

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΚΟΥΓΙΟΥΜΤΖΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ (Α.Μ.: 7553)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΟΥΡΟΣ Α.

ΠΑΤΡΑ 2022

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Κυματική Ενέργεια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΚΟΥΓΙΟΥΜΤΖΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ





ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανδρέα Βούρο, για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που βρίσκονταν δίπλα μου αυτό το διάστημα.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Κυματική Ενέργεια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΚΟΥΓΙΟΥΜΤΖΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ



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

Η σπουδάστρια
(Ονοματεπώνυμο)

.....

.....
(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων ή κυματική ενέργεια και στις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τη μετατροπή αυτής της μορφής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην αναγκαιότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παρουσιάζεται το θεωρητικό μέρος της κυματικής ενέργειας, καθώς και η αναφορά στη σημασία της ενέργειας, τις δυνατότητες και την πηγή των κυμάτων. Αναλύεται η μηχανική των κυμάτων και τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό ενός κύματος. Αναφέρονται επίσης οι πόροι της ενέργειας των κυμάτων, το κυματικό κλίμα / δυναμικό και οι παράκτιες διαδικασίες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές των μετατροπών της κυματικής ενέργειας. Παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή, καθώς επίσης και ο σχεδιασμός, η ισχύς και οι απαιτούμενες συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά σχετικά με την κατηγοριοποίηση των μετατροπών της κυματικής ενέργειας σε υποσυστήματα και αναφέρονται τα οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Επίσης, παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών διαφόρων ειδών μετατροπών κυματικής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο βρίσκεται η αναφορά για την υδροδυναμική και τους μηχανισμούς πρόσδεσης. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας, οι υδροστατικές δυνάμεις, ο συντονισμός και η υδροδυναμική σχεδίαση ενός μετατροπέα της κυματικής ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνοοικονομική ανάπτυξη των μετατροπών της κυματικής ενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα στάδια της ανάπτυξης των μετατροπών έτσι ώστε το αποτέλεσμα να αποτελεί ένα προϊόν με οικονομική βιωσιμότητα. Αναλύονται οι στρατηγικές της τεχνοοικονομικής ανάπτυξης και τα αντίστοιχα οικονομικά αυτών των μετατροπών.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.



Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
Περιεχόμενα	v
Κατάλογος εικόνων	vii
Κατάλογος πινάκων	viii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	ix
1. Κυματική Ενέργεια	- 12 -
1.1 Η σημασία της ενέργειας των κυμάτων.	- 12 -
1.2 Οι δυνατότητες της ενέργειας των κυμάτων.....	- 12 -
1.3 Η πηγή των κυμάτων.....	- 13 -
1.4 Επισκόπηση των παγκόσμιων πόρων ενέργειας των κυμάτων.....	- 15 -
1.5 Η μηχανική των κυμάτων.....	- 17 -
1.6 Χαρακτηρισμός των κυμάτων του ωκεανού και του κυματικού κλίματος. ...	- 21 -
1.6.1 Χρονικά, φασματικά και χωρικά χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος.	- 21 -
1.6.2 Προκλήσεις στο χαρακτηρισμό του κυματικού κλίματος.	- 25 -
1.7 Παράκτιες διαδικασίες.....	- 26 -
2. Τεχνολογίες για την Κυματική Ενέργεια	- 31 -
2.1 Ιστορική αναδρομή στην ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου της ενέργειας των κυμάτων.	- 31 -
2.2 Η τεχνολογία των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων και το περιβάλλον τους.	- 31 -
2.2.1 Τα απαραίτητα οικονομικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων	- 33 -
2.2.2 Σχεδιασμός των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων.	- 33 -
2.2.3 Ισχύς των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων.	- 35 -
2.2.4 Το περιβάλλον για τους μετατροπείς της ενέργειας των κυμάτων.	- 36 -
2.3 Κατηγοριοποίηση ή ταξινόμηση των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων.	- 37 -
2.3.1 Βασικές ταξινομήσεις.	- 37 -
2.3.2 Παραδείγματα διαφόρων τύπων WEC.....	- 40 -
3. Υδροδυναμική και μηχανισμοί πρόσδεσης για τα συστήματα μετατροπής της κυματικής ενέργειας	- 54 -
3.1 Η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας ως κυματική παρεμβολή.....	- 54 -
3.2 Υδροστατική, πλευστότητα και σταθερότητα.....	- 55 -



3.3	Υδροδυναμικές δυνάμεις και κινήσεις του σώματος.....	56 -
3.4	Συντονισμός.....	59 -
3.5	Υδροδυναμική σχεδίαση ενός μετατροπέα της κυματικής ενέργειας.	60 -
4.	Τεχνοοικονομική Ανάπτυξη των Συστημάτων Μετατροπής της Κυματικής Ενέργειας.....	63 -
4.1	Γενικά.....	63 -
4.2	Τα στάδια της ανάπτυξης ενός WEC.	65 -
4.3	Αξιολόγηση της τεχνοοικονομικής ανάπτυξης των WEC.....	66 -
4.4	Στρατηγικές τεχνοοικονομικής ανάπτυξης.	72 -
4.5	Τα οικονομικά των WEC.....	75 -
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78 -
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79 -



Κατάλογος εικόνων

<i>Εικόνα 1.1: Τα είδη των κυμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στον ωκεανό[6]</i>	- 14 -
<i>Εικόνα 1.2: Η δημιουργία των κυμάτων του ωκεανού[7]</i>	- 15 -
<i>Εικόνα 1.3: Παγκόσμια κατανομή της ετήσιας μέσης κυματικής ισχύος[8]</i>	- 16 -
<i>Εικόνα 1.4: Ορισμός παραμέτρων των κυμάτων σε ημιτονοειδές κύμα</i>	- 18 -
<i>Εικόνα 1.5: Κίνηση σωματιδίων νερού[11]</i>	- 19 -
<i>Εικόνα 1.6: Κίνηση σωματιδίων νερού ως προς την ακτή [11]</i>	- 19 -
<i>Εικόνα 1.7: Κατεύθυνση των κυμάτων [12]</i>	- 23 -
<i>Εικόνα 1.8: Διάθλαση κύματος κοντά στην ακτή λόγω αλλαγής του βάθους του νερού [14]</i> ...- 27 -	
<i>Εικόνα 1.9: Κατηγοριοποίηση του σπασίματος των κυμάτων [15]</i>	- 29 -
<i>Εικόνα 2.1: διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον, μαζί με τα κύρια υποσυστήματα ενός (πλωτού) WEC[17]</i>	- 32 -
<i>Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση WEC σύμφωνα με την αρχή της δέσμευσης της ενέργειας [26]</i> ...-	38 -
<i>Εικόνα 2.3: Κύριες κατηγορίες WEC[27]</i>	- 39 -
<i>Εικόνα 2.4: Συσκευές ταλαντούμενης στήλης νερού. (α) Η επιχειρησιακή αρχή του εργοστασίου PicoOWC. (β) Εργοστάσιο Pico στις Αζόρες. (γ) OceanEnergyLtdsOEOWC[28]</i> - 41 -	
<i>Εικόνα 2.5: Εργοστάσιο κυματικής ενέργειας Mutriku, Ισπανία[29]</i>	- 42 -
<i>Εικόνα 2.6: Ταλαντευόμενη στήλη νερού LeanCon[30]</i>	- 42 -
<i>Εικόνα 2.7: WEC Pelamis για μετατροπή της κυματικής ενέργειας[31]</i>	- 43 -
<i>Εικόνα 2.8: WEC Crestwing για μετατροπή της κυματικής ενέργειας[32]</i>	- 44 -
<i>Εικόνα 2.9: Αρχή λειτουργίας και εξωτερική όψη του PowerBuoy</i>	- 45 -
<i>Εικόνα 2.10: Wavebob WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[34]</i>	- 45 -
<i>Εικόνα 2.11: Seabased WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[35]</i>	- 46 -
<i>Εικόνα 2.12: Fred Olsens Lifesaver WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[36]</i> - 46 -	
<i>Εικόνα 2.13: WAB Carnegies CETO στο σποδυθό[37]</i>	- 47 -
<i>Εικόνα 2.14: WAB Carnegies CETO πριν την τοποθέτηση[38]</i>	- 47 -
<i>Εικόνα 2.15: Oyster WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[39]</i>	- 48 -
<i>Εικόνα 2.16: Waveroller WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[40]</i>	- 49 -
<i>Εικόνα 2.17: Resolute Marine Energy WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [41]</i> - 49 -	
<i>Εικόνα 2.18: Langlee WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]</i>	- 50 -
<i>Εικόνα 2.19: Wavestar WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]</i>	- 51 -
<i>Εικόνα 2.20: Πλωτή μονάδα παραγωγής ενέργειας WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[43]</i>	- 51 -
<i>Εικόνα 2.21: Weptos WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[45]</i>	- 52 -
<i>Εικόνα 2.22: Πρωτότυπο Wave Dragon WEC που δείχνει ένα κωνικό κανάλι και ράμπα [46]</i> - 53 -	
<i>Εικόνα 2.23: Σχέδιο λειτουργίας του Wave Dragon WEC[47]</i>	- 53 -
<i>Εικόνα 2.24: Αναπαράσταση ενός SSG WEC 3 επιπέδων με στρόβιλο πολλαπλών σταδίων[48]</i> ...- 53 -	



Εικόνα 4.1: Απορρόφηση κυματικής ενέργειας ως παρεμβολή κυμάτων [49] - 55 -

Εικόνα 4.2: Ορισμός συστήματος κίνησης και συντεταγμένων ενός πλωτού σώματος [50] - 56

-

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.1: Τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) - 67 -

Πίνακας 3.2: Τα επίπεδα της τεχνολογικής απόδοσης (TPL) - 68 -



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και να διασφαλιστεί ένα βιώσιμο μέλλον σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι σαφές ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα διαδραματίσουν ένα βασικό ρόλο. Η κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων ήταν το 2016 περίπου ίση με το 78,3% του συνολικού μεριδίου της κατανάλωσης της ενέργειας, ενώ η αντίστοιχη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ήταν ίση με 19,2%. Η παραδοσιακή βιομάζα αντιπροσωπεύει το 8,9%, ενώ οι σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν ποσοστό 10,3%, όπου κυριαρχούν η ηλιακή και η αιολική. Το χάσμα μεταξύ της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων και της αγοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να καλυφθεί στο εγγύς μέλλον, αν ληφθεί υπόψη η πρόσφατη πρόοδος στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταξύ των αρχών της δεκαετίας (εξαιρουμένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας) έχει αυξηθεί δραματικά. Κορυφαία πηγή αποτελεί η αιολική βιομηχανία η οποία έχει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη σε GW, ακολουθούμενη από τον κλάδο των φωτοβολταϊκών. Η ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων, όπως η πολιτική υποστήριξη, τα οικονομικά κίνητρα και η μείωση του κόστους της τεχνολογίας που καθιστά ανταγωνιστικό το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο πεδίο της αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας, είναι σημαντική η απάντηση στο γιατί είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί αυτός ο πόρος. Οι λόγοι για αυτό είναι κοινοί και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, η αιολική, η ηλιακή, η βιομάζα και άλλες. Τα βασικά ζητήματα που μπορεί να βοηθήσει η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να ξεπεραστούν περιλαμβάνουν τα περιβαλλοντικά προβλήματα, την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, την ασφάλεια του εφοδιασμού και τη δημιουργία θέσεων εργασίας.

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα σχετίζονται τόσο με τις τοπικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση, όσο και την παραγωγή CO_2 , η οποία σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων, με συνέπεια τις πλέον καθιερωμένες αρνητικές επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή.

Η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων είχε ήδη επισημανθεί σε δημοσιεύσεις από τη δεκαετία του 1950 και είναι καλά αποδεδειγμένο ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένα. Έτσι, είναι επίσης προφανές ότι το σημερινό επίπεδο κατανάλωσης της ενέργειας, το οποίο βασίζεται κατά πολύ στα ορυκτά καύσιμα, δε μπορεί να συνεχιστεί εάν δεν αναπτυχθούν εναλλακτικές πηγές. Σε αυτό το σημείο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν την πιο προφανή απάντηση.

Ωστόσο, ακόμη και ενώ υπάρχουν επί του παρόντος λογικές ποσότητες ορυκτών καυσίμων, η άνιση κατανομή των πόρων σε όλο τον κόσμο προκαλεί συγκρούσεις. Μπορεί να αναμένεται ότι αυτή η τάση θα επιδεινωθεί καθώς οι πηγές των ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται όλο και περισσότερο. Έτσι, για τα περισσότερα έθνη έχει μεγάλο ενδιαφέρον να μειώσουν την εξάρτησή τους από την προμήθεια των



καυσίμων από άλλες χώρες για να διατηρήσουν την κυριαρχία και την πολιτική τους σταθερότητα. Ως απάντηση σε αυτό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολύ διαφορετικές και σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό διάσπαρτες και καλά κατανοημένες σε όλο τον κόσμο (όταν εξετάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο σύνολό τους). Τοπικά, υπάρχουν μεγάλες παραλλαγές στο είδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν. Αυτό σημαίνει επίσης ότι υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί ένα ευρύ χαρτοφυλάκιο τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε να υπάρχει επάρκεια για να ταιριάζουν στις τοπικές ανάγκες.

Στην τρέχουσα αγορά, η ενέργεια από τις λιγότερο ώριμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γενικά δεν είναι ανταγωνιστική από πλευράς κόστους, αλλά βασίζεται στην πολιτική υποστήριξη. Ωστόσο, μπορεί να αναμένεται ότι αυτή η κατάσταση θα αλλάξει στο εγγύς μέλλον λόγω τόσο της αναμενόμενης αύξησης του κόστους των ορυκτών καυσίμων όσο και της μείωσης του κόστους των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λόγω επιπρόσθετης Ε&Α και οικονομικών κλίμακας.

Σε σύγκριση με τις τεχνολογίες παραγωγής της ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, οι περισσότερες επενδύσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δαπανώνται σε υλικά και εργασία για την κατασκευή και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων και όχι σε καύσιμα, τα οποία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δωρεάν. Οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δαπανώνται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό εντός του έθνους και συχνά στην ίδια τοπική περιοχή (καθώς μεγάλο μέρος του κόστους αφορά τη λειτουργία και τη συντήρηση των εγκαταστάσεων) όπου καταναλώνεται η παραγόμενη ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι η επένδυση παραμένει στη γειτονιά όπου δημιουργεί θέσεις εργασίας και τροφοδοτεί τις τοπικές οικονομίες, αντί να πηγαίνει σε μακρινές περιοχές. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν επίσης ευκαιρίες για εξαγωγές για τα έθνη που έχουν επιτυχία στην ανάπτυξη εμπορικά βιώσιμων τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η τεχνολογία της θαλάσσιας ενέργειας βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, ειδικά η περίπτωση της κυματικής ενέργειας. Η κυματική ενέργεια χρειάζεται συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες για να δημιουργηθεί. Αυτή η ενέργεια μπορεί να διαιρεθεί σε δύο τμήματα. Το πρώτο αποτελεί τη συνιστώσα της δυναμικής ενέργειας, όπου το νερό ωθείται ενάντια στη βαρύτητα από την κοιλότητα και τις κορυφές του κύματος. Το δεύτερο αποτελεί τη συνιστώσα της κινητικής ενέργειας, δηλαδή την ταχύτητα ταλάντωσης του νερού. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η ενέργεια, είναι σημαντικό να σχεδιαστεί μια δομή που να μπορεί να μετατρέπει αποτελεσματικά την ενέργεια που μεταδίδεται από τα κύματα. Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι ότι η δομή θα πρέπει να είναι σε θέση να επιβιώσει στο θαλάσσιο περιβάλλον, ιδίως σε καταιγίδες και ακραία καιρικά φαινόμενα όπου η κυματική ενέργεια αυξάνεται σημαντικά. Ένας τρόπος για να μετατραπεί η ενέργεια των κυμάτων σε μηχανική ενέργεια είναι η χρήση μιας γεννήτριας που είναι στερεωμένη στο βυθό της θάλασσας ή στην ακτογραμμή με μέρη ή υποσυστήματα αυτού του συστήματος να βρίσκονται σε κίνηση. Τις τελευταίες δεκαετίες εισήχθησαν τα πλωτά συστήματα που μπορούν να αναπτυχθούν ακόμη και σε υπεράκτιες περιοχές. Τα συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύονται τόσο τη δυναμική όσο και την κινητική ενέργεια, μεμονωμένα ή ταυτόχρονα.



Το δυναμικό των πόρων του ωκεανού είναι σημαντικό εάν ληφθούν υπόψη οι δυνατοί συνδυασμοί μεταξύ των μεγάλων υδάτινων επιφανειών και της ποικιλότητας των θαλάσσιων φυσικών πόρων. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία επιλογών εξόρυξης της ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των κυμάτων, των παλιρροϊκών και ωκεάνιων ρευμάτων, της θερμικής ενέργειας των ωκεανών, των κλίσεων αλατότητας, της θαλάσσιας βιομάζας και της υποθαλάσσιας γεωθερμικής ενέργειας. Ένα επιτυχημένο παράδειγμα χρήσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι η υπεράκτια αιολική βιομηχανία.

Ο τομέας της κυματικής ενέργειας θα μπορούσε δυνητικά να ισοδυναμεί ή και να υπερβαίνει τον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, αν ληφθεί υπόψη ότι τα κύματα είναι μια συμπυκνωμένη μορφή αιολικής ενέργειας ικανή να διανύσει μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες. Γενικότερα, υπάρχουν δύο κατηγορίες κυμάτων. Η μία είναι τα κύματα που δημιουργούνται τοπικά και τα «φουσκώματα» ή τα κύματα που δημιουργούνται από μακρινούς ανέμους. Τα κύματα που δημιουργούνται από μακρινούς ανέμους είναι πιο σημαντικά για τη βιομηχανία των μετατροπών ενέργειας των κυμάτων (WEC), καθώς η ενεργειακή πυκνότητα είναι πιο συνεπής.



1. Κυματική Ενέργεια.

1.1 Η σημασία της ενέργειας των κυμάτων.

Η εξερεύνηση καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει καταστεί απαραίτητη, καθώς οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν σήμερα σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους. Τα ακραία καιρικάφαινόμενα και τα ζητήματα της υπερθέρμανσης του πλανήτη που παρατηρήθηκαν τα τελευταία χρόνια αποτελούν απόδειξη τρωτών σημείων που θα μπορούσαν να επιδεινωθούν στο εγγύς μέλλον. Ως εκ τούτου, πολλοί καθαροί και ανανεώσιμοι πόροι ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, η ηλιακή και η αιολική χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα για την αντιμετώπιση αυτών των δύσκολων περιστάσεων.

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη πηγή βιώσιμης ενέργειας για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων [1]. Αρχικά αυτή η ενέργεια έγινε αντιληπτή με τη μορφή των τσουνάμι και των κυκλώνων. Στη σημερινή εποχή, το τεράστιο ενεργειακό δυναμικό των θαλάσσιων κυμάτων χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Το δυναμικό της κυματικής ενέργειας υπολογίζεται σε περίπου 2.000 TWh/έτος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το μερίδιο αντιστοιχεί περίπου στο 10% της συνολικής παγκόσμιας ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια.

Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων έχει σημειώσει βραδύτερη πρόοδο εδώ και πολλά χρόνια λόγω της ευρύτερης τάσης προς άλλους πόρους και της ανεπαρκούς χρηματοδότησης της έρευνας. Ωστόσο, το ποσό της χρηματοδότησης της αντίστοιχης έρευνας έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Έχει δοθεί μια ισχυρή ώθηση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, έχουν δημιουργηθεί πολλά πρωτότυπα αποτελεσματικά. Μερικά από αυτά έχουν πετύχει επίσης ακόμη και σε προ-εμπορικό επίπεδο, όπως η στήλη ταλαντευόμενου νερού (OWC), το «Pelamis», το «WaveDragon», κ.λπ. όπως αναφέρονται αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο [3].

Η τεχνική OWC είναι μια από τις πιο κοινές τεχνικές στους ερευνητές της κυματικής ισχύος[4]. Γενικότερα, έχουν δημοσιευτεί πολλές μελέτες σχετικά με την τεχνική OWC. Το εξαιρετικό πλεονέκτημα του OWC είναι η απλότητα, καθώς το μόνο κινούμενο μέρος του συστήματος για τη μετατροπή της ενέργειας είναι ο ρότορας ενός στρόβιλου που κινεί απευθείας μια ηλεκτρική γεννήτρια.

1.2 Οι δυνατότητες της ενέργειας των κυμάτων.

Όταν εξετάζεται η κυματική ενέργεια ως πηγή παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικό και ενδιαφέρον να δει κανείς τις εκτιμήσεις για το πόσο μεγάλο είναι το δυναμικό χρήσης της. Τα κύματα του ωκεανού, συμπεριλαμβανομένων των διογκώσεων (κύματα που δημιουργούνται από μακρινά καιρικά συστήματα) προέρχονται από την ηλιακή ενέργεια, μέσω του ανέμου, ο οποίος όταν πνέει πάνω



από την επιφάνεια του ωκεανού δημιουργεί τα κύματα. Τα κύματα ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή απώλεια ενέργειας, εφόσον βρίσκονται σε συνθήκες βαθέων υδάτων. Όταν εξετάζεται η χρήση των κυμάτων του ωκεανού εννοούνται τα κύματα που δημιουργούνται από τον άνεμο. Έτσι, το πεδίο εφαρμογής περιορίζεται στην εξέταση των κυμάτων της επιφάνειας των ωκεανών με περιόδους στην περιοχή των 0,5–30 δευτερολέπτων.

Όταν εξετάζονται οι θαλάσσιες καταστάσεις (χαρακτηρίζονται από στατιστικές παραμέτρους των κυμάτων που καλύπτουν συγκεκριμένες περιόδους), αυτές είναι πιο σταθερές από το πεδίο του ανέμου που δημιουργεί τα κύματα. Η ροή της ενέργειας των κυμάτων (επίπεδο ισχύος) παρουσιάζει σημαντική διακύμανση στο χρόνο και στο χώρο. Μπορεί δηλαδή να υπάρχει μια διακύμανση από λίγα W/m έως MW/m σε ακραίες (θυελλώδεις) συνθήκες. Το επίπεδο ισχύος των κυμάτων παρουσιάζει επίσης σημαντική εποχιακή διακύμανση, καθώς και διακύμανση από έτος σε έτος. Οι πρώιμες εκτιμήσεις της παγκόσμιας διαθέσιμης κυματικής ισχύος υποδεικνύουν συνολικό δυναμικό 2,7 (–70) TW [5].

Ο παγκόσμιος ακαθάριστος θεωρητικός πόρος εκτιμάται σε περίπου 3,7 TW, εκ των οποίων το 3,5 TW είναι ο πόρος που υπολογίζεται, εξαιρουμένων των περιοχών με κλίμα ήρεμων κυμάτων (περιοχές με λιγότερα από 5 kW/m) και του καθαρού πόρου (όπου εξαιρούνται επίσης περιοχές με πιθανή κάλυψη πάγου). Στην Ευρώπη παρατηρείται μια μείωση του 25 % από τον ακαθάριστο στον καθαρό πόρο, ως επί το πλείστον λόγω της κάλυψης πάγου, με την ακαθάριστη και την καθαρή αξία να είναι 381 και 286 GW, αντίστοιχα. Γενικότερα, ο συνολικός πόρος της κυματικής ενέργειας έχει το δυναμικό να υπερκαλύψει την παγκόσμια κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε πολλές περιοχές του κόσμου έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες τοπικές μελέτες για τον πόρο της κυματικής ενέργειας. Η κυματική ενέργεια έχει σημαντικές δυνατότητες για την Ευρώπη, αλλά πιθανότατα θα παραμείνει μικρή σε σύγκριση με την αιολική βιομηχανία για αρκετά χρόνια ακόμα. Ωστόσο, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές της ενέργειας καλύπτουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, ο χρόνος και η πρόβλεψη της παραγωγής της ενέργειας καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικές. Από αυτή την άποψη ο συνδυασμός του ανέμου και των κυμάτων (σε συνδυασμό με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) είναι πολύ πιο ωφέλιμος σε σύγκριση με την αιολική μόνο.

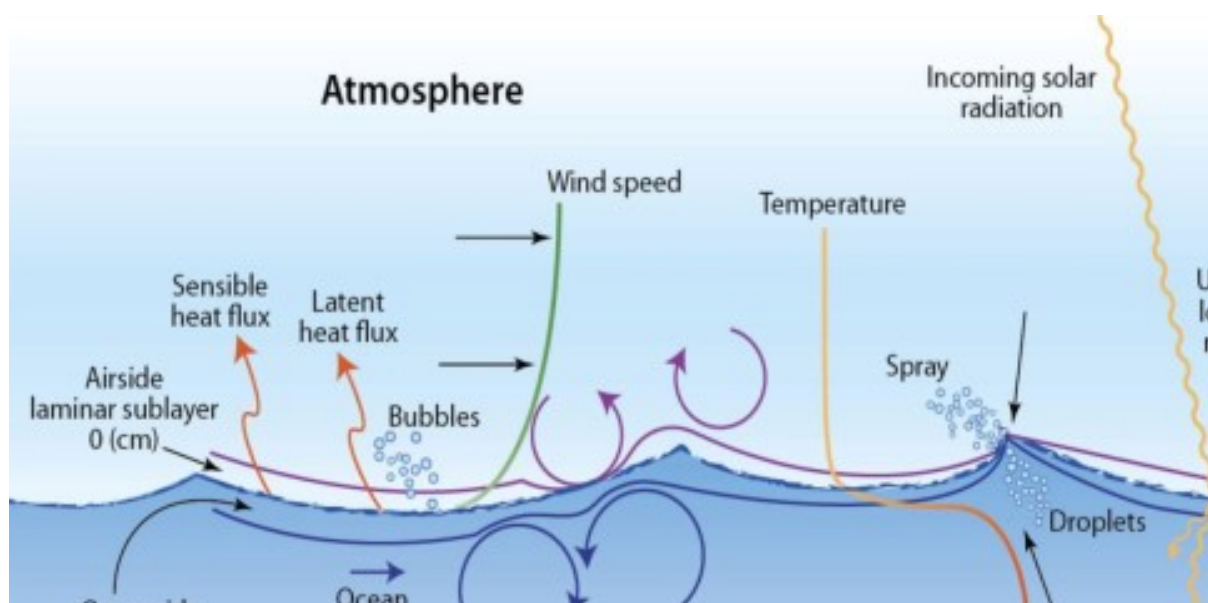
Γενικότερα, υπάρχει η δυνατότητα της αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας για την κάλυψη ενός σημαντικού μέρους των παγκόσμιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σημαντικό ερώτημα είναι ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτόν τον σκοπό.

1.3 Η πηγή των κυμάτων.

Τα κύματα στην επιφάνεια του ωκεανού μπορούν να δημιουργηθούν από ένα συνδυασμό πολλών διαφορετικών παραγόντων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1: *Τα είδη των κυμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στον ωκεανό*[6]. Έτσι, σε γενικές γραμμές,

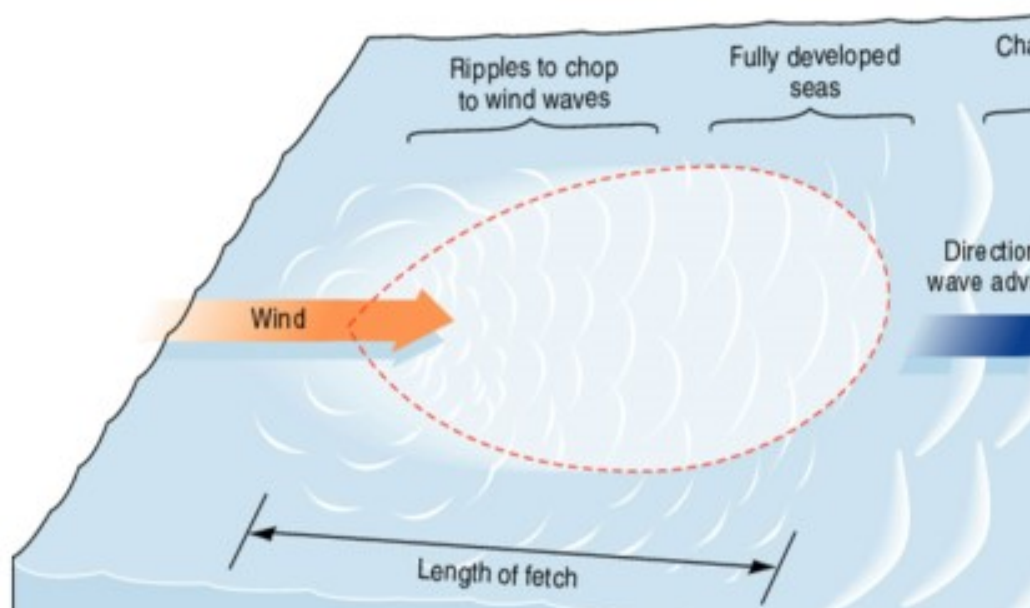


οι παλίρροιες θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως πολύ μεγάλης διάρκειας κύματα και διαταραχές όπως οι σεισμοί που προκαλούν τα τσουνάμι θα μπορούσαν εύλογα να ονομαστούν κύματα. Ωστόσο, τα κύματα που εκμεταλλεύονται οι μετατροπές της κυματικής ενέργειας παράγονται γενικά από τον άνεμο που πνέει στην επιφάνεια του ωκεανού.



Εικόνα 1.1: Τα είδη των κυμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στον ωκεανό[6]

Εάν η διαδικασία των κυμάτων που παράγονται από τον άνεμο εξεταστεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, τα κύματα ξεκινούν πάντα ως μικροί κυματισμοί, αλλά αυξάνονται σε μέγεθος λόγω της παρατεταμένης εισροής της ενέργειας από τον άνεμο. Με την προϋπόθεση ότι ο άνεμος συνεχίζει να φυσάει, τότε τα κύματα φτάνουν σε ένα όριο, πέραν του οποίου δεν αναπτύσσονται λόγω απωλειών της ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση τα κύματα θεωρούνται πλήρως ανεπτυγμένα. Το αν μια θάλασσα είναι πλήρως αναπτυγμένη ή όχι θα εξαρτηθεί τόσο από την ταχύτητα του ανέμου όσο και από την απόσταση πάνω από την οποία φυσούσε ο άνεμος. Ωστόσο, όταν ο άνεμος σταματήσει να φυσάει, τα κύματα θα συνεχίσουν να υπάρχουν και μπορούν να ταξιδέψουν για πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς ουσιαστικά καμία απώλεια της ενέργειας. Σε αυτή την κατάσταση, ονομάζονται τυπικά κύματα διάγκωσης επειδή ο άνεμος που είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία τους δεν είναι πλέον παρών. Η Εικόνα 1.2: Η δημιουργία των κυμάτων του ωκεανού[7] δείχνει μια απλοποιημένη αναπαράσταση αυτών των διαδικασιών.



Εικόνα 1.2: Η δημιουργία των κυμάτων του ωκεανού[7]

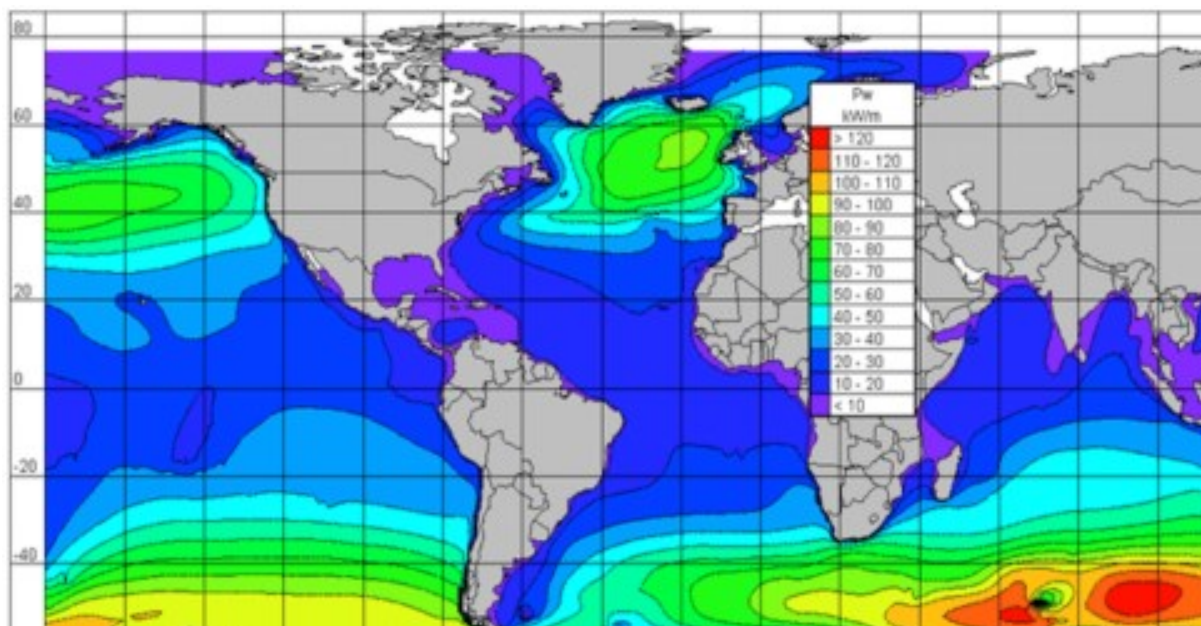
Χρησιμοποιώντας αυτήν την αναπαράσταση της δημιουργίας των κυμάτων είναι συνηθισμένο να διαχωρίζονται τα κύματα σε κύματα ανέμου που δημιουργούνται από τοπικούς ανέμους και διόγκωμένα κύματα, που δημιουργούνται από ανέμους που δε φυσούν πλέον. Ενώ ο διαχωρισμός των κυμάτων σε κύματα ανέμου και διόγκωσης μπορεί να είναι χρήσιμος για συζήτηση, θα πρέπει να αναγνωριστεί ότι είναι ουσιαστικά δύο άκρα μιας συνέχειας των κυμάτων. Στην πραγματικότητα, όλα τα κύματα δημιουργούνται και από την επίδραση κάποιου προηγούμενου ανέμου και επηρεάζονται από τον τοπικό άνεμο. Έτσι, αν και ο διαχωρισμός των κυμάτων σε κύματα ανέμου και διόγκωσης μπορεί να είναι χρήσιμος για την περιγραφή των συνθηκών μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας στον ωκεανό, δεν υπάρχει θεμελιώδης διαφορά στην υδροδυναμική των κυμάτων ανέμου και διόγκωσης.

