

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ενέργεια από Κύματα

Περιγραφή και Ανάλυση
Τεχνολογιών



Ελπίδα Βόντα
Θάλεια Ευθαλία Τηλιακού

Επιβλέπων: Β. Μποντόζογλου, Καθηγητής Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ 2019

© 2019 Ελπίδα Βόντα, Θάλεια Ευθαλία Τηλιακού

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου, επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης αυτής, για την στήριξη του και για τις επιστημονικές συμβουλές του.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Πελεκάση και τον Καθηγητή κ. Ανδρίτσο.

Τέλος, ευχαριστούμε τις οικογένειες μας, Μαριρένα, Σωκράτη και Μαρία, Άγγελο και τους φίλους μας, Έλλη, Γεωργία, Δημοσθένη, Ελευθερία και Μαρκέλλα για τη συνεχή στήριξη τους.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο της συμπεριφοράς των θαλάσσιων κυμάτων, μελετάται η λειτουργία ορισμένων τύπων συσκευών και προσεγγίζεται η μοντελοποίηση των υπεράκτιων(offshore) συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας(WECs).

Στο κεφάλαιο 2 εισάγονται οι πρώτες έννοιες, ιδιότητες και χαρακτηριστικά των κυμάτων και γίνεται ανασκόπηση ορισμένων βασικών γνώσεων από τη Ρευστομηχανική και την Κυματομηχανική που είναι απαραίτητες για την κατανόηση και μελέτη των θαλάσσιων κυμάτων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των υφιστάμενων τεχνολογιών WECs και θα εξεταστούν πιο αναλυτικά ορισμένες συσκευές που έχουν φτάσει σε πλήρη κλίμακα. Η ανάλυση της λειτουργίας των συσκευών θα περιοριστεί στις 4 κύριες ανταγωνιστικές τεχνολογίες: Oscillating Water Column(OWC), Archimedes Wave Swing(AWS), Pelamis και Wave Dragon.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι επιλογές μοντελοποίησης κατά την μελέτη ενός WEC. Η προσοχή μας περιορίζεται σε εκείνες τις συσκευές που λειτουργούν σε υπεράκτιο περιβάλλον(offshore) και ιδιαίτερα σε επιπλέουσες κατασκευές. Αναφέρονται οι υδροδυναμικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία βελτιστοποίησης κατά τη μελέτη μιας συσκευής. Επίσης γίνεται και περιορισμένη αναφορά σε μεθοδολογίες σχεδιασμού και ελέγχου των συσκευών.

Abstract

In this diploma thesis, the theoretical background of marine wave behavior is presented, the operation of certain types of devices is studied and the modelling of offshore wave energy converters (WECs) is approached.

In Chapter 2 the first concepts, properties and characteristics of the waves are introduced and we review important theory of Fluid Mechanics and Wave Mechanics that is necessary for the understanding and study of sea waves.

Chapter 3 describes existing WECs technologies and examines in more detail some devices that have reached a full scale. Analysis of the operation of the devices will be confined to the four main competitive technologies: Oscillating Water Column (OWC), Archimedes Wave Swing (AWS), Pelamis and Wave Dragon.

Chapter 4 describes the modelling options during the study of a WEC. Our attention is limited to offshore devices and especially to floating constructions. The hydrodynamic principles governing the optimization process when studying a device are described. There is also a limited reference to device design and control strategies.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	11
2	Θεωρία Κυμάτων.....	19
2.1	Κατηγοριοποίηση Κυμάτων	20
2.1.1	Με βάση τη συχνότητα	20
2.1.2	Με βάση το προφίλ ταλάντωσης	21
2.1.3	Με βάση το βάθος ύδατος.....	21
2.2	Χαρακτηριστικά κύματος	22
2.3	Χαρακτηριστικά ομάδας κυματισμών (wavegroup)	23
2.4	Ιδιότητες κυμάτων.....	24
2.4.1	Ανάκλαση	24
2.4.2	Αρχή της Επαλληλίας.....	25
2.4.3	Διάθλαση.....	25
2.4.4	Περίθλαση	27
2.4.5	Ρήχωση	27
2.4.6	Θραύση Κυματισμών στα Ρηχά.....	28
2.4.7	Διασπορά.....	29
2.5	Θεμελιώδεις Σχέσεις	30
2.5.1	Διατήρηση Μάζας και Ορμής.....	30
2.5.2	Δυναμικό Ταχυτήτων.....	31
2.6	Γραμμική Θεωρία Κυμάτων	32
2.6.1	Συνθήκες στην Ελεύθερη Επιφάνεια	32
2.6.2	Υπολογισμός Μήκους Κύματος.....	35
2.7	Βασικές Έννοιες Αποδοτικότητας Συσκευών (WECs).....	37
2.7.1	Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης	37
2.7.2	Απόδοση	37
2.7.3	Μέγιστο Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης.....	38
2.7.4	Καμπύλη Εύρους Συχνοτήτων (Bandwidth)	38
3	Συσκευές WECs Πλήρους Κλίμακας	39
3.1	Ταξινόμηση Συσκευών	39
3.2	Εναλλακτική Ταξινόμηση Συσκευών	40
3.3	Εξολοθρευτής (Terminator)	43
3.4	Σημειακός Απορροφητής (point absorber)	52

3.4.1	Συσκευή Archimedes Wave Swing (AWS)	54
3.4.2	Σχεδιασμός Πλήρους Κλίμακας Πειραματικής Μονάδας	57
3.4.3	Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη Διαμήκους Ροής (LFPM).....	58
3.5	Εξασθενητής (Attenuator).....	62
3.5.1	Συσκευή Pelamis.....	64
3.5.2	Σύστημα Λήψης Ισχύος	65
3.5.3	Υδροδυναμική της Συσκευής Pelamis	70
3.6	Συσκευή Wave Dragon	72
3.6.1	Θεωρία Υπερπήδησης (Overtopping Theory)	76
3.6.2	Φτερά-Ανακλαστήρες Κυμάτων (Wave Reflector Wings).....	80
3.6.3	Στρόβιλοι Χαμηλού Μανομετρικού Ύψους.....	81
3.6.4	Έλεγχος	86
4	Μοντελοποίηση.....	86
4.1	Προκαταρκτικές Εκτιμήσεις	86
4.2	Μοντελοποίηση της Πηγής	88
4.2.1	Ισχύς Πηγής και Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης.....	91
4.3	Υδροδυναμική των Υπεράκτιων Συσκευών (Offshore Devices)	91
4.3.1	Υδροδυναμικές Προσεγγίσεις	93
4.3.2	Δυνάμεις εντός του Πλαισίου Περίθλασης.....	94
4.3.3	Εξίσωση Κίνησης	98
4.4	Βέλτιστη Υδροδυναμική Απόδοση	101
4.4.1	Μια Αξονοσυμμετρική Συσκευή (Single Axisymmetric Device)	103
4.5	Περιορισμένη Κίνηση (Constrained Motion)	105
4.6	Συστοιχίες Συσκευών (Arrays of Devices)	106
4.7	Έλεγχος και Σχεδιασμός	109
4.7.1	Ρύθμιση (Tuning) και Καμπύλη Εύρους Συχνοτήτων (Bandwidth).....	111
4.7.2	Σχεδιασμός	114
4.7.3	Στρατηγικές Ελέγχου	118
4.8	Εισαγωγή στο Αριθμητικό Μοντέλο.....	120
4.8.1	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου Συνοριακών Στοιχείων.	121
4.8.2	Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (BEM) και Ενέργεια από τα Κύματα της Θάλασσας.....	123
4.8.3	Αρχικά Βήματα της Μεθόδου BEM	124
4.8.4	Διακριτοποίηση Σώματος.....	125
4.8.5	Υπολογιστικά Προγράμματα BEM.....	127
	Συμπεράσματα	129

Βιβλιογραφικές Αναφορές	131
-------------------------------	-----

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1-1.: Διάφορες τεχνολογίες WEC	12
Εικόνα 1-2: LIMPET OWC plant, rated 500 kW, installed in 2000 on the island of Islay	12
Εικόνα 1-3: Πίσω όψη της συσκευής 400 kW OWC στο νησί Pico, Azores, Portugal, 1999. ..	13
Εικόνα 1-4: AWS installed off Orkney in 2007 by AWS Ocean Energy with eventual plans to create 250kW	13
Εικόνα 1-5: The Pelamis Prototype machine at EMEC, Orkney, Scotland, 2007, 750(kW).....	14
Εικόνα 1-6: Wave Dragon, Overtopping Device 1.5 to 12(MW).....	14
Εικόνα 1-7: Καμπύλες απόδοσης αδιάστατες σε σχέση με την περίοδο κύματος, ενός heaving σώματος με ένα απλό γραμμικώς αποσβενούμενο σύστημα PTO. Συμπαγείς γραμμές: βέλτιστη απόσβεση	17
Εικόνα 2-1:	19
Εικόνα 2-2:: Συχνότητα και Περίοδος κυμάτων ωκεανού. © Cambridge University Press, 2007.....	20
Εικόνα 2-3: Χαρακτηριστική κύματος	22
Εικόνα 2-4: Χαρακτηριστικά κύματος σε τρεις διαστάσεις	23
Εικόνα 2-5: Μέτωπο Κύματος	23
Εικόνα 2-6: Περίθλαση και Συμβολή κυματισμών, δύο από τις σημαντικότερες ιδιότητες τους, έξω από τις βόρειες ακτές της Ν. Ζηλανδίας.....	24
Εικόνα 2-7: Απεικόνιση της Ενισχυτικής και Καταστρεπτικής Συμβολής	25
Εικόνα 2-8: Νόμος του Snell Πηγή : Μετασχηματισμοί Κυματισμών (Β.Κ. Τσουκαλά)	26
Εικόνα 2-9: Περίθλαση για δύο διαφορετικές μορφές εμποδίων και για οπή	27
Εικόνα 2-10: Τροχιές που αναπαριστούν την κίνηση των μορίων του νερού για διάφορα βάθη ύδατος	28
Εικόνα 2-11 : Θραύση κυμάτων στην ακτή	29
Εικόνα 2-12: :Γράφημα της ταχύτητας(c) των κυμάτων έναντι του μήκους κύματος(λ) για διάφορα βάθη ύδατος(h).	30
Εικόνα 2-13: Ορισμός συστήματος γραμμικών κυματισμών.....	32
Εικόνα 2-14: Τροχιές σωματιδίων με το σχετικό βάθος, όπου d το βάθος πυθμένα και L το μήκος κύματος (λ)	35
Εικόνα 2-15: Κυματισμοί με μικρή διαφορά μήκους κι η επαλληλία τους (ΜΣΘ: Μέση Στάθμη Θάλασσας).....	36
Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση της κλίμακας και του προσανατολισμού ενός εξολοθρευτή(Terminator), ενός εξασθενητή (attenuator) και ενός απορροφητή σημείων(point absorber).....	40
Εικόνα 3-2: Τύποι Συσκευών WEC	43
Εικόνα 3-3: Oscillating Water Column, Terminator type WEC.....	44
Εικόνα 3-4: Pico OWC, σχήμα (πάνω αριστερά) και σε λειτουργία (πάνω δεξιά), OceanLynx, σχήμα (κάτω αριστερά), πραγματική φωτογραφία συσκευής (κάτω δεξιά)	44
Εικόνα 3-5: Σχηματική απεικόνιση του OWC.....	45
Εικόνα 3-6: Τουρμπίνα Wells που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση LIMPET	46
Εικόνα 3-7: Σχήμα τουρμπίνας Wells.....	47

Εικόνα 3-8: Αεροδυναμικές δυνάμεις και ταχύτητες που δρουν σε μια λεπίδα στροβίλου Wells	48
Εικόνα 3-9: Αναπαράσταση καμπύλης απόδοσης η - Φ	49
Εικόνα 3-10: Προφίλ πνευματικής ισχύος και στιγμιαίας απόδοσης.....	50
Εικόνα 3-11: OWC Pico plant.....	52
Εικόνα 3-12: Archimedes Wave Swing, Point Absorber.....	53
Εικόνα 3-13: Archimedes Wave Swing.....	54
Εικόνα 3-14: Archimedes Wave Swing by AWS Ocean Energy	54
Εικόνα 3-15: Archimedes wave swing converter	56
Εικόνα 3-16: Archimedes Wave Swing.....	56
Εικόνα 3-17: Πιλοτική εγκατάσταση AWS αγκυροβολημένη το 2004 στο Leixões, Πορτογαλία	57
Εικόνα 3-18: Φρένα Νερού	58
Εικόνα 3-19: Η διατομή μιας γεννήτριας LFPM, η διαδρομή μαγνητικής ροής απεικονίζεται με μια διακεκομμένη γραμμή και η κατεύθυνση της ροής με βέλη	59
Εικόνα 3-20: Σχήμα γεννήτριας Longitudinal flux permanent magnet generator(LFPM)	60
Εικόνα 3-21: Εξασθενητής (Attenuator).....	63
Εικόνα 3-22: Απλοποιημένο σχήμα του εξασθενητή Pelamis, (a)πλάγια όψη,(b)κάτοψη	63
Εικόνα 3-23: Συσκευή Pelamis	64
Εικόνα 3-24: Μονάδα μετατροπής ισχύος Pelamis	65
Εικόνα 3-25: Γενικοί ορισμοί 6 βαθμών ελευθερίας	66
Εικόνα 3-26: Pelamis σε λειτουργία (αριστερά) και υδραυλικός κινητήρας του (δεξιά)	67
Εικόνα 3-27: Pelamis PTO.....	67
Εικόνα 3-28: Σύστημα παραγωγής ενέργειας τύπου Pelamis	68
Εικόνα 3-29: Απλοποιημένο σχήμα του Pelamis PTO	69
Εικόνα 3-30: Σχέδιο της απόκρισης του Pelamis υπό συνθήκες μη-συντονισμού (1) και συντονισμού (2)	72
Εικόνα 3-31: Συσκευή Wave Dragon.....	72
Εικόνα 3-32: Wave Dragon πρωτότυπο κλίμακας 1:4.5 συνδεδεμένο με το δίκτυο, δοκιμή στο Nissum Bredning, Denmark	73
Εικόνα 3-33: Τεχνολογία Wave Dragon	74
Εικόνα 3-34: Σχηματική απεικόνιση Wave Dragon	75
Εικόνα 3-35: Σύστημα πρόσδεσης του Wave Dragon.....	76
Εικόνα 3-36: Σχήμα ροών στο Wave Dragon.....	77
Εικόνα 3-37: Κατακόρυφη κατανομή ενέργειας σε στήλη νερού.....	78
Εικόνα 3-38: Βύθισμα και χαρακτηριστικά μεγέθη της συσκευής	79
Εικόνα 3-39: Πίνακας εύρους μανομετρικού ύψους των κοινών τύπων στροβίλων	82
Εικόνα 3-40: Kaplan turbine	82
Εικόνα 3-41: Απόδοση σε σχέση με το μανομετρικό ύψος για παραλλαγές της τουρμπίνας Kaplan.....	83
Εικόνα 3-42: Απόδοση και παροχή τουρμπίνας προς το μανομετρικό ύψος για σταθερή και μεταβλητή ταχύτητα	84
Εικόνα 3-43: Siphon on/off turbine.....	85
Εικόνα 3-44: Wave Dragon cylinder gate turbine	85
Εικόνα 4-1: Διάγραμμα πυκνότητας ισχύος (kW/m/Hz) σε σχέση με τη συχνότητα (Hz) στις τοποθεσίες Pico και South Uist (συνεχείς γραμμές) και στην αντίστοιχη offshore τοποθεσία για το Pico (διακεκομμένη).	87

