Torres, J., Obradors, D., Nájera, J., ... & Sánchez, A. (2020). New type of linear switched reluctance generator for wave energy applications.
10. Guterres, A. (2020). Carbon neutrality by 2050: the world's most urgent mission. United States.
11. Guo, B., & Ringwood, J. V. (2021). Geometric optimisation of wave energy conversion devices: A survey. Applied Energy, 297, 11710
12. Jafari, R., Asef, P., Ardebili, M., & Derakhshani, M. M. (2022). Linear Permanent Magnet Vernier Generators for Wave Energy Applications: Analysis, Challenges, and Opportunities. Sustainability, 14(17), 10912
13. Rodrigues, C., Nunes, D., Clemente, D., Mathias, N., Correia, J. M., Rosa-Santos, P., ... & Ventura, J. (2020). Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: state of the art and future perspectives. Energy & Environmental Science
14. . OpenHydro, www.openhydro.com (accessed 24/02/2025)
15. T. Heath. Oscillating Water Column – LIMPET, Chapter 7 in ref. 2 above, Springer: Berlin
16. . Y. Torre-Enciso, I. Ortubia, L.I. Lopez de Aguileta, M.J. Mutriku. ´ Wave Power Plant: From the Thinking out to the Reality. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden (2009)
17. Μουζιούρας Ν. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Εξέλιξη – Προβλέψεις, ΠΑΠΕΙ, 2010