1.4 Επισκόπηση των παγκόσμιων πόρων ενέργειας των κυμάτων.

Η Εικόνα 1.3: Παγκόσμια κατανομή της ετήσιας μέσης κυματικής ισχύος[8] δείχνει τη συνολική διακύμανση της ετήσιας μέσης πυκνότητας ισχύος των κυμάτων. Οι κύριες περιοχές των πόρων της κυματικής ενέργειας εμφανίζονται σε ζώνες στο βόρειο και στο νότιο ημισφαίριο, με λιγότερο ενεργητικές περιοχές κοντά στον ισημερινό και τους πόλους. Ωστόσο, η ετήσια μέση πυκνότητα ισχύος των κυμάτων δεν περιλαμβάνει σημαντικές ποσότητες πληροφοριών που είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της χρησιμότητας ενός συγκεκριμένου πόρου κυματικής ενέργειας για έναν συγκεκριμένο μετατροπέα της κυματικής ενέργειας. Είναι δυνατό να παραχθεί μια σειρά από άλλα στοιχεία που δείχνουν πώς ποικίλλουν άλλοι σημαντικοί παράγοντες σε ολόκληρο τον κόσμο, και μερικοί από αυτούς τους παράγοντες έχουν αναφερθεί από αρκετούς ερευνητές στο παρελθόν [9]. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την ανάλυση του κλίματος των κυμάτων σε ένα



πεπερασμένο σύνολο παραγόντων, καθώς αυτή η μη επάρκεια σχετικών δεδομένων οδηγεί σε απώλεια πληροφοριών, η οποία θα μπορούσε να στρεβλώσει την αναπαράσταση του πόρου και επομένως τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτόν.



Εικόνα 1.3: Παγκόσμια κατανομή της ετήσιας μέσης κυματικής ισχύος[8]

Ως εναλλακτική λύση στη χρήση παραγόντων που καθορίζουν τον παγκόσμιο πόρο των κυμάτων, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η κατανόηση της τοπικής μετεωρολογίας και γεωγραφίας για την εκτίμηση των αναμενόμενων χαρακτηριστικών του πόρου των κυμάτων. Αν και τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης μπορεί να είναι περισσότερο ποιοτικά παρά ποσοτικά, παρέχουν επίσης μια πιο άμεση κατανόηση των συνθηκών και ελαχιστοποιείται η δυνατότητα λήψης μιας παραμορφωμένης άποψης του πόρου του κύματος. Χρησιμοποιώντας την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αναπτύσσονται τα κύματα είναι δυνατό να δηλωθεί ότι τα πιο ενεργητικά κυματικά κλίματα αναμένεται να συμβούν όπου υπάρχει μεγάλος όγκος νερού, με καιρικά συστήματα που ακολουθούν την ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι άνεμοι που σχετίζονται με το μετεωρολογικό σύστημα θα αναγκάσουν τα κύματα να συνεχίσουν να αναπτύσσονται σε ολόκληρο το υδάτινο σώμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερων κυμάτων. Έτσι, τα κύματα που φτάνουν στη δυτική ακτή της Ευρώπης είναι συνήθως μεγαλύτερα από αυτά που φτάνουν στην ανατολική ακτή των ΗΠΑ, επειδή όχι μόνο οι άνεμοι φυσούν κανονικά από δυτικά προς τα ανατολικά, αλλά επειδή η τυπική διαδρομή των καιρικών συστημάτων στον Βόρειο Ατλαντικό είναι από τα δυτικά προς τα ανατολικά.

Η γνώση των τυπικών κατευθύνσεων του ανέμου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί μια αρχική ένδειξη του τύπου των κυμάτων που μπορεί να αναμένονται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Για παράδειγμα, τα κύματα στη Μεσόγειο Θάλασσα είναι τυπικά μικρά, επειδή τα μήκη έλξης είναι επίσης σχετικά



μικρά. Αντίθετα, τα κύματα στο Νότιο Ειρηνικό ωκεανό είναι συνήθως μεγάλα λόγω των μεγάλων μηκών και των σχετικά ισχυρών ανέμων σε αυτή την περιοχή, ειδικά στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Τέλος, τα κύματα στις ισημερινές περιοχές είναι συνήθως σχετικά μικρά επειδή οι ταχύτητες του ανέμου σε αυτές τις περιοχές είναι επίσης τυπικά μικρές.

Οι εποχικές καιρικές διακυμάνσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της συνέπειας του πόρου των κυμάτων. Ένας σημαντικός παράγοντας εδώ είναι ότι ο άνεμος στο νότιο ημισφαίριο είναι σημαντικά πιο συνεπής από τους ανέμους στο βόρειο ημισφαίριο, έτσι ώστε ο πόρος των κυμάτων να είναι πολύ λιγότερο μεταβλητός. Έτσι, είναι δυνατό να παραχθούν λογικές ποιοτικές εκτιμήσεις του πόρου των κυμάτων με κάποια γνώση της τοπικής γεωγραφίας και των μετεωρολογικών συνθηκών.

1.5 Η μηχανική των κυμάτων.

Ένα βασικό κύμα θεωρείται τυπικά ως μια ημιτονοειδής μεταβολή στο υψόμετρο της επιφάνειας του νερού και μπορεί να οριστεί ότι έχει ύψος H , που είναι η κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή του κύματος μέχρι το κατώτατο σημείο του κύματος, ένα μήκος κύματος λ ή L , που είναι η απόσταση μεταξύ δύο παρόμοιων σημείων του κύματος και της κυματικής περιόδου T , που είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επαναληφθεί το κύμα (Εικόνα 1.4: Ορισμός παραμέτρων των κυμάτων σε ημιτονοειδές κύμα).

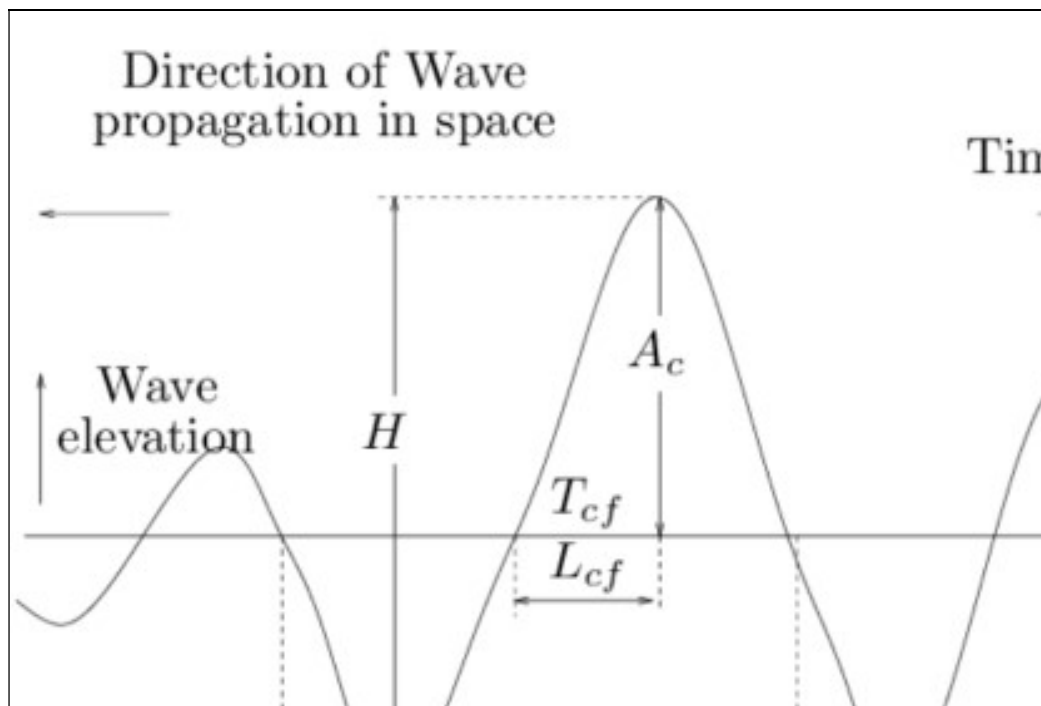
Επιπλέον, είναι χρήσιμο να οριστεί μια σειρά από άλλες παραμέτρους κυμάτων:

$$\text{Κλίση κύματος, } s = H/\lambda \quad (1.1)$$

$$\text{Αριθμός κυμάτων, } k = 2\pi/\lambda \quad (1.2)$$

$$\text{Συχνότητα κύματος, } \omega = 2\pi/T \quad (1.3)$$

Από αυτές τις πρόσθετες παραμέτρους, η κλίση του κύματος χρησιμοποιείται συχνά για τη διάκριση μεταξύ των γραμμικών και μη γραμμικών κυμάτων. Τυπικά, εάν η απότομη κλίση είναι μικρότερη από 0,01, τότε οι σχέσεις των γραμμικών κυμάτων είναι έγκυρες, αλλά καθώς αυξάνεται η κλίση, η γραμμική θεωρία γίνεται λιγότερο ακριβής και τα μοντέλα των κυμάτων υψηλότερης τάξης όπως τα κύματα Stokes 5ης τάξης είναι καταλληλότερα [10]. Ωστόσο, στην πραγματικότητα είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα κυμάτων υψηλότερης τάξης για την ανάλυση οτιδήποτε άλλου εκτός από τα κανονικά κύματα και έτσι η θεωρία των γραμμικών κυμάτων χρησιμοποιείται συχνά για κύματα πολύ πιο απότομα από το 0,01.



Εικόνα 1.4: Ορισμός παραμέτρων των κυμάτων σε ημιτονοειδές κύμα.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των κυμάτων του ωκεανού είναι ότι είναι γενικά διασκορπισμένα, πράγμα που σημαίνει ότι η ενέργεια στο κύμα δεν ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα με το προφίλ του κύματος. Το αποτέλεσμα της διασποράς μπορεί να φανεί όταν για παράδειγμα μια πέτρα πέσει στο νερό. Σε αυτή την περίπτωση τα κύματα φαίνεται να μένουν πίσω από το κύριο κύμα και ταξιδεύουν με πιο αργή ταχύτητα από τις κορυφές των κυμάτων λόγω της ενέργειας των κυμάτων. Η ταχύτητα μιας κορυφής του κύματος ονομάζεται τυπικά η ταχύτητα του κύματος c και η ταχύτητα διάδοσης της ενέργειας ονομάζεται τυπικά ομαδική ταχύτητα c_g . Στα βαθιά νερά η ομαδική ταχύτητα είναι ίση με το μισό της ταχύτητας του κύματος, αλλά γενικά η ομαδική ταχύτητα δίνεται ως εξής:

$$c_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d}{\lambda} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)} \right] c \quad (1.4)$$

Επιπλέον, όχι μόνο η ταχύτητα της ομάδας ποικίλλει ανάλογα με το βάθος του νερού, αλλά και η ταχύτητα του κύματος ποικίλλει ανάλογα με το βάθος του νερού και δίνεται ως εξής:

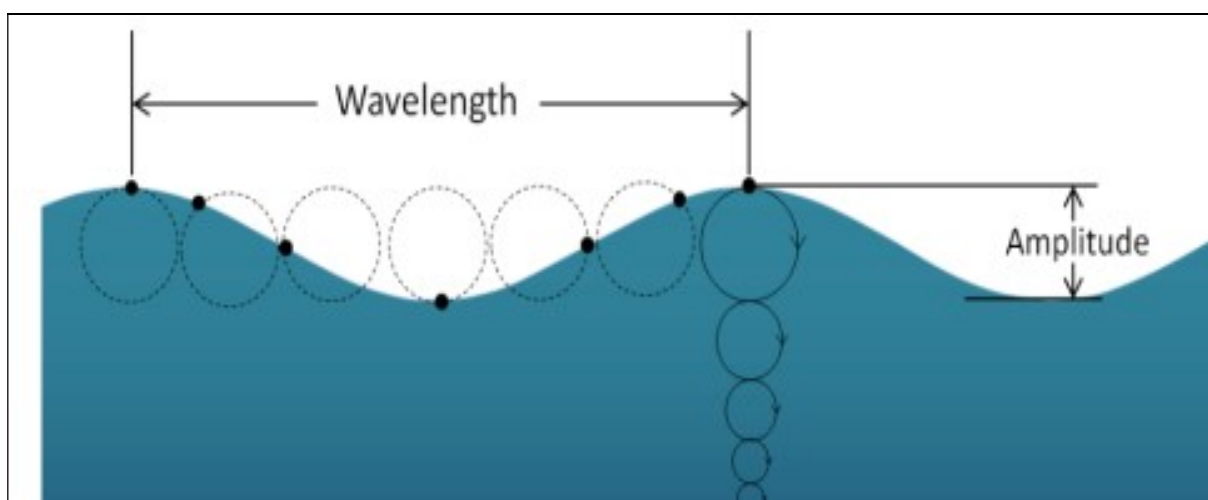
$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (1.5)$$

Αυτό ονομάζεται εξίσωση διασποράς και ορίζει το μήκος του κύματος με βάση την περίοδο του κύματος και το βάθος του νερού. Στην περίπτωση της διαδρομής σωματιδίων νερού και κινήσεις των κυμάτων, το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού f δίνεται ως εξής:

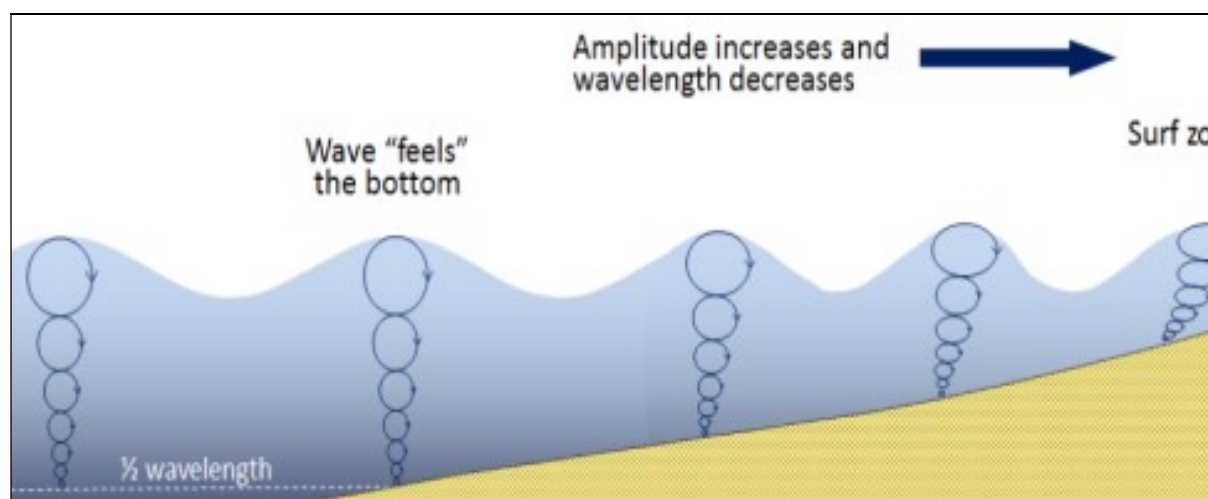


$$\zeta = \frac{H}{2} \cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right] \quad (1.6)$$

Ωστόσο, αυτή η διακύμανση στην ανύψωση της επιφάνειας του νερού είναι στην πραγματικότητα το αποτέλεσμα μιας ελλειπτικής κίνησης των σωματιδίων του νερού, η οποία επίσης εκτείνεται πολύ κάτω από την επιφάνεια του νερού, με το πλάτος της κίνησης να μειώνεται εκθετικά με το βάθος (Εικόνα 1.5: Κίνηση σωματιδίων νερού[11]).



Εικόνα 1.5: Κίνηση σωματιδίων νερού[11]



Εικόνα 1.6: Κίνηση σωματιδίων νερού ως προς την ακτή [11]



Έτσι, η κατακόρυφη μετατόπιση των σωματιδίων του νερού δίνεται ως εξής:

$$\zeta(z) = \frac{H}{2} \cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right] \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+d)}{\lambda}\right]}{\sinh\left[\frac{2\pi d}{\lambda}\right]} \quad (1.7)$$

και η οριζόντια μετατόπιση δίνεται ως:

$$\xi(z) = -\frac{H}{2} \sin\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right] \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+d)}{\lambda}\right]}{\sinh\left[\frac{2\pi d}{\lambda}\right]} \quad (1.8)$$

Έτσι, στα βαθιά νερά οι κινήσεις των σωματιδίων του νερού είναι κυκλικές, αλλά γίνονται πιο ελλειπτικές καθώς το βάθος του νερού μειώνεται. Συγκεκριμένα, μπορεί να φανεί ότι η διακύμανση στην κίνηση των σωματιδίων του νερού εξαρτάται από το βάθος του νερού σε σχέση με το μήκος κύματος. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά για να ορίσει τρεις περιοχές βάθους νερού:

1. Βαθιά νερά όπου ο βυθός δεν επηρεάζει τα κύματα και συνήθως απαιτεί το βάθος του νερού να είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος.
2. Ρηχά νερά όπου δεν υπάρχει διακύμανση στην οριζόντια κίνηση των σωματιδίων του νερού με το βάθος του νερού και συνήθως απαιτεί το βάθος του νερού να είναι μικρότερο από το 1/20 του μήκους κύματος.
3. Ενδιάμεσο βάθος που υπάρχει μεταξύ αυτών των δύο άκρων.

Σε βάθος μισού μήκους κύματος, οι κινήσεις που προκαλούνται από το κύμα είναι μόνο περίπου το 4% αυτών στην επιφάνεια και επομένως θα μπορούσαν να θεωρηθούν ασήμαντες. Ωστόσο, θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι αυτά τα όρια είναι κάπως αυθαίρετα και επειδή εξαρτώνται από το μήκος κύματος, αυτό σημαίνει ότι ο ορισμός του βάθους του νερού δεν είναι σταθερός. Δηλαδή, μια τοποθεσία μπορεί να οριστεί ότι βρίσκεται σε βαθιά νερά για ένα σύντομο κύμα, ενώ η ίδια τοποθεσία για ένα διαφορετικό κύμα μπορεί να είναι σε ενδιάμεσο νερό. Επομένως, πρέπει πάντα να λαμβάνεται μέριμνα για τον προσδιορισμό του μήκους κύματος αναφοράς που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του σχετικού βάθους. Για την κυματική ενέργεια είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναγνωριστεί αυτή η συνθήκη, επειδή πολλοί μετατροπείς της κυματικής ενέργειας που ορίζονται ως συσκευές «βάθους», όπως το «Pelamis», συνήθως αναπτύσσονται σε αυτά που πολλοί ωκεανογράφοι θα όριζαν ως ενδιάμεσα βάθη νερού.



1.6 Χαρακτηρισμός των κυμάτων του ωκεανού και του κυματικού κλίματος.

Παραδοσιακά, οι θαλάσσιες καταστάσεις χαρακτηρίζονται χρησιμοποιώντας ένα αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος, το οποίο πριν να υπάρξει οποιαδήποτε μέθοδος καταγραφής των κυμάτων βασιζόταν αποκλειστικά στην παρατήρηση. Δηλαδή, το αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος ορίστηκε ως το ύψος κύματος όπως αναφέρεται από έναν «έμπειρο παρατηρητή», τον οποίο πρέπει να υποθέσουμε ότι είχε περάσει πολλά χρόνια ακούγοντας τις εκτιμήσεις άλλων έμπειρων παρατηρητών, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει μια σχετικά συνεπής εκτίμηση του ύψους του κύματος. Αυτό ονομαζόταν «σημαντικό ύψος κύματος», που συμβολίζεται από το H_s . Ωστόσο, είναι σαφές ότι η ακρίβεια αυτής της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του παρατηρητή και ως εκ τούτου υπόκειται σε κάποιο σημαντικό σφάλμα. Όταν κατέστη δυνατή η καταγραφή της διακύμανσης στην ανύψωση της επιφάνειας του νερού, αναπτύχθηκε μια εναλλακτική μέθοδος καθορισμού του ύψους κύματος. Με μια καταγραφή της διακύμανσης στην ανύψωση της επιφάνειας του νερού, είναι δυνατό να μετρηθεί το ύψος μεμονωμένων κυμάτων και έτσι να παραχθεί μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση του ύψους του κύματος. Προκειμένου να είναι συνεπείς με τις ιστορικές αναφορές, αποφασίστηκε ότι οι νέες καταγραφές του υψομέτρου θα πρέπει να αναλυθούν έτσι ώστε να παραχθεί μια εκτίμηση ισοδύναμη με το H_s . Μια καλή εκτίμηση του H_s δόθηκε χρησιμοποιώντας το μέσο ύψος του τρίτου υψηλότερου κύματος.

Στη σύγχρονη εποχή, η διακύμανση στην ανύψωση της επιφάνειας του κύματος καταγράφεται τυπικά ψηφιακά, γεγονός που παρέχει τη δυνατότητα για μια σημαντική ανάλυση του αρχείου των κυμάτων. Η πιο σημαντική εξέλιξη στην αναπαράσταση της θάλασσας είναι ο ορισμός της θάλασσας χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο φάσμα. Για να κατανοηθεί η έννοια του φάσματος των κυμάτων, είναι πρώτα απαραίτητο να θεωρηθεί ότι η διακύμανση στην επιφάνεια του νερού μπορεί να αναπαρασταθεί ως η γραμμική θέση ημιτονοειδών κυμάτων διαφορετικών συχνοτήτων, κατευθύνσεων και φάσεων. Αν και αυτή η αναπαράσταση θα μπορούσε να θεωρηθεί απλώς μια αλλαγή στο σύστημα των συντεταγμένων (από τον τομέα του χρόνου στον τομέα της συχνότητας), στην πραγματικότητα φαίνεται να είναι μια αρκετά καλή αναπαράσταση της υποκείμενης φυσικής. Το φάσμα των κυμάτων χρησιμοποιείται γενικά για να ορίσει πλήρως οποιαδήποτε θαλάσσια κατάσταση, με την υπόθεση ότι υπάρχει μια τυχαία φάση μεταξύ όλων των επιμέρους κυματικών συνιστωσών, η οποία είναι φυσική συνέπεια της υπόθεσης της γραμμικής θέσης.

1.6.1 Χρονικά, φασματικά και χωρικά χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος.

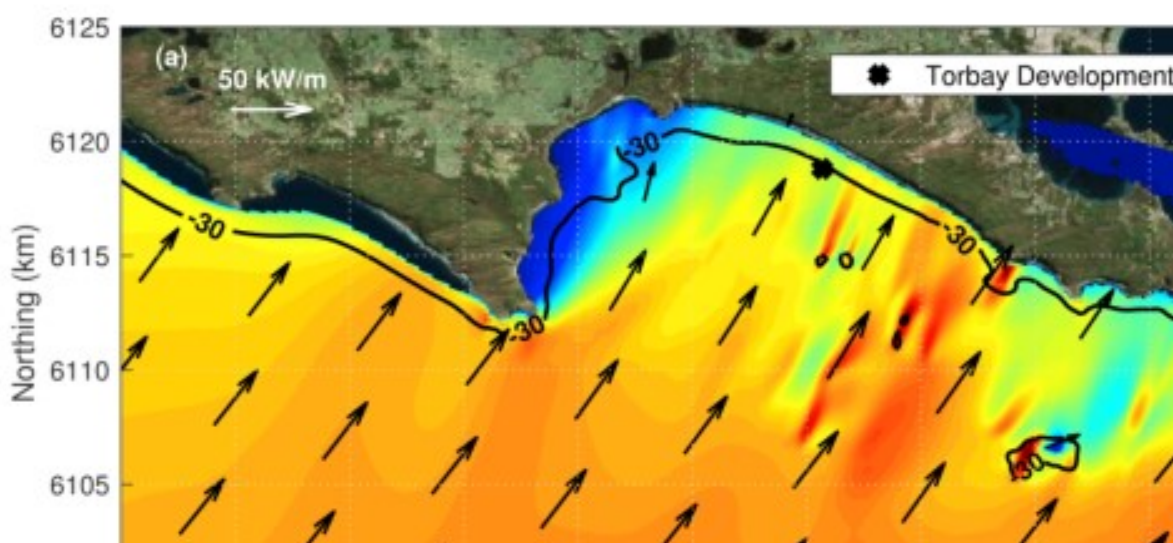
Για να κατανοηθεί πώς τα κύματα του ωκεανού μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση ενός μετατροπέα ενέργειας των κυμάτων, είναι χρήσιμο να εξεταστούν τα χρονικά, φασματικά χαρακτηριστικά και αυτά της κατεύθυνσης των κυμάτων του ωκεανού και πώς αυτά μπορούν να επηρεάσουν τη σχέση μεταξύ της μέσης ισχύος των κυμάτων και του μέσου όρου της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.



Πρώτον, το χρονικό χαρακτηριστικό ενός κυματικού κλίματος είναι το πώς οι θαλάσσιες καταστάσεις που συνθέτουν ένα κυματικό κλίμα ποικίλλουν χρονικά. Γενικά, όσο πιο συνεπές είναι το κυματικό κλίμα, τόσο πιο ελκυστικό γίνεται (για μια συγκεκριμένη μέση ισχύ κυμάτων) επειδή το WEC και η μονάδα παραγωγής της ενέργειας μπορούν να παραμείνουν πλησιέστερα στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τους και έτσι να μεγιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, οι θαλάσσιες καταστάσεις θα ποικίλλουν λόγω των αλλαγών στις μετρολογικές συνθήκες που δημιουργούν τους ανέμους και τα συναφή κύματα. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η σταθερότητα των μετρολογικών συνθηκών ποικίλλει ανά τον κόσμο, έτσι ώστε το κλίμα των κυμάτων να είναι πιο συνεπές σε ορισμένες τοποθεσίες σε σχέση με άλλες. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να σχετίζεται κυρίως με τις ημερήσιες, εποχιακές ή/και ετήσιες διακυμάνσεις στις θαλάσσιες καταστάσεις, καθεμία από τις οποίες θα έχει ελαφρώς διαφορετικό αντίκτυπο στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμότητά της. Έτσι, είναι σαφές ότι για όλες τις τοποθεσίες τα χρονικά χαρακτηριστικά είναι ένα σημαντικό στοιχείο του κυματικού κλίματος, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές φάσεις ισχύος για την ίδια μέση ισχύ του προσπίπτοντος κύματος.

Δεύτερον, τα χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης ενός κυματικού κλίματος συνδέονται όχι μόνο με την εξάπλωση των επιμέρους θαλάσσιων καταστάσεων ως προς την κατεύθυνση, αλλά και με την διακύμανση της κατεύθυνσης όλων των θαλάσσιων καταστάσεων. Η μόνη περίπτωση όπου αυτό μπορεί να μην είναι κρίσιμο είναι σε ένα απομονωμένο WEC που στηρίζεται στην κατεύθυνση. Γενικά, μια αύξηση στην διακύμανση της κατεύθυνσης των κυμάτων θα οδηγήσει σε μείωση της μέσης παραγωγής της ενέργειας, επειδή τα WEC και/ή το τμήμα των κυμάτων θα είναι συνήθως λιγότερο βέλιστα ευθυγραμμισμένα. Όπως θα ήταν αναμενόμενο, τα χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης ενός κυματικού κλίματος εξαρτώνται από τη θέση του, η οποία καθορίζει το εύρος των καιρικών συστημάτων που παράγουν ανέμους και στη συνέχεια τα κύματα που συμβάλλουν στο τοπικό κυματικό κλίμα. Έτσι, τα χαρακτηριστικά της κατεύθυνσης είναι ένα σημαντικό στοιχείο του κυματικού κλίματος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση μιας πιθανής τοποθεσίας.

Τέλος, τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός κυματικού κλίματος συσχετίζονται με το φάσμα των κυμάτων μεμονωμένων θαλάσσιων καταστάσεων, μαζί με τη φασματική διακύμανση για όλες τις θαλάσσιες καταστάσεις όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.7: Κατεύθυνση των κυμάτων [12].



Εικόνα 1.7: Κατεύθυνση των κυμάτων [12]

Τα φασματικά χαρακτηριστικά του κλίματος των κυμάτων μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικά επειδή η αποτελεσματικότητα πολλών WEC εξαρτάται από τη συχνότητα. Έτσι, η κυματική ισχύς που σχετίζεται με συγκεκριμένες συχνότητες κυμάτων μπορεί να είναι πιο σημαντική από την ισχύ των κυμάτων σε άλλες συχνότητες. Για παράδειγμα, η δέσμευση της ισχύος ανά μονάδα ύψους του κύματος πολλών συσκευών τείνει να αυξάνεται με τη συχνότητα του κύματος, επειδή η δύναμη/ροπή του προσπίπτοντος κύματος τείνει επίσης να αυξάνεται με τη συχνότητα του κύματος, ενώ η ισχύς του προσπίπτοντος κύματος μειώνεται με τη συχνότητα του κύματος [13]. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς του προσπίπτοντος κύματος δεν είναι σαφώς καλή ένδειξη για την παραγωγή ενέργειας. Κατά την αξιολόγηση μιας πιθανής τοποθεσίας, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα φασματικά χαρακτηριστικά μιας πιθανής τοποθεσίας, ειδικά σε σχέση με τη φασματική απόκριση των WEC που εξετάζονται για ανάπτυξη στην εν λόγω τοποθεσία.

Όταν έχει εντοπιστεί μια συγκεκριμένη τοποθεσία ενδιαφέροντος, τότε χρησιμοποιείται συχνά ένα διάγραμμα διασποράς για το χαρακτηρισμό της. Αυτό το διάγραμμα διασποράς στην ουσία αποτελείται από έναν πίνακα συχνότητας εμφάνισης που ευρετηριάζεται από μια αντιπροσωπευτική περίοδο κύματος, συνήθως μια περίοδο αιχμής, περίοδο μηδενικής διέλευσης ή περίοδο ενέργειας και ένα αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος (σχεδόν πάντα το «σημαντικό ύψος κύματος»). Το διάγραμμα διασποράς παρέχει σαφώς πολύ περισσότερες πληροφορίες για το κλίμα των κυμάτων από τη μέση ισχύ των κυμάτων προς διάφορες κατευθύνσεις. Ωστόσο και αυτή η μέθοδος δεν είναι χωρίς προβλήματα. Πρώτον, ανάλογα με την ανάλυση του πίνακα, οι θαλάσσιες καταστάσεις μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε οποιοδήποτε κελί στον πίνακα διασποράς, ειδικά για τα κελιά που ευρετηριάζονται από ένα μικρό σημαντικό ύψος κύματος. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη οποιαδήποτε πιθανή παραμόρφωση κατά τη χρήση των διαγραμμάτων διασποράς. Δεύτερον, τυπικά δεν υπάρχουν λεπτομέρειες σχετικά με τη κατανομή του χρόνου και της κατεύθυνσης, ή το φασματικό σχήμα των θαλάσσιων καταστάσεων που περιέχονται σε ένα ενιαίο κελί, τα οποία και τα δύο μπορούν να έχουν ένα σημαντικό



αντίκτυπο στην παραγωγή της ενέργειας ενός WEC όπως συζητήθηκε παραπάνω. Αυτό το δεύτερο ζήτημα μερικές φορές μειώνεται με την παραγωγή πολλαπλών διαγραμμάτων διασποράς για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, τα οποία χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του κλίματος των κυμάτων ανά κατεύθυνση, αλλά υπάρχει σαφώς ένα πρακτικό όριο στον αριθμό και το εύρος των διαγραμμάτων διασποράς που μπορούν να παραχθούν και ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά.

Μια άλλη αναπαράσταση του κλίματος του κύματος που χρησιμοποιείται συχνά είναι η αύξηση των κυμάτων. Η αύξηση ενός κύματος είναι μια γραφική αναπαράσταση της μέσης ισχύος του κύματος ή του σημαντικού ύψους του κύματος από διαφορετικούς τομείς της κατεύθυνσης. Παρόμοια με ένα σύνολο τέτοιων γραφικών παραστάσεων μπορούν να παραχθούν άλλα με βάση την εποχή, προκειμένου να παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες που μπορεί να είναι χρήσιμες για την κατανόηση του κυματικού κλίματος, ειδικά όπου διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες είναι υπεύθυνες για διαφορετικές συνθήκες των κυμάτων σε διαφορετικές εποχές του χρόνου.

Συνοπτικά, μπορεί να φανεί ότι ο χαρακτηρισμός του κυματικού κλίματος χρησιμοποιώντας μεμονωμένες παραμέτρους όπως η μέση κυματική ισχύς ως προς την κατεύθυνση, τα διαγράμματα σκέδασης και τα κυματικά γραφήματα παρουσιάζουν μόνο μια μερική εικόνα του κυματικού κλίματος. Επιπλέον, πρέπει να δοθεί προσοχή στη μετάφραση αυτής της μερικής εικόνας για την μετέπειτα εκτίμηση της παραγωγής της ενέργειας ενός WEC. Πράγματι, όποτε είναι δυνατόν, συνιστάται η χρήση της πλήρους χρονοσειράς των φασμάτων της κατεύθυνσης των κυμάτων για την εκτίμηση της μέσης παραγωγής της ενέργειας ενός WEC. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, είτε επειδή το πλήρες σύνολο των δεδομένων δεν είναι διαθέσιμο, είτε επειδή απαιτείται πάρα πολλή προσπάθεια, τότε είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται ότι όχι μόνο υπάρχει αυξημένη αβεβαιότητα στην εκτίμηση της παραγωγής της ενέργειας, αλλά η σχετική απόδοση του WEC σε διαφορετικές τοποθεσίες μπορεί να μην είναι απλή συνάρτηση της μέσης ισχύος της κατεύθυνσης. Ωστόσο, αν και δε συνιστάται η χρήση χαρακτηρισμών του κυματικού κλίματος για την εκτίμηση της παραγωγής της ενέργειας, παρέχουν μια επισκόπηση που μπορεί να είναι χρήσιμη για την κατανόηση της απόδοσης ενός WEC. Επιπλέον, καθώς η κατανόηση ενός WEC αυξάνεται με τον προσδιορισμό των καταλληλότερων χαρακτηρισμών του κυματικού κλίματος για το συγκεκριμένο WEC, είναι πιθανό η απόδοση του WEC να εκτιμηθεί εύλογα από τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος. Ωστόσο, μέχρι να επιτευχθεί αυτό το σημείο, παραμένει συνετό να αναγνωρίζονται οι περιορισμοί οποιουδήποτε χαρακτηρισμού του κυματικού κλίματος και την πιθανή παραμόρφωση στην εκτίμηση της ισχύος ενός WEC που μπορεί να προκαλέσουν.