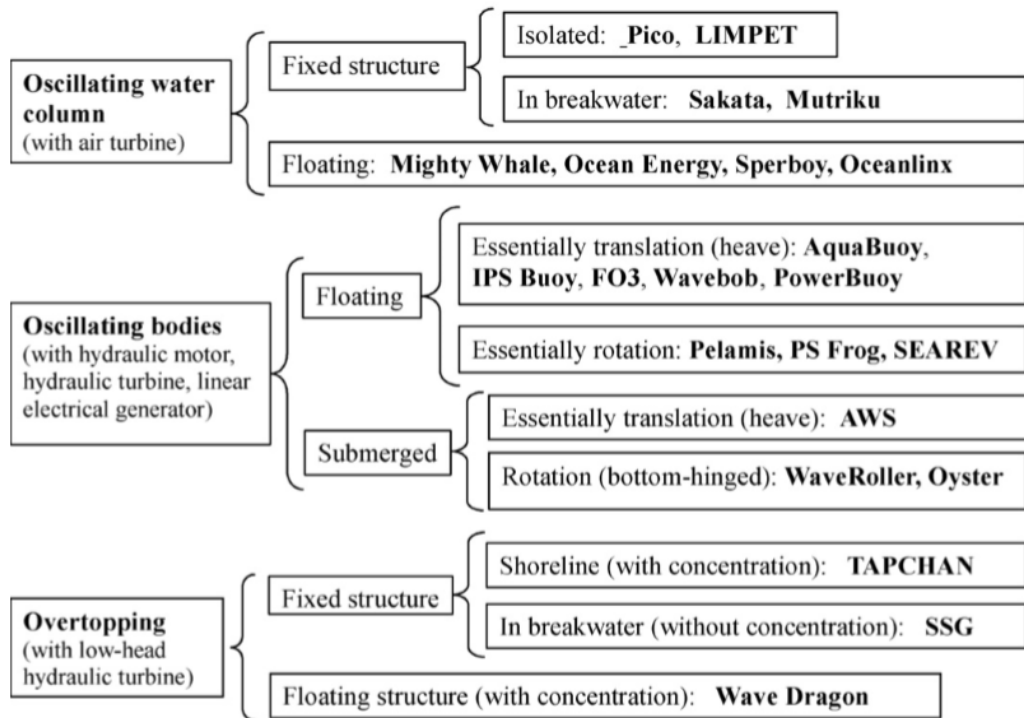
Εικόνα 4-2: Προφίλ επιφάνειας του κύματος, όπου φαίνεται η ανύψωση (m) σε σχέση με τη χρόνο (s) και αντιστοιχεί στο φάσμα του Pico της Εικόνας 1	88
Εικόνα 4-3: Μορφή δισδιάστατων κυμάτων (long-crested)	90
Εικόνα 4-4: Περιγραφή τρόπων κίνησης για ένα σημειακό απορροφητή, 3 κινήσεις περιστροφής (yaw, pitch, roll) και 3 μεταφορικές κινήσεις (heave, sway, surge)	92
Εικόνα 4-5: Κίνηση σημειακού απορροφητή	92
Εικόνα 4-6: Δυνάμεις που ασκούνται σε σημειακό απορροφητή	94
Εικόνα 4-7: Συστοιχία AWS (Archimedes Wave Swing) τύπου σημειακού απορροφητή	106
Εικόνα 4-8: Προσδιορισμός των σχετικών γωνιών πρόσπτωσης κύματος.....	108
Εικόνα 4-9: Μεταβολή του συντελεστή q με την αδιάστατη παράμετρο διαστήματος kd , για μια ομοιόμορφα διαχωρισμένη γραμμική συστοιχία πέντε ημι-βυθισμένων σφαιρών και προσπίπτοντα κύματα που αντιστοιχούν σε beam seas και head seas (συνεχείς γραμμές) και σε $\pi / 4$ (διακεκομμένη γραμμή). Η διακεκομμένη γραμμή $q = 1$ είναι ισοδύναμη με καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών συστοιχίας.....	108
Εικόνα 4-10: Τυπικές καμπύλες εύρους συχνοτήτων για το Bristol Cylinder, όπου φαίνεται η μεταβολή της υδροδυναμικής απόδοσης E με την αδιάστατη συχνότητα ν για τρεις συχνότητες συντονισμού (συνεχόμενες γραμμές). Η καμπύλη μέγιστης απόδοσης (διακεκομμένη) και η καμπύλη της πηγής του South Uist (διακεκομμένη-τελείες) φαίνονται επίσης.	113
Εικόνα 4-11: Μεταβολή της πυκνότητας ισχύος $P(\nu)$ με την αδιάστατη συχνότητα ν για το Bristol Cylinder για τις τρεις στρατηγικές βελτιστοποίησης των Εξ.(4.50)-(4.53) (συνεχείς γραμμές) με την πηγή στόχο του South Uist (διακεκομμένη)	117
Εικόνα 4-12: Στρατηγική Ασφάλισης που δείχνει την επιθυμητή μετατόπιση του σώματος (συνεχής γραμμή) σε σχέση με την ημιτονοειδή χρονική εξάρτηση (διακεκομμένη)	120
Εικόνα 4-13: Επιφανειακό πλέγμα σφαιρικού σημειακού απορροφητή από το AQWA (εργαλειοθήκη ANSYS)	121
Εικόνα 4-14: Επιφανειακό πλέγμα σημειακών απορροφητών για κωνικό (1) και ημισφαιρικό κύλινδρο (2).....	122
Εικόνα 4-15: Τομή σημειακού απορροφητή (πάνω) και συμμετρικό πλέγμα (κάτω) Φαίνεται μόνο η βρεχόμενη επιφάνεια και το μισό τμήμα που ορίζει ο xz άξονας συμμετρίας.....	124
Εικόνα 4-16: Αρχική προσομοίωση OWC με τη συσκευή απομονωμένη	128
Εικόνα 4-17: Τελική προσομοίωση OWC με την τελική γεωμετρία συσκευής, την ακτή και τη βαθυμετρία γύρω του	128

Κεφάλαιο Πρώτο

1 Εισαγωγή

Στο σύγχρονο κόσμο υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας. Μέχρι τώρα οι βασικοί ενεργειακοί πόροι είναι τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία σύντομα θα εξαντληθούν και οι εκπομπές που παράγονται από αυτά συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Για ένα βιώσιμο μέλλον, αυτά τα ορυκτά καύσιμα θα πρέπει να αντικατασταθούν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ωκεανοί μπορούν να μας προσφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια τους: από τα κύματα, από τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες) και από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού. Μια πηγή ενέργειας με μεγάλες δυνατότητες αποδιδόμενης ισχύος (power output) που δεν έχουμε εκμεταλλευτεί επαρκώς και αποτελεί το αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι τα κύματα της θάλασσας.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η μελέτη των κυμάτων έλαβε σημαντική προσοχή για την αξιοποίηση της ενέργειας του ωκεανού. Για την λήψη αυτής της ενέργειας, χρειάζονται συσκευές (Wave Energy Converters-WECs) που θα μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι μελέτες που έχουν γίνει στον τομέα της κυματικής ενέργειας δεν έχουν καταλήξει σε βελτιστοποιημένα μοντέλα συσκευών. Σημαντικές εκκρεμότητες αποτελούν η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση του κόστους των υφιστάμενων WECs. Η βιομηχανία έχει προτείνει πολλές τεχνολογίες, όπως τους terminators (εξολοθρευτές), τους σημειακούς απορροφητές (point absorbers), τους εξασθενητές (attenuators) και το σύστημα υπερπήδησης (overtopping system). Για να αναπτυχθούν τέτοιες συσκευές, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι μοντελοποίησης όπως η αναλυτική μέθοδος, η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM), η μέθοδος εξισώσεων Navier-Stokes και η εμπειρική μέθοδος.



Εικόνα 1-1.: Διάφορες τεχνολογίες WEC

Πηγή: *Wave energy utilization: A review of the technologies*, Falcao(2009)



Εικόνα 1-2: LIMPET OWC plant, rated 500 kW, installed in 2000 on the island of Islay

Πηγή: *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*, Antonio Falcao, João C Henriques, (2016)



Εικόνα 1-3: Πίσω όψη της συσκευής 400 kW OWC στο νησί Pico, Azores, Portugal, 1999.
Πηγή: *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*, Antonio Falcao, João C Henriques, (2016)



Εικόνα 1-4: AWS installed off Orkney in 2007 by AWS Ocean Energy with eventual plans to create 250kW
Πηγή: <https://teamwork.nl/front-page/twt/portfolio/aws-2/>



Εικόνα 1-5: The Pelamis Prototype machine at EMEC, Orkney, Scotland, 2007, 750(kW)

Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Pelamis_Wave_Energy_Converter



Εικόνα 1-6: Wave Dragon, Overtopping Device 1.5 to 12(MW)

Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon

Οι κυριότερες ανησυχίες σχετικά με την πρακτική χρήση των συσκευών WECs είναι η βιωσιμότητα, η δυνατότητα συντήρησης και η επιβίωση τους στις διάφορες συνθήκες θαλάσσης. Φυσικά, είναι επίσης απαραίτητο να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της δομής καθώς και η ελαχιστοποίηση του κόστους. Η μοντελοποίηση των συσκευών είναι απαραίτητη, καθώς αποσκοπούμε στην ανάπτυξη πιο ρεαλιστικών μοντέλων WECs, ενώ παράλληλα επιδιώκουμε την μείωση του χρόνου προσομοίωσης τους. Στην διαδικασία βελτιστοποίησης του μοντέλου επιθυμούμε την ενσωμάτωση του παράγοντα κόστους στο πρόβλημα του σχεδιασμού, έτσι ώστε να έχουμε μια οικονομική και ταυτόχρονα αποδοτική συσκευή WEC.

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης των αριθμητικών εργαλείων, αντιμετωπίστηκαν πολλές δυσκολίες. Ένας από τους στόχους των αριθμητικών προσομοιώσεων ήταν να αποδοθεί μια πλήρης περιγραφή όλων των δυνάμεων που δρουν στη συσκευή σε ακραία κύματα: αδρανειακές δυνάμεις (inertial forces), δυνάμεις οπισθέλκουσας (drag forces), υδροδυναμική ακτινοβολία (hydrodynamic radiation) και φαινόμενα περίθλασης (diffraction effects).

Σύμφωνα με τον Falcão (2009), για ένα σώμα που επιπλέει και κάνει ταλάντωση σε μία διεύθυνση (δηλαδή έχει ένα βαθμό ελευθερίας), στο οποίο προσπίπτουν ημιτονοειδή κύματα κάνουμε την υπόθεση γραμμικού συστήματος λήψης ισχύος και όσον αφορά τα κύματα θεωρούμε ότι έχουν γραμμική συμπεριφορά. Για ένα τέτοιο σώμα, οι υδροδυναμικές δυνάμεις πάνω στη βρεχόμενη επιφάνεια αναλύονται σε δυνάμεις διέγερσης (λόγω των προσπιπτόντων κυμάτων, όπου κάνουμε την υπόθεση ακίνητου σώματος), σε δυνάμεις λόγω ακτινοβολίας (λόγω της κίνησης του σώματος, όπου υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν προσπίπτοντα κύματα) και σε υδροστατικές δυνάμεις (αφορούν τη στιγμιαία θέση του σώματος σε σχέση με την ελεύθερη επιφάνεια).

Αν θεωρήσουμε ότι η θέση του σώματος ορίζεται από την κάθετη διεύθυνση x (όπου το $x = 0$ αντιστοιχεί σε ήρεμα ύδατα) τότε η εξίσωση κίνησης για το σώμα μάζας m γίνεται :

$$(m + A)\ddot{x} = f_d - B\dot{x} - \rho g S x + f_{PTO} \quad (1) , \text{ όπου}$$

$f_d(t)$: η κάθετη συνιστώσα της δύναμης διέγερσης (θεωρούμε $f_d = 0$ για ήρεμα ύδατα)

$f_{PTO}(t)$: η κάθετη συνιστώσα της δύναμης λόγω του μηχανισμού λήψης ισχύος

$A(\omega)$: ο υδροδυναμικός συντελεστής λόγω προστιθέμενης μάζας, όπου λαμβάνεται υπόψη η αδράνεια του νερού γύρω από το σώμα

$B(\omega)$: ο συντελεστής απόσβεσης λόγω ακτινοβολίας, όπου υπολογίζεται η απόσβεση της κίνησης του σώματος λόγω της ενέργειας που μεταφέρει στα κύματα που ακτινοβολούνται από αυτό

S : το εμβαδόν της διατομής του σώματος από την επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια (όπου, $-\rho g S x$ είναι η υδροστατική δύναμη επαναφοράς)

Για το σύστημα λήψης ισχύος υποθέτουμε ότι αποτελείται από ένα γραμμικό αποσβεστήρα (συντελεστής C) και ένα γραμμικό ελατήριο (δυσκαμψίας K) και καταλήγουμε στη μορφή

$$f_{PTO} = -C\dot{x} - Kx .$$

Για ημιτονοειδή κύματα πλάτους A_W και συχνότητας ω , έχουμε τα μιγαδικά πλάτη : $\mathbb{X} = \mathbb{X}_R + i\mathbb{X}_I$ και $F_d = F_{d,R} + iF_{d,I}$, όπου $\{x, f_d\} = \text{Re}(\{X, F_d\}e^{i\omega t})$

Έτσι σε συνδυασμό με την (1), καταλήγουμε :

$$\mathbb{X} = \frac{F_d}{-\omega^2(m+A) + i\omega(B+C) + \rho g S + K} \quad (2) .$$

Αν θεωρήσουμε δύο πραγματικές ποσότητες : $\alpha = -\omega^2(m + A) + \rho g S + K$ και $\beta = \omega(B + C)$, τότε η (2) γίνεται :

$$\mathbb{X} = \frac{F_d(\alpha - i\beta)}{\alpha^2 + \beta^2} \quad (3)$$

Αρχικά, σκοπός μας είναι να εκτιμήσουμε την μέση χρονικά ισχύ που απορροφάται από τη συσκευή καθώς και τη μέγιστη τιμή της, όπου

$$\bar{P} = \overline{-f_{PTO}\dot{x}} \quad (4)$$

Άρα έχουμε $\overline{f_{PTO}\dot{x}} = \overline{-C\dot{x}^2} - \overline{Kx\dot{x}}$.

Και αφού έχουμε γραμμικό σύστημα ξέρουμε ότι οι όροι $\overline{x\dot{x}}$ και είναι μηδενικοί . Επίσης το μιγαδικό πλάτος της ταχύτητας $\dot{x}(t)$ μπορεί να γραφεί με τη μορφή $U = i\omega\mathbb{X}$ και άρα $\overline{\dot{x}^2} = \frac{1}{2}\omega^2|\mathbb{X}|^2$. Ακόμη από την (3), παίρνουμε ότι $|\mathbb{X}|^2 = \frac{|F_d|^2}{\alpha^2 + \beta^2}$ και καταλήγουμε :

$$\bar{P} = \overline{-f_{PTO}\dot{x}} = \overline{C\dot{x}^2} + \overline{Kx\dot{x}} = \frac{1}{2}C\omega^2|\mathbb{X}|^2 = \frac{1}{2}C\omega^2 \frac{|F_d|^2}{\alpha^2 + \beta^2}$$

Εφόσον για ένα δεδομένο σώμα και ένα δεδομένο προσπίπτον κύμα τα μεγέθη B και F_d είναι σταθερά, η ισχύς εξαρτάται από το \mathbb{X} , δηλαδή μόνο τους άγνωστους συντελεστές C και K του συστήματος λήψης ισχύος (PTO). Άρα οι συνθήκες για την P_{max} είναι :

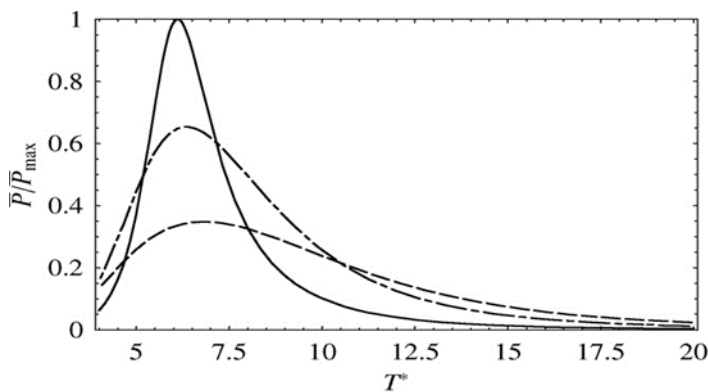
$$i. \quad \alpha = 0 \Leftrightarrow \omega = \left(\frac{\rho g S + K}{m + A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\Rightarrow K = \omega^2(m + A) - \rho g S$$

$$ii. \quad \frac{1}{2} \frac{C \omega^2}{\omega^2(B+C)^2} = \max, \text{ όταν } C = B \quad (5)$$

Η συνθήκη (4) εκφράζει μια κατάσταση συντονισμού, όπου στο δεξί μέλος έχουμε τη συχνότητα των ελεύθερων ταλαντώσεων ενός μηχανικού ταλαντωτή χωρίς απόσβεση μάζας ($m+A$) με ένα ελατήριο δυσκαμψίας $\rho g S + K$.

Από τη μελέτη του Hulme (1982) παίρνουμε την παρακάτω καμπύλη για ένα ταλαντευόμενο σώμα που επιπλέει, όπου αναπαριστάται ο λόγος \bar{P}/\bar{P}_{max} ως προς μια αδιάστατη περίοδο T^* , για διάφορες τιμές του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης C του PTO και υποθέτοντας $K=0$.