1.6.2 Προκλήσεις στο χαρακτηρισμό του κυματικού κλίματος.

Ένα κυματικό κλίμα μπορεί εύλογα να προσεγγιστεί ως μια μακροπρόθεσμη σειρά θαλάσσιων καταστάσεων που ορίζονται από το φάσμα της κατεύθυνσης των κυμάτων. Αυτό το φάσμα μαζί με άλλες παραμέτρους όπως το βάθος του νερού, η ταχύτητα/κατεύθυνση του θαλάσσιου ρεύματος και η ταχύτητα/κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δέσμησης ισχύος και των παραμέτρων σχεδιασμού για οποιονδήποτε μετατροπέα ενέργειας των κυμάτων που μπορεί να αναπτύσσεται στην τοποθεσία. Ωστόσο, συνήθως δεν είναι δυνατό να εργαστεί κανείς με αυτόν τον όγκο των δεδομένων (ή τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα) και έτσι χρησιμοποιείται ένας χαρακτηρισμός του κλίματος των κυμάτων. Ο χαρακτηρισμός του κυματικού κλίματος μπορεί ουσιαστικά να είναι ένας από τους δύο ακόλουθους τύπους. Ο πρώτος είναι ο χαρακτηρισμός του κυματικού κλίματος σε ένα μόνο σημείο και ο δεύτερος είναι ο χαρακτηρισμός του κυματικού κλίματος σε μια περιοχή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι και στις δύο περιπτώσεις ο χαρακτηρισμός οδηγεί σε μείωση των λεπτομερειών για το κλίμα των κυμάτων και επομένως δεν περιέχει όλες τις πληροφορίες που μπορεί να σχετίζονται με την απόδοση ενός μετατροπέα της κυματικής ενέργειας.

Η μέση κυματική ισχύς ως προς όλες τις κατευθύνσεις είναι ίσως ο πιο συνηθισμένος χαρακτηρισμός της κυματικής πηγής για την εκτίμηση της κυματικής ενέργειας. Αυτό αποτελεί πιθανότατα έναν εύλογο χαρακτηρισμό, αφού είναι σαφές ότι για να εξαχθούν σημαντικές ποσότητες κυματικής ενέργειας, η ισχύς του προσπίπτοντος κύματος πρέπει επίσης να είναι σημαντική. Χωρίς κύματα δεν υπάρχει και κυματική ισχύς. Για παράδειγμα, οι περιοχές με την υψηλότερη μέση ισχύ κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως η βορειοδυτική ακτή της Ευρώπης αποτελούν επίσης περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των μετατροπέων της κυματικής ενέργειας. Η εξαγωγή της ισχύος ενός μετατροπέα της ενέργειας του κύματος είναι ανάλογη με τη μέση ισχύ του κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις, επομένως μια μεγαλύτερη μέση ισχύς αυτού του κύματος θα ισοδυναμεί με μεγαλύτερη εξαγωγή της ισχύος.

Ο βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι κατά τη σύγκριση πιθανών τοποθεσιών, η χρήση της μέσης ισχύος του κύματος αποκρύπτει πληροφορίες σχετικά με τα χρονικά και τα φασματικά χαρακτηριστικά του κλίματος του κύματος, καθώς και με τις κατευθύνσεις που μπορεί να είναι σημαντικά για τη μέση δέσμηση της ισχύος. Φυσικά, ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν τη μέση παραγωγή της ενέργειας θα ποικίλλει ανάλογα με το WEC. Επομένως, είναι δύσκολο για τους ερευνητές να έχουν πάντα αρκετές προδιαγραφές σχετικά με την έκταση της παραμόρφωσης που μπορεί να οφείλεται στη χρήση της μέσης ισχύος των κυμάτων για τη μέση παραγωγή της ενέργειας. Μια μέθοδος για την αντιστάθμιση της πιθανής παραμόρφωσης είναι η παροχή πληροφοριών για άλλες πτυχές του κλίματος των κυμάτων ταυτόχρονα με τη μέση ισχύ των κυμάτων. Παραδείγματα αυτών των πρόσθετων πληροφοριών θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν το λόγο της μέγιστης ισχύος του κύματος ως προς τη μέση ισχύ του κύματος, το μέσο συντελεστή της κατεύθυνσης, το μέσο φασματικό πλάτος και τη μέση ενεργειακή περίοδο. Δυστυχώς, παρόλο που αυτές οι πρόσθετες πληροφορίες παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά του πόρου



του κύματος που μπορεί να υποδηλώνουν τα σχετικά δυνατά και αδύνατα σημεία συγκεκριμένων τοποθεσιών, εξακολουθούν να μην παρέχουν σαφή ένδειξη για το πώς η παραγωγή της ενέργειας ενός WEC μπορεί να διαφέρει μεταξύ των τοποθεσιών.

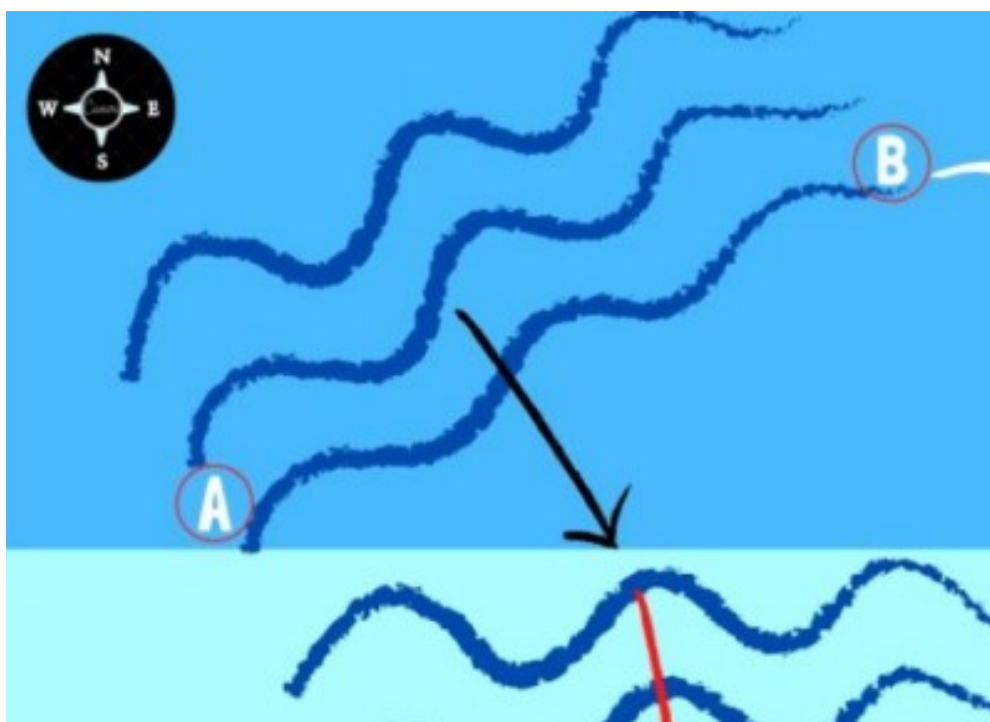
Αν και αποτελεί πρόβλημα το γεγονός ότι μια μεμονωμένη παράμετρος, ή ακόμη και ένα σύνολο παραμέτρων, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας πιθανής τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός WEC, αυτή είναι η σημερινή κατάσταση της βιομηχανίας της κυματικής ενέργειας. Η πλούσια ποικιλομορφία των WEC που αναπτύσσονται επί του παρόντος σημαίνει ότι υπάρχουν πολλαπλές σχέσεις μεταξύ του πόρου των κυμάτων και της παραγωγής της ενέργειας. Επιπλέον, είναι πιθανό μια συγκεκριμένη ιδέα WEC να είναι πιο κατάλληλη σε μια τοποθεσία, ενώ μια άλλη ιδέα WEC να είναι πιο κατάλληλη σε μια άλλη τοποθεσία. Έτσι, μπορεί να μην υπάρχει η πλήρης σύγκλιση σε μια ενιαία ιδέα όπως στην αιολική ενέργεια, λόγω της δυνητικά μεγαλύτερης ποικιλομορφίας των χαρακτηριστικών των κυματικών πόρων σε σύγκριση με τα χαρακτηριστικά των αιολικών πόρων.

1.7 Παράκτιες διαδικασίες.

Η ολίσθηση των κυμάτων μπορεί να γίνει κατανοητή εξετάζοντας ένα κύμα που διαδίδεται σε ρηχότερα νερά. Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε πιο ρηχά νερά, η ταχύτητα της ομάδας των κυμάτων αλλάζει, αλλά η αλλαγή στην ταχύτητα της ομάδας δε συνοδεύεται από αλλαγή στη ροή της ενέργειας. Έτσι, η διατήρηση της ενέργειας σημαίνει ότι το ύψος του κύματος πρέπει να γίνει μεγαλύτερο για να διατηρείται σταθερή η συνολική ροή της ενέργειας. Αυτό μπορεί να απεικονιστεί ως ένα μάζεμα των προσπίπτων κυμάτων έτσι ώστε να αυξάνονται σε ύψος (Εικόνα 1.8: Διάθλαση κύματος κοντά στην ακτή λόγω αλλαγής του βάθους του νερού [14]).

Το φαινόμενο της διάθλασης εξηγεί γιατί στην παραλία όλα τα κύματα φαίνονται να προέρχονται από μια κατεύθυνση περίπου ορθογώνια ως προς την ακτογραμμή. Για να κατανοηθεί καλύτερα η διάθλαση, μπορεί να ληφθεί υπόψιν ένα κύμα που διαδίδεται υπό γωνία ως προς τα περιγράμματα του βάθους. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση της διασποράς δείχνει ότι το τμήμα της κορυφής του κύματος σε ρηχά νερά θα ταξιδεύει πιο αργά με αποτέλεσμα μια στροφή της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος.

Η διάθλαση αναγκάζει τα κύματα να αλλάξουν κατεύθυνση, έτσι ώστε η κατεύθυνση διάδοσής τους να είναι πιο ορθογώνια ως προς τα περιγράμματα του βάθους του βυθού. Το καθαρό αποτέλεσμα αυτού σε όλα τα κύματα είναι η μείωση της εξάπλωσης της κατεύθυνσης στα κύματα, καθώς το βάθος του νερού μειώνει την προσέγγισή τους από μια πιο συγκεντρωμένη κατεύθυνση. Επιπλέον, οποιαδήποτε διάθλαση ενός κύματος προκαλεί μείωση του ύψους του κύματος καθώς απλώνεται σε μεγαλύτερη απόσταση. Ωστόσο, η διαδικασία της διάθλασης εξοικονομεί ενέργεια και επομένως δεν αλλάζει την ποσότητα της ενέργειας που ταξιδεύει ορθογώνια ως προς τα περιγράμματα του βάθους.



Εικόνα 1.8: Διάθλαση κύματος κοντά στην ακτή λόγω αλλαγής του βάθους του νερού [14]

Για την αξιολόγηση του κατά πόσον η αλλαγή στη μέση ισχύ των κυμάτων λόγω της διάθλασης θα επηρεάσει παρομοίως την παραγωγή της ενέργειας εξαρτάται από την ευαισθησία της κατεύθυνσης του WEC. Κάποια συγκεκριμένα απομονωμένα WEC μπορεί να μην είναι ευαίσθητα στην κατεύθυνση του κύματος και έτσι η μείωση της μέσης ισχύος των κυμάτων θα έχει ως αποτέλεσμα μια παρόμοια μείωση στην παραγωγή της ενέργειας. Ωστόσο, άλλα WEC θα έχουν μια ευαισθησία στην κατεύθυνση, έτσι ώστε η ισχύς του προσπίπτοντος κύματος να ορίζεται από την ισχύ των κυμάτων που προσπίπτουν. Εάν συμβαίνει αυτό, υπάρχει ευθυγράμμιση με τα περιγράμματα του βάθους και η διάθλαση δε θα έχει καμία επίδραση στη σχετική ισχύ του προσπίπτοντος κύματος (καθώς η διάθλαση εξοικονομεί ενέργεια). Στην πραγματικότητα, είναι πιθανό η διάθλαση να αλλάξει την προσπίπτουσα ισχύ, με το φαινόμενο λόγω της διάθλασης να αυξάνεται καθώς αυξάνεται η γωνία μεταξύ του WEC και των περιγραμμάτων του βάθους. Έτσι, πάλι μπορεί να φανεί ότι η καταλληλότητα της χρήσης της μέσης ισχύος των κυμάτων για την παραγωγή της ενέργειας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του WEC και τη διαμόρφωση.

Η περίθλαση συμβαίνει όταν τα κύματα συναντούν ένα εμπόδιο που διαπερνά την επιφάνεια, όπως ένα νησί, ακρωτήριο ή κάποιον κυματοθραύστη. Χωρίς περίθλαση, τα κύματα θα συνέχιζαν να ταξιδεύουν προς την ίδια κατεύθυνση αφήνοντας μια περιοχή ήρεμου νερού στην περιοχή του εμποδίου. Ωστόσο, η περίθλαση σημαίνει ότι τα κύματα θα «λυγίσουν» έτσι ώστε να υπάρχουν κύματα πίσω από το εμπόδιο. Η ποσότητα της περίθλασης εξαρτάται από το μήκος του κύματος, με τα μεγαλύτερα κύματα να περιθλώνται σε μεγαλύτερο βαθμό από τα μικρότερα κύματα. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία πηγές περίθλασης, π.χ. σε κάθε πλευρά ενός νησιού, τότε μπορεί να σχηματιστεί ένα μοτίβο περίθλασης όπου υπάρχουν περιοχές



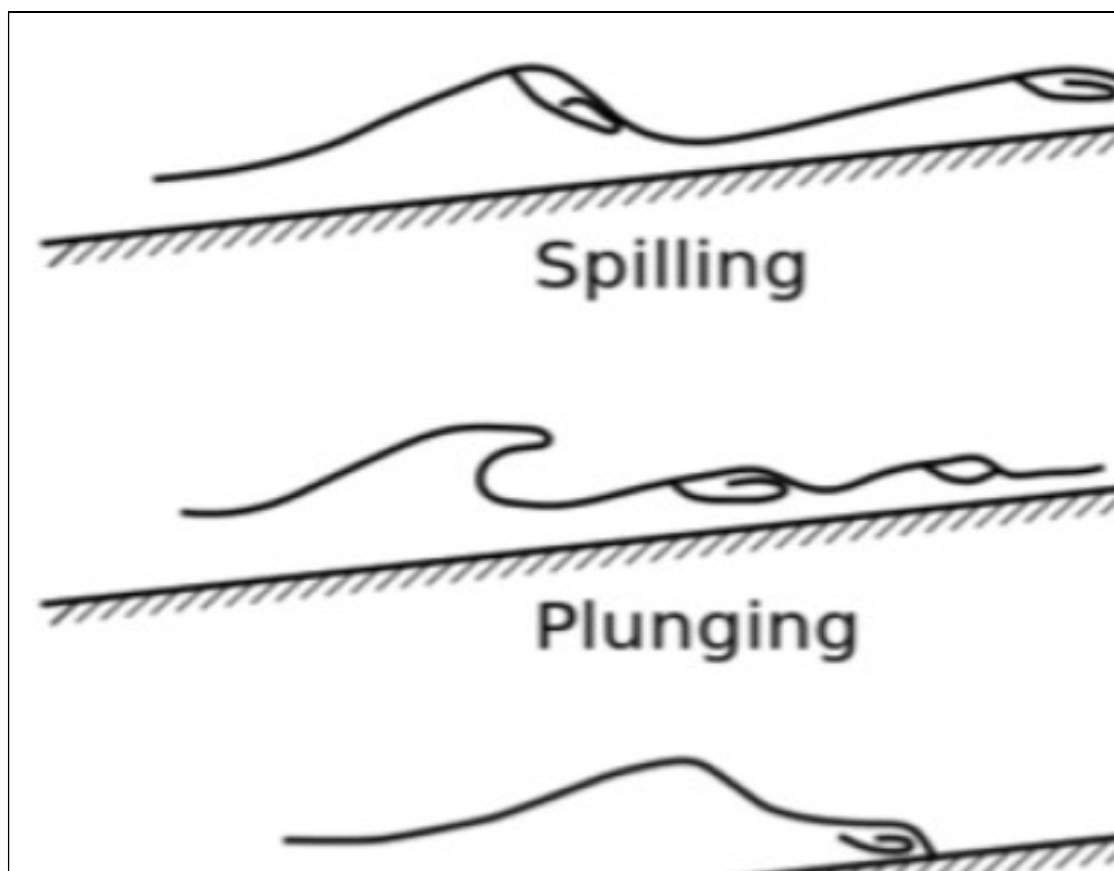
αυξημένου και μειωμένου ύψους κύματος λόγω επικοδομητικών και καταστροφικών παρεμβολών. Αν και η περίθλαση σημαίνει ότι τα κύματα θα εμφανιστούν στην υπήνεμη πλευρά ενός εμποδίου, γενικά αυτά τα κύματα θα είναι μικρότερα από τα προσπίπτοντα κύματα (εκτός από την ειδική περίπτωση επικοδομητικής παρεμβολής), επομένως ο πόρος του κύματος πίσω από ένα εμπόδιο είναι πιθανό να είναι μικρότερος από τον πόρο των θαλάσσιων κυμάτων.

Η θραύση του κύματος συμβαίνει όταν η ταχύτητα των σωματιδίων του οριζόντιου κύματος γίνεται μεγαλύτερη από την ταχύτητα του κύματος. Όταν συμβεί αυτό, το κύμα θα διαρρέει ενέργεια με τη μορφή του «θραύσης» του κύματος. Η θραύση του κύματος που προκαλείται από το βάθος σχετίζεται με την απότομη κλίση των κυμάτων σε ρηχά νερά λόγω της ολίσθησης. Όταν το ύψος του κύματος είναι μεγαλύτερο από περίπου 0,8 του βάθους του νερού (ή περίπου 0,14 του μήκους κύματος), τότε δημιουργείται η θραύση στα κύματα. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι κυμάτων σε αυτή την περίπτωση της θραύσης. Αυτοί οι τύποι είναι τα κύματα διαρροής, βύθισης και τα διογκούμενα κύματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.9: *Κατηγοριοποίηση του σπασίματος των κυμάτων [15]*, ανάλογα με την απότομη κλίση του κύματος και του βυθού ή πιο συγκεκριμένα τον αριθμό Iribarren¹[16].

Σε βάθη νερού μεγαλύτερα από τα περίπου 10m, η συντριπτική πλειονότητα των κυμάτων δεν θα υποστεί θραύση και για αυτό είναι δελεαστικό να θεωρηθεί ότι αυτή η διαδικασία δεν είναι σημαντική για την αξιολόγηση της καταλληλότητας χρήσης της μέσης ισχύος των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις για τη σύγκριση των υπεράκτιων και των κοντινών τοποθεσιών. Ωστόσο, η μέση κυματική ισχύς περιλαμβάνει ενέργεια από όλα τα συμβάντα, ανεξάρτητα από το βαθμό εκμετάλλευσής της. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει την κυματική ενέργεια στις καταιγίδες, η οποία στην υπεράκτια τοποθεσία, σε βαθιά νερά, μπορεί να έχει 40-50 φορές την κυματική ισχύ από τη μέση κυματική ισχύ. Έτσι, αν και οι καταιγίδες μπορεί να συμβαίνουν σπάνια, μπορεί να έχουν σχετικά μεγάλη συμβολή στη μέση κυματική ισχύ και να αντιπροσωπεύουν ίσως το 15-20% της συνολικής κυματικής ενέργειας. Αντίθετα, στην περιοχή κοντά στην ακτή η ενέργεια του κύματος σε μια καταιγίδα αποτελεί ένα πολύ μικρότερο πολλαπλάσιο της μέσης κυματικής ισχύος, επειδή η επαγόμενη από το βάθος θραύση του κύματος έχει περιορίσει την ενέργεια του κύματος σε μια καταιγίδα που φτάνει στην κοντινή ακτή, αλλά δεν έχει επηρεάσει την ισχύ του κύματος.

Η αναλογία της συνολικής κυματικής ενέργειας που περιέχεται στις καταιγίδες είναι σημαντική, δεδομένου ότι είναι σε μεγάλο βαθμό μη εκμεταλλεύσιμη, είτε επειδή η παραγωγή της ενέργειας των WEC περιορίζεται από τη βαθμολογία της μονάδας, είτε επειδή πρέπει να σταματήσει να λειτουργεί για να επιβιώσει από την καταιγίδα. Έτσι, επειδή η μέση κυματική ισχύς δε διακρίνει εάν η κυματική ενέργεια είναι εκμεταλλεύσιμη ή όχι, παραμορφώνει τη σχετική δυνητική παραγωγή της ενέργειας στις υπεράκτιες και στις κοντινές τοποθεσίες.

¹ Στη ρευστοδυναμική, ο αριθμός Iribarren ή η παράμετρος Iribarren είναι μια αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πολλών επιπτώσεων (σπασίματος) επιφανειακών κυμάτων βαρύτητας σε παραλίες και παράκτιες κατασκευές. Η παράμετρος πήρε το όνομά της από τον Ισπανό μηχανικό Ramón Iribarren Cavanillas (1900–1967), που την εισήγαγε για να περιγράψει την εμφάνιση του σπασίματος των κυμάτων σε επικλινείς παραλίες.



Εικόνα 1.9: Κατηγοριοποίηση του σπασίματος των κυμάτων [15]

Η μείωση της μέσης ισχύος των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις έχει συχνά αποδοθεί κυρίως στην τριβή του πυθμένα. Ωστόσο, όπως φαίνεται παραπάνω, ένα σημαντικό ποσοστό της μείωσης προκαλείται από άλλους παράγοντες και ιδιαίτερα τη διάθλαση. Για έναν τυπικό βυθό η τριβή του βυθού αντιπροσωπεύει μόνο το περίπου 5% της μείωσης της μέσης ισχύος των κυμάτων. Η μείωση της ενέργειας του φασματικού κύματος λόγω της τριβής του πυθμένα είναι πολύπλοκη και ποικίλλει ανάλογα με το βάθος, έτσι ώστε το φάσμα των κυμάτων να αλλάζει ως αποτέλεσμα της τριβής του πυθμένα (αν και η μικρή μείωση της ενέργειας σημαίνει ότι η αλλαγή στο φάσμα θα είναι επίσης μικρή). Ωστόσο, καθώς διαφορετικές έννοιες των WEC έχουν διαφορετικές φασματικές αποκρίσεις, είναι πιθανό η αλλαγή στο φασματικό σχήμα να είναι πιο σημαντική για κάποιο WEC σε σχέση με ένα άλλο. Έτσι, είναι πιθανό η μεταβολή της μέσης ισχύος του κύματος να έχει διαφορετικό αντίκτυπο λόγω της τριβής του πυθμένα στη μέση παραγωγή της ενέργειας για διαφορετικές συσκευές λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών απόκρισής τους.

Καθώς υπάρχει μεγαλύτερη έλξη στον ανοιχτό ωκεανό σε σχέση με την κοντινή ακτή, μπορεί να αναμένεται ότι η ανάπτυξη του ανέμου θα αυξήσει την κυματική ισχύ σε αυτή την τοποθεσία. Δυστυχώς, σε πολλές περιπτώσεις τα υπεράκτια κύματα βρίσκονται ήδη σε ισορροπία με τον άνεμο λόγω της μεγάλης πρόσφυσης και έτσι δε μπορούν να αναπτυχθούν σημαντικά μεταξύ των υπεράκτιων περιοχών και των κοντινών ακτών. Ωστόσο, όταν ο άνεμος φυσάει από τη στεριά, θα υπάρχει ελάχιστη

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Κυματική Ενέργεια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΚΟΥΓΙΟΥΜΤΖΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ



έλξη για την κοντινή τοποθεσία, αλλά η ανάκτηση μπορεί να είναι σημαντική για την υπεράκτια τοποθεσία. Το κλειδί για την αξιολόγηση του εάν το ποσοστό της κυματικής ισχύος που παράγεται στις εν λόγω περιοχές πρέπει ή όχι να συμπεριληφθεί στην ανάλυση εξαρτάται από το εάν το WEC μπορεί, ή όχι να συλλάβει την ενέργεια που ταξιδεύει προς την αντίθετη κατεύθυνση από την πλειονότητα των κυμάτων.



2. Τεχνολογίες για την Κυματική Ενέργεια.

2.1 Ιστορική αναδρομή στην ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου της ενέργειας των κυμάτων.

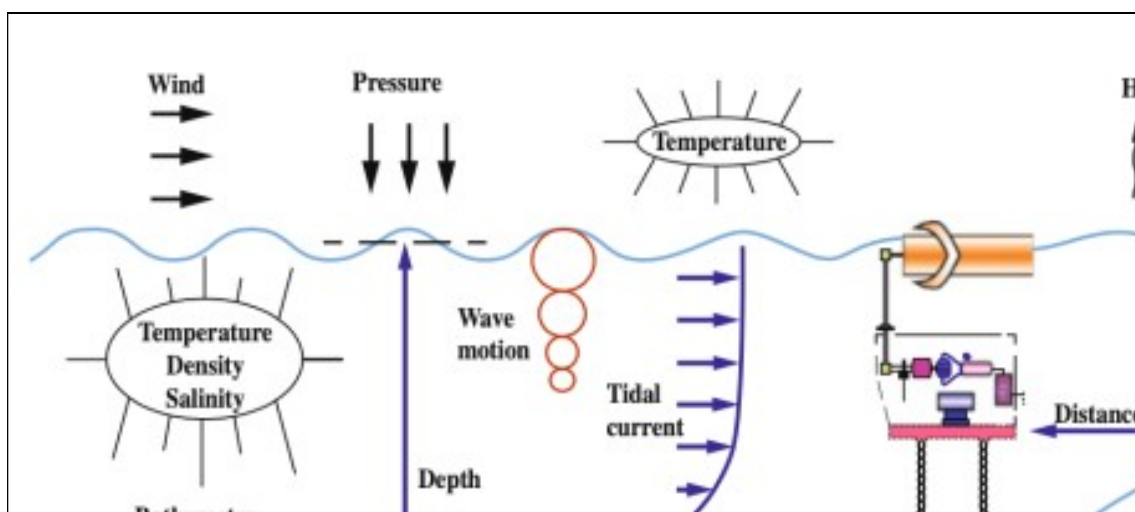
Η ανάπτυξη των μετατροπών της κυματικής ενέργειας ξεκινάει από πολύ πίσω στο χρόνο, αφού έχει καταγραφεί ότι οι πρώτες προσπάθειες έγιναν το 1800. Στην πραγματικότητα, το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα μετατροπέα της κυματικής ενέργειας χρονολογείται από το έτος 1799. Στη σύγχρονη εποχή, μόλις στην ενεργειακή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του 1970, άρχισε να ανανεώνεται το ενδιαφέρον για αυτό το πεδίο, με τη σημαντική ενίσχυση από τον SalterS. (1974). Ωστόσο, παρά τις πολύ σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες, οι δραστηριότητες μειώθηκαν ξανά στη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Στο τέλος της προηγούμενης χιλιετίας, οι δραστηριότητες άρχισαν να επιταχύνονται ξανά, σε αρκετές χώρες σε όλο τον κόσμο, αλλά με τις περισσότερες προσπάθειες να παρατηρούνται στις παράκτιες ευρωπαϊκές χώρες. Την τελευταία δεκαετία, το Ηνωμένο Βασίλειο κατέβαλε τεράστιες προσπάθειες για την ανάπτυξη των θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της κυματικής ενέργειας και σήμερα θεωρείται ως ο παγκόσμιος ηγέτης σε αυτόν τον τομέα.

2.2 Η τεχνολογία των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων και το περιβάλλον τους.

Οι μετατροπείς της κυματικής ενέργειας (WEC) είναι μηχανές σε θέση να εκμεταλλεύονται την ισχύ από τα κύματα του ωκεανού και να τη μετατρέπουν σε μια χρησιμοποιήσιμη μορφή ενέργειας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια.

Τα κύματα του ωκεανού θεωρούνται σχετικά καλά κατανοητά και περιγράφονται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, στην πράξη, είναι πολύ δύσκολο να περιγραφούν, να αναπαραχθούν και να προβλεφθούν οι ακριβείς περιβαλλοντικές συνθήκες σε μια συγκεκριμένη υπεράκτια τοποθεσία με καλή ακρίβεια. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητά τους, αλλά και στο μεγάλο αριθμό των περιβαλλοντικών παραμέτρων που μπορούν τελικά να έχουν μια σημαντική επίδραση. Στην Εικόνα 2.1: *διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον, μαζί με τα κύρια υποσυστήματα ενός (πλωτού) WEC*, παρουσιάζονται σχηματικά οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον, μαζί με τα κύρια υποσυστήματα ενός (πλωτού) WEC.

Τα περισσότερα WEC, ακόμη και αυτά με διαφορετικές αρχές λειτουργίας μοιάζουν πολύ σε γενική άποψη. Τα περισσότερα από αυτά αποτελούνται από τα ίδια πρωτεύοντα υποσυστήματα, κάτι που οφείλεται στο κοινό τους περιβάλλον και στόχο.



Εικόνα 2.1: διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον, μαζί με τα κύρια υποσυστήματα ενός (πλωτού) WEC[17]

Τα κύρια υποσυστήματα που υπάρχουν σε όλα τα WEC έχουν επίσης αναφερθεί ευρέως στη βιβλιογραφία και αποτελούνται από τα εξής:

- Το υδροδυναμικό υποσύστημα είναι το κύριο σύστημα απορρόφησης των κυμάτων που εκμεταλλεύεται την κυματική ισχύ. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με την τεχνολογία, π.χ. ταλαντευόμενο σώμα, ταλαντευόμενη στήλη νερού και συνδέονται τόσο με τα υποσυστήματα αντίδρασης όσο και με τα υποσυστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας (PTO) έναντι των οποίων θα μεταφέρονται ενεργά δυνάμεις και κινήσεις.
- Το υποσύστημα μετατροπής της ενέργειας μετατρέπει την εισερχόμενη κυματική ενέργεια (από το υδροδυναμικό υποσύστημα) σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα PTO μπορούν να βασίζονται σε διαφορετικές αρχές, από τις οποίες μερικές από τις πιο κοινές είναι το υδραυλικό PTO, το μηχανικό PTO απευθείας μετάδοσης της κίνησης, οι γραμμικές γεννήτριες, ο αεροστρόβιλος και ο υδροστρόβιλος χαμηλής κεφαλής.
- Το υποσύστημα αντίδρασης διατηρεί το WEC στη θέση του σε σχέση με τον πυθμένα της θάλασσας (π.χ. σύστημα πρόσδεσης) και παρέχει ένα σημείο αντίδρασης για το PTO και υποστήριξη για τα υδροδυναμικά υποσυστήματα (π.χ. σταθερή δομή αναφοράς ή υποστήριξη)
- Το υποσύστημα ελέγχου (και οργάνων) είναι το έξυπνο μέρος του συστήματος καθώς φροντίζουν για τον έλεγχο του WEC και των μετρήσεών του. Αποτελούνται κυρίως από τους επεξεργαστές για τον αυτοματισμό και τις ηλεκτρομηχανικές διεργασίες, τους αισθητήρες και την απόκτηση των δεδομένων τους, την επικοινωνία, τη μεταφορά των δεδομένων και την ανθρώπινη διεπαφή.



2.2.1 Τα απαραίτητα οικονομικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας των μετατροπέων της ενέργειας των κυμάτων

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά είναι οι βασικές πτυχές στις οποίες ένα WEC θα πρέπει να υπερέρχει προκειμένου να δείξει μακροπρόθεσμη οικονομική δυνατότητα [18]:

- **Βιωσιμότητα:** Το WEC απαιτεί ένα αξιόπιστο σύστημα πρόσδεσης και κατά προτίμηση ένα σύστημα παθητικής ασφάλειας που μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τα ακραία φορτία. Η παθητική ασφάλεια σημαίνει ότι ο μηχανισμός ασφαλείας μπορεί να ενεργοποιηθεί (αυτόματα) χωρίς να απαιτείται εξωτερική αλληλεπίδραση, όπως ηλεκτρική ή άλλη ενέργεια.
- **Αξιοπιστία και δυνατότητα συντήρησης:** Θα πρέπει να είναι εύκολη η πρόσβαση για την επιθεώρηση των πιο βασικών μερών του WEC. Επιπλέον, θα ήταν πολύ καλό εάν το μεγαλύτερο ή ολόκληρο μέρος της συντήρησης μπορούσε να γίνει στο ίδιο το WEC στη θέση του, χωρίς να χρειάζεται να γυρίσει για παράδειγμα πίσω στο λιμάνι.
- **Συνολική απόδοση ισχύος:** Το WEC πρέπει να αποτελείται από αποτελεσματική τεχνολογία για την απορρόφηση της ενέργειας των κυμάτων και ΡΤΟ. Πρέπει να παράγει επαρκώς ομαλή ηλεκτρική ισχύ και να έχει υψηλό συντελεστή χωρητικότητας. Διαφορετικά, θα χαθεί πάρα πολλή ενέργεια σε ολόκληρη την αλυσίδα μετατροπής της ενέργειας από το κύμα στο καλώδιο.
- **Επεκτασιμότητα:** Σε πλήρη κλίμακα, μια συσκευή WEC πρέπει να είναι μια συσκευή πολλαπλών MW για να είναι οικονομικά βιώσιμη. Για να μπορέσει να συνεχίσει να βελτιώνει σημαντικά το κόστος θα πρέπει να είναι επεκτάσιμο, που σημαίνει ότι θα πρέπει να μπορεί να διευρυνθούν περαιτέρω οι διαστάσεις του (όπως για παράδειγμα γίνεται με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες). Πολλά WEC φτάνουν τις βέλτιστες διαστάσεις τους σε πολύ χαμηλές διαστάσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να μετατραπούν σε WEC πολλαπλών MW (δηλαδή περισσότερα από 5 MW). Αυτό δεν περιλαμβάνει τον πολλαπλασιασμό των WEC καθώς αυτό δεν θα έχει σημαντική επίδραση στο μέσο κόστος της υποδομής και τεχνολογίας και επομένως δεν θα βελτιώσει σημαντικά το κόστος του WEC ή του έργου.
- **Περιβαλλοντικό όφελος:** Τα WEC αναμένεται να είναι βιώσιμα ενεργειακά συστήματα και επομένως αναμένεται να έχουν μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος και ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

2.2.2 Σχεδιασμός των μετατροπέων της ενέργειας των κυμάτων.

Η ικανότητα ενός σώματος να απορροφά την ενέργεια από τα κύματα εξαρτάται από τον υδροδυναμικό σχεδιασμό του. Όταν ένα σώμα κινείται μέσα στο νερό, θα δημιουργήσει κύμα ανάλογα με το σχήμα και την κίνησή του. Για παράδειγμα, ένας σημειακός απορροφητής θα δημιουργήσει ένα κυκλικό κύμα ίσο προς όλες τις κατευθύνσεις όταν ταλαντώνεται κατακόρυφα. Όσο καλύτερα αυτό το ακτινοβολούμενο κύμα αντιστοιχεί στο εισερχόμενο κύμα του ωκεανού, τόσο πιο



αποτελεσματικό είναι αυτό το σώμα στην απορρόφηση ενός εισερχόμενου κύματος του ωκεανού.

Το θεωρητικό όριο στην απορρόφηση της κυματικής ενέργειας από ένα σώμα που δημιουργεί ένα συμμετρικό ακτινοβολούμενο κύμα είναι το 50 %. Ωστόσο, ένα μη συμμετρικό σώμα, μπορεί να έχει την ικανότητα να απορροφά σχεδόν το 100% της εισερχόμενης κυματικής ενέργειας [19].

Αν και δεν υπάρχει ακόμη σαφής σύγκλιση στις τεχνολογίες, υπάρχουν διάφορες κύριες κατηγορίες των WEC. Για ορισμένες από αυτές τις κύριες κατηγορίες, μπορεί να δοθεί μια ενδεικτική αναλογία της απορροφούμενης ενέργειας από τα κύματα, με βάση διάφορα δημοσιευμένα αποτελέσματα [20]. Αυτά τα παρουσιάζουν μια απλή ένδειξη της ικανότητας αυτών των τύπων WEC να απορροφούν την ενέργεια των κυμάτων. Αυτή η ενέργεια πρέπει στη συνέχεια να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι τιμές πρέπει να λαμβάνονται με προσοχή, καθώς μπορούν να βασίζονται σε διαφορετικές προδιαγραφές και υποθέσεις. Μερικές από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι οι συνθήκες του κύματος και το σχετικό μέγεθος (αναλογία κλιμάκωσης) του WEC ως προς τα κύματα.

Η βέλτιστη διάσταση του σώματος απορρόφησης των κυμάτων και της δομής ενός WEC συνήθως συνδέεται στενότερα με την περίοδο του κύματος (σε σχέση με όλες τις παραμέτρους του κύματος), εκτός από άλλες δυνητικά παρεμβαλλόμενες οικονομικές παραμέτρους. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περίοδος του κύματος αιχμής με την υψηλότερη ετήσια συνεισφορά ενέργειας των κυμάτων (που αντιστοιχεί στην κυματική ενέργεια \times πιθανότητα εμφάνισης).

Οι διακυμάνσεις της ισχύος ενός μεμονωμένου WEC μειώνονται σημαντικά με την ποσότητα των απορροφητών της ενέργειας του κύματος. Η απορροφούμενη ισχύς από τα κύματα κυμαίνεται και δεν είναι σταθερή λόγω της φύσης των κυμάτων (χρονική κλίμακα μερικών δευτερολέπτων), αλλά και λόγω του ότι τα κύματα ταξιδεύουν σε ομάδες (χρονική κλίμακα λίγων λεπτών). Αυτές οι διακυμάνσεις δεν είναι επιθυμητές, καθώς αυξάνουν την ανάγκη για υπερμεγέθη μηχανολογικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό και αποτελούν ένα από τα κύρια εμπόδια για την επίτευξη μιας αξιόπιστης και οικονομικά αποδοτικής τεχνολογίας [21].

Όπως και με τις ανεμογεννήτριες, θα πρέπει να αναμένονται αρκετές βλάβες των διαφόρων υποσυστημάτων ετησίως. Γενικά, λόγω των βελτιώσεων τα τελευταία 5-10 χρόνια, αν και οι ανεμογεννήτριες υφίστανται μεγάλο αριθμό δυσλειτούργιων, συνήθως οδηγούν μικρές μόνο περιόδους ακινητοποίησης λόγω της ταχείας αλληλεπίδρασης των ομάδων εξυπηρέτησης. Επιτυγχάνουν τεχνική διαθεσιμότητα περίπου 98%, που αντιστοιχεί σε χρόνο διακοπής της λειτουργίας περίπου 1 εβδομάδας το χρόνο [22].

Αυτό θα πρέπει να δείχνει ξεκάθαρα ότι είναι πολύ σημαντικό όλα τα κρίσιμα εξαρτήματα του WEC να είναι τουλάχιστον εύκολο να επιθεωρηθούν καθώς θα συμβαίνουν πολλές δυσλειτούργιες κάθε χρόνο. Ακόμα καλύτερα θα ήταν τα εξαρτήματα του WEC να είναι εύκολο να συντηρηθούν και να εναλλάσσονται, χωρίς την ανάγκη να απαιτούνται δύτες. Τα πλήρως βυθισμένα WEC είναι, ως εκ τούτου, πολύ δύσκολο να λειτουργήσουν καθώς η δυνατότητα συντήρησής τους είναι πολύ



δύσκολη (εκτός των άλλων, το WEC βρίσκεται συνήθως σε περιοχή με σοβαρές συνθήκες κυμάτων).

Για τεχνολογίες WEC που έχουν κύρια πλωτή δομή αναφοράς, είναι επιθυμητό το προβλεπόμενο μήκος να είναι περίπου το ίδιο ή μεγαλύτερο από ένα μήκος κύματος για τη βέλτιστη παραγωγή ισχύος. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το μήκος του κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τη δομή, η δομή θα αρχίσει να κινείται με το κύμα. Η πρόσδεση των πλωτών κατασκευών μπορεί να είναι προβληματική και είναι γενικά δαπανηρή. Μερικοί βασικοί εμπειρικοί κανόνες είναι οι εξής:

- Αν και τα WEC είναι συνήθως πιο αποτελεσματικά σε απότομα κύματα, έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες μετατοπίσεις, σε σχέση με τη θέση ηρεμίας τους.
- Οι κινήσεις μιας αγκυροβολημένης πλωτής κατασκευής είναι ιδιαίτερα μεγάλες σε περίπτωση θραύσης των κυμάτων, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μετάδοση σημαντικά υψηλότερων φορτίων στην κατασκευή.
- Η ανθεκτικότητα του συστήματος πρόσδεσης αμφισβητείται ακόμη περισσότερο κάτω από βραχυπρόθεσμα επαναλαμβανόμενα κυματικά συμβάντα, όπως ομάδες κυμάτων (που είναι πολύ συνηθισμένο). Ένα πλωτό WEC θα πρέπει να δένεται έξω από την περιοχή όπου συμβαίνει το «σπάσιμο» των κυμάτων λόγω των παρεμβολών στο βάθος του νερού.
- Τα εξαιρετικά υψηλά (μέγιστα) φορτία συμβαίνουν με τις απότομες στάσεις των σωμάτων που βρίσκονταν σε κίνηση. Αυτό μπορεί να συμβεί εντός της δομής ή των υποσυστημάτων.

2.2.3 Ισχύς των μετατροπών της ενέργειας των κυμάτων.

Το ΡΤΟ ενός σώματος που ενεργοποιείται από το κύμα είναι το πιο αποτελεσματικό όταν η κίνησή του περιορίζεται σε ένα μόνο βαθμό ελευθερίας. Διαφορετικά, το σώμα που ενεργοποιείται από το κύμα θα επιλέγει πάντα να κινείται προς την κατεύθυνση της ελάχιστης αντίστασης και έτσι να αποφεύγει την αλληλεπίδραση με το ΡΤΟ. Επιπλέον, περιορίζοντας τις κινήσεις του σε έναν βαθμό ελευθερίας μειώνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος ΡΤΟ και η πιθανή ποσότητα των περιπτώσεων φόρτωσης. Επιπλέον, βελτιστοποιείται η απόδοσή του και διευκολύνεται ο έλεγχός του, καθώς είναι γνωστή η ακριβής κίνηση του σώματος που ενεργοποιείται από το κύμα.

Συνήθως τα συστήματα ΡΤΟ για τα WEC απαιτούνται για να μετατρέψουν μια αργή ταλαντευόμενη κίνηση σε συνδυασμό με τις υψηλές δυνάμεις (που προκαλούνται από τη φύση των κυμάτων) σε γρήγορη περιστροφή προς μία κατεύθυνση (που απαιτείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα). Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τύπων συστημάτων ΡΤΟ, τα οποία όλα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση, τον έλεγχο, την πολυπλοκότητα και το κόστος. Κάποιες πτυχές του συστήματος ΡΤΟ που είναι σημαντικές είναι η ικανότητα του να αποθηκεύει και να εξομαλύνει την ενέργεια προσωρινά, να



αντιμετωπίζει τη βραχυπρόθεσμη υπερφόρτωση του ρεύματος, να αντιμετωπίζει τα ξαφνικά σφάλματα του συστήματος και τις πιθανές απώλειες του ελέγχου.

Οι προηγμένες στρατηγικές του ελέγχου του σώματος απορρόφησης των κυμάτων μέσω του συστήματος ΡΤΟ μπορούν συνήθως να ενισχύσουν σημαντικά τη συνολική παραγωγή της ισχύος. Ωστόσο, αυτό θα συνεπάγεται σημαντικά υψηλότερα φορτία και φθορά στη δομή και τα εξαρτήματα του συστήματος. Το ΡΤΟ αποτελεί μια πολύ πιο αποτελεσματική προσθήκη σε σχέση με μια σταθερή αναφορά. Αυτή η σταθερή αναφορά μπορεί να είναι ο βυθός της θάλασσας ή μια μεγάλη κατασκευή που δεν κινείται κάτω από τη δράση της απορρόφησης των κυμάτων του συστήματος. Διαφορετικά, θα μεταφερθεί ενδεχομένως πολλή ενέργεια σε κινήσεις άλλων συνδεδεμένων σωμάτων.

2.2.4 Το περιβάλλον για τους μετατροπείς της ενέργειας των κυμάτων.

Η απόδοση ισχύος ενός WEC είναι πολύ καλύτερη σε απότομα κύματα, καθώς αυτά έχουν ως αποτέλεσμα συχνότερες ή/και μεγαλύτερες κινήσεις του απορροφητή της ενέργειας των κυμάτων. Στα μακρά κύματα, οι κινήσεις της επιφάνειας του νερού είναι λιγότερο συχνές και πιο αργές, γεγονός που οδηγεί σε πιο αργές και μικρότερες κινήσεις του σώματος που ενεργοποιείται από τα κύματα. Οι σημαντικές πτυχές μιας καλής τοποθεσίας για τα WEC είναι οι εξής:

- Καλό μέσο περιεχόμενο κυματικής ενέργειας (π.χ. περισσότερα από 15 kW/m)
- Καλή μέση κλίση του κύματος (π.χ. μεγαλύτερη από το 1,5 %, καθώς η απόδοση των WEC είναι σημαντικά υψηλότερη σε απότομα κύματα)
- Χαμηλή αναλογία μέγιστου ως προς το μέσο όρο όσον αφορά τα σημαντικά ύψη του κύματος
- Χαμηλή μηνιαία διακύμανση του περιεχομένου της κυματικής ενέργειας, καθώς διευκολύνει τη σταθερή παραγωγή ενέργειας και βελτιώνει τον παράγοντα της χωρητικότητας όταν το κλίμα των κυμάτων είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, αυτό καθιστά την εγκατάσταση και τη συντήρηση πιο δύσκολη.
- Εγγύτητα στην ακτή, τις υποδομές και τον τελικό χρήστη καθώς μειώνει σημαντικά το κόστος CapEx² και OpEx³ που σχετίζεται με το έργο.
- Λογικό βάθος νερού (π.χ. 30–60 m), το οποίο μπορεί να επηρεάσει σοβαρά το κόστος πρόσδεσης και καλωδίωσης.

²Οι δαπάνες CapEx είναι σημαντικές για τις εταιρείες να διατηρήσουν υπάρχοντα ακίνητα και εξοπλισμό και να επενδύσουν σε νέα τεχνολογία και άλλα περιουσιακά στοιχεία για ανάπτυξη.

³Τα λειτουργικά έξοδα OpEx είναι τα κόστη που επιβαρύνουν μια εταιρεία για τη λειτουργία της καθημερινής της λειτουργίας.



2.3 Κατηγοριοποίηση ή ταξινόμηση των μετατροπέων της ενέργειας των κυμάτων.

2.3.1 Βασικές ταξινομήσεις.

Η ανάπτυξη των WEC χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ιδεών και εννοιών για τον τρόπο χρήσης του πόρου της ενέργειας των κυμάτων. Οι διαφορετικές έννοιες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους.

Η ταξινόμηση των WEC φαίνεται και από τις βασικές αρχές λειτουργίας τους. Ορισμένα WEC δε μπορούν να τοποθετηθούν σε κάποια υπάρχουσα κατηγορία, καθώς συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες κοινές μεταξύ άλλων.

Λόγω της ύπαρξης πολυάριθμων και διαφορετικών WEC [23], υπάρχουν αρκετές ταξινομήσεις σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Θέση της συσκευής σε σχέση με τη βαθυμετρία και η απόσταση από την ακτή
- Θέση της συσκευής σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας,
- Το μέγεθος και τον προσανατολισμό της συσκευής
- Αρχή της δέσμησης της ενέργειας [24].

Όσον αφορά την πρώτη από αυτές τις ταξινομήσεις, μπορεί να πραγματοποιηθεί διάκριση μεταξύ χερσαίων, κοντινών στην ακτή και υπεράκτιων εγκαταστάσεων. Ο όρος χερσαία αναφέρεται σε αυτή που βρίσκεται στην ακτή, συνήθως εκμεταλλεόμενη είτε μια υπάρχουσα, είτε μια νέα κατασκευή που πρόκειται να κατασκευαστεί, όπως π.χ. ο κυματοθραύστης. Ο όρος κοντά στην ακτή αναφέρεται σε ρηχά νερά με βάθη που δεν υπερβαίνουν τα 50 μέτρα, που βρίσκονται σχετικά κοντά στην ακτογραμμή. Υπεράκτια σημαίνει ύδατα βαθύτερα από τα 50 μέτρα, σε πιο απομακρυσμένες περιοχές της ακτής παρά κοντά σε εγκαταστάσεις της ακτής.

Οι συσκευές στην ξηρά είναι από τη φύση τους «τερματιστές» όπως παρουσιάζονται παρακάτω και συνδέονται άκαμπτα με την ξηρά. Τυπικά παραδείγματα του παρόντος είναι οι ταλαντευόμενες στήλες κυματισμού και οι συσκευές υπέρβασης⁴. Οι συσκευές κοντά στην ακτή βρίσκονται σε βάθη νερού όπου τα διαθέσιμα κύματα επηρεάζονται από το βάθος του νερού γενικότερα. Οι συσκευές που αναπτύσσονται σε αυτήν την περιοχή συχνά τοποθετούνται στο κάτω μέρος. Οι συσκευές που τοποθετούνται στην ανοικτή θάλασσα γενικά θα επιπλέουν και θα έχουν πρόσβαση στα κύματα ανεξάρτητα από το βυθό.

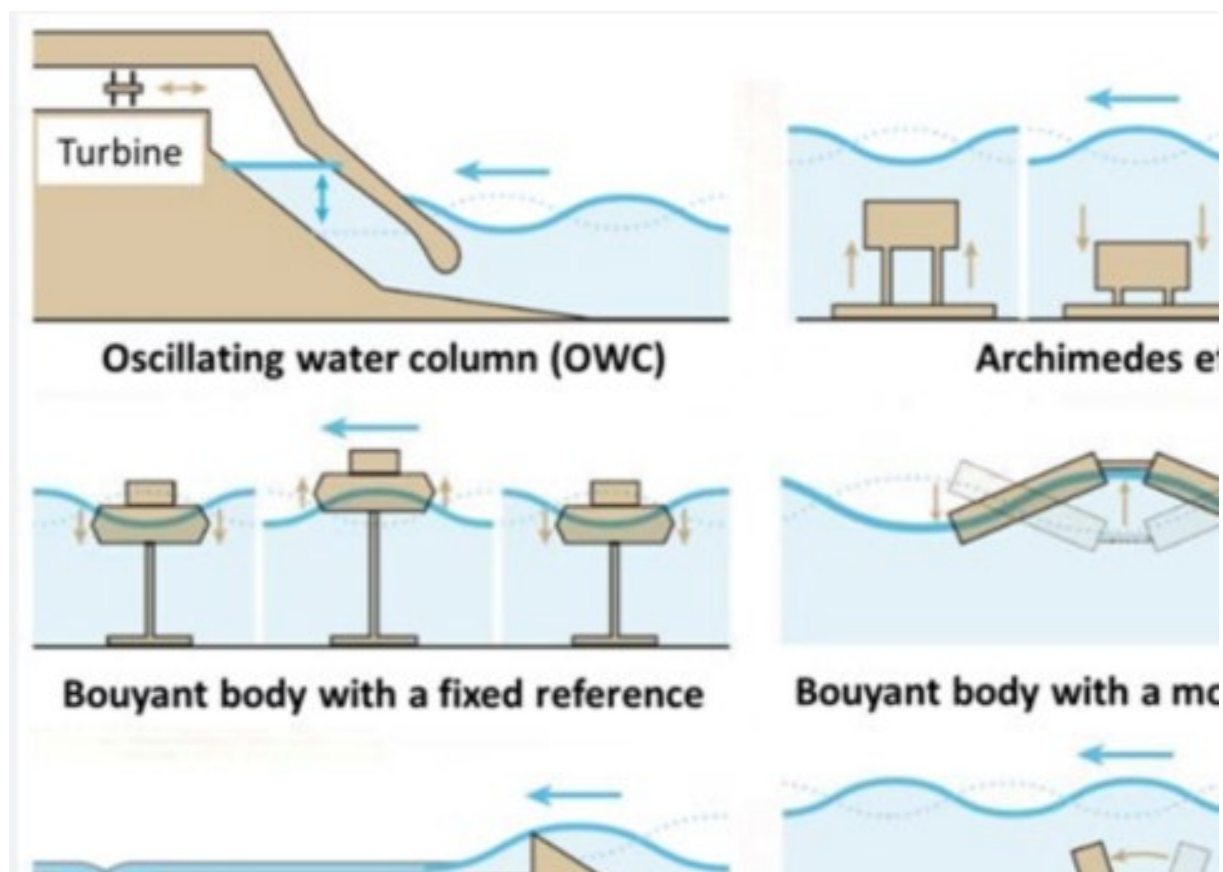
Όσον αφορά λοιπόν τη δεύτερη από τις ταξινομήσεις που αναφέρθηκαν, μπορεί να πραγματοποιηθεί διάκριση μεταξύ αναδυόμενης, ημιβυθισμένης και βυθισμένης κατασκευής. Επιπλέον, ανάλογα με τον τύπο της δομής στήριξης μπορεί οι κατασκευές να είναι όρθιες ή αιωρούμενες με το σύστημα της πρόσδεσης.

⁴Οι συσκευές υπέρβασης είναι μακριές κατασκευές που επιτρέπουν στην κυματική κίνηση να γεμίσει μια δεξαμενή σε υψηλότερη στάθμη νερού από τον περιβάλλοντα ωκεανό.



Όσον αφορά την τρίτη από αυτές τις ταξινομήσεις, υπάρχουν αυτές της απορρόφησης σημείου, εξασθενητές και τερματιστές WEC. Οι συσκευές απορρόφησης σημείων έχουν γενικά μικρές διαστάσεις σε σύγκριση με το μήκος του κύματος, απορροφώντας την κυματική ενέργεια προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Οι συσκευές εξασθενητή έχουν τον κύριο άξονα ή τη διάστασή τους παράλληλη προς την κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος. Οι συσκευές τερματισμού έχουν τον κύριο άξονά τους κάθετο στην κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος. Αυτή η κατηγορία είναι η πιο συχνή και η πιο βασική [25].

Η τέταρτη από τις ταξινομήσεις κάνει διάκριση μεταξύ της ταλαντευόμενης στήλης νερού (OWC), του φαινομένου του Αρχιμήδη και του πλευστικού σώματος με σταθερή αναφορά, του πλευστικού σώματος με κινητή αναφορά, της υπέρβασης και της κρούσης (Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση WEC σύμφωνα με την αρχή της δέσμωσης της ενέργειας [26]).



Εικόνα 2.2: Ταξινόμηση WEC σύμφωνα με την αρχή της δέσμωσης της ενέργειας [26]

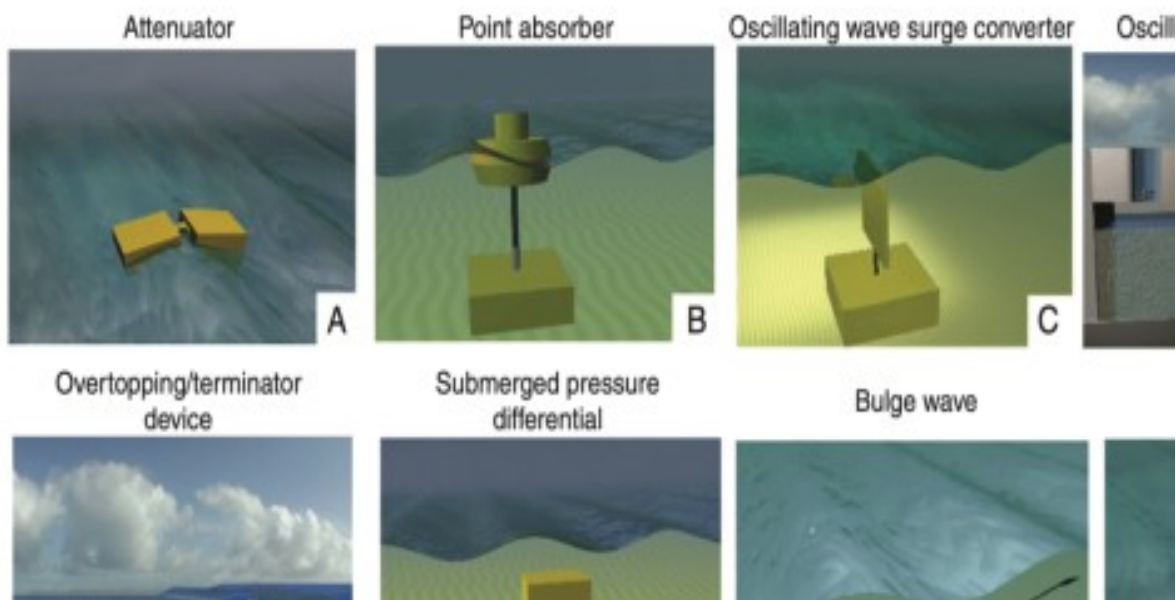
Οι στήλες ταλαντευόμενου νερού (OWC) χρησιμοποιούν την αλλαγή της στάθμης του νερού λόγω των κυμάτων μέσα σε ένα θάλαμο για να μετακινήσουν τον αέρα σε ενεργό αεροστρόβιλο. Το φαινόμενο του Αρχιμήδη λαμβάνει υπόψη την αλλαγή της πίεσης στις συσκευές που προκαλείται από τα κύματα. Τα πλευστικά σώματα με σταθερή και κινητή αναφορά εκμεταλλεύονται τη σχετική κίνηση μεταξύ δύο τμημάτων της συσκευής. Οι συσκευές υπέρβασης του κύματος εκμεταλλεύονται το



νερό που περνά πάνω από το ύψος εξάλων της κατασκευής. Οι συσκευές κρούσης μετακινούνται λόγω της δράσης των κυμάτων.

Υπάρχουν άλλες ταξινομήσεις που λαμβάνουν υπόψη το συνδυασμό των προαναφερθέντων κριτηρίων, όπως για παράδειγμα οι παρακάτω όπου πραγματοποιείται διάκριση ως εξής [27]:

- Εξασθενητής
- Απορροφητής σημείων
- Μετατροπέας κύματος ταλάντωσης
- Στήλη ταλαντευόμενου νερού
- Συσκευή υπέρβασης/τερματιστή
- Βυθισμένο διαφορικό πίεσης
- Κύμα διόγκωσης
- Περιστρεφόμενη μάζα
- Άλλα



Εικόνα 2.3: Κύριες κατηγορίες WEC [27]



Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά WEC και η κατανομή μεταξύ των τύπων σύμφωνα με την ταξινόμηση EMEC⁵ είναι η ακόλουθη: 40% είναι σημειακοί απορροφητές (B), 23% είναι εξασθενητές (A), 19% είναι ταλαντευόμενοι μηχανισμοί κυμάτων (C), το 7% είναι ταλαντευόμενες στήλες νερού (D), το 7% είναι περιστρεφόμενες μάζες (H), το 1% είναι μηχανισμοί κυμάτων διόγκωσης (G) το 3% είναι υπέρβασης (E) και άλλα (I).

Όλα τα WEC που αποτελούνται από ταλαντευόμενα σώματα εντάσσονται σε μία κατηγορία. Αυτή η κατηγορία ονομάζεται «WaveActivatedBodies» (WAB). Για την περαιτέρω κατηγοριοποίηση των WEC σε ένα επίπεδο, έχουν παρασχεθεί κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τον τρόπο κατηγοριοποίησης των WEC ανά τα υποσυστήματα. Το WEC σε αυτήν την περίπτωση χωρίζεται στα ακόλουθα υποσυστήματα, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να κατηγοριοποιηθούν μεμονωμένα:

- Εξόρυξης πρωτογενούς ενέργειας
- Συστήματος ελέγχου ισχύος
- Συστήματος αντίδρασης

Η ιδέα για επιπρόσθετη λεπτομερή κατηγοριοποίηση και ανάλυση ενός WEC αναπτύσσεται περαιτέρω από τους Hamedni B. (2014) et al. Μέσα από αυτό παρέχεται μια γενική ανάλυση του συστήματος η οποία καθίσταται χρήσιμη ως βάση μιας γενικής κατάταξης του κινδύνου και της ανάλυσης της αστοχίας.

2.3.2 Παραδείγματα διαφόρων τύπων WEC.

Υπάρχει ένας αριθμός WEC με βάση την ακτή όπως οι (σταθερές) ταλαντευόμενες στήλες νερού (OWC) που λειτουργούν στο Islay στη Σκωτία (που διαχειρίζεται η WaveGen), το εργοστάσιο Pico στις Αζόρες στην Πορτογαλία (Εικόνα 2.4: *Συσκευές ταλαντούμενης στήλης νερού. (α) Η επιχειρησιακή αρχή του εργοστασίου PicoOWC. (β) Εργοστάσιο Pico στις Αζόρες. (γ) OceanEnergyLtdsOEOWC[28]*), το λιμάνι Mutriku στην Ισπανία (Εικόνα 2.5: *Εργοστάσιο κυματικής ενέργειας Mutriku, Ισπανία[29]*) και το λιμάνι Sagata στην Ιαπωνία.

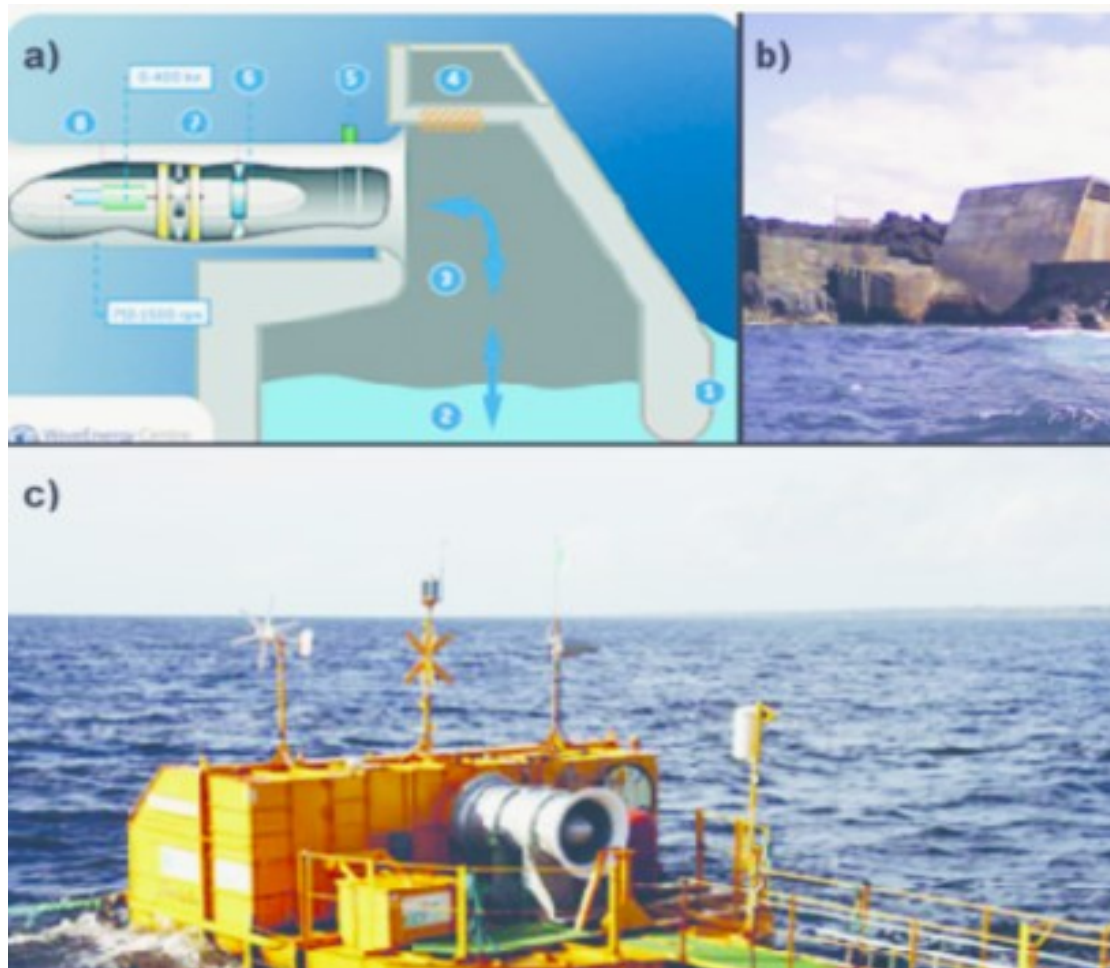
Η μονοκατευθυντική περιστροφή του αεροστρόβιλου (τύπου Wells) είναι ένας απλός τρόπος για να διορθωθεί η αμφίδρομη ροή και έτσι να μετατραπεί η ταλαντευόμενη ισχύς από τα κύματα (λόγω του γεγονότος ότι η ανάγκη για βαλβίδες ελέγχου μπορεί να παραλειφθεί και η δομή να κατασκευαστεί με λιγότερα κινούμενα μέρη).

Το «LeanCon» WEC είναι αιωρούμενο και επίσης βασίζεται στην έννοια των ταλαντευόμενων στηλών νερού (Εικόνα 2.6: *Ταλαντευόμενης στήλης νερού LeanCon*). Είναι μια μεγάλη κατασκευή που καλύπτει περισσότερα από ένα μήκη κύματος και αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό τμημάτων OWC. Αυτό συνεπάγεται ότι η κατακόρυφη δύναμη που προκύπτει στο WEC είναι περιορισμένη. Οι δυνάμεις προς τα κάτω από την αρνητική πίεση σε μέρη του WEC το εμποδίζουν να επιπλέει επάνω στην κορυφή των κυμάτων και λόγω αυτού η συσκευή μπορεί να έχει χαμηλό βάρος (κατασκευασμένη από υλικό ενισχυμένο με ίνες υψηλής αντοχής). Η ροή του

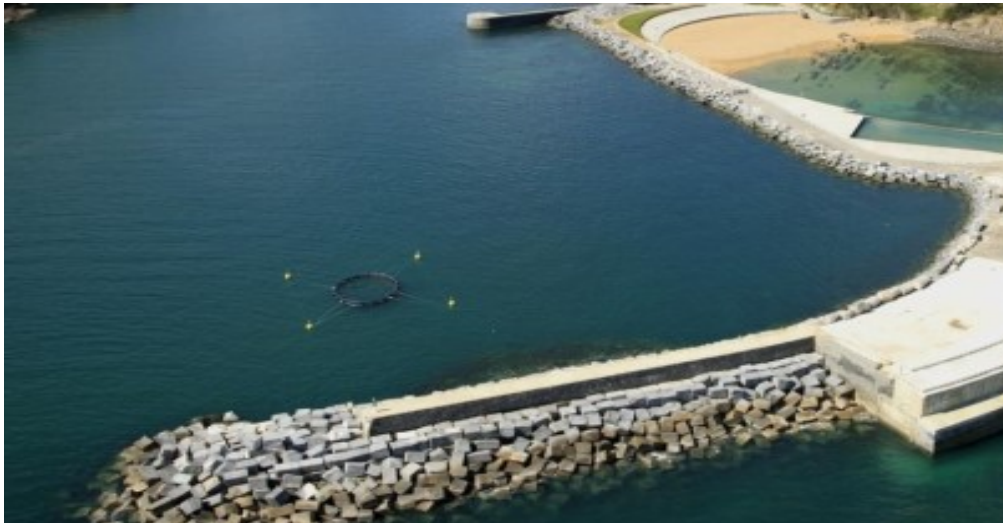
⁵Το EMEC αποτελεί το Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας



αέρα διορθώνεται από τις βαλβίδες αντεπιστροφής πριν φτάσει στο σύστημα ΡΤΟ. Έτσι, το LeanCon χρησιμοποιεί αεροστρόβιλο μονής κατεύθυνσης, ενώ τα περισσότερα άλλα OWC χρησιμοποιούν στροβίλους Wells.