Εικόνα 1-7: Καμπύλες απόδοσης αδιάστατες σε σχέση με την περίοδο κύματος, ενός heaving σώματος με ένα απλό γραμμικώς αποσβενούμενο σύστημα PTO. Συμπαγείς γραμμές: βέλτιστη απόσβεση
 Πηγή: Wave energy utilization: A review of the technologies, Falcao(2009)

Η καμπύλη δείχνει πως ένα βέλτιστα αποσβενόμενο σώμα (C_{opt}) αποκρίνεται αποδοτικά σε ένα σχετικά μικρό εύρος περιόδων, γύρω από την περίοδο συντονισμού. Στην περίπτωση υπεραπόσβεσης ($C > C_{opt}$) έχουμε μια λιγότερη μυτερή και φαρδύτερη καμπύλη, η οποία βέβαια ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματική συμπεριφορά των κυμάτων, τα οποία καταλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η ακτίνα του σώματος που προκύπτει για τη βέλτιστη λύση είναι αρκετά μεγάλη για τα πραγματικά πρακτικά και οικονομικά δεδομένα. Από την άλλη τα μικρότερα σώματα ή αλλιώς σημειακοί απορροφητές έχουν αρκετά φτωχά αποτελέσματα για τα μεγέθη κύματος των ανοιχτών θαλασσών, έτσι η πρόκληση έγκειται στο να επιστρατεύσουμε τις κατάλληλες στρατηγικές ελέγχου, ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση των WECs και ειδικότερα των σημειακών απορροφητών.

Τέλος ένα πολύ ενδιαφέρον μέγεθος με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης L . Στην αρχή της δεκαετίας του 1970 αποδείχθηκε ανεξάρτητα από διάφορους ερευνητές όπως ο Budal, ο Falnes, ο Evans, ο Newman και ο Μεί ότι ισχύει η σχέση $L_{max} = \frac{\overline{P_{max}}}{E} = \frac{\lambda}{2\pi}$, το οποίο αποτέλεσε ένα κομβικό θεωρητικό αποτέλεσμα για τη μελέτη των WECs.

Κεφάλαιο Δεύτερο

2 Θεωρία Κυμάτων

Σύμφωνα με τον Chia-Shun Yih (1979), όταν μία μάζα νερού διαταράσσεται, είτε βρίσκεται σε κίνηση είτε όχι, έτσι ώστε τα μόρια του ρευστού να μετατοπίζονται από τις αρχικές τους θέσεις ή ροϊκές γραμμές, τότε αρχίζουν να επιδρούν πάνω της δυνάμεις επαναφοράς (restoring forces). Αυτές μπορεί να είναι είτε η βαρυτική δύναμη, είτε η επιφανειακή τάση, είτε κεντρομόλος δύναμη ενός περιστρεφόμενου ρευστού, είτε η υπερπίεση (excess pressure) που προκαλείται λόγω συμπίεσης. Η κίνηση του ρευστού λόγω αυτών των δυνάμεων επαναφοράς δε σταματάει όταν το ρευστό φτάσει την αρχική θέση του στατικού ή δυναμικού ισοζυγίου, αλλά υπερβαίνει το σημείο αυτό (overshoot) και απαιτεί την επανενεργοποίηση των δυνάμεων επαναφοράς. Έτσι η κίνηση του κύματος γεννιέται και διαιωνίζεται μέχρι την απόσβεση της λόγω ιξώδους ή μέχρι να προσκρούσει σε κάποιο εμπόδιο όπως η ακτή της θάλασσας στην περίπτωση μας.



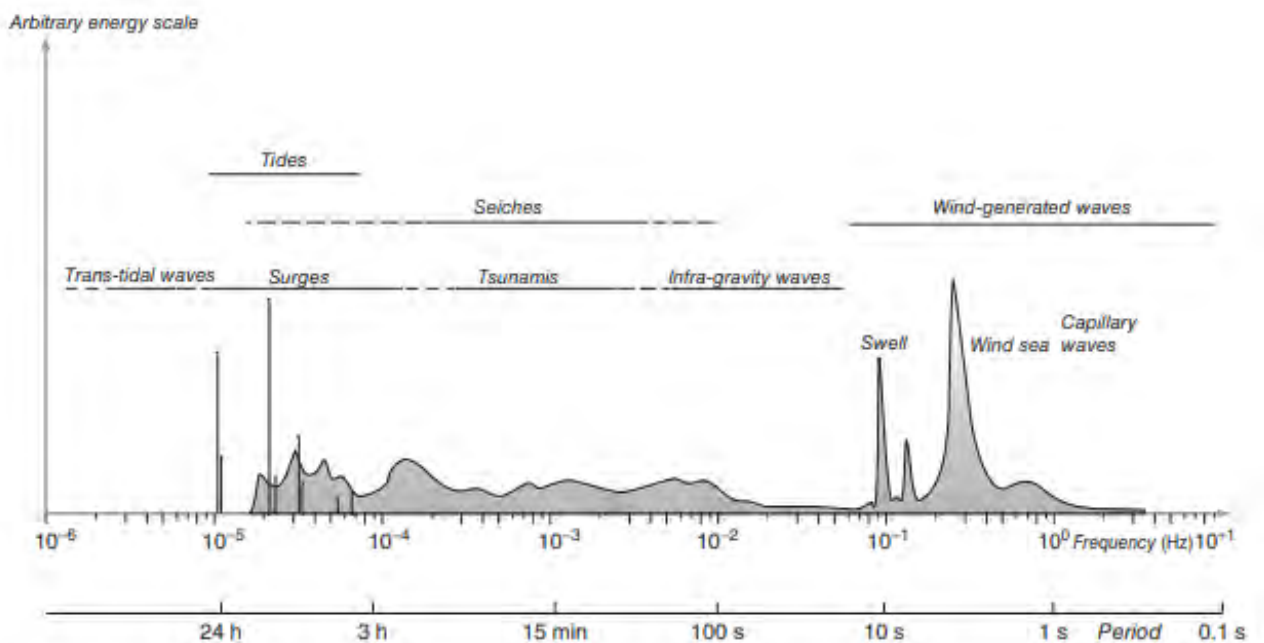
Εικόνα 2-1:

Πηγή : www.boem.gov/Ocean-Wave-Energy/

2.1 Κατηγοριοποίηση Κυμάτων

2.1.1 Με βάση τη συχνότητα

Σύμφωνα με τους Alessandro Toffoli Elzbieta και M.Bitner-Gregersen (2017), τα θαλάσσια κύματα αρχικά ξεχωρίζουν βάσει των μηχανισμών παραγωγής και επαναφοράς τους, οι οποίοι προκαλούν ταλαντώσεις σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων και συνεπώς μηκών κύματος. Οι βασικές γενεσιουργές δυνάμεις προκαλούνται από τον αέρα, την ατμοσφαιρική βαθμίδα πίεσης και τη βαρυτική έλξη. Ενώ οι δυνάμεις επαναφοράς προκαλούνται λόγω της διατμητικής τάσης, της βαρύτητας και της δύναμης Coriolis. Βέβαια ο πιο συνηθισμένος τρόπος διάκρισης των κυμάτων που σχετίζεται άμεσα και με τα παραπάνω είναι βάσει της περιόδου ή του αντίστοιχου μήκους κύματος.



Εικόνα 2-2:: Συχνότητα και Περίοδος κυμάτων ωκεανού. © Cambridge University Press, 2007.
Πηγή : Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, online © 2017 John Wiley & Sons, Ltd

Μετά τα πρώτα κύματα που παρατηρούνται στην επιφάνεια της θάλασσας, τα οποία είναι τα τριχοειδή, τα επόμενα είναι τα ανεμογενή κύματα (ultragravity waves, gravity waves, infragravity waves). Εμείς θα επικεντρωθούμε στα ultragravity και gravity κύματα, στα οποία η ταχύτητα διάδοσης τους είναι συνάρτηση της βαρύτητας. Η δύναμη επαναφοράς τους είναι κυρίως η βαρύτητα και δευτερευόντως η επιφανειακή τάση. Η ορμή των κυμάτων ωθεί την επιφάνεια από την αρχική επίπεδη θέση της, όσο η βαρύτητα προσπαθεί να επαναφέρει την αρχική

μορφή του νερού. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο φαινομένων επιτρέπει στο κύμα να συνεχίζει να διαδίδεται. Μια σημαντική ιδιότητα αυτών των κυματισμών είναι ότι στο στάδιο ανάπτυξης τους, η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα διάδοσης της ομάδας κυματισμών (wavegroup) είναι ίδιες.

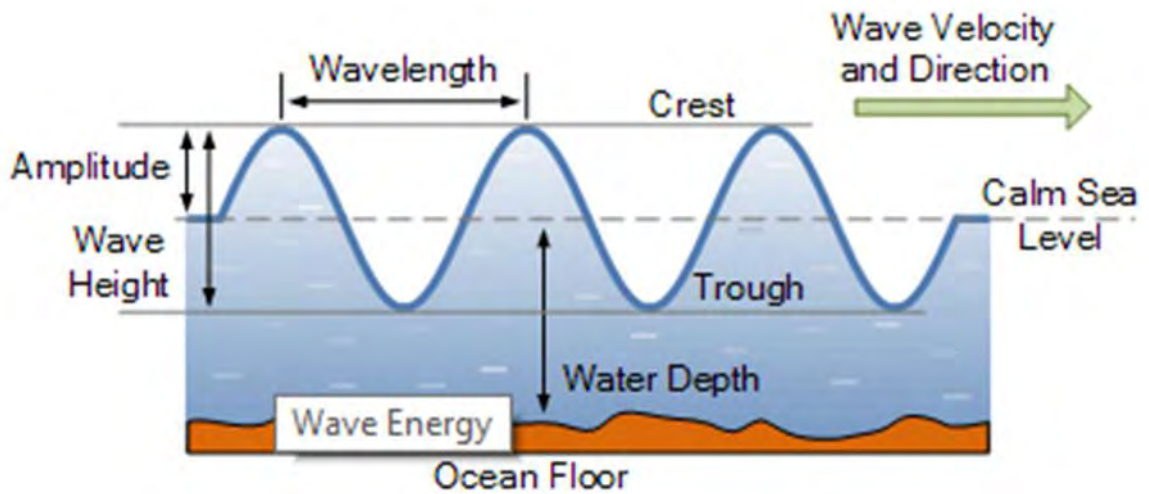
2.1.2 Με βάση το προφίλ ταλάντωσης

Το κύμα στην απλούστερη μορφή του είναι μια έκφραση κίνησης ή διάδοσης ενέργειας μέσω ενός υγρού. Έτσι όταν το προφίλ της ταλάντωσης κινείται σχετικά με το υγρό, το αποτέλεσμα είναι το πλέον γνωστό *μεταδιδόμενο κύμα* (progressive). Αυτή είναι κι η μορφή που έχουν τα περισσότερα κύματα που συναντώνται στην επιφάνεια της θάλασσας. Σε συγκεκριμένες μόνο περιπτώσεις, το προφίλ του κύματος παραμένει σε μια θέση, δημιουργώντας μόνο κάθετη ταλάντωση της επιφάνειας της θάλασσας χωρίς να διαδίδεται στην οριζόντια κατεύθυνση. Βέβαια εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με μεταδιδόμενα κύματα.

2.1.3 Με βάση το βάθος ύδατος

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό τους σχετίζεται με το βάθος του νερού, πάνω από το οποίο διαδίδεται η ταλάντωση. Συγκεκριμένα αν το βάθος είναι πολύ μεγαλύτερο του μήκους κύματος (π.χ. $H/\lambda > 1/2$), η κίνηση των μορίων του νερού λόγω του κύματος εξασθενούν με το βάθος και τελικά εξαφανίζεται όταν το βάθος ισούται με το μισό του μήκους κύματος. Σε αυτές τις συνθήκες τα κύματα δεν επηρεάζονται από τον πυθμένα κι ορίζονται ως *κύματα βαθέων υδάτων*. Από την άλλη αν το βάθος του νερού είναι πολύ μικρότερο του μήκους κύματος (π.χ. $H/\lambda < 0.05$), η στήλη ύδατος δεν είναι αρκετή για να επιτρέψει την πλήρη ανάπτυξη της κίνησης του κύματος, επηρεάζοντας τις ιδιότητες της επιφανειακής ταλάντωσης. Αυτή η κατηγορία κυμάτων χαρακτηρίζεται ως *κύματα ρηχών υδάτων*. Για βάθος νερού ανάμεσα στις δύο αυτές συνθήκες, τα κύματα επηρεάζονται μερικώς μόνο από την τοπογραφία του πυθμένα κι ορίζονται ως *κύματα ενδιάμεσων υδάτων*. Τα ανεμογενή κύματα, με τα οποία θα ασχοληθούμε, μεταδίδονται ως κύματα βαθέων και ενδιάμεσων υδάτων και καταλήγουν ως ρηχών υδάτων όταν κατευθύνονται προς την ακτή.

2.2 Χαρακτηριστικά κύματος

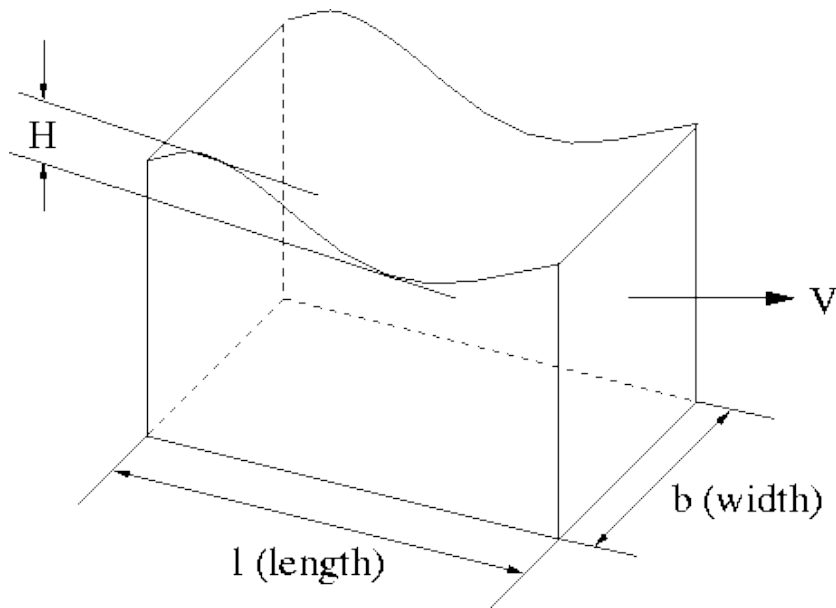


Εικόνα 2-3: Χαρακτηριστική κύματος

Πηγή : <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy.html>

- Κορυφή (crest) : μέγιστο σημείο
- Κοιλία (trough) : ελάχιστο σημείο
- Περίοδος κύματος T : το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών, όπου αντίστοιχα ορίζεται κι η συχνότητα f κι η γωνιακή ταχύτητα $\omega=2\pi f$
- Πλάτος ταλάντωσης (amplitude) a : η απόλυτη τιμή της μέγιστης (ή της ελάχιστης) τιμής της ταλάντωσης
- Μήκος κύματος (wave length) λ : η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών κύματος
- Μέση Στάθμη Θάλασσας-Μ.Σ.Θ. (Calm sea level) : Στάθμη ηρεμίας
- Ύψος κύματος (wave height) h : κάθετη απόσταση μεταξύ κορυφής και κοιλάς
- Βάθος ύδατος (water depth) H ή d : βάθος πυθμένα σε σχέση με τη Μ.Σ.Θ
- Πλάτος κύματος b (width)

Παρακάτω φαίνεται και το πλάτος του κύματος b , το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία σύλληψης ενέργειας από τα κύματα της θάλασσας.

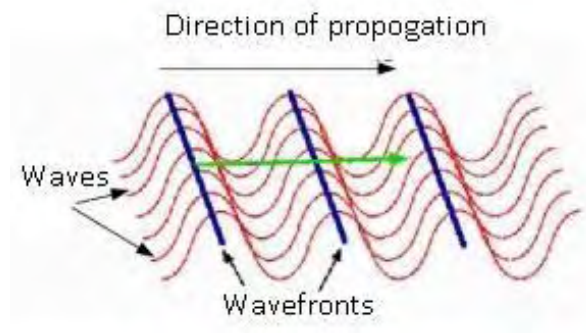


Εικόνα 2-4: Χαρακτηριστικά κύματος σε τρεις διαστάσεις

Πηγή: http://cavity.cae.utexas.edu/kinnas/wow/public_html/waveroom/linthe/node24.html

2.3 Χαρακτηριστικά ομάδας κυματισμών (wavegroup)

- Μέτωπο Κύματος (wavefront) : Αποτελεί τη νοητή γραμμή ή επιφάνεια, που συνδέει όλα τα γειτονικά σημεία, τα οποία έχουν την ίδια φάση. Στην ουσία είναι το σύνολο των σημείων στα οποία μόλις έφτασε η διαταραχή.



Εικόνα 2-5: Μέτωπο Κύματος

Πηγή: <http://www.examear.com/notes/Class-12/Physics/Wave-Optics/2002/Wavefront.htm>

- Κυματάριθμος (wavenumber) k : Ορίζεται ως η χωρική συχνότητα ενός κύματος σε κύκλους ανά μονάδα απόστασης, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Αν η χρονική συχνότητα μπορεί να ορισθεί ως ο αριθμός κυμάτων ανά μονάδα χρόνου, ο κυματάριθμος ορίζεται ως ο αριθμός κυμάτων ανά μονάδα απόστασης.