Εικόνα 2.4: Συσκευές ταλαντούμενης στήλης νερού. (α) Η επιχειρησιακή αρχή του εργοστασίου Pico OWC. (β) Εργοστάσιο Pico στις Αζόρες. (γ) OceanEnergyLtds OWC [28]



Εικόνα 2.5: Εργοστάσιο κυματικής ενέργειας Mutriku, Ισπανία[29]



Εικόνα 2.6: Ταλαντευόμενη στήλη νερού LeanCon[30]

Η κατηγορία των σωμάτων που ενεργοποιούνται με κύμα (WAB) περιλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο πεδίο των WEC. Γενικότερα τα WEC αυτής της κατηγορίας μπορούν να μετρηθούν σε εκατοντάδες.

Το WEC «Pelamis» είναι μια πλωτή συσκευή, που αποτελείται από πέντε τμήματα σωλήνα που συνδέονται με γενικούς συνδέσμους που επιτρέπουν την κάμψη προς δύο κατευθύνσεις (Εικόνα 2.7: WEC Pelamis για μετατροπή της κυματικής ενέργειας). Το WEC επιπλέει ημι-βυθισμένο στην επιφάνεια του νερού και εγγενώς βρίσκεται προς την κατεύθυνση των κυμάτων και διατηρείται στη θέση του από ένα σύστημα πρόσδεσης. Καθώς τα κύματα διαπερνούν το μήκος της μηχανής και τα τμήματα κάμπτονται στο νερό, η κίνηση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδραυλικών

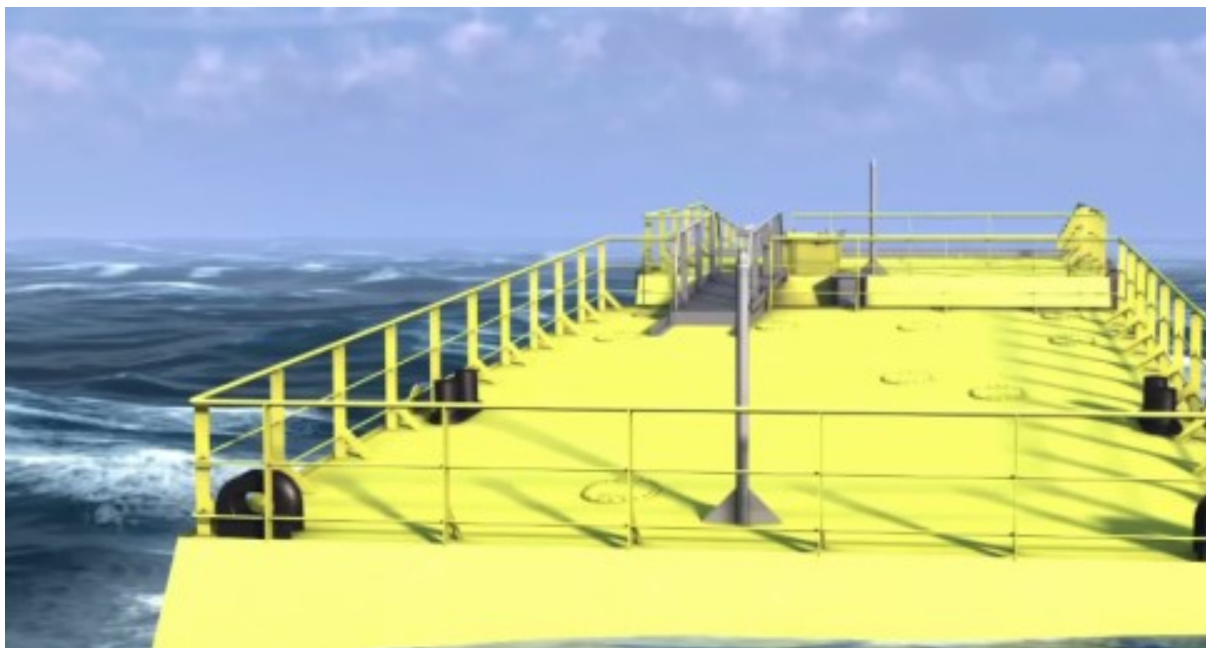


συστημάτων ισχύος που βρίσκονται μέσα σε κάθε σύνδεσμο των σωλήνων του μηχανήματος και η ισχύς μεταδίδεται στην ακτή χρησιμοποιώντας τυπικά υποθαλάσσια καλώδια και εξοπλισμό.

Παρομοίως με το Pelamis, το «Crestwing» αποτελεί μια αγκυροβολημένη συσκευή που χρησιμοποιεί τη σχετική κίνηση μεταξύ των σωμάτων που ενεργοποιούνται από το κύμα (Εικόνα 2.8: *WEC Crestwing για μετατροπή της κυματικής ενέργειας*[32]). Ενώ, το Pelamis συλλέγει την ενέργεια με 2 βαθμούς ελευθερίας (DOF) σε συνολικά 4 συνδέσμους, το Crestwing χρησιμοποιεί απλώς ένα μόνο DOF για την παραγωγή της ενέργειας. Οι αρθρωτές σχεδίες του Crestwing είναι δομές κλειστού κιβωτίου. Το ΡΤΟ του Crestwing είναι ένα μηχανικό σύστημα που χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό κασάνιας και ένα βολάν για τη μετατροπή της ταλαντευτικής κίνησης μεταξύ των σχεδίων σε μια περιστροφική κίνηση σε έναν άξονα, η οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί σε ένα σύστημα γριναζιών και γεννήτριας. Διάφορα άλλα παρόμοια WEC πλωτών σωμάτων αποτελούν τα «Dexa», «Martifer», «MacCabe Wave Pump» και το «Cockerell Raft».

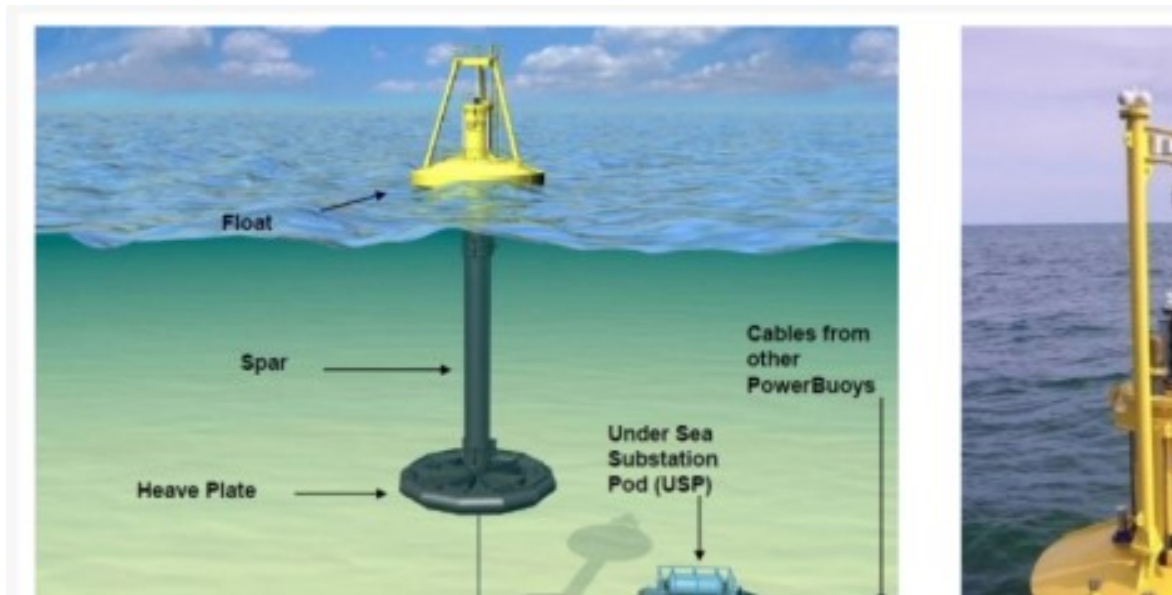


Εικόνα 2.7: *WEC Pelamis για μετατροπή της κυματικής ενέργειας*[31]



Εικόνα 2.8: WECCrestwing για μετατροπή της κυματικής ενέργειας[32]

Μια άλλη ομάδα πλωτών WAB περιλαμβάνει τα ανυψωτικά σώματα. Αυτό περιλαμβάνει τις συσκευές «OceanPower Technologies» (OPT) (Εικόνα 2.9: Αρχή λειτουργίας και εξωτερική όψη του PowerBuoy). Αυτή η τεχνολογία αποτελεί μία από τις πολλές τεχνολογίες που χρησιμοποιούν απορροφητή σημείων[33]. Στα OPT έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές λύσεις για PTO, συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών λαδιών. Σχετικά με τα OPT υπάρχει μια σειρά από έργα ανάπτυξης και έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές στη θάλασσα χρησιμοποιώντας διαφορετικές εκδόσεις όπως αυτές των 40 kW και των 150 kW. Άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν παρόμοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν το «Wavebob» (Εικόνα 2.10: WavebobWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[34]) και το «SeaBased» όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11: SeabasedWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[35] (χρησιμοποιώντας ένα σταθερό σημείο αναφοράς στον πυθμένα της θάλασσας, όπου επίσης τοποθετείται το PTO).



Εικόνα 2.9: Αρχή λειτουργίας και εξωτερική όψη του PowerBuoy



Εικόνα 2.10: WavebobWECγια τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[34]



Εικόνα 2.11: SeabasedWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[35]

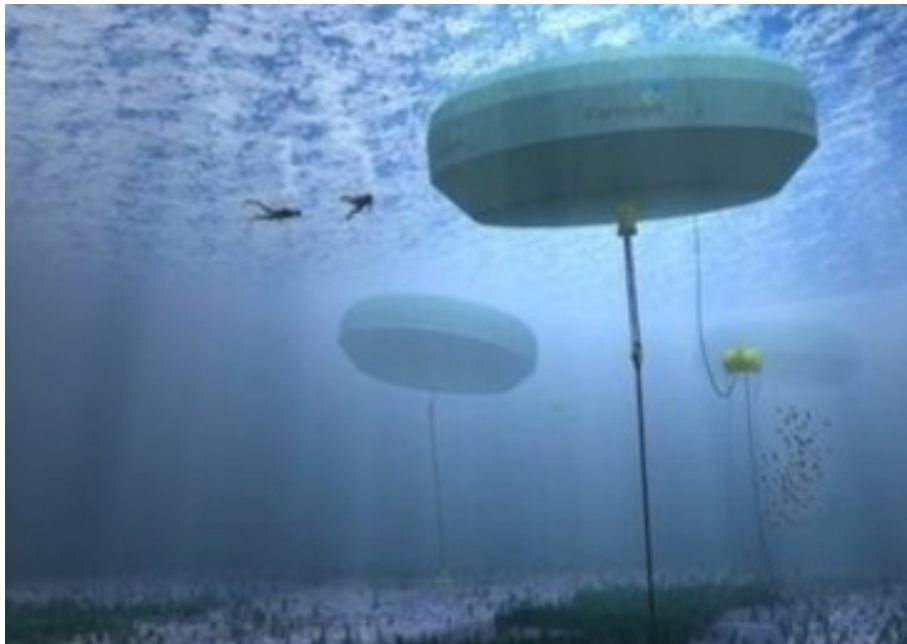
Υπάρχουν επίσης και άλλοι τύποι απορρόφησης σημείων, όπως το FredOlsensLifesaver, το οποίο χρησιμοποιεί την ανύψωση αλλά και την περιστροφή, καθώς αποτελείται από ένα δακτύλιο που συνδέεται με το βυθό της θάλασσας μέσω βαρούλκων με ενσωματωμένα PTO (Εικόνα 2.12: FredOlsensLifesaverWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων).



Εικόνα 2.12: FredOlsensLifesaverWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[36]



Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί το WAB Carnegies CETO (βυθισμένη σημαδούρα). Στη συσκευή CETO, η ίδια η σημαδούρα είναι πλήρως βυθισμένη και διατηρείται στη θέση της μέσω μιας πρόσδεσης στερεωμένης στον πυθμένα της θάλασσας και με μια υδραυλική αντλία που βασίζεται σε PTO (Εικόνα 2.13: WAB Carnegies CETO στο βυθό [37], Εικόνα 2.14: WAB Carnegies CETO πριν την τοποθέτηση [38]).



Εικόνα 2.13: WAB Carnegies CETO στο βυθό [37]

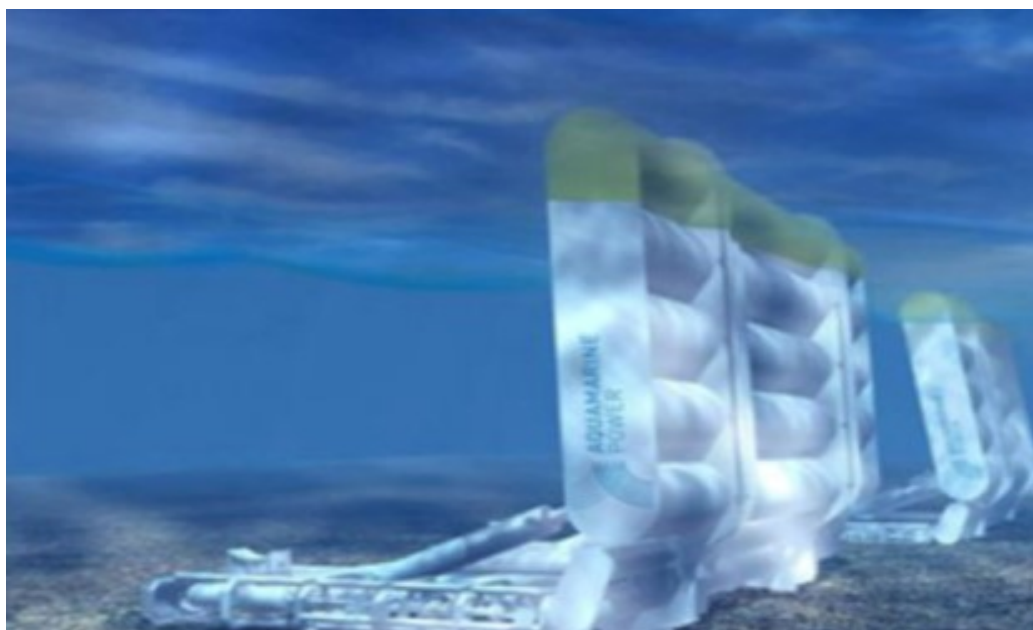


Εικόνα 2.14: WAB Carnegies CETO πριν την τοποθέτηση [38]

Εκτός από τα παραπάνω, μπορεί να αναφερθεί μια άλλη ομάδα σταθερών WAB που αποτελούνται από βυθισμένα πτερύγια που αρθρώνονται στο βυθό της θάλασσας.



Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει το «Oyster», που αναπτύχθηκε από την Aquamarine (Εικόνα 2.15: *OysterWEC* για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων). Το πτερύγιο μετακινείται εμπρός και πίσω από τα κύματα και η ισχύς λαμβάνεται μέσω υδραυλικών αντλιών που είναι τοποθετημένες μεταξύ του πτερυγίου και της κατασκευής που είναι καρφωμένη στον πυθμένα της θάλασσας. Το Oyster 800 τελευταίας γενιάς έχει εγκατεστημένη ισχύ 800 kW. Επίσης, έχει πλάτος 26 μ. και ύψος 12 μ. Το συγκεκριμένο WEC έχει ήδη εγκατασταθεί σε βάθος νερού 13 μ. περίπου, 500 μέτρα από την ακτή του Orkney στο EMEC.

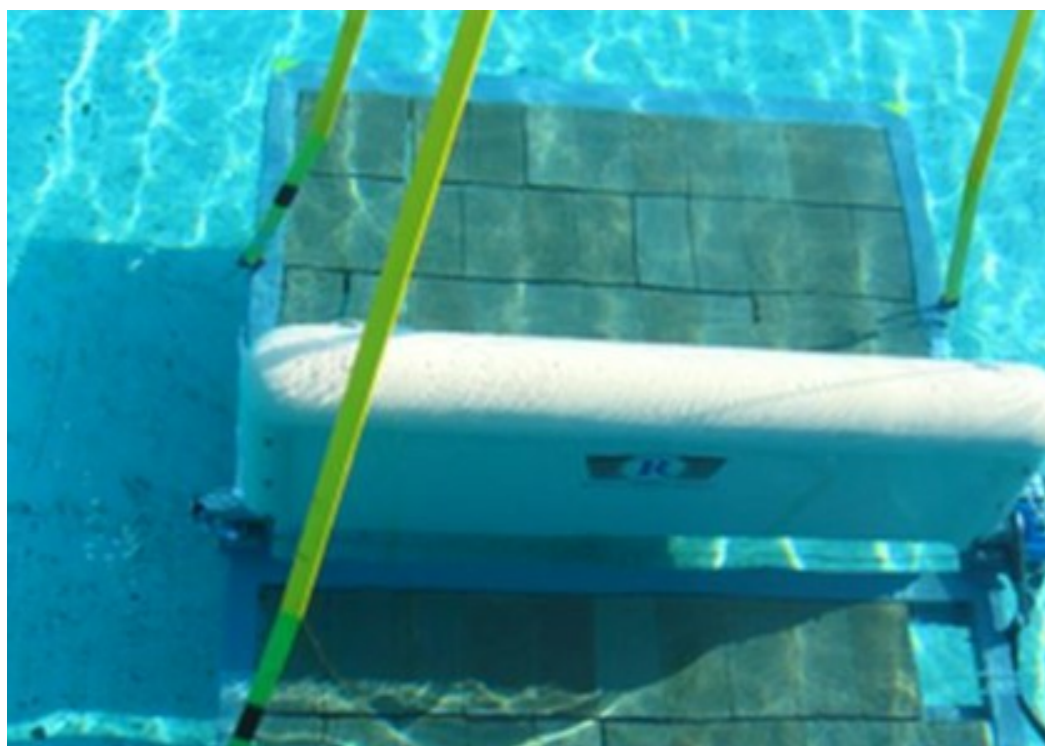


Εικόνα 2.15: *OysterWEC* για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[39]

Άλλα σχετικά WEC που χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές λειτουργίας αποτελούν το «Waveroller» (Εικόνα 2.16: *WaverollerWEC* για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων), το «ResoluteMarine Energy» (Εικόνα 2.17: *ResoluteMarine Energy WEC* για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [41]) και το «Langlee» (Εικόνα 2.18: *LangleeWEC* για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]). Ωστόσο, το τελευταίο δεν είναι στερεωμένο στον πυθμένα της θάλασσας, αλλά αποτελείται από μια κατασκευή με δύο πτερύγια προσαρτημένα σε ένα πλωτό πλαίσιο.



Εικόνα 2.16: WaverollerWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[40]



Εικόνα 2.17: ResoluteMarine Energy WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [41]



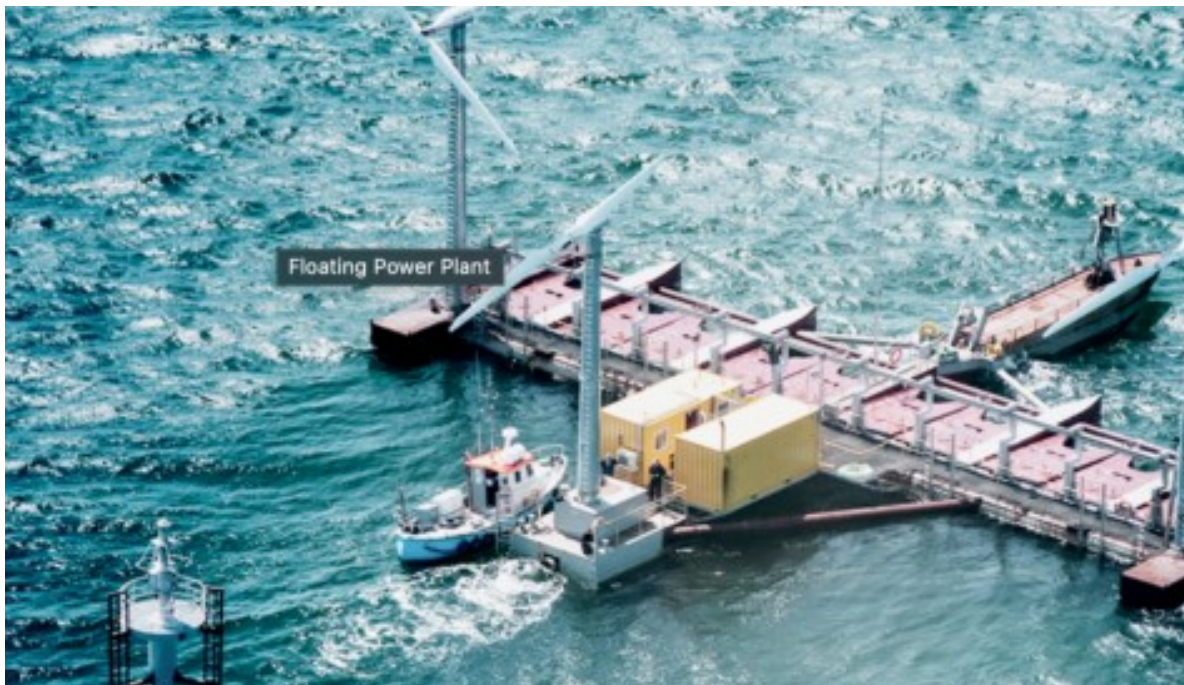
Εικόνα 2.18: LangleeWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]

Εκτός από τα προαναφερθέντα WEC στην κατηγορία WAB, υπάρχει επίσης ένας αριθμός συσκευών όπου συνδυάζονται πολλαπλά σώματα σε μια μεγαλύτερη δομή. Ένα παράδειγμα αποτελεί η συσκευή «Wavestar», η οποία αποτελείται από δύο σειρές στρογγυλών πλωτήρων και σημειακών απορροφητών που βρίσκονται προσαρτημένοι σε μια κατασκευή γέφυρας, στερεωμένη στον πυθμένα της θάλασσας (με τη χρήση χαλύβδινων πασσάλων, οι οποίοι χυτεύονται σε θεμέλια από σκυρόδεμα) Αυτός ο τύπος WEC αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.19: *WavestarWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]*. Όλα τα κινούμενα μέρη βρίσκονται πάνω από το κανονικό επίπεδο του θαλασσινού νερού. Η συσκευή εγκαθίσταται με τη δομική γέφυρα να υποστηρίζει τους πλωτήρες κατευθυνόμενους προς την κυρίαρχη κατεύθυνση του κύματος. Όταν το κύμα περνά, οι πλωτήρες κινούνται πάνω και κάτω οδηγούμενοι από τα διερχόμενα κύματα, αντλώντας έτσι το υδραυλικό υγρό σε ένα κοινό υδραυλικό σύστημα που παράγει μια ροή λαδιού υψηλής πίεσης σε έναν υδραυλικό κινητήρα. Αυτός ο κινητήρας έπειτα οδηγεί μια ηλεκτρική γεννήτρια.

Μια άλλη συσκευή πολλαπλών σωμάτων είναι η πλωτή μονάδα παραγωγής ενέργειας (Εικόνα 2.20: *Πλωτή μονάδα παραγωγής ενέργειας WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων*). Αυτή η συσκευή είναι μια αγκυροβολημένη κατασκευή που χρησιμοποιεί πολλαπλά WAB ευθυγραμμισμένα παράλληλα με τις κορυφές των κυμάτων. Έτσι, η αρχή λειτουργίας τους μοιάζει σε κάποιο βαθμό με το «Wavestar», εκτός από το ότι η δομή αναφοράς εδώ είναι αιωρούμενη και δεν είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος. Επιπλέον, η πλωτή κατασκευή χρησιμοποιείται ως πλωτή βάση και για ανεμογεννήτριες.



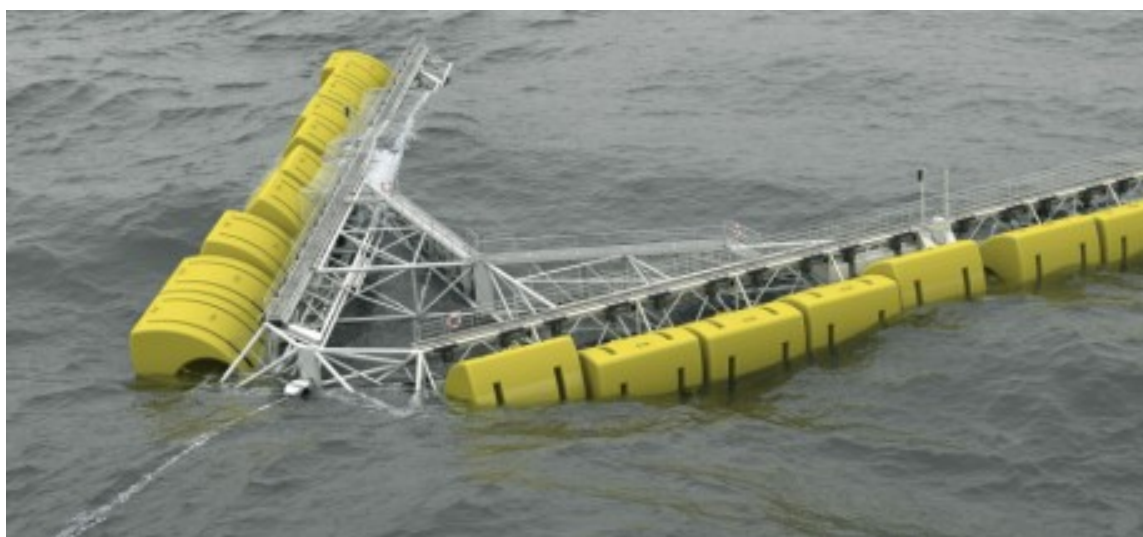
Εικόνα 2.19: WavestarWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων [42]



Εικόνα 2.20: Πλωτή μονάδα παραγωγής ενέργειας WEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων[43]



Το Weptos WEC είναι μια άλλη πλωτή κατασκευή, που αποτελείται από δύο συμμετρικά πλαίσια («πόδια») που υποστηρίζουν ένα πλήθος από είκοσι πανομοιότυπους ρότορες (Εικόνα 2.21: *WeptosWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων*). Το σχήμα από αυτούς τους ρότορες βασίζεται στο σχήμα της πάτιας WEC του Salter (που εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε από το 1974)[44]. Όλοι οι ρότορες στο ένα πόδι συνδέονται στο ίδιο πλαίσιο και κινούν έναν κοινό άξονα. Κάθε άξονας συνδέεται με ένα ανεξάρτητο ΡΤΟ. Η ροπή που προκύπτει από την περιστροφική κίνηση από τους ρότορες γύρω από τον άξονα, μεταδίδεται μέσω μονόδρομων ρουλεμάν στην κίνηση του ρότορα προς τα πάνω και προς τα κάτω. Η γωνία μεταξύ των δύο κύριων ποδιών είναι προσαρμόσιμη. Αυτό επιτρέπει στη συσκευή να προσαρμόζει τη διαμόρφωσή της σε σχέση με τις συνθήκες του κύματος, αυξάνοντας το πλάτος της σε σχέση με το μέτωπο του εισερχόμενου κύματος και μειώνοντας παράλληλα την αλληλεπίδρασή της με την υπερβολική ισχύ των κυμάτων σε ακραίες συνθήκες.



Εικόνα 2.21: *WeptosWEC για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων*[45]

Το «WaveDragon» είναι ένα αγκυροβολημένο WEC που χρησιμοποιεί την αρχή της υπέρβασης (Εικόνα 2.22: Πρωτότυπο WaveDragonWEC που δείχνει ένα κωνικό κανάλι και *ράμπα* [46]). Η δομή του αποτελείται από μια πλωτή πλατφόρμα με μια ενσωματωμένη δεξαμενή και μια ράμπα. Τα κύματα ξεπερνούν τη ράμπα και εισέρχονται στη δεξαμενή, όπου το νερό αποθηκεύεται προσωρινά προτού οδηγηθεί πίσω στη θάλασσα, μέσω υδροστροβίλων που παράγουν ισχύ στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούν την κεφαλή που προκύπτει στη δεξαμενή. Επιπλέον, η πλατφόρμα είναι εξοπλισμένη με δύο ανακλαστήρες που εστιάζουν τα εισερχόμενα κύματα προς τη ράμπα, γεγονός που ενισχύει την ικανότητα παραγωγής της ενέργειας.

Υπάρχουν επίσης και άλλες προσεγγίσεις που βασίζονται στην υπέρβαση, συμπεριλαμβανομένου του «SSG», το οποίο αποτελεί μια σταθερή δομή που λειτουργεί ως συνδυασμός ενός WEC και ενός κυματοθραύστη (Εικόνα 2.24: *Αναπαράσταση ενός SSG WEC 3 επιπέδων με στρόβιλο πολλαπλών σταδίων*[48]). Προκειμένου να εξακολουθεί να είναι σε θέση να συλλέγει την ισχύ του κύματος με καλή απόδοση,



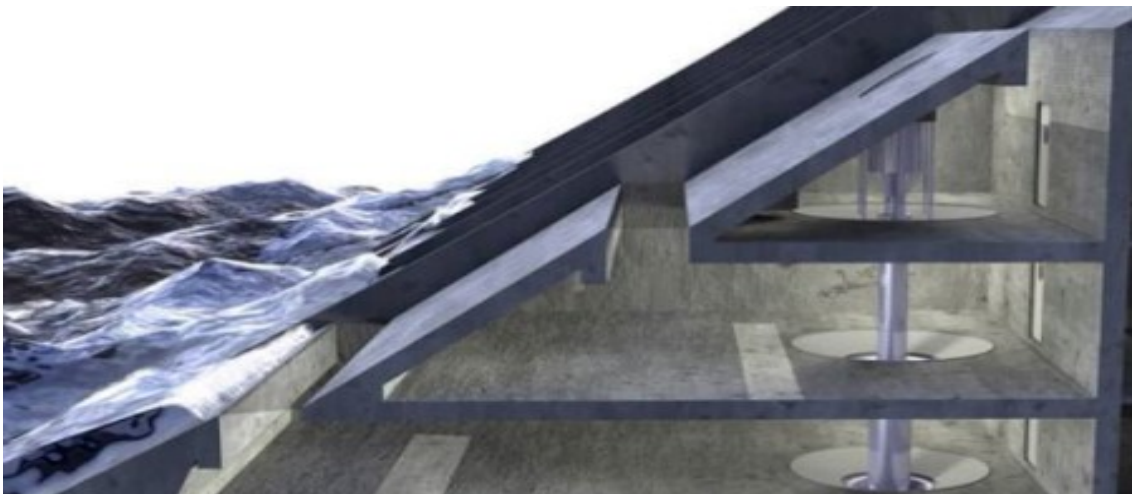
χωρίς να έχει την επιλογή της ρύθμισης του ύψους της ράμπας μέσω του πλωτού επιπέδου, το SSG αποτελείται από πολλαπλές δεξαμενές με διαφορετικά ύψη.



Εικόνα 2.22: Πρωτότυπο Wave Dragon WEC που δείχνει ένα κωνικό κανάλι και ράμπα [46]



Εικόνα 2.23: Σχέδιο λειτουργίας του Wave Dragon WEC [47]



Εικόνα 2.24: Αναπαράσταση ενός SSG WEC 3 επιπέδων με στρόβιλο πολλαπλών σταδίων [48]



3. Υδροδυναμική και μηχανισμοί πρόσδεσης για τα συστήματα μετατροπής της κυματικής ενέργειας.