2.4 Ιδιότητες κυμάτων

Όλα τα κύματα συμπεριφέρονται σύμφωνα με κάποιες ιδιότητες, οι βασικότερες των οποίων είναι η διάθλαση, η ανάκλαση, η αρχή της επαλληλίας ή υπέρθεσης και η περίθλαση. Αυτές είναι οι ιδιότητες που μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά τους και τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν με το έδαφος, είτε αυτό είναι η ακτή είτε ο πυθμένας της θάλασσας. Παρόλο που φαίνεται εύκολη η μελέτη των ανεμογενών κυμάτων σε βαθιά νερά, όταν αυτά πλησιάζουν την ακτή, η ανάλυση τους γίνεται πολύ πιο περίπλοκη.



Εικόνα 2-6: Περίθλαση και Συμβολή κυματισμών, δύο από τις σημαντικότερες ιδιότητες τους, έξω από τις βόρειες ακτές της Ν. Ζηλανδίας

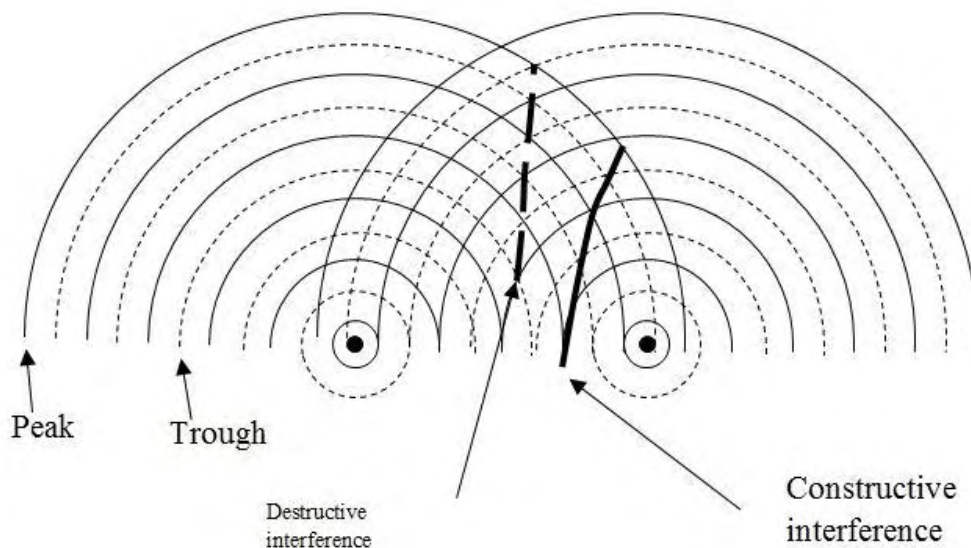
Πηγή : <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/121-behaviour-of-waves>

2.4.1 Ανάκλαση

Η ανάκλαση των θαλάσσιων κυμάτων σε μία ακτή συνήθως δεν αποτελεί σημαντική ιδιότητα τους, εκτός αν υπάρχει σε αυτήν κάποιος απότομος βράχος ή κάποιος κυματοθραύστης. Τα ανακλώμενα κύματα τείνουν να μπλέκονται με τα προσπίπτοντα κύματα κι εν τέλει να μελετώνται μέσα από αυτά.

2.4.2 Αρχή της Επαλληλίας

Όταν δύο κύματα που διαδίδονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις συναντώνται, τότε οι ενέργειες τους συνδυάζονται και σχηματίζουν ένα μοντέλο συμβολής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει είτε σε περιοχές υψηλών κυμάτων, όταν αυτά προστίθενται (ενισχυτική συμβολή), είτε σε περιοχές εξασθενημένων ή ανύπαρκτων κυμάτων όταν αυτά αλληλοαναιρούνται (καταστρεπτική συμβολή). Ενισχυτική συμβολή έχουμε, όταν το πλάτος του κύματος, που προέρχεται από την υπέρθεση, είναι μεγαλύτερο από κάθε πλάτος οποιουδήποτε από τα κύματα που υπερθέτονται. Αντίστοιχα καταστρεπτική συμβολή έχουμε όταν το πλάτος του παραγόμενου κύματος είναι μικρότερο από κάθε πλάτος οποιουδήποτε από τα κύματα που υπερθέτονται. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια απλή μορφή της καταστρεπτικής και της ενισχυτικής συμβολής. Σύμφωνα με όσα ξέρουμε από την Κυματομηχανική, δυο κύματα είναι σύμφωνα όταν έχουν την ίδια ταχύτητα, συχνότητα, μήκος κύματος και την ίδια σχέση φάσης κι όχι απαραίτητα την ίδια φάση. Για δύο πηγές που εκπέμπουν τέτοια κύματα, η συμβολή τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



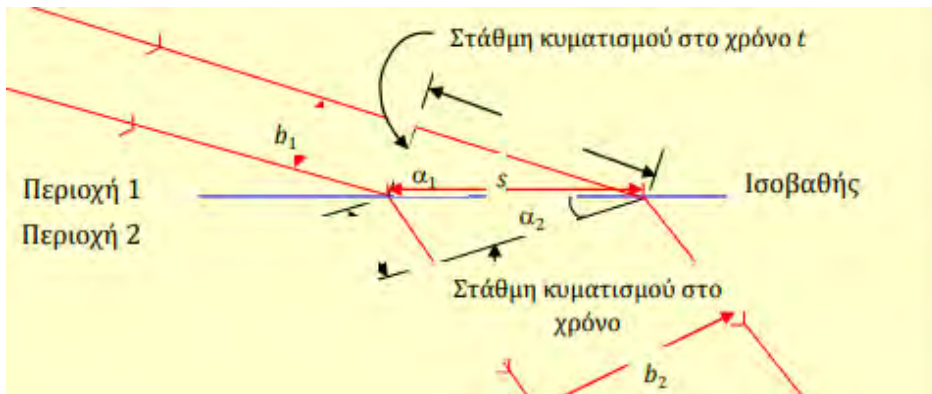
Εικόνα 2-7: Απεικόνιση της Ενισχυτικής και Καταστρεπτικής Συμβολής
Πηγή: Wave Tutorial 7-Interference from Antoine Education Website

2.4.3 Διάθλαση

Η διάθλαση ορίζεται ως η αλλαγή κατεύθυνσης του κύματος, καθώς αυτό επιβραδύνει. Σε ρηχότερα ύδατα κοντά στην ακτή, τα κύματα επιβραδύνουν λόγω της ασκούμενης δύναμης από τον πυθμένα, συνεπώς όπως θα δούμε και παρακάτω

η ταχύτητα ενός κυματισμού εξαρτάται ισχυρά από το βάθος του πυθμένα. Για κυματισμούς που κινούνται διαγωνίως των ισοβαθών ευθειών, το κομμάτι του κυματισμού που βρίσκεται στα βαθύτερα ύδατα κινείται ταχύτερα από το κομμάτι του κυματισμού που βρίσκεται στα ρηχότερα. Αυτή η διαφορά αναγκάζει τον κυματισμό να στρέφεται παράλληλα προς τις ισοβαθείς κι άρα να καμπυλώνει, με συνέπεια να αλλάζει το μέτωπο του κύματος.

Η μεταβολή στη διεύθυνση του κυματισμού κι ο συντελεστής διάθλασης προκύπτουν από το Νόμο του Snell.



Εικόνα 2-8: Νόμος του Snell

Πηγή : Μετασχηματισμοί Κυματισμών (Β.Κ. Τσουκαλά)

Όπου α_1 είναι η γωνία που σχηματίζει η κορυφή του κύματος με την ισοβαθή όταν αυτό προσπίπτει αρχικά και α_2 είναι η γωνία που σχηματίζει η κυματοκορυφή με την ισοβαθή μετά τη διάθλαση. Η κυματοκορυφή διανύει μία απόσταση, έτσι ώστε η ταχύτητες της να δίνονται από τους τύπους : $c_1 = \frac{l_1}{\delta t} = \frac{s \sin \alpha_1}{\delta t}$ και $c_2 = \frac{l_2}{\delta t} = \frac{s \sin \alpha_2}{\delta t} \rightarrow \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$

Η παραγόμενη σχέση αποτελεί το Νόμο του Snell. Θέτουμε b_0, b να είναι η απόσταση μεταξύ των ορθογωνίων πριν τη διάθλαση, δηλαδή σε βαθιά νερά, και μετά τη διάθλαση, δηλαδή σε ρηχά νερά, αντίστοιχα. Τότε το ύψος του κύματος (H) που προκύπτει δίνεται από τη σχέση : $\frac{H}{H_0} = \left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{cg_0}{cg}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}} K_s$, όπου ο λόγος $\left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}}$ ονομάζεται συντελεστής διάθλασης

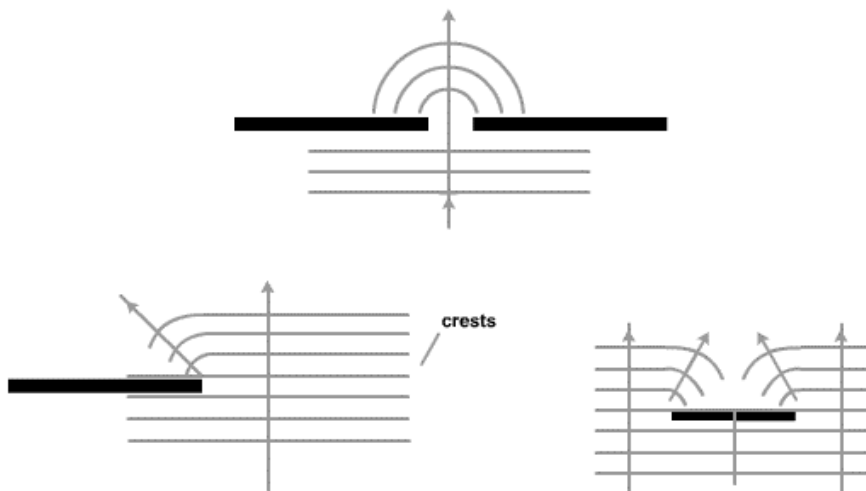
και K_s ο συντελεστής ρήχωσης, μιας ιδιότητας των κυμάτων που θα παρουσιασθεί και παρακάτω.

Εδώ μπορούμε να σημειώσουμε ότι η διάθλαση είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος και για τα τσουνάμι, μιας και αυτά αλληλεπιδρούν συνεχώς με τον πυθμένα κι έτσι επηρεάζεται η κατεύθυνση τους, σε αντίθεση με τα επιφανειακά

κύματα που μελετάμε εμείς τα οποία επηρεάζονται από αυτήν κυρίως στα ρηχά ύδατα. Συνεπώς η διάθλαση έχει σημαντική επίδραση στο ύψος του κυματισμού και στην κατανομή της ενέργειας στην ακτογραμμή. [B.K.Τσουκαλά (2017)]

2.4.4 Περίθλαση

Όταν τα κύματα κατά τη μετάδοση τους συναντούν ένα εμπόδιο, όπως μια νησίδα, ή ένα μικρό κενό, όπως το άνοιγμα προς ένα λιμάνι, τότε παρατηρείται γύρω από αυτό το σημείο καμπύλωση των κορυφογραμμών με αποτέλεσμα τα κύματα όχι μόνο να μην παρακάμπτουν το εμπόδιο αλλά αντίθετα να μεταδίδονται στην πίσω πλευρά του υπό μορφή ομόκεντρων κυκλικών τόξων συνεχώς ελαττούμενου ύψους. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν το μήκος του κύματος και το μέγεθος του εμποδίου ή της οπής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Το άκρο του εμποδίου ουσιαστικά λειτουργεί ως πηγή ενέργειας, η οποία με αυτό τον τρόπο μεταδίδεται όχι μόνο παράλληλα με τη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών αλλά κι εγκάρσια σε αυτούς. Η επίδραση της φαίνεται να είναι σημαντικότερη σε ρηχά ύδατα σε σχέση με τα βαθιά.



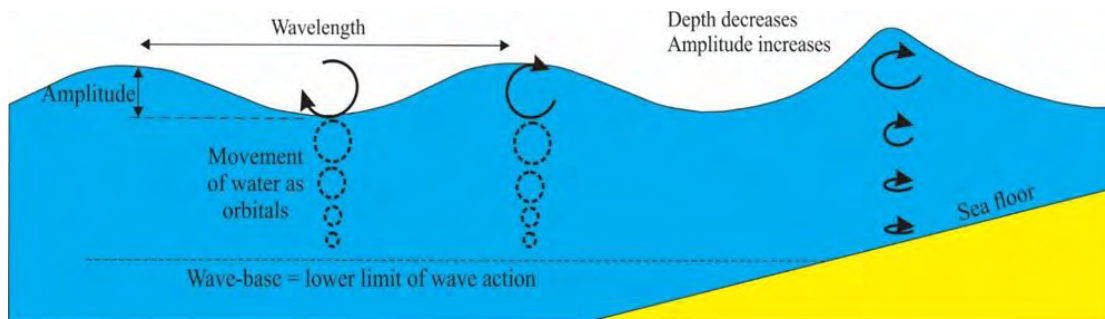
Εικόνα 2-9: Περίθλαση για δύο διαφορετικές μορφές εμποδίων και για οπή
Πηγή : Μετασχηματισμοί Κυματισμών (B.K.Τσουκαλά)

2.4.5 Ρήχωση

Ως ρήχωση ορίζεται η κατάσταση όπου τα χαρακτηριστικά του κύματος (H , λ) μεταβάλλονται ενώ η περίοδος (T) παραμένει σταθερή, όταν το κύμα μεταδίδεται πάνω από έναν επικλινή πυθμένα σε διεύθυνση κάθετη στις ισοβαθείς ευθείες. Έτσι με βασικές προϋποθέσεις ότι η κλίση του πυθμένα είναι μικρή αλλά όχι απαραίτητα σταθερή, ότι δεν υπολογίζουμε τις πιθανές ανακλάσεις κι ότι δεν έχουμε απώλειες ενέργειας λόγω θραύσης ή κέρδος λόγω ανέμων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κι ο

συντελεστής ρήχωσης : $K_s = \left(\frac{c_0}{2\pi c}\right)^{1/2}$, όπου $n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right)$

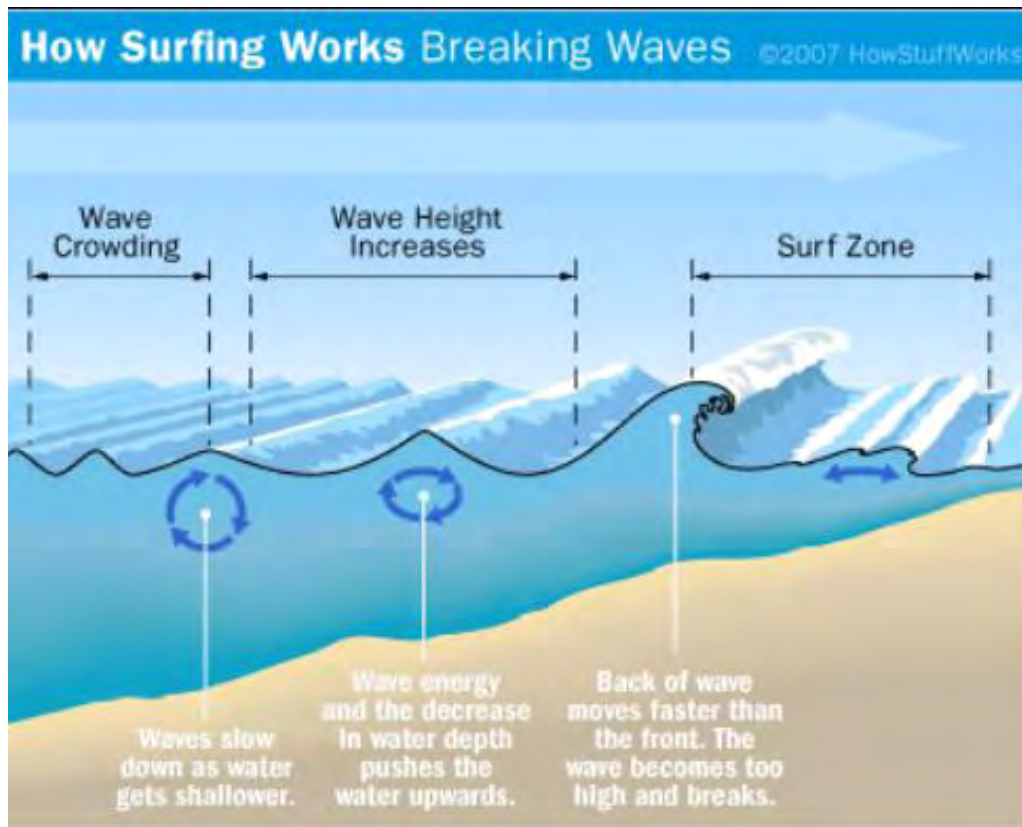
για βάθος πυθμένα (d), μια συνάρτηση που θα συναντήσουμε κι αργότερα κι αφορά την ταχύτητα των κυματισμών. [B.Κ.Τσουκαλά (2017)]



Εικόνα 2-10: Τροχιές που αναπαριστούν την κίνηση των μορίων του νερού για διάφορα βάθη ύδατος
Πηγή : www.geological-digressions.com

2.4.6 Θραύση Κυματισμών στα Ρηχά

Όταν το κύμα κατευθύνεται προς τα ρηχά ύδατα, η ταχύτητα του, c , μειώνεται λόγω της μείωσης του βάθους, επομένως μειώνεται κι η κινητική του ενέργεια. Το φαινόμενο της θραύσης ξεκινάει αφού έχουμε πολλά κύματα τα οποία διαθλώνται και κατευθύνονται προς την ακτή. Έτσι αυτά που είναι μπροστά «καταπίνονται» (drag) από την ακτή και συνεπώς επιβραδύνουν. Αυτό επιτρέπει στα κύματα που έπονται να σκαρφαλώσουν πάνω τους. **Όσο μειώνεται η απόσταση μεταξύ των υπόλοιπων κυμάτων, η κυματική ενέργεια γίνεται όλο και πιο πυκνή κι αφού χρειάζεται να εκτονωθεί κάπου, εν τέλει τα κύματα θα αυξηθούν σε ύψος.** Εδώ να σημειώσουμε ότι η κυματική ενέργεια σχηματίζει τροχιές κάτω από το κύμα κι έτσι τα ψηλότερα κύματα απαιτούν όλο και μεγαλύτερες και ισχυρότερες τροχιές. Εντωμεταξύ, οι κυματισμοί συνεχίζουν να επιβραδύνουν κι η ταχύτητα των τροχιών συνεχίζει να αυξάνεται, μέχρι κάποια στιγμή, όπου η ταχύτητα της τροχιάς (u) ξεπεράσει την ταχύτητα του κύματος (c), όπου κι αυτό είναι το όριο θραύσης του κύματος.