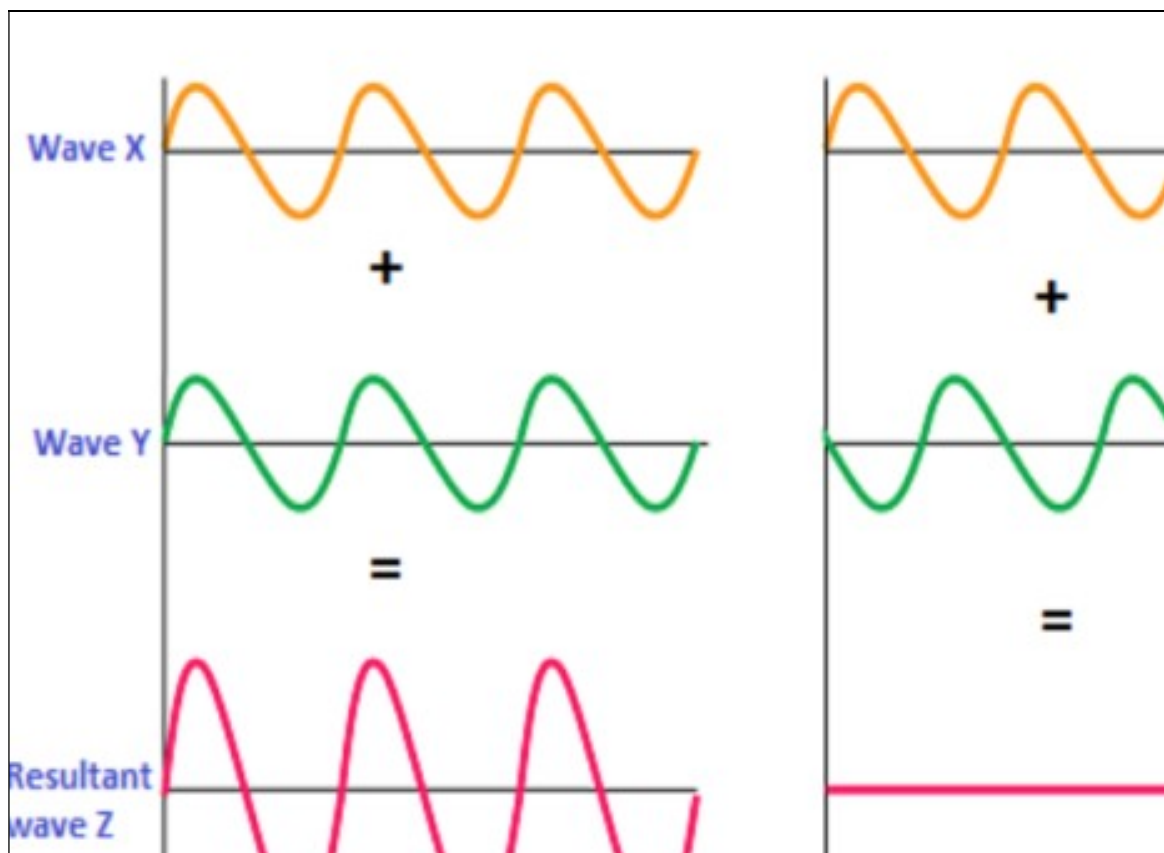
Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται οι θεμελιώδεις αρχές της απορρόφησης των κυμάτων και των δυνάμεων στα επιπλέοντα σώματα. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι κύριες φυσικές επιπτώσεις που εμπλέκονται κατά την προσπάθεια εξαγωγής της ενέργειας από τα κύματα του ωκεανού.

3.1 Η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας ως κυματική παρεμβολή.

Ένα κύμα που ταξιδεύει σε μια ανοιχτή ωκεάνια περιοχή μεταφέρει ένα ορισμένο ποσό ισχύος. Ένας απορροφητής της ενέργειας του κύματος σε αυτή την περιοχή απορροφά μέρος της ενέργειας του ίδιου του προσπίπτοντος κύματος. Εάν υπάρχει λιγότερη ενέργεια που ταξιδεύει στον ωκεανό μετά από την τοποθέτηση αυτής της συσκευής της κυματικής ενέργειας σημαίνει ότι η συσκευή έχει απορροφήσει ενέργεια.

Η απορρόφηση της ενέργειας από τα κύματα στον ωκεανό ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές με την απορρόφηση άλλων τύπων κυμάτων όπως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (π.χ. ραδιόφωνο και τηλεπικοινωνίες) και ο ήχος. Η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας θα πρέπει πρωτίστως να γίνει κατανοητή ως παρεμβολή κυμάτων. Για να απορροφήσει ένα κύμα, η συσκευή της κυματικής ενέργειας πρέπει να δημιουργήσει ένα «αντικύμα» για να παρεμβαίνει στο προσπίπτον κύμα. Εάν η παρεμβολή λειτουργεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το κύμα στον ωκεανό να μειωθεί, η κυματική ενέργεια απορροφάται από τη συσκευή.

Η Εικόνα 3.1: *Απορρόφηση κυματικής ενέργειας ως παρεμβολή κυμάτων [49]* δείχνει πώς λειτουργεί το φαινόμενο της κυματικής παρεμβολής. Ένα κύμα μπορεί να ακυρωθεί με τη σωστή δημιουργία κυμάτων. Προκειμένου να επιτευχθεί ακύρωση με καταστροφική παρεμβολή μεταξύ του ανακλώμενου και του παραγόμενου κύματος, είναι σημαντικό να επιλεγούν σωστά τόσο η φάση (χρονισμός) όσο και το πλάτος (ισχύς) του παραγόμενου κύματος. Αυτό είναι κρίσιμο για οποιαδήποτε συσκευή κυματικής ενέργειας, αλλά η φάση και το πλάτος μπορεί να μην είναι πάντα εύκολα ελεγχόμενα.



Εικόνα 3.1: Απορρόφηση κυματικής ενέργειας ως παρεμβολή κυμάτων [49]

3.2 Υδροστατική, πλευστότητα και σταθερότητα.

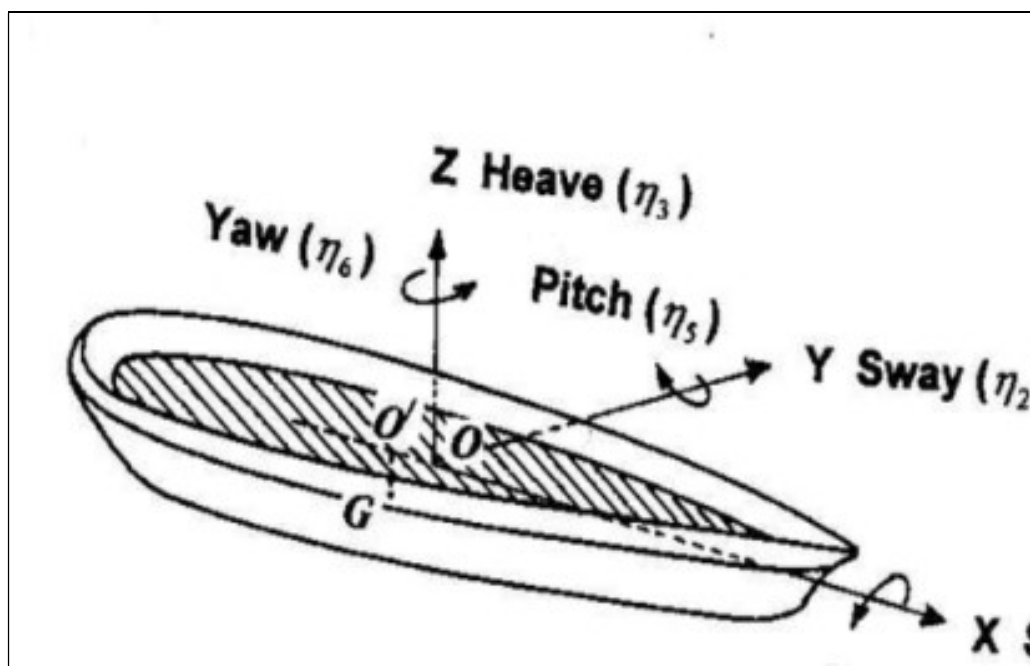
Οι κινήσεις του άκαμπτου σώματος συνήθως αποσυντίθενται σε έξι τμήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2: Ορισμός συστήματος κίνησης και συντεταγμένων ενός πλωτού σώματος [50]. Αυτά τα τμήματα είναι το κύμα (surge), ταλάντευση (sway), ηάνωση (heave), η περιστροφή (roll), το βήμα⁶ (pitch) και η εκτροπή (yaw).

Για να επιπλέει σταθερά, ένα πλωτό σώμα πρέπει να έχει αρκετά μεγάλο όγκο σε σύγκριση με τη μάζα και να είναι υδροστατικά σταθερό για περιστροφές. Είναι υδροστατικά σταθερό εάν το άθροισμα της δύναμης της βαρύτητας και της δύναμης της άνωσης δίνει μια θετική ροπή ανόρθωσης (μια ροπή που λειτουργεί για να επαναφέρει το σώμα σε υδροστατική ισορροπία σε περίπτωση διαταραχών).

Η σταθερότητα μπορεί να χαρακτηριστεί από μια καμπύλη (GZ), η οποία δίνει τη ροπή ως συνάρτηση της γωνίας κλίσης α . Η δύναμη της άνωσης σε ένα μερικώς ή πλήρως βυθισμένο σώμα βρίσκεται ως

$$F_b = \rho g \nabla \quad (4.1)$$

⁶ Το βήμα περιγράφει την άνω και κάτω κίνηση ενός πλευστού σώματος. Στην περίπτωση για παράδειγμα των πλοίων, αυτό χαρακτηρίζεται από την άνοδο και την πτώση της πλώρης και της πρύμνης.



Εικόνα 3.2: Ορισμός συστήματος κίνησης και συντεταγμένων ενός πλωτού σώματος [50]

Όπου F_b είναι το γινόμενο της πυκνότητας του νερού ρ , της επιτάχυνσης της βαρύτητας g και του βυθισμένου όγκου V . Το κέντρο της άνωσης βρίσκεται στο κέντρο του βυθισμένου όγκου.

Για μικρές γωνίες κλίσης, η ροπή της άνωσης εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- Την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου μάζας και του κέντρου άνωσης
- Την υδάτινη περιοχή (τόσο το μέγεθος όσο και η κατανομή της)

Αυτό σημαίνει ότι ένα πλωτό σώμα μπορεί να γίνει πιο σταθερό είτε χαμηλώνοντας το κέντρο μάζας, ανυψώνοντας το κέντρο άνωσης, είτε αυξάνοντας την επιφάνεια του υδάτινου επιπέδου. Αυτό θα αυξήσει την κλίση της καμπύλης (GZ) σε γωνία κλίσης $\alpha = 0$. Αυτή η κλίση καθορίζει το συντελεστή της υδροστατικής ακαμψίας για περιστροφή σε βήμα, που είναι η αύξηση της ροπής της άνωσης ανά αλλαγή στη γωνία κλίσης.

3.3 Υδροδυναμικές δυνάμεις και κινήσεις του σώματος

Η υδροδυναμική είναι η θεωρία σχετικά με τις δυνάμεις και την κίνηση σταθερών και αιωρούμενων σωμάτων σε κινούμενα ρευστά. Ένας μετατροπέας της κυματικής ενέργειας συνήθως αντιμετωπίζει τα ακόλουθα εξωτερικά φορτία:

- Βαρύτητα



- Πλευστότητα
- Διέγερση από τα προσπίπτοντα και περίθλαστα κύματα
- Κυματική ακτινοβολία (δυνάμεις λόγω παραγόμενων κυμάτων)
- Δυνάμεις μηχανημάτων (δύναμη ΡΤΟ συμπεριλαμβανομένης της τριβής)
- Τριβή
- Δυνάμεις μετατόπισης των κυμάτων
- Τρέχουσες δυνάμεις
- Δυνάμεις πρόσδεσης

Η αδράνειά του καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το πλωτό σώμα ανταποκρίνεται σε αυτά τα φορτία. Οι πιο σημαντικές δυνάμεις από το ρευστό είναι οι δυνάμεις της πίεσης που προκύπτουν λόγω των προσπίπτων κυμάτων και των κινήσεων του σώματος. Αποτελεί συνήθη πρακτική η διαίρεση αυτών των δυνάμεων πίεσης σε δυνάμεις διέγερσης και ακτινοβολίας με βάση μια γραμμική (και επομένως απλοποιημένη) περιγραφή του προβλήματος. Η τριβή μπορεί συνήθως να παραμεληθεί σε προβλήματα της κυματικής ενέργειας.

Διατηρώντας τις δυνάμεις έλξης μακριά, οι δυνάμεις διέγερσης είναι αυτές που αισθάνεται το σώμα ως προς τα εισερχόμενα κύματα, ενώ οι δυνάμεις της ακτινοβολίας είναι εκείνες που αισθάνεται το σώμα όταν κινείται σε κατά τα άλλα ήρεμο νερό.

Η δύναμη της διέγερσης βρίσκεται από την υδροδυναμική πίεση στο άθροισμα των προσπίπτων και των σκεδαζόμενων κυμάτων. Εάν το σώμα είναι μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος, η σκέδαση μπορεί μερικές φορές να παραμεληθεί, έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί μια πρόχειρη προσέγγιση της δύναμης διέγερσης, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την πίεση στο αδιατάρακτο προσπίπτον κύμα. Μια βελτιωμένη προσέγγιση μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της λεγόμενης προσέγγισης μικρού σώματος, ή μιας άλλης προσέγγισης, που περιλαμβάνει μια απλοποιημένη αναπαράσταση της δύναμης που παράγεται από τη σκέδαση του κύματος.

Οι δυνάμεις που προκύπτουν από τις κινήσεις του σώματος αναφέρονται συνήθως ως δυνάμεις ακτινοβολίας. Είναι σύνηθες αυτές οι δυνάμεις να διαιρούνται σε δυνάμεις προστιθέμενης μάζας, ανάλογες με την επιτάχυνση του σώματος, και δυνάμεις απόσβεσης των κυμάτων, ανάλογες με την ταχύτητα του σώματος. Η απόσβεση των κυμάτων μπορεί επίσης να αναφέρεται ως αντίσταση της ακτινοβολίας.

Φυσικά, η προστιθέμενη δύναμη της μάζας μπορεί να απεικονιστεί ως δύναμη της αδράνειας που σχετίζεται με τη μάζα του νερού που παρασύρεται με την κίνηση του



σώματος. Επιπλέον η ποσότητα του νερού δεν είναι σταθερή. Όλο το νερό επηρεάζεται από την κίνηση ενός πλωτού σώματος. Ο προστιθέμενος συντελεστής μάζας είναι μάλλον μια ισοδύναμη ποσότητα που δείχνει πόσο μεγάλη γίνεται η δύναμη της αδράνειας του ρευστού όταν το σώμα επιταχύνεται. Όταν υπολογίζεται ο μέσος όρος με την πάροδο του χρόνου, δεν υπάρχει καθαρή ροή ισχύος μεταξύ του σώματος και του ρευστού λόγω της προστιθέμενης δύναμης της μάζας.

Η δύναμη της αντίστασης στην ακτινοβολία (ή απόσβεσης των κυμάτων), από την άλλη πλευρά, συνδέεται στενά με τη μέση ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ της θάλασσας και του σώματος. Αυτή η δύναμη προκύπτει λόγω των εξερχόμενων κυμάτων που δημιουργούνται όταν το σώμα κινείται. Ο συντελεστής αντίστασης της ακτινοβολίας δείχνει πόσο μεγάλα θα είναι τα κύματα. Καθώς αυτά είναι τα κύματα που παρεμβαίνουν στα εισερχόμενα κύματα, η αντίσταση της ακτινοβολίας δείχνει επίσης έμμεσα πόση δύναμη μπορεί να εξαχθεί από τα εισερχόμενα κύματα. Αυτό καθιστά την αντίσταση στην ακτινοβολία μια πολύ σημαντική παράμετρο για την εξαγωγή της κυματικής ενέργειας.

Δυστυχώς, στην υδροδυναμική, τόσο ο προστιθέμενος συντελεστής μάζας όσο και ο συντελεστής αντίστασης της ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη συχνότητα της ταλάντωσης. Αυτό καθιστά τόσο τη μοντελοποίηση όσο και τη βελτιστοποίηση των μετατροπών πιο απαιτητικές από ό,τι θα ήταν διαφορετικά. Οι βέλτιστες παράμετροι της συσκευής και οι ρυθμίσεις του μηχανήματος εξαρτώνται από τη συχνότητα του κύματος, η οποία μπορεί να αλλάζει συνεχώς.

Υπάρχει μια σχέση μεταξύ των δυνάμεων απόσβεσης της ακτινοβολίας και της διέγερσης, καθώς και οι δύο είναι μέτρα για το πόσο ισχυρά συνδέεται το σώμα με το κυματικό πεδίο στη θάλασσα. Ένα σώμα που είναι σε θέση να ακτινοβολεί κύματα προς μία κατεύθυνση όταν κινείται, θα βιώσει διέγερση όταν ενεργεί από προσπίπτοντα κύματα που προέρχονται από αυτή την κατεύθυνση.

Οι δυνάμεις των μηχανημάτων (PTO) είναι αυτές που διαχωρίζουν τα συστήματα μετατροπής της κυματικής ενέργειας από τις συμβατικές θαλάσσιες δομές. Υδροδυναμικά δεν έχει σημασία πώς παράγονται οι μηχανικές δυνάμεις. Η δύναμη πρέπει να εφαρμόζεται μεταξύ του σώματος που απορροφά τα κύματα και ενός στερεωμένου σώματος στην ακτή, ή στον πυθμένα της θάλασσας, ή εναλλακτικά μπορεί να ασκείται μεταξύ δύο πλωτών σωμάτων.

Μια πολύ κοινή υπόθεση είναι ότι το μηχανήμα συμπεριφέρεται σαν ένας γραμμικός αποσβεστήρας όπου η δύναμη είναι ανάλογη της ταχύτητας. Αυτό καθιστά εύκολη τη μαθηματική μοντελοποίηση, αλλά δεν υπάρχει, ωστόσο, γενικό πλεονέκτημα στην πράξη. Αυτό που έχει σημασία είναι πόσο και πότε στον κύκλο της ταλάντωσης εξάγεται ενέργεια από το μηχανικό σύστημα.

Οι ελκτικές δυνάμεις σε ένα πλωτό σώμα προέρχονται κυρίως από την απόρριψη της δίνης όταν το νερό ρέει πέρα από την επιφάνεια του σώματος, ή από τα σημεία πρόσδεσης, ή άλλα βυθισμένα μέρη του συστήματος. Ως εκ τούτου, η δύναμη της έλξης προέρχεται από την απώλεια της κινητικής ενέργειας. Γενικά, οι ελκτικές δυνάμεις αυξάνονται τετραγωνικά με τη σχετική ταχύτητα της ροής μεταξύ του σώματος και του νερού. Εάν ένας μετατροπέας της κυματικής ενέργειας είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες κατά τη λειτουργία σε



κύματα κανονικού μεγέθους, οι δυνάμεις μπορεί να εξακολουθούν να είναι σημαντικές σε καταστάσεις ανοικτής θάλασσας και καταιγίδες λόγω αυτής της τετραγωνικής σχέσης.

Η κλιμάκωση των δυνάμεων μεταξύ της κλίμακας του μοντέλου και της κλίμακας του πρωτοτύπου δεν είναι απλή. Το καθεστώς της ροής εξαρτάται από την παράμετρο της κλίμακας, έτσι ώστε η γεωμετρική κλίμακα των δυνάμεων να μπορεί να μην εφαρμόζεται απευθείας μεταξύ των πειραμάτων μικρής κλίμακας και των δοκιμών πλήρους κλίμακας. Εάν, ωστόσο, μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι δυνάμεις οφείλονται στην απόρριψη της δίνης γύρω από τις γωνίες και είναι επίσης δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με άλλα φορτία, η γεωμετρική κλίμακα μπορεί να αναμένεται να είναι μια καλή προσέγγιση για το συνολικό σύστημα.

Υπάρχουν επιπλέον δυνάμεις που συνήθως δίνουν το αποτέλεσμα μιας αργής διέγερσης και απόκρισης χαμηλής συχνότητας, δηλαδή δυνάμεις μετατόπισης των κυμάτων και δυνάμεις πρόσδεσης. Οι δυνάμεις μετατόπισης των κυμάτων οφείλονται σε μη συμμετρική κυματική φόρτιση σε σώματα, στην αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων διαφορετικής κυματικής περιόδου και στην αλληλεπίδραση μεταξύ της κυματικής ταλάντωσης και της ταλάντωσης του ίδιου του σώματος. Αυτά τα φαινόμενα δίνουν μια σταθερή, ή χαμηλής συχνότητας διέγερση στο σύστημα. Αυτή η διέγερση μπορεί να γίνει σημαντική εάν τα κύματα είναι μεγάλα ή εάν η περίοδος ταλάντωσης συμπίπτει με τις συχνότητες του συντονισμού που εισάγονται από το σύστημα της πρόσδεσης.

Σε ορισμένες τοποθεσίες, τα παλιρροιακά και τα ωκεάνια ρεύματα δίνουν σημαντικές δυνάμεις στους μετατροπείς της κυματικής ενέργειας. Τα ήπια συστήματα πρόσδεσης (χαλαρή πρόσδεση) συνήθως σχεδιάζονται για να παρέχουν μια δύναμη τοποθέτησης για την εξουδετέρωση της οριζόντιας μετατόπισης του κύματος και των δυνάμεων του ρεύματος, ενώ τα συστήματα ισχυρής πρόσδεσης (π.χ. τεταμένα σχοινιά ή συρματόσχοινα) μπορούν επιπλέον να εξουδετερώσουν τη διέγερση συχνών κυμάτων σε έναν ή περισσότερους τρόπους λειτουργίας. Εάν οι γραμμές πρόσδεσης χρησιμοποιούνται ως αναφορά της δύναμης για τη μετατροπή της ενέργειας, το σύστημα της πρόσδεσης είναι συνήθως σχεδιασμένο για να ασκεί όσο το δυνατόν μικρότερη επιρροή στη διαδικασία της απορρόφησης των κυμάτων. Ο συντονισμός χαμηλής συχνότητας στο σύστημα της πρόσδεσης μπορεί να είναι επιζήμιος σε συνθήκες καταιγίδας ή ακόμα και σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, εάν δεν έχει σχεδιαστεί σωστά.

3.4 Συντονισμός.

Ο συντονισμός εμφανίζεται όταν ένα σύστημα αναγκάζεται να έχει μια περίοδο ταλάντωσης κοντά, ή ίση με τη φυσική περίοδο ταλάντωσης του ίδιου του συστήματος. Μια τέτοια περίοδος συντονισμού υπάρχει εάν το σύστημα έχει και ακαμψία και αδράνεια. Έτσι, για τα ελεύθερα αιωρούμενα σώματα υπάρχουν περίοδοι συντονισμού για λειτουργίες ανύψωσης, κύλισης και βήματος. Επιπλέον, με τις γραμμές πρόσδεσης συνδεδεμένες μπορεί να υπάρχει ακαμψία στα κύματα, στην ταλάντευση και στην εκτροπή, προκαλώντας συντονισμό και σε αυτούς τους τρόπους



κίνησης. Η αποθήκευση της δυναμικής ενέργειας και η αποθήκευση της κινητικής ενέργειας του συστήματος είναι ίσου μεγέθους.

Για τρόπους κίνησης χωρίς, ή με χαμηλή ακαμψία το σχετικό εύρος ζώνης γίνεται πολύ μεγάλο. Το σχετικό εύρος ζώνης είναι ένα μέτρο του πόσο ισχυρά αποκρίνεται το σύστημα σε εισόδους συχνοτήτων εκτός της περιόδου συντονισμού. Επειδή τα κύματα του ωκεανού έρχονται με ποικίλη συχνότητα, αυτή είναι μια σημαντική ιδιότητα για ένα μετατροπέα της κυματικής ενέργειας.

Όταν ένα σύστημα συντονίζεται με τα προσπίπτοντα κύματα, σημαίνει ότι οι κινήσεις τείνουν να ενισχύονται, με αποτέλεσμα μεγάλες επιταχύνσεις και δυνάμεις. Για το λόγο αυτό ο συντονισμός συνήθως αποφεύγεται στη συμβατική ναυτική αρχιτεκτονική. Ένας μετατροπέας της κυματικής ενέργειας, από την άλλη πλευρά, μπορεί να πρέπει να λειτουργεί σε συντονισμό, ή εν μέρη σε αυτόν ώστε να μπορεί να επιτύχει επαρκή μετατροπή της ισχύος, η οποία υπαγορεύεται από την ευθυγράμμιση της φάσης μεταξύ της δύναμης της διέγερσης και της ταχύτητας του σώματος.

3.5 Υδροδυναμική σχεδίαση ενός μετατροπέα της κυματικής ενέργειας.

Ένα σώμα για να είναι κατάλληλο για απορρόφηση των κυμάτων πρέπει να έχει σχήμα, μέγεθος, τοποθέτηση και κίνηση που να δημιουργεί σημαντικά εξερχόμενα κύματα όταν κινείται. Ο πρώτος εμπειρικός κανόνας για τα σώματα απορρόφησης των κυμάτων και τις στήλες νερού είναι ότι οι γωνίες πρέπει να είναι στρογγυλεμένες. Οι αιχμηρές άκρες θα προκαλέσουν αντίσταση και απώλειες ιξώδους που συνήθως αφαιρούνται απευθείας από τη διαθέσιμη ισχύ για μετατροπή. Εάν οι γωνίες μπορούν να δημιουργηθούν με κάποια ακτίνα καμπυλότητας μεγαλύτερη ή περίπου ίση με τη διαδρομή της τοπικής κίνησης των σωματιδίων του νερού, οι απώλειες του ιξώδους είναι συνήθως αμελητέες [51]. Ο σχεδιασμός πρέπει να είναι τέτοιος ώστε αυτό να ισχύει για τα μέτρια κύματα στο σημείο λειτουργίας. Το μέγεθος των δομών νοείται ως η οριζόντια επέκτασή τους σε σχέση με το κυρίαρχο μήκος κύματος λ εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά.

Γενικά, μπορεί να εφαρμοστεί η ακόλουθη διαφοροποίηση:

- Λιγότερο από $\lambda/6$: μικρό σώμα
- Μεταξύ $\lambda/6$ και $\lambda/2$: μεσαίου μεγέθους σώμα
- Μεγαλύτερο από $\lambda/2$: μεγάλο σώμα

Για τα μικρά σώματα το σχήμα δεν έχει μεγάλη σημασία, εφόσον αποφεύγονται οι απώλειες του ιξώδους. Όσον αφορά το μοτίβο της ακτινοβολίας των κυμάτων, τα μικρά σώματα θα συμπεριφέρονται παρόμοια με ένα αξονικό συμμετρικό σώμα ανεξάρτητα από το σχήμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυματική τους ακτινοβολία μπορεί να προσεγγιστεί με εκείνη μιας σημειακής πηγής, ή ζεύγους σημειακών πηγών. Αυτό που έχει σημασία για τέτοια σώματα είναι η διαθέσιμη διαδρομή του όγκου. Κατά μέσο όρο, η ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί θα είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με τη διαθέσιμη διαδρομή του όγκου. Το μέγεθος του



σώματος θα πρέπει στη συνέχεια να επιλεγεί κατά προτίμηση αρκετά μεγάλο, ώστε να απορροφά ένα σημαντικό μέρος της διαθέσιμης ισχύος, αλλά αρκετά μικρό για να λειτουργεί σε πλήρη διαδρομή με του κανονικού μεγέθους κύματα. Πολύ χρήσιμο μπορεί να είναι ένα διάγραμμα Budal⁷ για την εύρεση του κατάλληλου μεγέθους του σώματος για μια δεδομένη τοποθεσία.

Τα μεγαλύτερα σώματα που δεν αποτελούν συμμετρικούς άξονες γίνονται «κατευθυντικά», με την έννοια ότι το πεδίο της ακτινοβολίας του κύματος θα διαφέρει από αυτό ενός αξονικού συμμετρικού. Στη συνέχεια μπορεί να επιτευχθεί αυξημένη υδροδυναμική απόδοση διαμορφώνοντας το σώμα έτσι ώστε να δημιουργεί κύματα κατά μήκος της κυρίαρχης κατεύθυνσης του κύματος. Αυτή είναι στην πραγματικότητα και η αρχή της λειτουργίας μιας συσκευής τερματισμού. Εφόσον η συσκευή τερματισμού αποτελείται από μια σειρά μονάδων όπως κουπιά, θαλάμους OWC κ.λπ. δεν υπάρχει προφανές όριο στο χρήσιμο μέγεθός της.

Εάν το σώμα είναι μεγάλο σε μέγεθος και βαθύ που αντανακλά τα περισσότερα από τα προσπίπτοντα κύματα, η κίνησή του θα πρέπει να προκαλέσει κύματα που ταξιδεύουν ανάντη για να ακυρώσουν τα ανακλώμενα κύματα. Από την άλλη πλευρά για σώματα που είναι σχεδόν στην επιφάνεια ως προς τα προσπίπτοντα κύματα, πρέπει να δημιουργηθούν μόνο κύματα που ταξιδεύουν προς την κατεύθυνση του ρεύματος για να απορροφήσουν την ενέργεια. Στην πράξη, συνήθως υπάρχει συνδυασμός αυτών των δύο περιπτώσεων.

Για τα αξονικά συμμετρικά σώματα, η διέγερση του κύματος συνήθως αυξάνεται έντονα με πλάτος μέχρι μια προέκταση περίπου $\lambda/2$. Για σώματα πέρα από αυτό το μέγεθος, η αύξηση του μεγέθους δεν αναπληρώνει εξίσου την αύξηση της διέγερσης. Αυτό οφείλεται στις αντίθετες δυνάμεις στην επιφάνεια του σώματος, καθιστώντας τέτοια μεγάλα σώματα λιγότερο υδροδυναμικά αποδοτικά από τα μικρότερα σώματα. Το ίδιο μοτίβο της ακτινοβολίας του κύματος που δημιουργείται από τα μεγάλα σώματα μπορεί να επιτευχθεί με έναν αριθμό μικρών σωμάτων τοποθετημένων σε διάταξη μήτρας ή σε διάταξη γραμμής όπου κάθε σώμα ταλαντώνεται στην ανύψωση και (τουλάχιστον) σε περισσότερους τρόπους κίνησης.

Είτε μικρό, είτε μεγάλο, το μέρος του σώματος που πρόκειται να δώσει τη διέγερση πρέπει να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Σώματα που είναι τοποθετημένα βαθιά μέσα στο νερό, ή που δεν έχουν σημαντική επιφάνεια σώματος κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, δε θα μπορούν να απορροφήσουν αρκετή ενέργεια από τα κύματα. Αυτό προκύπτει άμεσα από το πώς το νερό κινείται σε ένα διερχόμενο κύμα, με τροχιακή κίνηση (και αντίστοιχη δυναμική πίεση) μειούμενου πλάτους καθώς μπαίνει βαθύτερα στο νερό.

Αν και είναι δυνατή η μετατροπή της ενέργειας και μέσω άλλων τρόπων κίνησης, η ανύψωση, το κύμα και το βήμα είναι συνήθως οι τρόποι που εξετάζονται στην πράξη. Οι σημαδούρες και τα σώματα που κλίνουν γύρω από έναν άξονα κοντά στο μέσο επίπεδο της επιφάνειας έχουν υψηλή υδροστατική ακαμψία. Τέτοια συστήματα ανύψωσης ή βήματος θα έχουν πολύ στενό εύρος ζώνης απόκρισης, εκτός εάν παρέχεται με κάποιο μέσο η μείωση της ακαμψίας, ή ο έλεγχος της κίνησης, γεγονός

⁷Το διάγραμμα Budal δείχνει τη μέση απορροφούμενη ισχύ για τις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου με μεταβαλλόμενη περίοδο κύματος για κανονικά κύματα.



που τα καθιστά υδροδυναμικά αναποτελεσματικούς απορροφητές των κυμάτων σε ποικίλες ακανόνιστες θαλάσσιες περιοχές. Αυτό το ελάττωμα μπορεί να μετριαστεί με την ενεργή χρήση του μηχανήματος μέσω μιας κατάλληλης στρατηγικής ελέγχου, ή με τη συμπερίληψη μηχανικών εξαρτημάτων για την αντιμετώπιση της υδροστατικής ακαμψίας.

Το βήμα γύρω από έναν άξονα κοντά στην επιφάνεια είναι λιγότερο ογκομετρικά αποδοτικό από το κύμα όταν πρόκειται για απορρόφηση της ισχύος [52]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μια τέτοια κίνηση του βήματος λαμβάνει τη διέγερσή της από μια περιοχή που κατανέμεται κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος, ενώ η κίνηση μιας απότομης διέγερσης λαμβάνει τη διέγερσή της κυρίως από περιοχές απέναντι κατακόρυφων τοίχων σε απόσταση μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά, μπορεί να είναι ευκολότερο να σχεδιαστεί ένα πρακτικό μηχάνημα για την τοποθέτηση σωμάτων από ό,τι για τα αιωρούμενα σώματα.

Για μικρά σώματα, η κίνηση της ανύψωσης είναι η πιο ογκομετρικά αποτελεσματική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διέγερση της ανύψωσης προέρχεται από μια διαφορά μεταξύ της ατμοσφαιρικής πίεσης στο πάνω μέρος του σώματος και του πλήρους εύρους της υδροδυναμικής πίεσης στο κάτω μέρος. Η διέγερση πραγματοποιείται από μια διαφορά στην υδροδυναμική πίεση κατά μήκος του κύματος, το οποίο είναι αρκετά αδύναμο όταν το σώμα είναι μικρό. Για τα μεγάλα σώματα ισχύει το αντίθετο, έτσι ώστε το βήμα και ειδικότερα η αυξητική κίνηση να ευνοούνται έναντι της ανύψωσης.

Τα συστήματα που συνδυάζουν την εξαγωγή της ισχύος από δύο ή τρεις τρόπους κίνησης έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μια πιο αποτελεσματική χρήση της εγκατεστημένης δομής.

Το βήμα γύρω από έναν άξονα κοντά στον πυθμένα είναι υδροδυναμικά παρόμοιο με το κύμα. Οι λειτουργίες της ταλάντωσης και της εκτροπής δεν έχουν δυνάμεις επαναφοράς και οι δυνάμεις διατήρησης των σταθμών πρέπει να περιέχουν κατάλληλα συστήματα πρόσδεσης (άγκυρες κ.λπ.).



4. Τεχνοοικονομική Ανάπτυξη των Συστημάτων Μετατροπής της Κυματικής Ενέργειας.

4.1 Γενικά.

Η ανάπτυξη ενός WEC, από το στάδιο της ιδέας έως την επίδειξη ενός εμπορικά βιώσιμου προϊόντος αποτελεί μια μεγάλη διαδικασία. Εάν η τεχνολογία είναι σωστή, αναμένεται να διαρκέσει περίπου 15 χρόνια και κόστος αρκετών εκατομμυρίων ευρώ σύμφωνα με τα στατιστικά των προηγούμενων σχεδιασμένων WEC[53]. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που αναπτύσσονται πιθανότατα δε θα φτάσουν ποτέ στην εμπορευματοποίηση, επειδή δεν είναι σε θέση να παράγουν ανταγωνιστική ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά, ή δεν καταφέρνουν να λάβουν την απαιτούμενη χρηματοδότηση για να προχωρήσουν στην ανάπτυξη.

Προκειμένου να αποφευχθεί η σπατάλη μεγάλων πόρων για την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας, θα πρέπει να αξιολογούνται συνεχώς οι δυνατότητές της να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε τιμή αγοράς. Κάθε φορά που ο υπολογισμός του LCoE⁸ στο τέλος μιας φάσης ανάπτυξης συμπεραίνει ότι δεν επαρκεί για την επιτυχή εμπορευματοποίηση, τότε δεν υπάρχει λόγος να προχωρήσει και η ανάπτυξή του. Η πιθανότητα η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας να μειώσει το LCoE είναι πολύ μικρή, ενώ οι πιθανότητες είναι μάλλον μεγάλες να προκύψει κάποιο απροσδόκητο κόστος και ως εκ τούτου το τελικό LCoE να είναι υψηλότερο. Εάν συμβεί αυτή η κατάσταση, θα πρέπει να επανεξεταστούν τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας, επαναφέροντας την ανάπτυξη της τεχνολογίας στις ερευνητικές φάσεις [54].

Ο υπολογισμός του πραγματικού LCoE από μια εμπορική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής του WEC βασίζεται σε πολλές υποθέσεις και εκτιμήσεις. Εφόσον ένα WEC πλήρους κλίμακας δεν έχει λειτουργήσει στην τοποθεσία ενδιαφέροντος για αρκετό χρονικό διάστημα, θα υπάρχει αβεβαιότητα στην παραγωγή της ενέργειας και στο σχετικό κόστος. Όσο πιο μακριά είναι η τεχνολογία από την εμπορευματοποίηση, τόσο μεγαλύτερες είναι και αυτές οι αβεβαιότητες. Ως αποτέλεσμα, η αντιμετώπιση αυτών των αβεβαιοτήτων είναι ένας από τους κύριους στόχους καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης ενός WEC. Όσο περισσότερο προχωρά η ανάπτυξη, τόσο μικρότερες θα γίνονται αυτές οι αβεβαιότητες και ως εκ τούτου, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια καλύτερη εκτίμηση του πραγματικού LCoE. Γενικότερα υπάρχουν διαθέσιμες συγκεκριμένες μεθοδολογίες, καθώς και διάφορα εργαλεία και φύλλα υπολογισμών τα οποία μπορούν να διευκολύνουν τον υπολογισμό του LCoE [55].

Οι κλίμακες του επιπέδου της τεχνικής απόδοσης (TPL) και του επιπέδου τεχνικής ετοιμότητας (TRL) χρησιμοποιούνται ειδικά για την αξιολόγηση της τεχνικής ωριμότητας (TRL) και του οικονομικού δυναμικού (TPL) μιας νέας τεχνολογίας και

⁸Το εξισορροπημένο κόστος της ενέργειας (LCOE) είναι ένα μέτρο του μέσου καθαρού παρόντος κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας για μια μονάδα παραγωγής κατά τη διάρκεια ζωής της. Χρησιμοποιείται για τον επενδυτικό σχεδιασμό και για τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε σταθερή βάση.

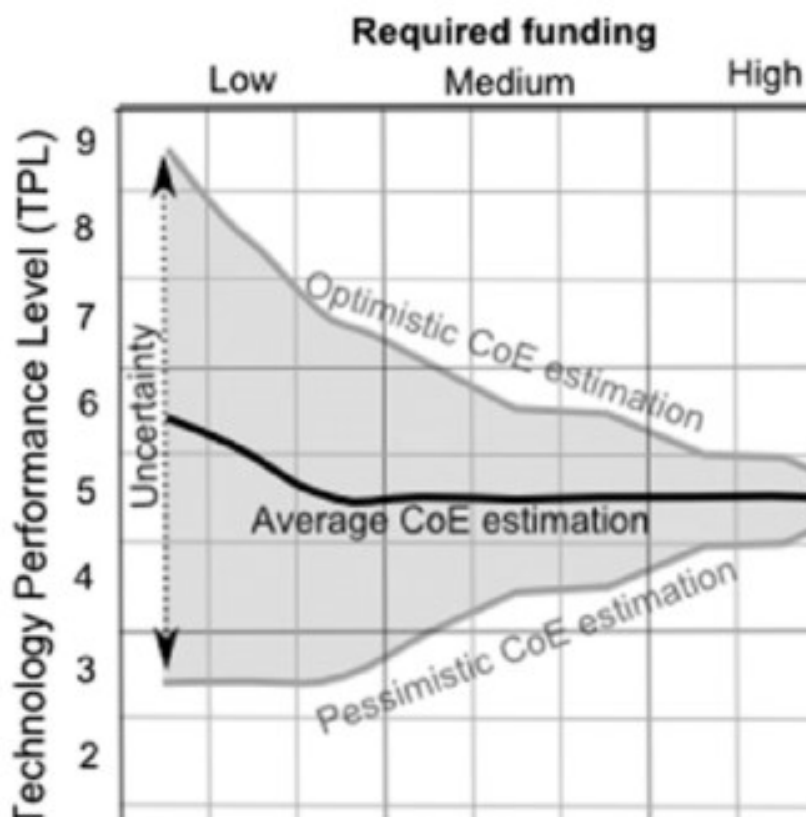


είναι πολύ χρήσιμες καθώς διευκολύνουν τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αναπτυσσόμενων τεχνολογιών, ακόμη και εκτός του τομέα της κυματικής ενέργειας⁹. Ωστόσο, στην πράξη ένα WEC αναπτύσσεται συνήθως ακολουθώντας ένα πιο συγκεκριμένο σύνολο σταδίων ανάπτυξης. Αυτά τα στάδια ή φάσεις της τεχνικής ανάπτυξης των WEC μπορούν να συνδεθούν με την κλίμακα TRL.

Το Εικόνα 4.1: Πιθανή πρόοδος της εκτίμησης του CoE (κόστος ενέργειας) με την τεχνολογική ανάπτυξη (TRL) και την τεχνολογική απόδοση (TPL), μαζί με μια απεικόνιση της δυναμικά σχετικής αβεβαιότητας παρουσιάζει μια επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο συνδέονται οι παράμετροι TPL, TRL, το κόστος της ενέργειας, η αβεβαιότητα και η πιθανή επιχορήγηση ή χρηματοδότηση για το έργο. Οι κύριες τάσεις είναι ότι ο απαιτούμενος χρόνος και τα έξοδα αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση του TRL ενώ ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού που μπορούν να αλλάξουν μειώνεται σημαντικά. Οι πηγές της χρηματοδότησης συνήθως τείνουν επίσης να αλλάζουν σημαντικά κατά τη διάρκεια της αναπτυξιακής διαδικασίας.

Καθώς καμία τεχνολογία δεν έχει ακόμη εμπορευματοποιηθεί με επιτυχία, η τρέχουσα «βέλτιστη πρακτική» εξακολουθεί να βασίζεται σε εμπειρίες από άλλους τομείς και σε υποθέσεις από ειδικούς στον τομέα της κυματικής ενέργειας. Η αναπτυξιακή στρατηγική, η οποία μπορεί να επηρεαστεί έντονα από το φορέα χρηματοδότησης, έχει σημαντική επίδραση στην κατανομή του κόστους και του χρόνου στα διάφορα στάδια της ανάπτυξης. Ορισμένοι μπορεί να προτιμούν τη δαπάνη επιπλέον χρόνου σε επίπεδο έρευνας όπου όλες οι επιλογές είναι ακόμα ανοιχτές και ο χρόνος και το κόστος είναι σχετικά μικρά, μόνο για να προχωρήσουν όταν επιτευχθεί ένα επαρκές επίπεδο LCoE (TPL). Άλλοι χρηματοδοτικοί φορείς ενδέχεται να ευνοήσουν μια ταχύτερη (αλλά πιο επικίνδυνη) διαδικασία ανάπτυξης στην οποία υπερισχύει το TRL.

⁹Το TRL αναφέρεται στο πόσο έτοιμη είναι η τεχνολογία και συνδέεται με την εμπορική ετοιμότητα της τεχνολογίας, ενώ το TPL αναφέρεται πόσο καλά η τεχνολογία αποδίδει και συνδέεται με την τεchnο-οικονομική απόδοση της τεχνολογίας.



Εικόνα 4.1: Πιθανή πρόοδος της εκτίμησης του CoE (κόστος ενέργειας) με την τεχνολογική ανάπτυξη (TRL) και την τεχνολογική απόδοση (TPL), μαζί με μια απεικόνιση της δυνητικά σχετικής αβεβαιότητας [56].

4.2 Τα στάδια της ανάπτυξης ενός WEC.

Η τεχνική ανάπτυξη ενός WEC μπορεί γενικά να χωριστεί σε πέντε κύρια στάδια ανάπτυξης. Κάθε στάδιο χαρακτηρίζεται από πολύ συγκεκριμένους στόχους που καθιστούν δυνατή τη συστηματική πρόοδο. Καθώς η ανάπτυξη των WEC είναι πολύ χρονοβόρα και εντάσεως κεφαλαίου, είναι πρόκληση να περιοριστεί στο ελάχιστο ο χρόνος. Ωστόσο, το να προχωρήσει κανείς πολύ γρήγορα σε μια φάση ή ακόμα και να χαθεί μια φάση μπορεί και πιθανότατα να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην περαιτέρω ανάπτυξη του WEC. Οι τροποποιήσεις στην ιδέα, ή στο σχεδιασμό του WEC θα πρέπει να γίνουν όσο το δυνατόν νωρίτερα μέσω της ανάπτυξης, καθώς αυτό θα γίνει πιο δύσκολο, δαπανηρό και χρονοβόρο σε μεταγενέστερο στάδιο.

Οι τρεις πρώτες φάσεις παρακάτω αποτελούν φάσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον. Οι δύο τελευταίες αποτελούν φάσεις σε ανοιχτή θάλασσα. Η πρώτη φάση αποτελεί την αρχική ιδέα, την επικύρωσή της, την εκτίμηση της ισχύος, τις πιθανές παραμέτρους που θα έχουν αντίκτυπο στο σχεδιασμό, το PTO και την ιδανική ρύθμιση όλων των παραγόντων. Η δεύτερη φάση αποτελεί τον τελικό σχεδιασμό, την προσομοίωση του PTO και των συνθηκών, την επανεκτίμηση της απόδοσης και της ισχύος, την εκτίμηση της δομής και της πρόσδεσης. Επιπλέον, σε αυτή τη φάση περιλαμβάνονται οι πιο λεπτομερείς υπολογισμοί και η μελέτη για το εάν η λύση είναι



τελικά εφικτή. Η τρίτη φάση περιλαμβάνει την πλήρη κατασκευή με πραγματικό ΡΤΟ και ηλεκτρική γεννήτρια, χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για τη μέτρηση της ισχύος και τη μοντελοποίηση της μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η τέταρτη φάση αποτελεί τη φάση της δημιουργίας μιας πλήρους λειτουργικής συσκευής σε συνδυασμό με την πραγματική μέτρηση των δυνάμεων που ασκούνται στη δομή και στα σημεία πρόσδεσης. Επιπλέον, σε αυτή τη φάση περιλαμβάνονται τα δεδομένα για τα πραγματικά κόστη της παραγωγής ισχύος με σκοπό την εκτίμηση για τις πωλήσεις των συσκευών, καθώς και η εκτίμηση του κύκλου ζωής της κάθε συσκευής. Η τελευταία φάση περιλαμβάνει ολόκληρη την αυτόνομη μονάδα παραγωγής. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν τα εξής:

- Κάθε στάδιο ανάπτυξης απαιτεί συγκεκριμένο μοντέλο/πρωτότυπο WEC που θα υπόκεινται σε συγκεκριμένες προκλήσεις και στόχους.
- Από την τρίτη φάση ανάπτυξης δεν υποτίθεται ότι θα γίνουν σημαντικές αλλαγές στη συνολική διαμόρφωση του WEC, προχωρώντας έτσι από την έρευνα στην ανάπτυξη.
- Τα αποτελέσματα της παραγωγής της ενέργειας από τις εργαστηριακές δοκιμές θα πρέπει να βασίζονται σε δοκιμές σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες κυμάτων για τις αντίστοιχες τοποθεσίες ενδιαφέροντος.
- Στο τέλος κάθε φάσης θα πρέπει να αξιολογηθούν η πρόοδος και το LCoE. Με βάση αυτό, λαμβάνεται απόφαση για το εάν η ανάπτυξη μπορεί να μεταφερθεί στην επόμενη φάση, ή γενικότερα εάν αξίζει ακόμη να συνεχιστεί η ανάπτυξη του WEC.

4.3 Αξιολόγηση της τεχνοοικονομικής ανάπτυξης των WEC.

Οι πρόσφατες εργασίες για την παροχή τρόπων μέτρησης της προόδου και της αξίας των διαδικασιών E&A της τεχνολογίας έχουν επικεντρωθεί στην προσαρμογή του TRL σε συγκεκριμένους όρους της κυματικής ενέργειας και στην εισαγωγή μιας νέας κλίμακας TPL.

Ο Fitzgerald J. (2012) αναφέρει ότι έχει προετοιμαστεί η κλίμακα TRL για την ενέργεια των κυμάτων με επίκεντρο τη λειτουργική ετοιμότητα και την ετοιμότητα του κύκλου ζωής. Από την άλλη πλευρά, οι Weber et al. (2010) έχουν προετοιμάσει την κλίμακα TPL εστιάζοντας σε μια συνολική αξιολόγηση της απόδοσης με μεγάλη έμφαση στην καινοτομία και στην αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας [56], [57]. Επίσης, έχουν δημοσιευτεί πρόσθετες κλίμακες αντίστοιχων TRL και έχει οριστεί μια συμπληρωματική κλίμακα «Επιπέδων Εμπορικής Ετοιμότητας» (CRL) για να επεκταθεί μετά από τη φάση E&A [58].

Ως λειτουργική ετοιμότητα νοείται η ετοιμότητα της μετατροπής της κυματικής ενέργειας και της εξαγωγής της στο δίκτυο με επιπλέον άλλες σχετικές και βασικές λειτουργίες όπως η τήρηση σταθμών και η απομακρυσμένη παρακολούθηση. Η



κλίμακα TRL παρέχει ενδείξεις για το πώς θα πρέπει να αποδεικνύονται τα παραπάνω σε διαφορετικά επίπεδα TRL. Ως ετοιμότητα του κύκλου ζωής νοείται η ετοιμότητα σε μη λειτουργικούς χώρους που είναι σημαντικοί για τις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας. Αυτό περιλαμβάνει τη λειτουργική ετοιμότητα, την ετοιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, τη μείωση του κινδύνου και επίσης την εκτίμηση και τη μείωση του κόστους. Εγγενής στην κλίμακα TRL είναι η εστίαση στην πιστοποίηση και μια σχετική προσδοκία για τον τελικό χρήστη να απαιτείται να ασφαλιστεί έναντι ορισμένων κινδύνων.

Η κλίμακα TPL επικεντρώνεται στην απόδοση ως συνδυασμό κοινωνικής, περιβαλλοντικής και νομικής αποδοχής, απορρόφησης και μετατροπής της ισχύος, της διαθεσιμότητας του συστήματος, των κεφαλαιουχικών δαπανών (CapEx) και των λειτουργικών δαπανών (OpEx). Εγγενής στην κλίμακα TPL είναι η εστίαση στο κόστος της ενέργειας (CoE) και στη βελτίωσή του μέσω της καινοτομίας σε χαμηλό TRL. Μια περαιτέρω εστίαση του TPL είναι στη διαμόρφωση και την αυτοματοποίηση των αξιολογήσεων της απόδοσης. Ένα σημαντικό στοιχείο της αξιολόγησης της απόδοσης είναι η τεχνοοικονομική προσομοίωση και η βελτιστοποίηση. Αυτό συνδυάζει ιδανικά την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών στην απορρόφηση της κυματικής ενέργειας με τη λειτουργική προσομοίωση, την οικονομική αξιολόγηση και τις τεχνικές της αριθμητικής βελτιστοποίησης [59]. Στον Πίνακα 4.1: Τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) αποτυπώνονται τα επίπεδα της τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL) και στον

Πίνακα 4.2: Τα επίπεδα της τεχνολογικής απόδοσης (TPL) αποτυπώνονται τα επίπεδα της τεχνολογικής απόδοσης (TPL).

Πίνακας 4.1: Τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL)

TRL	Λειτουργική ετοιμότητα	Ετοιμότητα κύκλου ζωής
9	Λειτουργική απόδοση και αξιοπιστία που αποδείχθηκε για μια σειρά από WEC	Πλήρως μη επικίνδυνο επιχειρηματικό σχέδιο για την ανάπτυξη συστοιχιών σε κλίμακα χρησιμότητας
8	Το πραγματικό WEC πλήρους κλίμακας ολοκληρώθηκε και πιστοποιήθηκε μέσω δοκιμής και επίδειξης.	Οι πραγματικές θαλάσσιες δραστηριότητες ολοκληρώθηκαν και πιστοποιήθηκαν μέσω δοκιμής και επίδειξης
7	Επίδειξη πρωτοτύπου WEC σε επιχειρησιακό περιβάλλον	Ωκεάνια επιχειρησιακή ετοιμότητα: διαχείριση κινδύνων ωκεάνιας κλίμακας, θαλάσσιες επιχειρήσεις κ.λπ



6	Επίδειξη πρωτοτύπου WEC σε επιχειρησιακό περιβάλλον	Αλληλεπίδραση με τον πελάτη: λήψη των απαιτήσεων των πελατών για την ενημέρωση του σχεδιασμού. Ενημέρωση του πελάτη για πιθανούς περιορισμούς της τοποθεσίας του έργου
5	Επικύρωση στοιχείου WEC ή/και βασικού υποσυστήματος WEC σε σχετικό περιβάλλον	Κινητοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας: Προμήθεια σχεδιασμού υποσυστήματος, μελέτες σκοπιμότητας εγκατάστασης, εκτιμήσεις κόστους κ.λπ.
4	Επικύρωση στοιχείου WEC ή/και βασικού υποσυστήματος WEC σε εργαστηριακό περιβάλλον	Προκαταρκτικός σχεδιασμός κύκλου ζωής: στόχοι για κατασκευαστή, αναπτυσσόμενη, λειτουργική και συντηρήσιμη τεχνολογία
3	Αναλυτική και πειραματική κριτική συνάρτηση ή/και χαρακτηριστική απόδειξη έννοιας	Καθορίστηκαν οι εκτιμήσεις/στόχοι του αρχικού κόστους κεφαλαίου και της παραγωγής ενέργειας
2	Διατύπωση της έννοιας του WEC	Προσδιορισμός της αγοράς και σκοπός της τεχνολογίας
1	Βασικές αρχές που τηρήθηκαν και αναφέρθηκαν	Εντοπισμός πιθανών χρήσεων της τεχνολογίας

Πίνακας 4.2: Τα επίπεδα της τεχνολογικής απόδοσης (TPL)

TPL	Κατηγορία	Απόδοση
9	Υψηλό: Η τεχνολογία είναι οικονομικά βιώσιμη και ανταγωνιστική ως ανανεώσιμη μορφή	Ανταγωνιστικό με άλλες πηγές ενέργειας χωρίς ειδικό μηχανισμό υποστήριξης
8		Ανταγωνιστικό με άλλες πηγές ενέργειας δεδομένου βιώσιμου μηχανισμού υποστήριξης
7		Ανταγωνιστικό με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεδομένου ευνοϊκού μηχανισμού υποστήριξης



6		Η πλειονότητα των βασικών χαρακτηριστικών απόδοσης και των παραγόντων κόστους ικανοποιούν την πιθανή οικονομική βιωσιμότητα υπό διακριτές και ευνοϊκές συνθήκες αγοράς και λειτουργίας
5	Μεσαίο: Η τεχνολογία διαθέτει ορισμένα χαρακτηριστικά για πιθανή οικονομική βιωσιμότητα υπό διακριτές συνθήκες αγοράς και λειτουργίας. Απαιτούνται τεχνολογικές ή/και εννοιολογικές βελτιώσεις	Προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική βιωσιμότητα υπό διακριτές και ευνοϊκές συνθήκες αγοράς και λειτουργίας, απαιτούνται ορισμένες βασικές βελτιώσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας
4		Προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική βιωσιμότητα υπό διακριτές και ευνοϊκές συνθήκες αγοράς και λειτουργίας, απαιτούνται ορισμένες βασικές τεχνολογικές εφαρμογές και θεμελιώδεις εννοιολογικές βελτιώσεις
3	Χαμηλό: Η τεχνολογία δεν είναι οικονομικά βιώσιμη	Η μειοψηφία των βασικών χαρακτηριστικών απόδοσης και των παραγόντων κόστους δεν ικανοποιούν τη δυνητική οικονομική βιωσιμότητα
2		Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά απόδοσης και παράγοντες κόστους δεν ικανοποιούν τη δυνητική οικονομική βιωσιμότητα
1		Η πλειονότητα των βασικών χαρακτηριστικών απόδοσης και των παραγόντων κόστους δεν ικανοποιούν και αποτελούν εμπόδιο στη δυνητική οικονομική βιωσιμότητα

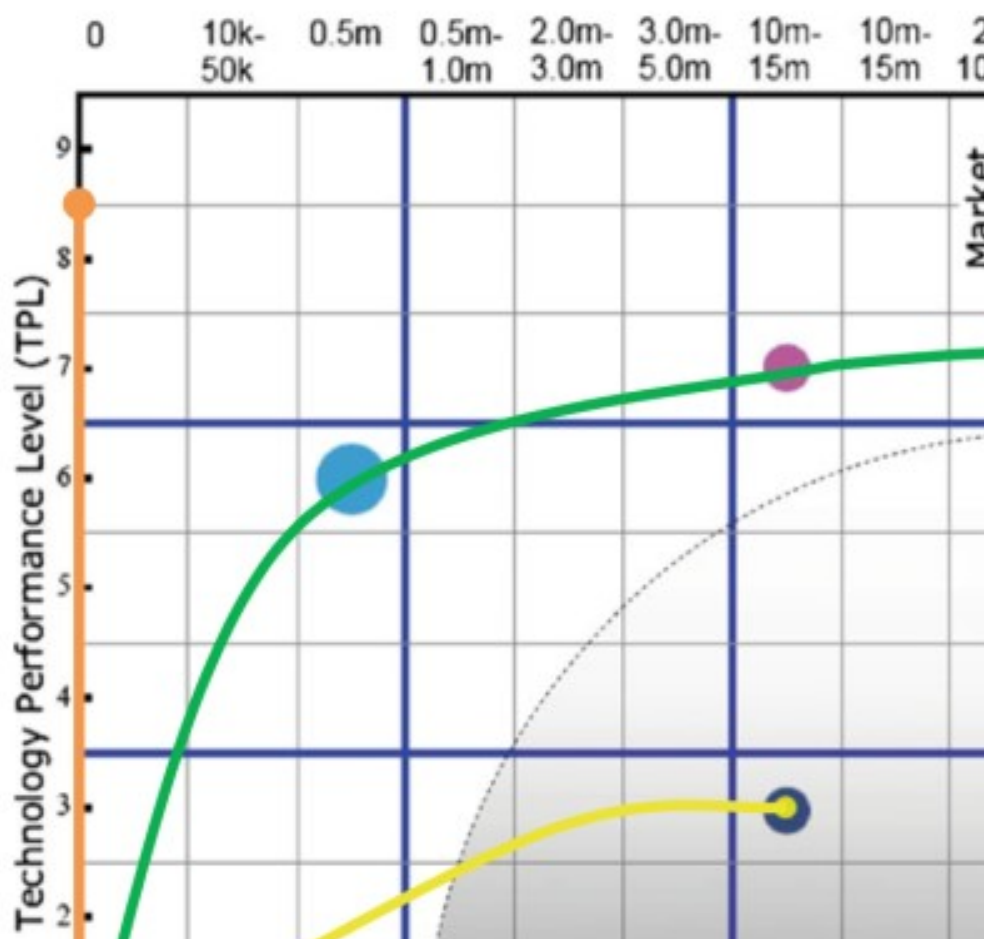
Τα πέντε στάδια της τεχνικής ανάπτυξης είναι ειδικά για τον τομέα της κυματικής ενέργειας ενώ η κλίμακα TRL, η οποία βαθμολογεί την τεχνική ωριμότητα, χρησιμοποιείται ευρέως και σε άλλους κλάδους. Αν και τα δύο αυτά συστήματα είναι από ορισμένες απόψεις πολύ διαφορετικά, μπορούν ακόμα να συνδυαστούν και να συγκριθούν καθώς και τα δύο ακολουθούν την ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος.

Η κλίμακα TPL (από το 1 έως το 9) παρουσιάζει τις οικονομικές δυνατότητες ενός WEC, ενώ η κλίμακα TRL (από το 1 έως το 9) παρουσιάζει το επίπεδο της τεχνικής ωριμότητας μιας τεχνολογίας. Αυτές οι δύο κλίμακες αξιολόγησης μπορούν να συνδυαστούν μαζί και σε έναν ενιαίο πίνακα TRL-TPL. Αυτός ο πίνακας TRL-TPL επιτρέπει την αναπαράσταση της κατάστασης ενός προγράμματος E&A τεχνολογίας σχετικής με την κυματική ενέργεια ως σημείο στο επίπεδο TRL-TPL και την ιστορία της προόδου της E&A μέχρι εκείνο το σημείο, καθώς και τις προβλέψεις της μελλοντικής προόδου να απεικονίζονται ως γραμμές.



Στο Εικόνα 4.2: *Διάγραμμα E&A του Weber [56]* ο οριζόντιος άξονας είναι το TRL και ο κατακόρυφος άξονας είναι το TPL. Το δεξί άκρο του διαγράμματος σημειώνεται με ενδεικτικό LCoE, το οποίο αντιπροσωπεύει το TPL (ή τα ενδεικτικά επίπεδα της απόδοσης). Τα υψηλότερα επίπεδα TPL συνδέονται με πιο ανταγωνιστικό κόστος της ενέργειας. Στο επάνω άκρο του διαγράμματος επισημαίνεται η ενδεικτική δαπάνη E&A ή "ποσοστό καύσης".

Τα υψηλότερα επίπεδα TRL συνδέονται με υψηλότερα «ποσοστά καύσης» κεφαλαίου καθώς οι δαπάνες E&A και οι κίνδυνοι του έργου αυξάνονται επίσης δραματικά με το TRL. Η μωβ μπάρα είναι η «είσοδος στην αγορά». Η μωβ κουκκίδα είναι το ελάχιστο βιώσιμο προϊόν. Η πράσινη γραμμή είναι μια αποτελεσματική τροχιά της E&A απόδοσης πριν από την ετοιμότητα. Η σκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τους συνδυασμούς TRL-TPL στους οποίους πιθανώς θα πρέπει να σταματήσουν οι περαιτέρω εξελίξεις, καθώς είναι πολύ απίθανο από εκείνο το σημείο και μετά το προϊόν να καταστεί οικονομικά μη βιώσιμο. Εάν, ωστόσο, αποφασιστεί η ενέργεια για περαιτέρω ανάπτυξη, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σημαντικές αλλαγές στα βασικά της ιδέας, επιστρέφοντας έτσι σε ένα προηγούμενο TRL με την ελπίδα να αυξηθεί το TPL.





Εικόνα 4.2: Διάγραμμα E&A του Weber [56]

Όλες οι τεχνολογικές εξελίξεις εισέρχονται στη διαδικασία στα αριστερά του διαγράμματος και αν όλα πάνε καλά, προχωρούν σε μια δεξιά και ανοδική τροχιά προς την είσοδο στην αγορά. Η επιτυχής είσοδος στην αγορά απαιτεί ένα πλήρως ανεπτυγμένο WEC (TRL 9) που είναι εμπορικά βιώσιμο, δηλαδή ένα TPL μεταξύ 7 και 9 (με ή χωρίς οικονομική υποστήριξη).

Κατά τη διάρκεια της τεχνικής ανάπτυξης του WEC με τη μορφή πειραματικών δοκιμών, αριθμητικών μοντέλων και ανάλυσης λαμβάνονται σχεδιαστικές αποφάσεις σχετικά με τα θεμελιώδη στοιχεία της ιδέας. Αυτά τα θεμελιώδη στοιχεία του WEC είναι πολυάριθμα και πολύ ευέλικτα σε αρχικό στάδιο, καθώς όλα είναι ακόμη ανοιχτά για συζήτηση, ενώ εξετάζονται. Ως εκ τούτου, μπορούν να υπάρξουν τυχόν διορθώσεις και αλλαγές μαζί με την ανάπτυξη. Είναι πολύ σημαντικό να μην καθοριστούν οι θεμελιώδεις παράμετροι του WEC, εφόσον το TPL δεν είναι τουλάχιστον 7 ή μεγαλύτερο.

Ενώ τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι ευέλικτα, ο πρωταρχικός στόχος της E&A θα πρέπει να είναι η αύξηση του TPL με έμφαση στην ανάλυση, την καινοτομία και την αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών λύσεων και όπου αυτό διευκολύνεται από δραστηριότητες χαμηλού κόστους και χαμηλού κινδύνου. Αφού εντοπιστεί μια ιδέα με αρκετά υψηλό TPL, τα βασικά στοιχεία του συστήματος θα πρέπει να διορθωθούν και η E&A θα πρέπει να προχωρήσει στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος Weber. Στο δεξί μισό του διαγράμματος, ο πρωταρχικός στόχος της E&A είναι η αύξηση του TRL. Σε αυτόν τον τομέα η έμφαση δίνεται στην επίδειξη και στη μείωση του κινδύνου. Στον δεξιό τομέα, η διαχείριση της καινοτομίας πρέπει να γίνεται πολύ πιο προσεκτικά για τη μείωση του κινδύνου σε μεγάλα έργα και πρέπει να περιοριστεί στη βελτίωση των υποσυστημάτων. Οι ιδέες για βελτιώσεις ολόκληρου του συστήματος πρέπει να δοκιμάζονται σε χαμηλότερο TRL και να αντιμετωπίζονται ως νέα έργα.

Το LCoE για μια εμπορική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, που βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο WEC, θα πρέπει να εκτιμάται στο τέλος κάθε σταδίου ανάπτυξης. Κατά την ανάπτυξη ενός WEC, οι πολυάριθμες υποθέσεις και τα άγνωστα που σχετίζονται με το κόστος και την παραγωγή της ενέργειας αντιμετωπίζονται συστηματικά. Έτσι, η αβεβαιότητα που σχετίζεται με το LCoE, η οποία είναι συνάρτηση του κόστους και της παραγωγής ισχύος ενός WEC, μειώνεται σταδιακά με τις φάσεις της ανάπτυξης.

Υπάρχουν γενικά σε πίνακες προκαθορισμένες τιμές που δίνουν μια πιθανή ένδειξη της αβεβαιότητας που συνδέεται με το εκτιμώμενο κόστος ενός έργου WEC. Η συνολική αβεβαιότητα που σχετίζεται με ένα έργο WEC θα είναι ακόμη μεγαλύτερη καθώς υπάρχει επίσης ένα δίκαιο επίπεδο αβεβαιότητας που συνδέεται με την παραγωγή της ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διαθεσιμότητα των WEC.

Η μέση εκτίμηση συνήθως του LCoE στις αναλύσεις είναι ο μέσος όρος μεταξύ της αισιόδοξης και της απαισιόδοξης εκτίμησής του. Εκτός από την αβεβαιότητα στην εκτίμηση, μπορεί να προκύψει διαφορετικό αποτέλεσμα ανάλογα με το ποιος κάνει τον υπολογισμό (π.χ. προγραμματιστής, ή αναλυτής εντός του έργου ή ανεξάρτητο τρίτο μέρος). Είναι δυστυχώς δύσκολο να εκτιμηθεί το πλήρως σωστό LCoE σε κάθε



περίπτωση προτού κατασκευαστεί και λειτουργήσει σε όλη τη διάρκεια ζωής του ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργεί εμπορικά και βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο WEC. Επομένως, έχει μεγάλη σημασία η εκτίμηση του LCoE να είναι διαφανής όπου γνωστοποιούνται πιθανές παραδοχές.

Μια περαιτέρω χρήση του διαγράμματος E&A του Weber αποτελεί οδηγό για την αξιολόγηση των εταιρειών τεχνολογίας που βρίσκονται στα μισά του δρόμου ενός προγράμματος E&A. Για παράδειγμα, οι εταιρείες που διεξάγουν αυτά τα προγράμματα E&A αυξάνουν τα ίδια κεφάλαια και θέλουν να γνωρίζουν ποια είναι η καλύτερη επένδυση.

Μπορεί κανείς να υποστηρίξει ότι το πρόγραμμα υψηλότερου TRL είναι πιο κοντά στην ετοιμότητα της αγοράς και επομένως, ότι η πρόσθετη επένδυση που απαιτείται για την ολοκλήρωση της E&A είναι μικρότερη από ό,τι στην περίπτωση του προγράμματος χαμηλότερου TRL. Εάν μια αξιολόγηση γίνεται αποκλειστικά με βάση το TRL, τότε η σκούρα μπλε κουκκίδα φαίνεται να αντιπροσωπεύει το πιο προηγμένο πρόγραμμα E&A. Ωστόσο, αυτό το πρόγραμμα είναι πιθανό να σταματήσει, ή τουλάχιστον να χρειαστεί να επιστρέψει στον επανασχεδιασμό. Αντίθετα, η γαλάζια κουκκίδα, αν και σε χαμηλότερο TRL, βρίσκεται σε πολύ υψηλότερο TPL και είναι πολύ πιο κοντά στην πράσινη τροχιά. Ένα έγκυρο σχετικό μέτρο ενός προγράμματος E&A είναι επομένως, το πόσο κοντά βρίσκεται σε μια τροχιά που θα οδηγήσει σε επιτυχή (προσιτή) είσοδο στην αγορά.

4.4 Στρατηγικές τεχνοοικονομικής ανάπτυξης.

Ένας διευθυντής της E&A πρέπει να επιλέξει την κατανομή των πόρων μεταξύ της επίτευξης της ετοιμότητας πριν από την απόδοση, ή της απόδοσης πριν από την ετοιμότητα. Μια τροχιά ετοιμότητας πριν από την απόδοση θα συνεπαγόταν πρώτα την πρόοδο κατά μήκος της κλίμακας TRL και στη συνέχεια κατά μήκος της κλίμακας TPL. Με βάση τα παραπάνω, ένα πρόγραμμα E&A θα πρέπει να ολοκληρώσει πολλαπλές επαναλήψεις του σχεδιασμού με υψηλό TRL και υψηλό κόστος και κατά συνέπεια θα ήταν απίθανο να πετύχει.