Εικόνα 2-11 : Θραύση κυμάτων στην ακτή

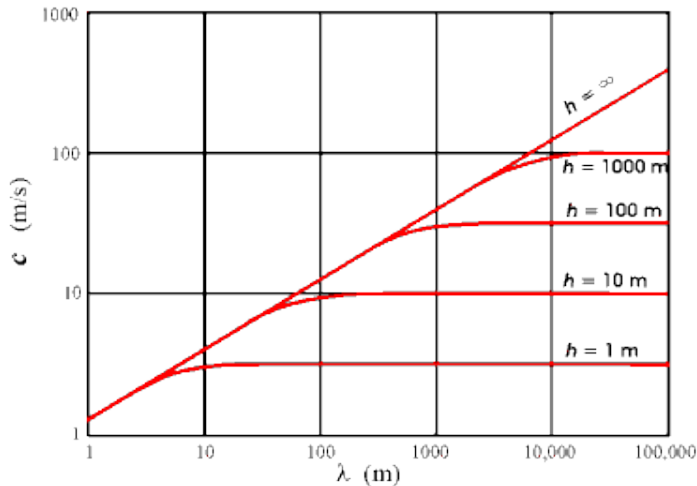
Πηγή : [How surfing works](#) by How stuff works 2007

2.4.7 Διασπορά

Μια ακόμη σημαντική ιδιότητα των κυμάτων της θάλασσας είναι η διασπορά, η οποία αναφέρεται στη συχνοτική διασπορά, και υποδεικνύει ότι κύματα διαφορετικού μήκους κύματος ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα φάσης, η οποία είναι ίδια με την ταχύτητα διάδοσης. **Δηλαδή κύματα υψηλότερου μήκους ταξιδεύουν γρηγορότερα από αυτά με χαμηλότερο.** Αυτό σημαίνει ότι πολύ μεγάλα κύματα όπως τα τσουνάμι διαδίδονται με τεράστιες ταχύτητες ενώ κύματα σαν αυτά ενός μικρού βάλτου διαδίδονται με μόλις λίγα cm/s. Η τελική σχέση που προκύπτει, υποδεικνύει την εξάρτηση της ταχύτητας από το μήκος κύματος και το βάθος του νερού και δίνεται από την εξίσωση :

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} .$$

Το μέσο βάθος των ωκεανών είναι περίπου 380 m, με τη βαθύτερη τάφρο να είναι γύρω στα 10.000 m βάθος, το οποίο αντιστοιχεί στο πάνω μέρος του διαγράμματος. Εδώ να σημειώσουμε ότι για την εξίσωση υποθέσαμε επίπεδο πυθμένα και δεν ισχύει για διάδοση κύματος, όταν υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη υποθαλάσσια τάφρος.



Εικόνα 2-12: :Γράφημα της ταχύτητας(c) των κυμάτων έναντι του μήκους κύματος(λ) για διάφορα βάθη ύδατος(h).

Πηγή : Ίδρυματικό Καταθετήριο του Πανεπιστημίου George Mason In Virginia

2.5 Θεμελιώδεις Σχέσεις

2.5.1 Διατήρηση Μάζας και Ορμής

Αρχικά, όπως γνωρίζουμε κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, το νερό θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό κι η πυκνότητα του ρ είναι σχεδόν ομοιόμορφη. Σε αυτή την περίπτωση, μια απλή μορφή της εξίσωσης συνέχειας θα είναι :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1),$$

όπου έχουμε τις καρτεσιανές συντεταγμένες $[x, y, z]$, με τις αντίστοιχες συνιστώσες της ταχύτητας $[u, v, w]$.

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε το *δεύτερο νόμο κίνησης του Newton* στις 3 διαστάσεις :

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial y} + y \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial y} + v \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \rho g \quad (2.2). \end{aligned}$$

Εδώ το αριστερά μέλος κάθε εξίσωσης είναι η επιτάχυνση των μορίων του ρευστού, όσο αυτά κινούνται δια μέσου του διαφορικού όγκου. Στο δεξί μέλος κάθε ισοζυγίου, η διαφορική πίεση προφανώς δρα ώστε να εναντιωθεί στην κίνηση των μορίων (από εκεί προκύπτει και το αρνητικό πρόσημο) κι η ιξώδης τριβή εφαρμόζεται μέσω του απόλυτου ιξώδους μ . Η τρίτη εξίσωση επίσης περιέχει έναν όρο για τη βαρύτητα, καταλήγοντας για την περίπτωση μηδενικών ταχυτήτων στη γνωστή σχέση $p(z) = -\rho gz$, όπου το z θεωρείται θετικό πάνω από τη μέση ελεύθερη επιφάνεια.

Εδώ χρειάζεται να σημειωθεί ότι ο αριθμός Reynolds στα κύματα θαλάσσιας κλίμακας χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν, μιας κι είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις : $Re = \frac{Ud}{\nu}$, όπου U και d είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα και μήκος αντίστοιχα και ν το κινηματικό ιξώδες (μ/ρ). Το κινηματικό ιξώδες του νερού σε τυπικές θερμοκρασίες θαλάσσης είναι $1e-6 m^2/s$. Από την άλλη οι ταχύτητες που συναντώνται στα θαλάσσια κύματα είναι της τάξης των 10m/s. Έτσι ο αριθμός Reynolds είναι μεγάλος κι οι ιξώδεις δυνάμεις μπορούν να αγνοηθούν. Βέβαια η επιρροή τους μπορεί να γίνει ορατή στα οριακά στρώματα κοντά στο σταθερό σύνορο, δηλαδή τον πυθμένα, κάτι που στην παρούσα μελέτη θα αγνοήσουμε. Αυτό σημαίνει ότι θα αγνοήσουμε όλους τους όρους που συμπεριλαμβάνουν το μ από τα ισοζύγια μας. Επίσης, εφόσον το ρευστό μας είναι ομοιογενές ή τουλάχιστον ομοιογενές ως προς τα <<στρώματα>> του (layerwise) είναι δεδομένο ότι θα είναι και αστρόβιλο, ή τουλάχιστον αστρόβιλο ως προς κάθε <<στρώμα>>. [C.H. Yih (1979)]

2.5.2 Δυναμικό Ταχυτήτων

Εισάγουμε το διανυσματικό πεδίο $\varphi(x, y, z, t)$, ώστε να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]^T = \nabla \varphi \quad (2.3)$$

Συνεπώς η εξίσωση διατήρησης μάζας παίρνει τη μορφή (Εξίσωση Laplace) :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \nabla^2 \cdot \varphi = 0 \quad (2.4)$$

Και το ισοζύγιο ορμής (δεύτερος νόμος Νεύτωνα) για τη x -συνιστώσα γίνεται :

$$\rho \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t \partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial x} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.5)$$

Ολοκληρώνοντας για το x έχουμε :

$$p + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) = C \quad , \quad (2.6)$$

όπου το C είναι σταθερό.

Τα ισοζύγια στις άλλες δύο συνιστώσες έχουν ακριβώς την ίδια μορφή, αλλά με την προσθήκη της επίδρασης της βαρύτητας στην z-συνιστώσα.

Επομένως μία απλή μορφή της εξίσωσης για όλο το πεδίο ταχυτήτων είναι η :

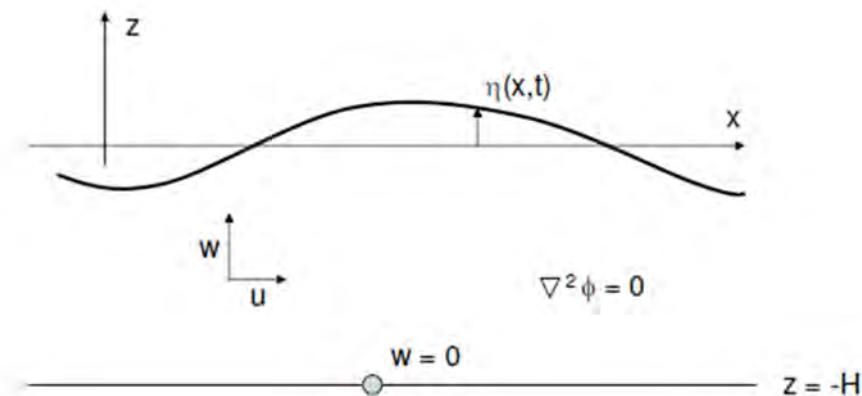
$$p + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) + \rho g z = C \quad (2.7)$$

Η οποία αποτελεί την εξίσωση Bernoulli.

2.6 Γραμμική Θεωρία Κυμάτων

Η Γραμμική Θεωρία Κυμάτων αποτελεί την κύρια θεωρία μελέτης των επιφανειακών κυμάτων θαλάσσης, που χρησιμοποιείται στην ωκεανομηχανική και την ακτομηχανική. Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να σημειώσουμε ότι τα κύματα με τα οποία θα ασχοληθούμε εμείς είναι τα κανονικά (regular) κύματα, τα οποία ορίζονται από την ύπαρξη της ημιτονοειδούς (ή συνημιτονοειδούς) συνάρτησης. Συνοπτικά για να εφαρμόσουμε τη γραμμική θεωρία, υποθέτουμε κύματα μικρού πλάτους (a) σε σχέση με το βάθος νερού (H) και το μήκος (λ) τους κι ορίζουμε την επιφανειακή ανύψωση $\eta(x, t)$, η οποία έχει θετικές τιμές στο θετικό μέρος του άξονα z. Μες στο ρευστό ισχύει η διατήρηση της μάζας και για την επιφάνεια υποθέτουμε $p = p_a$, ατμοσφαιρική πίεση, την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε μηδενική αφού στην ουσία υπάρχει ως αντιστάθμισμα σε όλες τις πιέσεις κάτω από την επιφάνεια. Λόγω της υπόθεσης της αστρόβιλης ροής, η συνιστώσα u της ταχύτητας μπορεί να θεωρηθεί μη μηδενική σε όλο το σύνορο.

2.6.1 Συνθήκες στην Ελεύθερη Επιφάνεια



Εικόνα 2-13: Ορισμός συστήματος γραμμικών κυματισμών

Πηγή: https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-017j-design-of-electromechanical-robotic-systems-fall-2009/course-text/MIT2_017JF09_ch06.pdf

Από το γεγονός ότι το νερό δε διέρχεται μέσω της ελεύθερης επιφάνειας,
 $\frac{D(z-\eta(x,t))}{Dt} = 0$, προκύπτει η κινηματική συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας :

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x}, \text{ για } z=\eta(x, t) \quad (2.8)$$

Ο πυθμένας θεωρείται οριζόντιος κι αδιαπέρατος κι άρα επιβάλλεται μηδενισμός της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας. Η οριακή συνθήκη πυθμένα είναι :

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \text{ για } z=0. \quad (2.9)$$

Επίσης, εξ ορισμού προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} \approx \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \text{ για } z = 0 \quad (2.10)$$

Εξετάζοντας τα σχετικά μεγέθη των όρων, βλέπουμε ότι ο όρος $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ είναι πολύ μικρότερος του gz , αν θεωρήσουμε ότι τα κύματα έχουν συχνότητα 1 rad/s, με χαρακτηριστικό μέγεθος 1 m (κάθετα), όπου το g είναι της τάξης του 10. Έτσι η εξίσωση Bernoulli κοντά στην επιφάνεια απλοποιείται στη μορφή :

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho g \eta \approx 0, \text{ για } z = 0. \quad (2.11)$$

Δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της επιφανειακής ανύψωσης ως προς το χρόνο είναι ο ίδιος με τη z -συνιστώσα του δυναμικού, δηλαδή την w . Συνδυάζοντας τις δύο εξισώσεις παίρνουμε :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \text{ για } z = 0 \quad (2.12)$$

Η λύση της εξίσωσης για την επιφάνεια είναι ένα διαδιδόμενο κύμα. Λόγω της υιοθέτησης της γραμμικής θεωρίας η μορφή του κυματισμού αυτού προϋποτίθεται ως ημιτονοειδής (μονοχρωματικός γραμμικός κυματισμός) :

$$\eta(x, t) = \alpha \cos(\omega t - kx + \psi), \quad (2.13)$$

Όπου α είναι το πλάτος, ω είναι η συχνότητα, k είναι ο κυματάριθμος και ψ είναι μια τυχαία γωνία φάσης.

Λόγω της κινηματικής συνθήκης (2.9), η γενική μορφή της συνάρτησης δυναμικού των ταχυτήτων $\varphi(x, z, t)$ είναι η ακόλουθη : $\Phi(x, z, t) = Z(z) \sin(\omega t - kx + \psi)$, όπου $Z(z)$ είναι η άγνωστη συνάρτηση μεταβλητής z . Και μετά από χρήση της Εξίσωσης Laplace και των συνοριακών συνθηκών για την επίλυση της

διαφορικής εξίσωσης και για την εύρεση των σταθερών της καταλήγουμε στο παρακάτω συμπέρασμα.

Η υποψήφια λύση για το δυναμικό είναι :

$$\varphi(x, z, t) = -\frac{\alpha\omega}{k} \frac{\cosh(k(z+H))}{\sinh(kH)} \sin(\omega t - kx + \psi), \quad (2.14)$$

όπου η σχέση διασποράς: $\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{kg \tanh(kd)}$ (2.15)

Αυτό που χρειάζεται να κάνουμε τώρα είναι να επαληθεύσουμε ότι αυτό το δυναμικό ικανοποιεί τις προϋποθέσεις μας. Αρχικά εξετάζουμε αν ικανοποιεί την εξίσωση Bernoulli για $z=0$:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t} = \frac{\alpha\omega^3}{k} \frac{1}{\tanh kH} \sin(\omega t - kx + \psi) = \alpha\omega g \sin(\omega t - kx + \psi)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\alpha\omega \sin(\omega t - kx + \psi)$$

Από ότι φαίνεται για την επιφάνεια ικανοποιείται η εξίσωση Bernoulli, οπότε έχουμε και τις ακόλουθες σχέσεις :

- $u(x, z, t) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \alpha\omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos(\omega t - kx + \psi), \quad (2.16)$

- $w(x, z, t) = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\alpha\omega \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \sin(\omega t - kx + \psi) \quad (2.17)$

Βλέπουμε ότι οι παραπάνω ταχύτητες βρίσκονται σε διαφορά φάσης $\pi/2$ (δηλαδή, όταν η x -συνιστώσα παίρνει την μέγιστη τιμή της στην κορυφή του κύματος ή την ελάχιστη της στην κοιλία, η z -συνιστώσα μηδενίζεται, κι αντίστροφα).

Στην επιφάνεια, $z=0$, είναι προφανές ότι τα υπερβολικά ημίτονα στην $w(x, z, t)$ φεύγουν. Έτσι παίρνοντας ένα ολοκλήρωμα χρόνου βρίσκουμε εύκολα την έκφραση για το $\eta(x, t)$ που δίνεται και παραπάνω. Η πίεση εδώ είναι $\rho g \eta$, όπως αναμένεται. Στον πυθμένα, όπου $z=-H$, $w=0$ λόγω του ότι $\sinh(0) = 0$, έτσι επαληθεύεται κι η συνοριακή συνθήκη πυθμένα. Άρα το μοντέλο που υποθέσαμε ισχύει.