Η οριζόντια κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει μια ακραία εκδοχή αυτής της τροχιάς ενώ η κίτρινη γραμμή αντιπροσωπεύει μια λιγότερο ακραία εκδοχή. Είναι δυνατό για τέτοιες αναπτυξιακές προσπάθειες να επιτευχθεί κάποιο TRL μεσαίου επιπέδου, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό ιδιωτικής χρηματοδότησης και δημόσιας επιχορήγησης. Ωστόσο, σε υψηλότερα TRL, το αυξημένο κόστος της E&A προσελκύει μεγαλύτερα επίπεδα δέουσας επιμέλειας και μια τέτοια προσπάθεια θα σταματούσε λόγω των χαμηλών εκτιμήσεων του TPL. Η κάτω δεξιά περιοχή του διαγράμματος είναι περιοχή μη βιώσιμων προγραμμάτων E&A που περνούν βιαστικά από τα πρώτα στάδια TRL και δεν εστιάζουν στην επίτευξη ενός υψηλού TPL, ενώ εξακολουθούν να έχουν χαμηλό TRL και χαμηλό κόστος επανάληψης του σχεδιασμού. Οι πορτοκαλί και οι πράσινες γραμμές είναι τροχιές απόδοσης πριν από την ετοιμότητα. Η κάθετη πορτοκαλί γραμμή αντιπροσωπεύει μια τροχιά που αντιστοιχεί σε ένα καθαρό πείραμα. Αποτελείται για παράδειγμα από μια ιδέα WEC που βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της φαντασίας του εφευρέτη. Κατ' αρχήν, είναι δυνατό αυτή η τροχιά να φτάσει σε υψηλό TPL, αλλά με πολύ υψηλή αβεβαιότητα



στο TPL, αφού δεν πραγματοποιείται κάποια φυσική δοκιμή. Αυτή η τροχιά δεν είναι πρακτική γιατί παραμένει σε πολύ χαμηλό TRL για πάρα πολύ καιρό. Απαιτείται δοκιμή σε TRL 2 και TRL 3 για να μειωθεί η αβεβαιότητα στις αξιολογήσεις στα αρχικά στάδια της προσπάθειας της E&A. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει μια πιο πρακτική εκδοχή της τροχιάς της απόδοσης πριν από την ετοιμότητα.

Μια παγίδα που πρέπει να αποφευχθεί είναι η προσπάθεια της ετοιμότητας πριν από τη στρατηγική της απόδοσης με την πεποίθηση ότι η απόδοση μπορεί να αυξηθεί μετά την είσοδο στην αγορά. Αυτή η στρατηγική μπορεί να είναι επιτυχής μόνο σε περιπτώσεις όπου η αρχική επένδυση είναι επαρκής για την είσοδο στην αγορά και το προϊόν είναι βιώσιμο έτσι ώστε οι πελάτες να αγοράζουν συνεχώς. Στην κυματική ενέργεια, καμία από αυτές τις συνθήκες δεν είναι πιθανό να συμβεί. Μια στρατηγική ετοιμότητας πριν από την απόδοση είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα αποτύχει στην είσοδο στην αγορά, ενώ μια στρατηγική απόδοσης πριν από την ετοιμότητα θα προσφέρει ένα βιώσιμο προϊόν πιο φθηνά από οποιαδήποτε άλλη στρατηγική.

Η ταχεία αύξηση του TPL καθίσταται δυνατή μέσω δομημένων τεχνικών καινοτομίας όπως το TRIZ¹⁰[60] και την τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση [61] που εφαρμόζονται σε χαμηλό TRL. Βασική προϋπόθεση για την επιτυχία σε αυτό το στάδιο είναι η ευελιξία στον ορισμό της έννοιας. Η στρατηγική της απόδοσης πριν από την ετοιμότητα το διευκολύνει λόγω των ριζικών αλλαγών στα θεμελιώδη στοιχεία του συστήματος.

Συνέπεια της εστίασης στην ευελιξία και την καινοτομία σε επίπεδο ιδέας είναι ότι μπορεί να είναι απαραίτητο να δοκιμαστούν πολλές έννοιες για το TRL 2 ή το TRL 3 προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών για περαιτέρω ανάπτυξη. Μια πρόκληση στην εφαρμογή της τροχιάς της ανάπτυξης της απόδοσης πριν από την ετοιμότητα σχετίζεται με την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων στην κατανόηση των χαρακτηριστικών του ώριμου συστήματος πριν αυτό το σύστημα είναι πραγματικά διαθέσιμο. Αυτό μεταφράζεται σε απαίτηση για εξελιγμένο λογισμικό τεχνοοικονομικής αξιολόγησης και βελτιστοποίησης για τη συνετή χρήση των πειραματικών δοκιμών για μια δομημένη προσέγγιση της καινοτομίας.

Η στρατηγική της τεχνοοικονομικής ανάπτυξης για ένα WEC μπορεί να διαφέρει σε σχέση με τη σημασία των TPL ή TRL. Ορισμένες ακραίες περιπτώσεις στρατηγικών τεχνοοικονομικής ανάπτυξης θα μπορούσαν να ευνοήσουν το ένα από αυτά περισσότερο από το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι ο προγραμματιστής του WEC θα έδινε προτεραιότητα:

- σε μια ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη του WEC χωρίς αντιμετώπιση της τεχνολογικής απόδοσης. Εδώ, ο προγραμματιστής του WEC θα προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει τη διάρκεια μεταξύ των (αρχικών) φάσεων της ανάπτυξης. Αυτή η στρατηγική αναφέρεται ως «ετοιμότητα πριν από την απόδοση».

¹⁰Αναπτύχθηκε από τον Σοβιετικό εφευρέτη και συγγραφέα επιστημονικής φαντασίας Genrich Altshuller (1926-1998) και τους συναδέλφους του, ξεκινώντας το 1946. Αποτελεί θεωρία της εφευρετικής επίλυσης προβλημάτων. Είναι το επόμενο εξελικτικό βήμα στη δημιουργία μιας οργανωμένης και συστηματικής προσέγγισης για την επίλυση προβλημάτων. Η ανάπτυξη και βελτίωση προϊόντων και τεχνολογιών σύμφωνα με το TRIZ καθοδηγείται από τους αντικειμενικούς Νόμους της Εξέλιξης του Μηχανικού Συστήματος.



- στην απόδοση του WEC όπου πρέπει να βελτιστοποιηθεί πριν προχωρήσει στην επόμενη φάση της ανάπτυξης. Εδώ, δε σημειώνεται πρόοδος όσον αφορά το στάδιο της ανάπτυξης, εφόσον αποδεικνύεται ότι το υψηλότερο TPL, όπου δεν απαιτούνται επιδοτήσεις, είναι εφικτό. Αυτή η στρατηγική αναφέρεται ως «απόδοση πριν από την ετοιμότητα».

Η υιοθετούμενη αναπτυξιακή στρατηγική είναι συνήθως αποτέλεσμα των διαφορετικών απόψεων και ατζέντας των διαφορετικών ενδιαφερομένων πίσω από το WEC (π.χ. ο εφευρέτης, ο δημόσιος ή ιδιωτικός φορέας της χρηματοδότησης κ.λπ.) που μπορεί να ευνοούν τη μία στρατηγική έναντι της άλλης.

Σε όλες τις περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί πολύς χρόνος για να φτάσει το απαιτούμενο TPL και TRL με σκοπό μια επιτυχημένη είσοδο στην αγορά. Για την «ετοιμότητα πριν από την απόδοση», ολόκληρη η ανάπτυξη θα πρέπει να επαναληφθεί με ενημερωμένα βασικά στοιχεία του WEC, ενώ η «απόδοση πριν από την ετοιμότητα» θα απαιτήσει σημαντικά ποσά χρηματοδότησης εάν η διάρκεια της ανάπτυξης γίνει πραγματικά μεγάλη.

Οι θεμελιώδεις αρχές του WEC πρέπει να επιτρέπουν στην τεχνολογία να γίνει εμπορικά βιώσιμη. Αυτό είναι μείζονος σημασίας και πρέπει να είναι προφανές και εμφανές στο τέλος κάθε φάσης ανάπτυξης. Αυτό μπορεί να είναι λίγο πιο δύσκολο σε πρώιμες φάσεις ανάπτυξης, καθώς οι αβεβαιότητες είναι μεγαλύτερες, αλλά θα πρέπει να γίνει καλή τεκμηρίωση πριν την πραγματοποίηση δοκιμών στη θάλασσα. Επομένως, όλες οι σημαντικές πτυχές της τεχνολογίας των WEC, όπως η πρόσδεση, ο δομικός σχεδιασμός, η παραγωγή της ισχύος, ο μηχανισμός επιβίωσης, ο σχεδιασμός του PTO και άλλα πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες κυμάτων πριν η τεχνολογία WEC περάσει στη φάση των θαλάσσιων δοκιμών.

Υποθέτοντας ότι τα θεμελιώδη στοιχεία του WEC στην ανάπτυξη είναι ικανά να φέρουν το WEC σε μια επιτυχημένη είσοδο στην αγορά, τότε η αναπτυξιακή τροχιά θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί ώστε να περιοριστεί το απαιτούμενο ποσό της χρηματοδότησης και ο συνολικός χρόνος στην αγορά. Καθώς οι αλλαγές στα θεμελιώδη στοιχεία του WEC εξακολουθούν να είναι ευέλικτες, σχετικά φθηνές και να αλλάζουν γρήγορα στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης, αυτή θα πρέπει να είναι η πρώτη προτεραιότητα. Μπορεί στην αρχή να αφιερωθεί πολλή προσπάθεια με σχετικά χαμηλό κόστος και ελαχιστοποίηση της δομικής απαίτησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις του LCoE. Αυτό, στην πράξη, σημαίνει διάφορες πειραματικές δοκιμαστικές εκστρατείες, χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα του πλήρους συστήματος και των υποσυστημάτων χωριστά, έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση ενός μεγάλου εύρους φυσικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Αυτό θα οδηγήσει σε βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και σε εκτενή γνώση των φορτίων και των χαρακτηριστικών σχεδίασης όλων των βασικών μερών της συσκευής. Επίσης, η παράλληλη ανάπτυξη ενός αριθμητικού μοντέλου μπορεί να είναι ιδιαίτερα πολύτιμη εάν μπορεί να είναι επαρκώς ακριβής.

Μόλις οι πρώιμες φάσεις της ανάπτυξης (κυρίως η έρευνα) έχουν μεγιστοποιήσει το TPL, η εστίαση θα πρέπει να δοθεί στη μείωση του χρόνου διάθεσης στην αγορά, προκειμένου να εξασφαλιστεί το εισόδημα από τις πωλήσεις του WEC, αντί να βασίζεται περαιτέρω σε εξωτερική χρηματοδότηση. Αυτή θα είναι η αρχή της



διαδικασίας ανάπτυξης, η οποία στοχεύει στην επίδειξη της λειτουργίας του WEC σε ένα πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον. Το πρώτο πρωτότυπο θα είναι μειωμένης κλίμακας και θα λειτουργεί σε μια κατάλληλη τοποθεσία όπου το WEC θα μπορεί να λειτουργεί σε λογικές συνθήκες κυμάτων. Ο στόχος θα είναι να είναι πλήρως λειτουργικό και να λειτουργεί ως μια αυτόνομη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Θα πρέπει, ωστόσο να παρουσιάζει επίσης δεδομένα σε διάφορες καταστάσεις, όπως σε καταιγίδες ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή του και να μετρηθούν τα ακραία φορτία στην κατασκευή. Το τελευταίο στάδιο της ανάπτυξης θα παρουσιάσει στη συνέχεια ένα WEC πλήρους κλίμακας που θα είναι σε θέση να λειτουργεί πλήρως αυτόνομα και θα είναι έτοιμο για επιτυχημένη είσοδο στην αγορά. Θα υπάρχει πάντα περιθώριο για βελτιώσεις και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται παράλληλα με τις εμπορικές δραστηριότητες της εταιρείας WEC, όπως κάνει κάθε εταιρεία που βασίζεται στην τεχνολογία.

4.5 Τα οικονομικά των WEC.

Στην κυματική ενέργεια, ίσως περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο κλάδο, τα οικονομικά της ανάπτυξης των προϊόντων και της ιδιοκτησίας του προϊόντος δεν είναι ξεχωριστά από τη μηχανική και το σχεδιασμό του προϊόντος. Αυτό συμβαίνει διότι, παρά τις υψηλές δυνατότητες των αναξιοποίητων ενεργειακών πόρων και τη συνεχή προσοχή της ακαδημαϊκής έρευνας και των καινοτόμων εταιρειών και εφευρετών, μέχρι στιγμής κανείς δεν έχει επιτύχει επαληθευμένα ένα ελάχιστο βιώσιμο προϊόν σε ένα σύστημα μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων.

Η εξελικτική βελτίωση λόγω των σταδιακών εξελίξεων από πολλούς ειδικούς σε μεμονωμένα θέματα θα ακολουθούσε φυσικά οποιοδήποτε βιώσιμο προϊόν. Τα επαναστατικά άλματα προς τα εμπρός θα ήταν επίσης ευκολότερο να χρηματοδοτηθούν με τη γνώση μιας ήδη βιώσιμης αγοράς.

Τα συστήματα μετατροπής της κυματικής ενέργειας είναι σχετικά πολύπλοκα συστήματα και η ανάπτυξη προϊόντων είναι αναγκαστικά πολυεπιστημονική. Η απόδειξη της μέχρι τώρα εμπειρίας στην ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας είναι ότι η αριστεία σε κάθε κλάδο συστατικών είναι απαραίτητη αλλά όχι επαρκής προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός επιτυχημένου προϊόντος. Με άλλα λόγια, είναι πιθανό ένα πρόγραμμα που επιτυγχάνει αριστεία σε κάθε επιμέρους κλάδο να μην επιτύχει ένα βιώσιμο προϊόν. Απαιτείται μια πιο ολιστική προσέγγιση που να εστιάζει στα οικονομικά της μεγάλης εικόνας.

Ο κλάδος της μηχανικής των συστημάτων παρέχει ένα κατάλληλο πλαίσιο για την ολιστική προσέγγιση που θα μπορούσε να επιτρέψει την πρόοδο προς ένα βιώσιμο σύστημα μετατροπής της κυματικής ενέργειας. Η διαδικασία της μηχανικής των συστημάτων στοχεύει να διασφαλίσει την επάρκεια και την πληρότητα του συστήματος για τις απαιτήσεις των πελατών, ενώ παράλληλα εξισορροπεί αυτούς τους στόχους με τους διαθέσιμους πόρους και το χρονοδιάγραμμα του προγράμματος ανάπτυξης του συστήματος.

Η οικονομική ανάλυση επικαλείται δύο φορές σε αυτόν τον ορισμό, πρώτα στις απαιτήσεις των πελατών που λογικά θα περιλαμβάνουν την απαίτηση για ένα επικερδές σύστημα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και δεύτερον, στην



αναφορά στους διαθέσιμους πόρους του προγράμματος ανάπτυξης του συστήματος. Η κατανομή αυτών των σπάνιων πόρων σε εναλλακτικούς σχεδιασμούς και εναλλακτικά ερευνητικά προγράμματα θα πρέπει να βασίζεται σε οικονομική ανάλυση.

Το προϊόν μιας επιχείρησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Για μια επιχείρηση παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας όλα τα άλλα πράγματα εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι γενικά εμπορεύσιμα προϊόντα. Συγκεκριμένα, η ισχύς και η ενέργεια, ενώ προφανώς σχετίζονται, δεν είναι το ίδιο πράγμα. Η ενέργεια είναι η ικανότητα εκτέλεσης εργασίας και μετρείται σε kWh ή MWh. Η ισχύς είναι ο στιγμιαίος ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας και μετράται σε kW ή MW. Οι μονάδες που πωλούνται είναι μονάδες ενέργειας και όχι ισχύος. Τα ετήσια έσοδα μιας επιχείρησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευθέως ανάλογα με την ετήσια παραγωγή της ενέργειας και δε συνδέονται αυστηρά άμεσα με την ισχύ της. Η ετήσια παραγωγή της ενέργειας είναι απλώς η συνολική ενέργεια που παράγεται σε περίοδο ενός έτους. Η ετήσια μέση ισχύς είναι η μέση ισχύς για ένα έτος είναι:

$$\text{Μέση ισχύς (MW)} = \frac{\text{Παραγωγή ενέργειας (MWh)}}{\text{Χρόνος (ώρες)}} \quad (4.1)$$

$$\text{Ετήσια Μέση ισχύς (MW)} = \frac{\text{Ετήσια Παραγωγή ενέργειας (MWh)}}{24 \times 365 \text{ (ώρες)}} \quad (4.2)$$

Η ονομαστική χωρητικότητα της ισχύος είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί σε ένα παρατεταμένο χρονικό πλαίσιο, σε μία ή περισσότερες ώρες, χωρίς να προκληθεί ζημιά ή υπερθέρμανση του εξοπλισμού. Η εγκατεστημένη χωρητικότητα ισχύος είναι για τους περισσότερους σκοπούς είναι ίδια με την ονομαστική χωρητικότητα ισχύος. Ο συντελεστής χωρητικότητας μιας γεννήτριας είναι ο λόγος της μέσης ισχύος της ως προς την ονομαστική της ισχύ:

$$\text{Συντελεστής χωρητικότητας} = \frac{\text{Ετήσια Μέση ισχύς}}{\text{Ονομαστική χωρητικότητα ισχύος}} = \frac{\text{Ετήσια Παραγωγή ενέργειας}}{24 \times 365 \times \text{Ονομαστική χωρητικότητα}} \quad (4.3)$$

Μια σημαντική εισροή στους οικονομικούς υπολογισμούς είναι η ετήσια ενεργειακή παραγωγικότητα. Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ονομαστικής χωρητικότητας και της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης είναι σημαντική. Η σχέση μπορεί να γραφτεί χρησιμοποιώντας τον παράγοντα της χωρητικότητας:

$$\text{Ετήσια παραγωγή ενέργειας} = 24 \times 365 \times \text{Συντ. χωρητικότητας} \times \text{Ονομαστική χωρητικότητα ισχύος} \quad (4.4)$$



Θα πρέπει να είναι προφανές από την προηγούμενη εξίσωση ότι η ονομαστική χωρητικότητα της ισχύος από μόνη της είναι ανεπαρκής πληροφορία για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγικότητας (ή των εσόδων) μιας επιχείρησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (απαιτείται επίσης ο συντελεστής χωρητικότητας). Μόνο η χωρητικότητα της ισχύος είναι το νούμερο που δημοσιοποιείται πάντα στις αναφορές των μέσων ενημέρωσης και στη δημοσιότητα της εταιρείας. Ωστόσο, μια ονομαστική χωρητικότητα ισχύος δεν έχει νόημα, εκτός εάν συνοδεύεται από ένα συντελεστή χωρητικότητας, επειδή απαιτούνται και τα δύο μέτρα για τον υπολογισμό της ετήσιας ενεργειακής παραγωγικότητας.

Οι τεχνικές προεξόφλησης των ταμειακών ροών αποτελούν τις πιο σύγχρονες στην οικονομική εκτίμηση και ανάλυση των επενδύσεων. Αρκετές μετρήσεις των οικονομικών αποφάσεων χρησιμοποιούν προεξοφλημένες ταμειακές ροές, συμπεριλαμβανομένων της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) και του εξισορροπημένου κόστους ενέργειας (LCoE). Το NPV είναι το πιο καθολικά εφαρμοσμένο μέτρο επενδύσεων σε όλους τους τομείς επενδύσεων και το LCoE είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο στις επενδύσεις παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Συχνά εταιρείες ή επενδυτές δεν επιλέγουν να επενδύσουν με βάση ένα κριτήριο, αλλά θα αξιολογήσουν το έργο χρησιμοποιώντας δύο, ή και περισσότερα κριτήρια. Η κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών πρέπει να βασίζεται σε μία μόνο μέτρηση, συνήθως το NPV, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες πρόσθετες μετρήσεις ως κριτήρια για το φιλτράρισμα έργων που δεν πληρούν ορισμένες απαιτήσεις.



5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δυνατότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των κυμάτων είναι σημαντική. Για να επιτευχθεί μια εμπορική ανάπτυξη των WEC, θα χρειαστεί μεγάλη προσπάθεια σε χρόνο και χρήμα σε ερευνητικά έργα. Μέχρι αυτή τη στιγμή, έχουν διατεθεί σημαντικοί πόροι για αυτό, αλλά η διασπορά στους τύπους WEC είναι σημαντική.

Συνιστάται η σωστή κατανομή των πόρων που αναζητούν συνέργειες. Υπάρχουν διαφορετικές ταξινομήσεις των WEC. Οι πιο γνωστές είναι αυτές που βασίζονται στη θέση του σε σχέση με την ακτή, τη θέση της συσκευής που σχετίζεται με το επίπεδο της θάλασσας, το μέγεθος και τον προσανατολισμό της συσκευής και την αρχή της δέσμευσης της ενέργειας. Επιπλέον, η ταξινόμηση των συσκευών των κυμάτων (EMEC) τα διακρίνει μεταξύ εξασθενητή, απορρόφησης σημείου, μετατροπέα ταλαντευόμενου κύματος κύματος, στήλης ταλαντευόμενου νερού, συσκευής υπέρβασης / τερματισμού, διαφορικού βυθισμένης πίεσης, κύματος διόγκωσης, περιστρεφόμενης μάζας και άλλων.

Η επιτυχημένη διαδικασία της ανάπτυξης των WEC απαιτεί μεγάλο χρόνο και μέσα. Η βέλτιστη τροχιά της ανάπτυξης καταφέρνει να περιορίσει αυτές τις δαπάνες στο ελάχιστο, ενώ παράλληλα προσφέρει ένα οικονομικά βιώσιμο προϊόν στο τέλος της ανάπτυξής του. Καθώς τα σχετικά έξοδα (χρόνος και χρήμα) αυξάνονται εκθετικά με τα στάδια ανάπτυξης (TRL) ενώ οι ευέλικτες παράμετροι μειώνονται γρήγορα, είναι υψίστης σημασίας να βελτιστοποιηθούν οι αρχές του WEC σε πρώιμο στάδιο (TRL 1-4) μέχρι το επίπεδο που εξασφαλίζεται το οικονομικό δυναμικό του WEC (TPL > 7).

Εάν, όταν περάσει το TRL 4 (οι αρχές εργασίας του WEC έχουν καθοριστεί και η νέα προοπτική είναι προς επίδειξη), το TPL δεν είναι μεγαλύτερο από 7 (τουλάχιστον οικονομικά βιώσιμο με κίνητρα), τότε τα επακόλουθα έξοδα θα σπαταληθούν και θα μπορούσαν ενδεχομένως να βλάψουν την αξιοπιστία και την εικόνα του κατασκευαστή αυτής της τεχνολογίας ή ακόμα και του κλάδου. Γενικά, κατά τη διάρκεια κάθε TRL της ανάπτυξης, πρέπει να αξιολογείται η δυνατότητα του WEC να είναι σε θέση να επιτύχει μια είσοδο στην αγορά (TPL > 7), λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα με αυτήν την εκτίμηση. Εάν αυτό αποδειχθεί αρνητικό, ή υποδηλώνει αμφιβολίες σχετικά με τις δυνατότητές του, τότε η πρόοδος όσον αφορά το TRL θα πρέπει να σταματήσει και ίσως χρειαστεί ακόμη και να γίνουν κάποια αναπτυξιακά βήματα προς τα πίσω. Αυτή θα είναι η μόνη επιλογή, καθώς σημαντικές τροποποιήσεις στα θεμελιώδη στοιχεία του WEC είναι δυνατές μόνο στα πρώτα TRL.

Όταν εξετάζονται τα WEC που αναπτύσσονται αυτήν τη στιγμή διεθνώς, οι αρχές της λειτουργίας τους εξακολουθούν να είναι πολύ ευρείες, ενώ μόνο ένα πολύ μικρό μέρος αυτών αναμένεται να είναι σε θέση να φτάσει το ικανοποιητικό TPL για επιτυχή είσοδο στην αγορά. Αυτά τα WEC υπό ανάπτυξη έχουν συχνά βιαστεί πολύ γρήγορα στα TRL, καθώς έχουν δημιουργήσει υπερβολικά αισιόδοξες εκτιμήσεις για τα TPL τους (ή δε μετρήθηκαν ουσιαστικά τα TPL).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Brekken, B. Batten and E. Amon, "From blue to green," *IEEE Control Syst Mag*, vol. 31, no. 5, p. 18–24.
- [2] E. Rusu and F. Onea, "Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands," *Renew Energy*, vol. 85, p. 687–703, 2016.
- [3] J. Portillo, "Wave energy converter physical model design and testing: The case of floating oscillating-water-columns," *Appl Energy*, 2020.
- [4] A. Falcão and H. J., "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review.," *Renew Energy*, vol. 85, p. 1391–1424, 2016.
- [5] J. Isaacs and W. Schmitt, "Ocean Energy: Forms and Prospects. Science," *New Series, American Association for the Advancement of Science*, vol. 207, p. 265–273, 1980.
- [6] "www.whoi.edu," [Online]. Available: <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/did-you-know/what-causes-ocean-waves/>. [Accessed 19 5 2022].
- [7] "geophile.net," [Online]. Available: http://geophile.net/Lessons/waves/waves_02.html. [Accessed 19 5 2022].
- [8] I. Thorbjornsson, «Future prospects of renewable energy production in Iceland,» 2012.
- [9] S. Barstow, "WorldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast," Uppsala, Sweden, 2009.
- [10] R. Dean and R. Dalrymple, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists," Singapore, 1991.
- [11] "opentextbc.ca," [Online]. Available: <https://opentextbc.ca/geology/chapter/17-1-waves/>. [Accessed 19 5 2022].
- [12] M. Cuttler, H. J. and R. Lowe, "Seasonal and interannual variability of the wave climate at a wave energy hotspot off the southwestern coast of Australia," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2337-2350, 2020.
- [13] T. Whittaker and M. Folley, "Nearshore oscillating wave surge converters and the



development of oyster," *Philos. Trans. R. Soc. A* 370, p. 345–364, 2012.

- [14] "www.submon.org," [Online]. Available: <https://www.submon.org/en/why-are-waves-always-coming-parallel-to-the-shore/>. [Accessed 26 5 2022].
- [15] "www.wikiwand.com," [Online]. Available: https://www.wikiwand.com/en/Breaking_wave. [Accessed 28 5 2022].
- [16] J. Battjes, "Surf similarity," Copenhagen, Denmark , 1974.
- [17] L. Myers, A. Bahaj, C. Retzler, H. Sørensen, F. Gardner, C. Bittencourt and J. Flinn, "Equimar Deliverable D5.5: Guidance on pre-deployment and operational actions associated with marine energy arrays.," *EquiMar Protocols—Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact*, 2010.
- [18] A. Pecher, J. Kofoed and T. Larsen, "The extensive R & D behind the Weptos WEC," *RENEW, Lisbon, Portugal*, 2014.
- [19] J. Falnes, "Principles for capture of energy from ocean waves," *Phase control and optimum oscillation. Department of Physics, NTNU*, 1997.
- [20] A. Babarit, "A database of capture width ratio of wave energy converters renew," *Energy*, vol. 80, p. 610–628, 2015.
- [21] E. Bjornstad, "Control of wave energy converter with constrained electric power take off," *NTNU*, 2011.
- [22] B. Hahn, M. Durstewitz and K. Rohrig, "Reliability of Wind Turbines: Experiences of 15 years with 1,500 WTs," in *Wind Energy Proceedings of Euromech Colloquium*, 2007.
- [23] J. Falnes, "A review of wave-energy extraction," *J. Marine Structures*, vol. 20, no. 4, pp. 185-201, 2007.
- [24] Irena, "Wave Energy: Technology Brief," *International Renewable Energy Agency technical report*, p. 28.
- [25] J. Cruz, *Ocean Waves Energy—Current Status and Future Perspectives*, Springer Series in Green Energy and Technology (2008). ISSN 1865-3529. ISBN 978-3-540-74894-6, 2008, pp. ISSN 1865-3529. ISBN 978-3-540-74894-6.
- [26] P. Ibáñez, "Energía de las olas: situación y futuro," *Xornada sobre Enerxía que Vén do Mar*, 2008.
- [27] E. Rusu and Onea F, "A review of the technologies for wave energy extraction,"



Clean Energy, vol. 2, pp. 10-19, 2018.

- [28] R. Magnus, "Ocean Wave Energy: Underwater Substation System for Wave Energy Converters," *Digital Comprehensive Summaries, Faculty of science and technology*, 2010.
- [29] "power-technology," [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>. [Accessed 5 5 2022].
- [30] "wavepartnership," [Online]. Available: <https://wavepartnership.dk/wave-energy-converters/>. [Accessed 6 5 2022].
- [31] "emec," [Online]. Available: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>. [Accessed 5 5 2022].
- [32] "euroquity," [Online]. Available: <https://www.euroquity.com/en/entity/Crestwing-ApS-c9d4d75b-1f4f-42ea-bfcb-1acb8ae20785/>. [Accessed 4 5 2022].
- [33] A. Poullikkas, "Technology Prospects of Wave Power Systems," *J. Energy Environ. Electron*, vol. 2, p. 47–69, 2014.
- [34] K. Tarrant and M. C., "Investigation on parametrically excited motions of point absorbers in regular waves," *J. of Ocean Engineering*, 2016.
- [35] "oceanenergy," 11 2021. [Online]. Available: <https://www.oceanenergy-europe.eu/industry-news/bermuda-and-seabased-sign-agreement-for-site-of-40mw-wave-energy-power-park/>. [Accessed 5 5 2022].
- [36] "theexplorer," [Online]. Available: <https://www.theexplorer.no/solutions/enabling-offshore-remote-operations-with-wave-energy/>. [Accessed 6 5 2022].
- [37] "renewableenergymagazine," [Online]. Available: https://www.renewableenergymagazine.com/ocean_energy/carnegie-wave-energy-receives-erdf-grant-for-20161107. [Accessed 3 5 2022].
- [38] "carnegiece," [Online]. Available: <https://www.carnegiece.com/intellectual-property/>. [Accessed 3 5 2022].
- [39] "oleoinc," 5 2012. [Online]. Available: <https://www.oleoinc.com/case-studies/view/2022/02/oyster-wave-energy-converter>. [Accessed 3 5 2022].
- [40] "oedigital," [Online]. Available: <https://www.oedigital.com/news/456750-dnv-gl-verifies-waveroller-performance>. [Accessed 4 5 2022].
- [41] "offshore-energy," [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/resolute-marine-joins-forces-with-revision-to-optimize-wave2o-technology/>. [Accessed 4 5



2022].

- [42] J. Todalshaug, A. Babarit, J. Krokstad and M. M., "The NumWEC project. Numerical estimation of energy delivery from a selection of wave energy converters – final report," 2015.
- [43] "floatingpowerplant," [Online]. Available: <https://www.floatingpowerplant.com/>. [Accessed 8 5 2022].
- [44] S. Salter, "Wave power.," *Nature*, p. 720–724 , 1974.
- [45] "kirt-thomsen," [Online]. Available: <https://www.kirt-thomsen.com/case05>. [Accessed 4 5 2022].
- [46] J. Hayward and P. Osman, "The potential of wave energy," *Wave Energy*, 2012.
- [47] J. Kofoed, P. Frigaard, E. Madsen and H. Sorensen, "Prototype testing of the wave energy converter wave dragon," *Renewable Energy*, pp. 181-189, 2006.
- [48] D. Vicinanza, L. Margheritini, J. Kofoed and M. Buccino, "The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments," *Energies* , pp. 193-226, 2012.
- [49] "www.inspiritvr.com," [Online]. Available: <https://www.inspiritvr.com/physics/harmonic-motion-and-waves/wave-interference-study-guide>. [Accessed 5 6 2022].
- [50] S. Das and P. Sahoo, "Investigation of Sway, Roll and Yaw Motions of a Ship with Forward Speed: Numerical modeling for flared up conditions," *Ship and Offshore Structures*, vol. 8, pp. 49-56, 2008.
- [51] G. Keulegan and L. Carpenter, " Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid," *J. Res. Nat. Bur. Stan.*, vol. 60, p. 423–440, 1985.
- [52] J. Todalshaug, "Practical limits to the power that can be captured from ocean waves by oscillating bodies," *Int. J. Mar. Energy*, 2013.
- [53] J. Weber, "WEC technology readiness and performance matrix—finding the best research technology development trajectory," in *4th International Conference on Ocean Energy*, Dublin, 2012.
- [54] A. Kurniawan, "Modelling and geometry optimisation of wave energy converters," 2013.
- [55] J. Chozas, J. Kofoed and N. Helstrup, "The COE Calculation Tool for Wave



Energy Converters," 2014.

- [56] J. Fitzgerald and B. Bolund, "Technology Readiness for Wave Energy Projects," 2012.
- [57] AARE, "Commercial Readiness Index for Renewable Energy Sectors," *Australian Agency of Renewable Energy*, 2014.
- [58] D. Padeletti, R. Costello and J. Ringwood, "A multi-body algorithm for wave energy converters employing nonlinear joint representation," 2014.
- [59] K. Gadd and C. Goddard, *TRIZ for Engineers: Enabling Inventive Problem Solving*, 2011.
- [60] R. Costello, B. Teillant, J. Weber and J. Ringwood, "Techno-economic optimisation for wave energy converters.," 2012.
- [61] B. Hamedni, C. Mathieu and C. Bittencourt-Ferreira, "Generic WEC System Breakdown. D5.1 of SDWED project," *DNV-GL, Aalborg University*, 2014.
- [62] J. Fitzgerald, "Financing Ocean Energy Technology Development," *ESBI*, 2012.
- [63] J. Weber, R. Costello, F. Mouwen, J. Ringwood and G. Thomas, "Techno-economic WEC system optimisation methodology applied to Wavebob system definition," Bilbao, 2010.