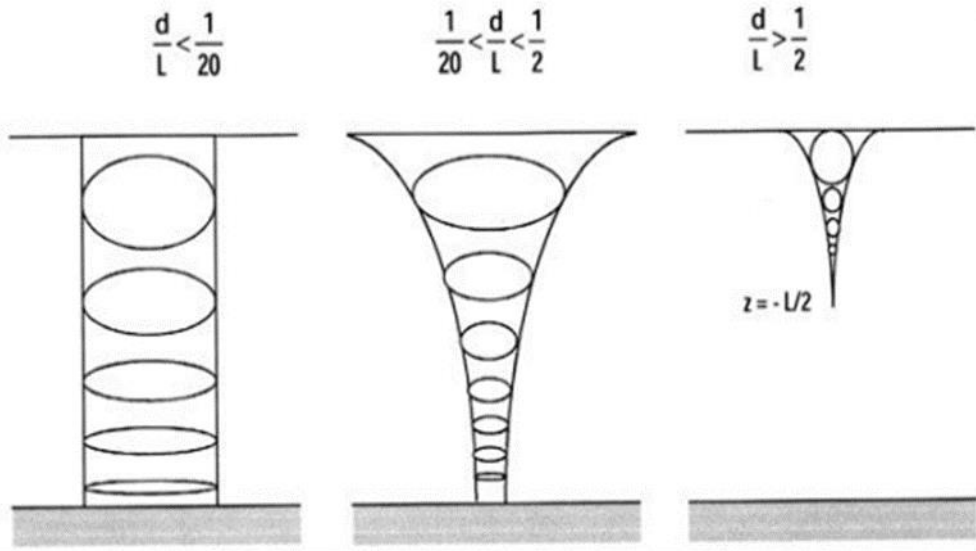
Η συνάρτηση της πίεσης που προκύπτει είναι η παρακάτω κι αποτελείται από δύο συνιστώσες, την υδροστατική και τη δυναμική :

$$p(x, z, t) \approx -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho g z = \rho \frac{\alpha\omega^2}{k} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos(\omega t - kx + \psi) - \rho g z \quad (2.18)$$

Οι τροχιές των σωματιδίων όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (2.16) και (2.17) είναι:

$$\bullet \quad \xi_p = \int u dt = a \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \sin(\omega t - kx + \psi) \quad (2.19)$$

$$\bullet \quad \eta_p = \int w dt = \frac{a}{k} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos(\omega t - kx + \psi) \quad (2.20)$$



Εικόνα 2-14: Τροχιές σωματιδίων με το σχετικό βάθος, όπου d το βάθος πυθμένα και L το μήκος κύματος (λ)
 Πηγή: R.G.Dean (1991)

Στα βαθιά νερά οι τροχιές είναι κυκλικές σε όλη τη στήλη του νερού, αλλά η διάμετρος τους ελαττώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από την επιφάνεια. Στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά οι τροχιές πλησιάζουν τον πυθμένα και γίνονται ελλειπτικές. Κοντά στον πυθμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα, η κίνηση των υλικών σημείων έχει μόνο οριζόντια συνιστώσα.

Εδώ να σημειώσουμε ότι δεν υπάρχουν μη-γραμμικοί όροι σε καμία έκφραση των $[x, y, z, u, v, w, p, \phi]$ κι έτσι το κυματικό μοντέλο είναι γραμμικό. Συγκεκριμένα, αυτό σημαίνει ότι κύματα διαφορετικών συχνοτήτων και φάσεων μπορούν να αθροιστούν, χωρίς να αλλάζει η συμπεριφορά των ανεξαρτήτων κυμάτων. (ακολουθούν την αρχή επαλληλίας των κυμάτων) .

2.6.2 Υπολογισμός Μήκους Κύματος

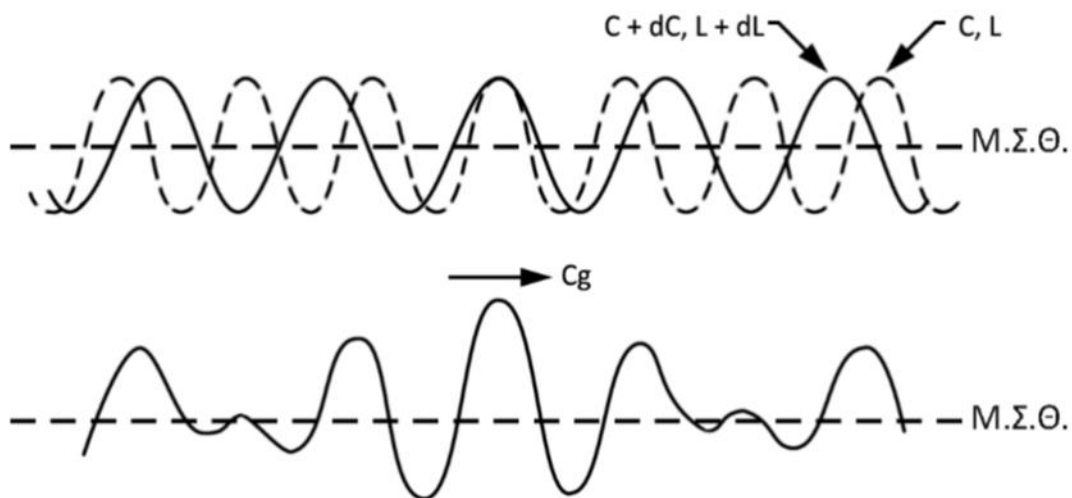
Ορίζουμε τη φασική ταχύτητα (ταχύτητα διάδοσης) του κυματισμού $c : c = \frac{\lambda}{T}$
 και λόγω της σχέσης διασποράς η ταχύτητα γίνεται : $c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd)$, άρα:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad (2.21)$$

Η τελευταία σχέση εφαρμόζεται στα περισσότερα προβλήματα Ακτομηχανικής, για τον υπολογισμό του μήκους λ , όταν είναι γνωστά το βάθος d κι η περίοδος T .

- Σε βαθιά ύδατα (όταν $d/\lambda > 0.5$), $\tanh(kd) \rightarrow 1$ κι άρα έχουμε : $\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, όπου ο δείκτης 'ο' δηλώνει μεταβλητή σε βαθιά νερά. Η παραπάνω τιμή λ_0 είναι η μεγαλύτερη που μπορεί να πάρει το μήκος κύματος, το οποίο όσο μειώνεται ο κυματισμός μεταδίδεται από τα βαθιά νερά προς τα ρηχά.
- Σε ρηχά ύδατα (όταν $d/\lambda < 0.05$) έχουμε : $\lambda = cT \approx \sqrt{gd}T$, όπου $c \approx \sqrt{gd}$ η ταχύτητα διάδοσης στα ρηχά νερά.

Ας θεωρήσουμε δύο σειρές μονοχρωματικών κυματισμών με μικρή διαφορά μήκους (λ και $\lambda + d\lambda$ αντίστοιχα). Στο σχήμα φαίνεται η επαλληλία τους, δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα της ελεύθερης επιφάνειας τους. Φαίνεται ότι η επαλληλία οδηγεί στην εμφάνιση ομάδας κυμάτων με εύρη που μεταβάλλονται από 0 (διαφορά φάσης) έως $2H$ (συμφωνία φάσης). Στη φύση πάντα δημιουργούνται τέτοιες ομάδες που αποτελούνται από μια ομάδα κυματισμών μεγάλου ύψους που ακολουθούνται από μια ομάδα κυματισμών μικρότερου ύψους.



Εικόνα 2-15: Κυματισμοί με μικρή διαφορά μήκους κι η επαλληλία τους (ΜΣΘ: Μέση Στάθμη Θάλασσας)
 Πηγή: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2096/1/02_chapter_2.pdf?fbclid=IwAR0LaqtZRUuVZBZkIT41jVq3ny-mngHcafoRGQlyN7PwxJy7suSfopiOM

Η ταχύτητα ομάδας κυματισμών c_g δίνεται από : $c_g = cn$, όπου η συνάρτηση $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kH}{\sinh(2kH)} \right)$ μεταβάλλεται από 0.5 στα βαθιά νερά έως 1 στα ρηχά.

2.7 Βασικές Έννοιες Αποδοτικότητας Συσκευών (WECs)

Η μαθηματική μοντελοποίηση των *Συσκευών Μετατροπής Κυματικής Ενέργειας – Wave Energy Converters (WECs)* βασίζεται στις υποθέσεις ότι τα κύματα είναι μικρού πλάτους, σχετικά με το μήκος και το βάθος τους, κι έχουν μια μόνιμη κανονική-ημιτονοειδή (regular) μορφή, οι οποίες είναι κι οι δύο βασικές υποθέσεις της γραμμικής θεωρίας κυμάτων. Αυτές είναι κι οι δύο βασικές υποθέσεις που επέτρεψαν σε μια σειρά μελετών των πεδίων της υδροδυναμικής πλοίων και των παράκτιων (offshore) κατασκευών να εφαρμοσθούν άμεσα στη μαθηματική μοντελοποίηση που μας ενδιαφέρει. Οι περισσότερες WECs περιλαμβάνουν την κίνηση μιας μεγάλης κατασκευής παρόμοιας με το μέγεθος ενός μικρού πλοίου κι έτσι δε μας εκπλήσσει το γεγονός ότι η ρευστοδυναμική ανάλυση που συνεπάγεται είναι παρόμοια με αυτή της θεωρίας της υδροδυναμικής πλοίων. Οι βασικές διαφορές είναι ότι οι WECs έχουν μηδενική ταχύτητα πορείας, συχνά είναι μια αρθρωτές συσκευές και βεβαίως έχουν ως βασικό στόχο να απορροφούν ενέργεια από το γειτονικό κυματικό πεδίο.

2.7.1 Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης

Σύμφωνα με τον Cruz (2008), τη δεκαετία του 70 εισήχθησαν πολλές καινούριες έννοιες και μεγέθη σχετικά με την μοντελοποίηση των WECs. Ένα ενδιαφέρον και χρήσιμο μέγεθος που θα μας απασχολήσει αργότερα κι έχει ευρεία εφαρμογή στην εκτίμηση της αποδοτικότητας των WECs είναι το *Εύρος αποτελεσματικής σύλληψης*. Για ένα μεμονωμένο σώμα τριών διαστάσεων, σε μια δεδομένη συχνότητα, αυτό ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής μέσης ισχύος που απορροφάται από το σώμα προς τη μέση ισχύ ανά μονάδα πλάτους κορυφής κύματος από μια σειρά κυμάτων ίδιας κατεύθυνσης που προσπίπτουν. Εδώ ως *μέση* αναφέρεται η μέση τιμή ανά περίοδο κύματος για κανονικά κύματα. Το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης έχει μονάδες μήκους και μερικές φορές το αδιάστατο μέγεθος, που εκφράζει το λόγο του εύρους αποτελεσματικής σύλληψης προς το πλάτος της συσκευής, είναι μια χρήσιμη ποσότητα για να εκτιμήσουμε την αποδοτικότητα της συσκευής. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος όρος για να περιγραφεί αυτή η ποσότητα, αλλά συχνά χρησιμοποιούνται οι όροι *Αδιάστατο Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης* και *Σχετικό Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης*.

2.7.2 Απόδοση

Η δισδιάστατη αντίστοιχη ποσότητα του Εύρους αποτελεσματικής σύλληψης είναι η *Απόδοση (Efficiency)*, η οποία έχει παίξει ένα σημαντικό ρόλο στις εργαστηριακές συγκρίσεις θεωρίας και πειραμάτων σε στενές δεξαμενές κυμάτων. Επίσης, είναι συνήθως ευκολότερο να αναπτυχθούν δισδιάστατα αριθμητικά

μοντέλα σε σχέση με τα αντίστοιχα τρισδιάστατα κι αυτό έχει παίξει το ρόλο του στη διάδοση του παραπάνω όρου. Τα δύο μεγέθη που περιγράφηκαν παραπάνω μπορεί να φαίνονται παρόμοια ως αδιάστατα μεγέθη, κάτι που όμως δεν ισχύει. Η απόδοση είναι ο λόγος της εξαγόμενης ισχύος ως προς την εισαγόμενη για ένα δισδιάστατο σύστημα, όπου μια μονάδα πλάτους της συσκευής δύναται να εξαγάγει ισχύ από μόνο μία μονάδα πλάτους του προσπίπτοντος μετώπου κύματος και συνεπώς η μέγιστη τιμή της ποσότητας είναι η μονάδα. Από την άλλη το σχετικό εύρος σύλληψης μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, μιας κι η τρισδιάστατη μορφή του επιτρέπει στη συσκευή να απορροφά ενέργεια από όλο το μέτωπο του κύματος που προσπίπτει πάνω στη συσκευή κι όχι να περιορίζεται μόνο στο μέτωπο που έχει ακριβώς το ίδιο πλάτος με αυτό της συσκευής. Επίσης να σημειώσουμε ότι για να αποφύγουμε τη σύγχυση με διάφορους ορισμούς, σχετικά με μια πληθώρα μεγεθών, που δίνονται στην *Απόδοση* σε αυτή τη μελέτη θα προτιμάται ο όρος *Υδροδυναμική Απόδοση*.

2.7.3 Μέγιστο Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης

Το *Μέγιστο Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης* μιας συσκευής συγκεκριμένης γεωμετρίας, σε δεδομένη συχνότητα, βρίσκεται με τη βελτιστοποίηση του εύρους αποτελεσματικής σύλληψης βάσει των παραμέτρων του συστήματος λήψης ισχύος (power take-off mechanism-PTO). Αυτό αντιστοιχεί στην κατάσταση όπου η μέση απορροφούμενη ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της, η οποία είναι ισχυρά εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Στη γραμμική θεωρία οι μηχανισμοί λήψης ισχύος συχνά μοντελοποιούνται ως «μαύρα κουτιά», όπου το σύστημα αναπαριστάται από ένα γραμμικό όρο απόσβεσης.

2.7.4 Καμπύλη Εύρους Συχνοτήτων (Bandwidth)

Αν μια συσκευή συντονιστεί ώστε να λειτουργεί με το βέλτιστο τρόπο σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, τότε αυτή θα υποδείξει και τις παραμέτρους λήψης ισχύος, καθώς θα βρεθεί κι η *καμπύλη εύρους συχνοτήτων (Bandwidth)* αν αναπαραστήσουμε σε ένα διάγραμμα το εύρος σύλληψης με τη συχνότητα για τις σταθερές πια παραμέτρους λήψης ισχύος. Αυτή θα συμπίπτει με το μέγιστο εύρος σύλληψης για τη συχνότητα που έχουμε συντονίσει τη συσκευή (tuning frequency), αλλά όχι γενικά για κάθε συχνότητα, όπου οι τιμές της καμπύλης είναι συνήθως κάτω του μέγιστου εύρους σύλληψης. Ο χαρακτήρας της καμπύλης εύρους ζώνης είναι μια σημαντική ένδειξη της αποδοτικότητας της συσκευής : μια ευρεία καμπύλη υποδηλώνει ότι η συσκευή θα δουλεύει καλά σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών, ενώ μια στενή καμπύλη υποδηλώνει ότι έχει καλές δυνατότητες κοντά στη συχνότητα συντονισμού αλλά φτωχές οπουδήποτε αλλού.

Κεφάλαιο Τρίτο

3 Συσκευές WECs Πλήρους Κλίμακας

3.1 Ταξινόμηση Συσκευών

Οι πρώιμες εργασίες αφορούσαν κυρίως πλωτές συσκευές και συνήθως ταξινομούσαν μια συγκεκριμένη συσκευή ως *Σημειακός Απορροφητής* (Point Absorber), ως *Εξολοθρευτής* (Terminator) ή ως *Εξασθενητής* (Attenuator) και οι παραπάνω περιγραφές εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό. Σκοπός τους είναι να περιγράψουν την αρχή της λειτουργίας και να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία της συσκευής.

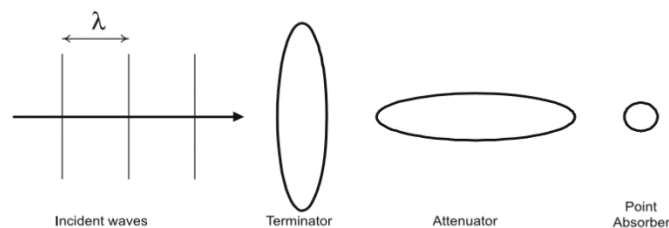
Οι *Σημειακοί Απορροφητές* (Point Absorbers) είναι συσκευές, συνήθως αξονοσυμμετρικές γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, οι οποίες είναι μικρές υπό την έννοια ότι οι οριζόντιες φυσικές διαστάσεις της συσκευής είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος των προσπίπτοντων κυμάτων. Η ιδέα μιας τέτοιας συσκευής είναι πολύ ελκυστική από την άποψη της μοντελοποίησης, διότι το σκεδαζόμενο πεδίο κύματος (scattered wave field) μπορεί να παραμεληθεί και οι δυνάμεις επί του σώματος οφείλονται μόνο στα προσπίπτοντα κύματα. Οι Σημειακοί απορροφητές είναι ικανοί να απορροφούν την ενέργεια από ένα κύμα πολλές φορές μεγαλύτερο από την οριζόντια διάσταση του απορροφητή (the key horizontal dimension of the absorber) και έτσι διαθέτουν ένα μεγάλο εύρος αποτελεσματικής σύλληψης (capture width). Η θεωρία προβλέπει ότι μια τέτοια απόδοση μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν η συσκευή υφίσταται ταλαντώσεις των οποίων το μέγεθος μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος. Αυτή η συμπεριφορά δεν είναι στην πράξη επιτρεπτή και έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη θεωριών που δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε σημειακούς απορροφητές για να προβλέψουν το μέγιστο εύρος σύλληψης (maximum capture width) όταν το πλάτος της ταλάντωσης της συσκευής περιορίζεται σε μέγεθος αλλά επιτρέπεται να διατηρηθεί η συχνότητα της ταλάντωσης.

Οι Εξασθενητές και οι Εξολοθρευτές είναι WECs που έχουν πεπερασμένες διαστάσεις σε σχέση με το πεδίο προσπίπτοντος κύματος και επιπλέον έχουν μία κυρίαρχη οριζόντια διάσταση. Ένας απλός τρόπος για να γίνει αντιληπτή αυτή η ιδέα είναι να θεωρήσουμε ένα ορθογώνιο ή μια έλλειψη που έχει πολύ μεγαλύτερο μήκος από πλάτος.

Οι Εξασθενητές (attenuators) ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος με το πλάτος (beam) τους να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος τους και οι Εξολοθρευτές τοποθετούνται με την κυρίαρχη κατεύθυνση

κάθετη προς τα προσπίπτοντα κύματα, με πλάτος (beam) πολύ μεγαλύτερο από το μήκος. Είναι συνηθισμένο για τους Εξασθενητές να είναι εύκαμπτες ή αρθρωτές δομές και συχνά η αρχική ιδέα σχεδιασμού ήταν ότι τα κύματα θα εξασθενούσαν κατά μήκος της συσκευής καθώς παραλαμβάνεται η ισχύς τους. Αυτή η έννοια είναι γενικά εσφαλμένη και η κίνηση του Attenuator μπορεί να είναι σχεδόν συμμετρική ως προς το μέσο της συσκευής, έτσι ώστε τα εμπρόσθια και οπίσθια τμήματα της συσκευής να λειτουργούν εξίσου αποδοτικά. Οι Terminators μπορεί να είναι άκαμπτοι ή εύκαμπτοι (compliant). Υπάρχει μικρή υδροδυναμική διαφορά στη συμπεριφορά ενός εύκαμπτου terminator και ενός Attenuator. Ουσιαστικά, οι κατευθύνσεις των προσπιπτόντων κυμάτων διαφέρουν κατά μία ορθή γωνία. Αυτό δείχνει ένα σημαντικό σημείο: ο τρόπος λειτουργίας συνδέεται στενά με το πεδίο προσπίπτοντος κύματος και αυτό θα ποικίλει. Χωρίς μηχανισμούς ελέγχου, μια επιμήκης συσκευή θα μπορούσε να αναγκαστεί να λειτουργήσει ως attenuator ή ως terminator στην ίδια θέση/τοποθεσία (site) και σε διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης (sea states). Η διαδικασία ευθυγράμμισης συνδέεται με τη διαμόρφωση πρόσδεσης και αυτό προσδιορίζει μία από τις βασικές απαιτήσεις για μία συσκευή WEC. Η πρόσδεση είναι απαραίτητη για να εξασφαλίζει τη διατήρηση μιας συσκευής σε επιλεγμένη περιοχή, καθώς και για την ευθυγράμμιση της συσκευής.

Σημαντική παρατήρηση: μια επιμήκης συσκευή σε λειτουργία εξασθενητή (attenuator mode) θα βιώνει συνήθως σημαντικά χαμηλότερες δυνάμεις πρόσδεσης (mooring forces) από την ίδια συσκευή σε λειτουργία εξολοθρευτή (terminator mode).



Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση της κλίμακας και του προσανατολισμού ενός εξολοθρευτή (Terminator), ενός εξασθενητή (attenuator) και ενός απορροφητή σημείων (point absorber)
Πηγή: Ocean Wave Energy, J.Cruz(2008)

3.2 Εναλλακτική Ταξινόμηση Συσκευών

Το παραπάνω σύστημα ταξινόμησης στόχευε στις πλωτές συσκευές αλλά αυτό δεν επαρκεί ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι κατηγορίες συσκευών. Για

παράδειγμα, οι πρώτες πετυχημένες OWCs (Oscillating Water Column), που εισήχθησαν από το Masuda και περιγράφηκαν από τον Brooke (2003), έχουν τοποθετηθεί στην ξηρά. Κάθε συσκευή τοποθετημένη στην ξηρά μπορεί να περιγραφεί ως terminator, αλλά υπάρχουν προφανείς διαφορές μεταξύ των συσκευών στην ξηρά και στην ανοικτή θάλασσα. Έτσι, αν και η συνηθέστερη μέθοδος ταξινόμησης συσκευών κυματικής ενέργειας βασίζεται κυρίως στον τρόπο λειτουργίας, συχνά χρησιμοποιούμε και άλλα χαρακτηριστικά για να ξεχωρίσουμε και να περιγράψουμε τη συσκευή, όπως την προτεινόμενη μέθοδο εργασίας και την τοποθεσία λειτουργίας.

Έτσι, για παράδειγμα, η ονομασία Oscillating Water Column (OWC) περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής, αλλά δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί καλύτερα η συσκευή. Αυτό το κενό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη συμπερίληψη ενός πρόσθετου περιγραφικού όρου, όπως Onshore (πάνω στην ακτή), Nearshore (παράκτια) ή Offshore (υπεράκτια), για να καθορισθεί η θέση της συσκευής.

Για τον παρόντα σκοπό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ελαφρώς διαφορετικό σύστημα ταξινόμησης ως προς την ακρίβεια της φυσικής τοποθεσίας όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Το νέο σύστημα αναπτύχθηκε στο χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ έργο OWEC-1 και αναφέρθηκε από τον Randløv (1996). Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στην παρούσα κατάσταση μιας συσκευής, στο χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης και στο οικονομικό κόστος επένδυσης της. Ο τρόπος λειτουργίας δεν χρησιμοποιείται ως καθοριστική παράμετρος. Εάν χρησιμοποιηθούν αυτές οι νέες εκτιμήσεις, τότε οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να ταξινομηθεί ως σύστημα **πρώτης γενιάς, σύστημα δεύτερης γενιάς ή σύστημα τρίτης γενιάς**. Οι τρεις κατηγορίες δεν αλληλοαποκλείονται και μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά.

Οι συσκευές on-shore ή near-shore OWC θεωρούνται συστήματα **πρώτης γενιάς** και τέτοιες συσκευές εγκαθίστανται προς το παρόν ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Πορτογαλία, την Ινδία και την Ιαπωνία. Οι OWCs είναι οι πιο δύσκολες ως προς την μοντελοποίηση από τις τρεις κατηγορίες.

Τα συστήματα **δεύτερης γενιάς**, που αντιπροσωπεύονται από πλωτές αντλίες (float pumps), είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε μια μεγάλη ποικιλία υπεράκτιων τοποθεσιών (offshore) και παράκτιων περιοχών (nearshore) όπου υπάρχουν διαθέσιμα υψηλά επίπεδα ενέργειας. Η εγκατάσταση συνήθως θεωρείται δυνατή σε βάθη νερού μεταξύ τριάντα και εκατό μέτρων. Οι αντλίες (float pumps) μπορεί να είναι χαλαρά αγκυροβολημένες (slack-moored) ή σφιχτά δεμένες (tightmoored), αλλά όλες έχουν ευνοϊκή αναλογία μεταξύ απορροφούμενης ενέργειας και όγκου. Σαφώς δεν αντιπροσωπεύουν ούτε προορίζονται να αντιπροσωπεύσουν όλες τις μελλοντικές κατηγορίες συσκευών ανοικτής θάλασσας, αλλά αυτές οι συσκευές είναι σχετικά μικρές τόσο σε φυσικό μέγεθος όσο και σε

ισχύ. Ως εκ τούτου είναι ιδανικές για μια σχετικά σύντομη και φθηνή περίοδο ανάπτυξης. Αυτές οι συσκευές ανήκουν στην κατηγορία σημειακού απορροφητή (point absorber category) δεδομένου ότι οι οριζόντιες φυσικές διαστάσεις της συσκευής είναι πολύ μικρότερες από το μήκος των κυμάτων για τα οποία είναι σχεδιασμένη η συσκευή για την εξαγωγή ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι πάντα δυνατό να γίνει μια πρόσθετη ταξινόμηση βάσει των χαρακτηριστικών λήψης ισχύος (power take-off).

Η καθοριστική ιδιότητα των Συστημάτων **Τρίτης Γενιάς** είναι ότι είναι μεγάλης κλίμακας υπεράκτιες συσκευές, τόσο από πλευράς φυσικού μεγέθους όσο και εξαγόμενης ισχύος (power output). Αυτά τα προηγμένα συστήματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως το τελικό στάδιο ανάπτυξης των συσκευών μετά την επιτυχή υλοποίηση των συστημάτων float rumpers. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι μεγάλη εξαγόμενη ισχύς επιτυγχάνεται δυναμικά είτε από μία συσκευή με μεγάλες φυσικές διαστάσεις είτε από μια μεγάλη συστοιχία συσκευών, οι οποίες είναι μεμονωμένα πολύ μικρότερες. Μεγάλες μεμονωμένες συσκευές αντιστοιχούν στους terminators και τους attenuators και μια σειρά μικρότερων συσκευών τύπου float απαιτεί τις θεωρίες συστοιχιών (array theories).

Τόσο οι συσκευές πρώτης όσο και της τρίτης γενιάς έχουν εγκατασταθεί και αναπτυχθεί με επιτυχία, αλλά καμία συσκευή δεύτερης γενιάς δεν έχει εγκατασταθεί ακόμη. Οποιοδήποτε προτεινόμενο σύστημα ταξινόμησης δεν μπορεί να είναι απόλυτα ικανοποιητικό. Για παράδειγμα, η συσκευή Pelamis μπορεί να θεωρηθεί ως attenuator όσον αφορά το αρχικό σύστημα ταξινόμησης και ως συσκευή τρίτης γενιάς στο πλαίσιο της εναλλακτικής ταξινόμησης.



Oscillating Water Column



Attenuator



Overtopping



Point Absorber

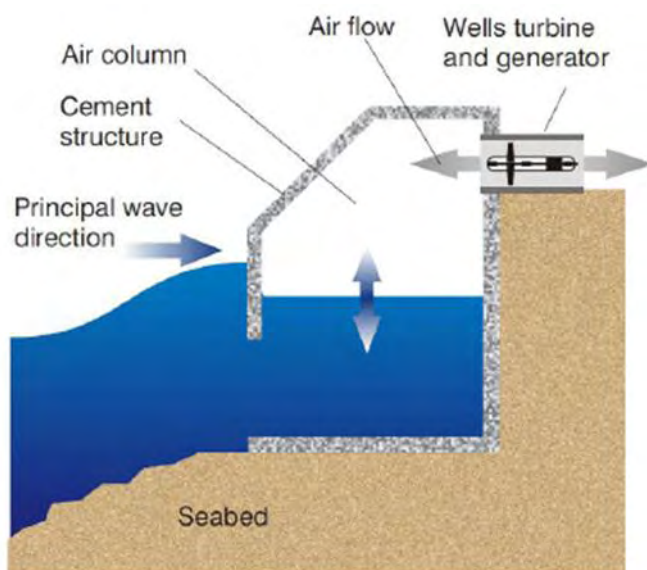
Εικόνα 3-2: Τύποι Συσκευών WEC

Πηγή: *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*, Antonio Falcao, João C Henriques, (2016)

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά ορισμένων ελπιδοφόρων και αντιπροσωπευτικών τεχνολογιών απόληψης της κυματικής ενέργειας (WEC) σύμφωνα με τον Cruz (2008).

3.3 Εξολοθρευτής (Terminator)

Οι συσκευές terminator(εξολοθρευτές) εκτείνονται κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος και συλλαμβάνουν ή αντανακλούν την ισχύ του κύματος. Αυτές οι συσκευές είναι συνήθως onshore ή nearshore. Ωστόσο, έχουν σχεδιαστεί πλωτές εκδόσεις για υπεράκτιες εφαρμογές. Η συγκεκριμένη συσκευή αποτελείται από ένα τμήμα που μένει ακίνητο και ένα τμήμα που κινείται ως απόκριση του κύματος. Το στατικό τμήμα μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο βυθό της θάλασσας είτε στην ακτή. Θα πρέπει όμως να παραμένει σε επαφή με το κινούμενο τμήμα. Το κινούμενο τμήμα λειτουργεί ως ένα είδος εμβόλου, δηλαδή κινείται πάνω-κάτω. Αυτή η κίνηση συμπιέζει τον αέρα για να κινήσει μια τουρμπίνα. Παρακάτω δίνεται μια αντιπροσωπευτική διάταξη του συγκεκριμένου είδους.



Εικόνα 3-3: Oscillating Water Column, Terminator type WEC

Πηγή: Challenges of Marine Power in the Balkan Region, Daniela Dzhonova, Aleksandar Georgiev, 2013

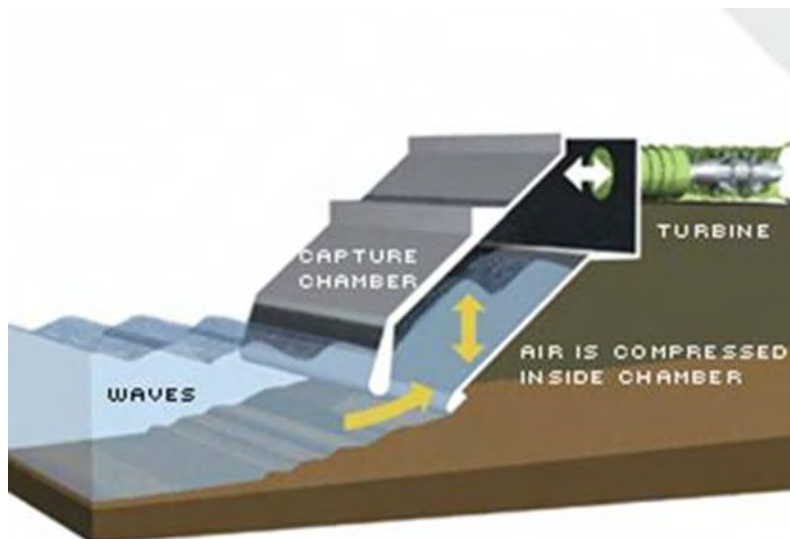
Oscillating Water Column (Παλινδρόμηση στήλης ύδατος)



Εικόνα 3-4: Pico OWC, σχήμα (πάνω αριστερά) και σε λειτουργία (πάνω δεξιά), OceanLynx, σχήμα (κάτω αριστερά), πραγματική φωτογραφία συσκευής (κάτω δεξιά) (Πηγή: Handbook of Ocean Wave Energy, Jens Peter Kofoed(2017))

Η oscillating water column είναι μια μορφή terminator, στην οποία το νερό εισέρχεται μέσω ενός υποθαλάσσιου ανοίγματος σε ένα θάλαμο, παγιδεύοντας αέρα πάνω. Η δράση των κυμάτων προκαλεί την κίνηση της παγιδευμένης στήλης ύδατος προς τα πάνω και προς τα κάτω σαν ένα έμβολο, εξαναγκάζοντας τον αέρα σε κίνηση μέσω ενός ανοίγματος που συνδέεται με έναν στρόβιλο για να παράγει ενέργεια. Αυτές οι συσκευές γενικά έχουν ονομαστική ισχύ από 500 kW έως 2 MW, ανάλογα με το κλίμα κύματος (wave climate) και τις διαστάσεις της συσκευής. **Από την έναρξη του Προγράμματος Wave Energy Programme του Ηνωμένου Βασιλείου το 1974 ο συνδυασμός μιας Oscillating Water Column (OWC) και ενός στροβίλου Wells έχει προωθηθεί ως ένας αξιόπιστος και οικονομικός συνδυασμός για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων σε χρήσιμη ισχύ.**

Μία OWC σχηματίζεται από ένα θάλαμο που γεμίζει με αέρα πάνω από τη γραμμή νερού. Με τη δράση των κυμάτων η στάθμη του νερού μέσα στο θάλαμο ανεβαίνει και πέφτει, εναλλάξ συμπιέζοντας και εκτονώνοντας τον αέρα μέσα στο θάλαμο. Καθώς η στάθμη του νερού μέσα στο θάλαμο ανεβαίνει ο πεπιεσμένος αέρας διαφεύγει από τον θάλαμο διαμέσου μιας μονάδας γεννήτριας στροβίλου (turbine-generator unit) που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Καθώς η στάθμη του νερού στο θάλαμο πέφτει, ο αέρας ανασύρεται πίσω στο θάλαμο διαμέσου του συγκροτήματος γεννήτριας-στροβίλου (turbine-generator) για να συνεχίσει την παραγωγή ισχύος. Οι στρόβιλοι Wells είναι αυτοανορθωτές έτσι ώστε η κατεύθυνση περιστροφής του στροβίλου να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ισχύος.



Εικόνα 3-5: Σχηματική απεικόνιση του OWC

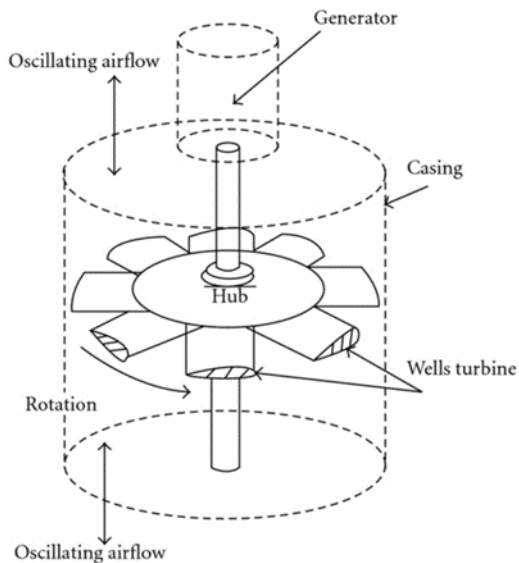
Πηγή: <https://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Oscillating+Water+Column>

Η τεχνολογία έχει βρει εμπορική εφαρμογή σε σημαντήρες πλοήγησης (navigation buoys) και πολλές εγκαταστάσεις επίδειξης (demonstration plants) έχουν κατασκευαστεί σε ολόκληρη την υφήλιο στην Ινδία, την Κίνα, τη Νορβηγία, την Ιαπωνία, την Πορτογαλία και το Ηνωμένο Βασίλειο, συμπεριλαμβανομένου της εγκατάστασης LIMPET της Wavegen στο Islay της Σκωτίας (LIMPET : Land Installed Marine Power Energy Transmitter). Οι μονάδες κυματοθραυστών OWC βρίσκονται υπό κατασκευή στο Mutriku στη βόρεια Ισπανία και στην Πορτογαλία στο Πόρτο. Οι OWC δεν είναι εξοπλισμένες μόνο με τουρμπίνες Wells. Προς το παρόν, ωστόσο, η απλότητα και η ευελιξία του συστήματος Wells την καθιστούν την πιο ελκυστική επιλογή μετατροπής ενέργειας για τα συστήματα OWC. Οι μεγάλες αρετές του στροβίλου Wells είναι η απλότητα και η αποτελεσματικότητά του.



Εικόνα 3-6: Τουρμπίνη Wells που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση LIMPET
Πηγή: Ocean Wave Energy, Cruz(2008)

Η απλότητα μπορεί να φανεί από την παραπάνω εικόνα η οποία δείχνει, με την απομάκρυνση του εξωτερικού αγωγού, την τελική φάση συναρμολόγησης ενός ζεύγους μονάδων στροβίλου 250 kW στην εγκατάσταση LIMPET. Οι επτά λεπίδες της μονάδας διαμέτρου 2,6 m είναι συμμετρικού τμήματος αεροτομής. Οι λεπίδες βιδώνονται μέσω ενός δακτυλίου συγκράτησης (ο οποίος φέρει τα φυγοκεντρικά φορτία) σε μια πλάκα η οποία με τη σειρά της προσαρμόζεται απευθείας στον άξονα της γεννήτριας (η οποία είναι κρυμμένη κάτω από ένα κυλινδρικό κάλυμμα). Η διαμόρφωση βασικής γραμμής της εγκατάστασης LIMPET χρησιμοποίησε δύο από αυτά τα συγκροτήματα, πλάτη-πλάτη, έτσι ώστε ο συνδυασμός να σχηματίζει ένα διπλό στρόβιλο αντίθετης περιστροφής. Ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των εγκαταστάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες διαμορφώσεις.

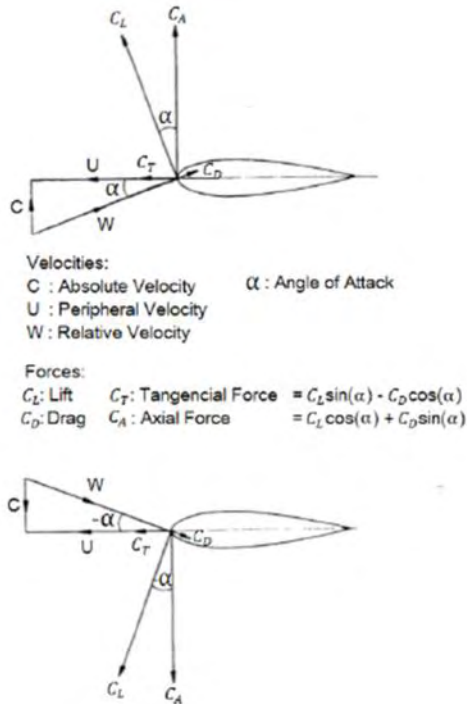


Εικόνα 3-7: Σχήμα τουρμπίνας Wells

Πηγή: *Improved Design of Wells Turbine for Wave Energy Conversion Using Entropy Generation*, R.Soltanmohamadi, E.Lakzian, (2015)

Η αρχή λειτουργίας του στροβίλου Wells μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Το επίπεδο του περιστρεφόμενου στροβίλου είναι κάθετο προς τη ροή αέρα στον αγωγό του στροβίλου. Η πρόσθια κίνηση του πτερυγίου σε συνδυασμό με την κάθετη ροή αέρα σημαίνει ότι σε σχέση με το πτερύγιο υπάρχει γωνία προσβολής του αέρα σε σχέση με το επίπεδο των πτερυγίων της τουρμπίνας. Αυτή η γωνία προσβολής μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ μηδέν (όταν ο στρόβιλος περιστρέφεται αλλά δεν υπάρχει ροή αέρα στον αγωγό) σε 90° (όταν υπάρχει αέρας στον αγωγό, αλλά ο στρόβιλος είναι ακίνητος). Όλες οι αεροτομές δημιουργούν ανύψωση σε γωνία 90° προς τη γωνία προσβολής και, όπως φαίνεται από το σχήμα παρακάτω, ο ανυψωτήρας αυτός έχει ένα συστατικό στοιχείο στην ίδια κατεύθυνση με την περιστροφή του στροβίλου. **Η μεγάλη αρετή του στροβίλου Wells είναι το γεγονός ότι, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση στην οποία ο αέρας ρέει, ο στρόβιλος κινείται προς την ίδια κατεύθυνση.** Από την άποψη αυτή, το σύστημα περιγράφεται ως αυτό-διορθωτικό.



Εικόνα 3-8: Αεροδυναμικές δυνάμεις και ταχύτητες που δρουν σε μια λεπίδα στροβίλου Wells
 Πηγή: *Modeling of Wave Energy Absorption: a Case Study for a Fishing Pier in Brazil*, Leonardo C Dalla Vecchia, Carla de Abreu D'Aquino et al.,(2015)

Στην πράξη υπάρχουν δυνάμεις οπισθέλκουσας (drag forces) στις λεπίδες του στροβίλου καθώς και ανύψωσης (lift) και σε σύγκριση με ορισμένες μορφές στροβίλου η οπισθέλκουσα, λόγω της μεγάλης περιοχής των λεπίδων, μπορεί να είναι σχετικά υψηλή. Αυτό σημαίνει ότι σε μικρές γωνίες προσβολής (συνήθως $< 2^\circ$) το στοιχείο ανύψωσης προς την κατεύθυνση περιστροφής είναι ανεπαρκές για να ξεπεραστεί η δύναμη οπισθέλκουσας και ο στρόβιλος δεν θα κινηθεί. Το ίδιο συμβαίνει σε υψηλές γωνίες προσβολής (συνήθως $> 14^\circ$) όταν η λεπίδα σταματήσει και πάλι ο στρόβιλος δεν θα κινηθεί. Οι λεπίδες είναι πιο αποτελεσματικές σε γωνία προσβολής περίπου 7° .

Αντί να περιγράψουμε την κατάσταση της ροής αέρα στον στρόβιλο από την άποψη της γωνίας προσβολής (θ) είναι πιο συνηθισμένο να χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής ροής (Φ) ο οποίος ορίζεται ως η εφαπτομένη της γωνίας προσβολής στο άκρο λεπίδας. (Cruz, 2008)

$$\text{Επομένως : } \Phi = \tan(\theta) = V_x / V_t = V_x / r\omega \quad (3.1)$$

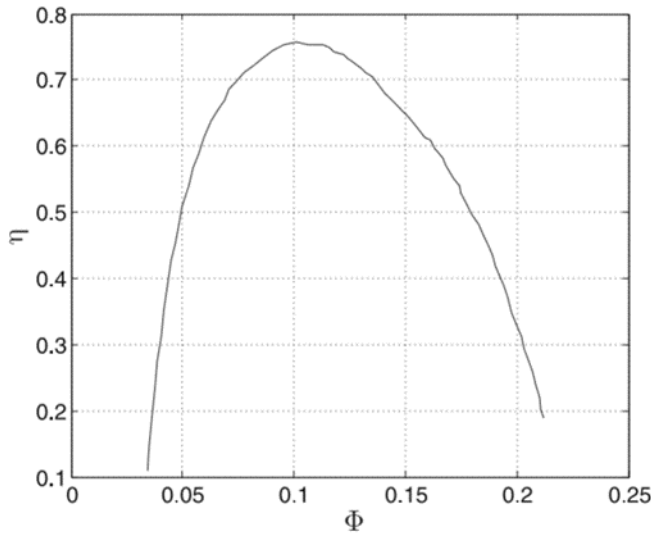
Όπου V_x : αξονική ταχύτητα ροής (axial flow velocity)

V_t : ταχύτητα άκρου στροβίλου (turbine tip speed)

r : ακτίνα στροβίλου (turbine radius)

ω : περιστροφική ταχύτητα (rotational speed)

Οι λεπτομερείς επιδόσεις του στροβίλου αλλάζουν με τη μορφή της αεροτομής και το μέγεθος του στροβίλου και οι κορυφαίες αποδόσεις που προσεγγίζουν το 90% είναι εφικτές.



Εικόνα 3-9: Αναπαράσταση καμπύλης απόδοσης η - Φ
 Πηγή: *Ocean Wave Energy, J.Cruz(2008)*

Η απόδοση κορυφής που παρουσιάζεται είναι 75,5%. Καθώς η στάθμη του νερού στο OWC αυξάνεται και πέφτει ως απόκριση στην ενέργεια των κυμάτων, η ροή διαμέσου του στροβίλου ποικίλει και συνεπώς ο συντελεστής ροής αλλάζει επίσης. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής ροής μεταβάλλεται συνεχώς πάνω και κάτω στην καμπύλη αποτελεσματικότητας με αποτέλεσμα η απόδοση ολόκληρου του κύκλου να είναι χαμηλότερη από την απόδοση κορυφής. Μια εκτίμηση της απόδοσης ολόκληρου του κύκλου μπορεί να γίνει με την παρατήρηση ότι η στιγμιαία ισχύς εισόδου (instantaneous input pneumatic power) είναι $P=cQ^2$,

Όπου Q: στιγμιαία ροή (instantaneous flow)

$c=P/Q$: απόσβεση στροβίλου (ή πτώση πίεσης ανά μονάδα ροής)

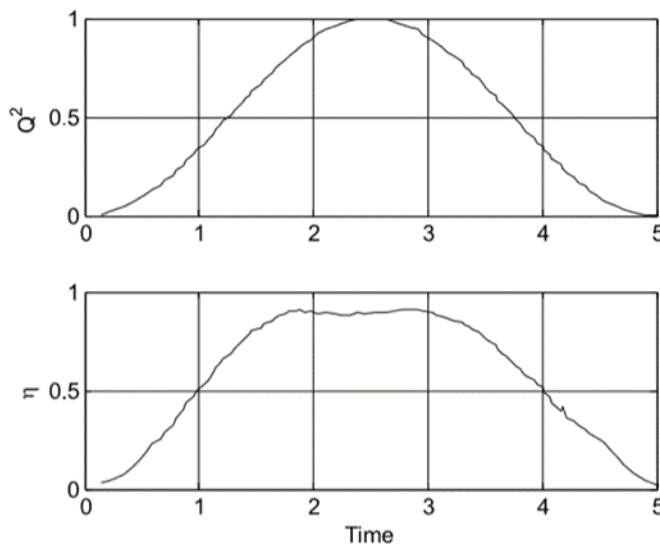
P: στιγμιαία πίεση

Ομοίως, η στιγμιαία ισχύς που μετατρέπεται από τον στρόβιλο είναι: $P_t = \eta(\Phi)cQ^2$

Και ολοκληρώνοντας σε έναν κύκλο η μέση απόδοση δίνεται από:

$$\eta_{av} = \frac{\sum cQ^2}{\sum c\eta(\Phi)Q^2} = \frac{\sum Q^2}{\sum \eta(\Phi)Q^2} \quad (3.2)$$

Εάν υποθέσουμε ημιτονοειδές προφίλ ροής και η ταχύτητα του άκρου του στροβίλου βελτιστοποιηθεί σε σχέση με τις υποτιθέμενες ταχύτητες ροής τότε είναι δυνατόν να αναπτυχθούν τα προφίλ της πνευματικής ισχύος και της στιγμιαίας απόδοσης που φαίνονται στο σχήμα. Διαπιστώνεται ότι, όταν υπάρχει υψηλή πνευματική ισχύς, η απόδοση είναι κοντά στο μέγιστο και αντίστροφα όταν η απόδοση είναι χαμηλή, υπάρχει ελάχιστη ή καμία πνευματική ισχύς. Για το παράδειγμα που παρουσιάζεται, η μέση απόδοση είναι 72%, η οποία είναι εκπληκτικά κοντά στην κορυφή του 75,5%. **Αυτό καταδεικνύει ότι, κατ'αρχήν, η απλή τουρμπίνα Wells μπορεί να έχει καλή απόδοση μετατροπής ακόμη και υπό συνθήκες τυχαίας ροής.**



Εικόνα 3-10: Προφίλ πνευματικής ισχύος και στιγμιαίας απόδοσης
 Πηγή: *Ocean Wave Energy*, J.Cruz (2008)

Το σύστημα στροβίλου-γεννήτριας δεν λειτουργεί μεμονωμένα στο θάλαμο σύλληψης του OWC και τα χαρακτηριστικά του στροβίλου και οι επιδράσεις της απόσβεσης ισχύος και της κίνησης της επιφάνειας του νερού στη στήλη είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας της βασικής λήψης ενέργειας από το OWC. Γίνεται σαφές ότι υπάρχει μια βέλτιστη απόσβεση που αυξάνεται με την ισχύ στη θάλασσα. Ένας στρόβιλος που υπέρ-αποσβένει ή υπό-αποσβένει τη στήλη νερού κατά ένα συντελεστή δύο (a factor of two) θα προκαλέσει πτώση της πνευματικής ισχύς κατά περίπου 15%. Ο σχεδιασμός του στροβίλου πρέπει επομένως να λαμβάνει πλήρως υπόψη την επίδραση της αλληλεξάρτησης μεταξύ των πρωταρχικών χαρακτηριστικών της δέσμης ισχύος και των στροβίλων και πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη το ευρύ φάσμα των

ενεργειακών επιπτώσεων που θα συναντήσουν σε ένα τυπικό έτος. Η ισχύς στη θάλασσα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη.

Κατά τον σχεδιασμό του εξοπλισμού στροβιλογεννήτριας πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ της ικανότητας της μονάδας παραγωγής να εξάγει τη μέγιστη ισχύ από τα συμβάντα καταιγίδας και τις πρόσθετες παρασιτικές απώλειες μεγαλύτερης εγκατάστασης που παράγει σε μερικό φορτίο(part load). **Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του στροβίλου, πρέπει ταυτόχρονα να λειτουργεί με τον ιδανικό συντελεστή ροής, ενώ παράλληλα παράγει την κατάλληλη απόσβεση για να μεγιστοποιήσει την πνευματική σύλληψη ισχύος. Η κατάσταση περιπλέκεται καθώς πρέπει να το κάνει σε όλες τις θαλάσσιες καταστάσεις. Ευτυχώς ο στρόβιλος Wells έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για να το επιτύχει αυτό.**

Σύμφωνα με τον J. Cruz (2008) αποδεικνύεται ότι η **απόσβεση του στροβίλου Wells (c)** είναι ανάλογη της ταχύτητας του στροβίλου (ω) ώστε $c=k\omega$. Όπου k : η αδιάστατη (ή μειωμένη) συχνότητα. Έτσι η αξονική ταχύτητα ροής είναι $V_x=Q/A$ ή $Q=V_xA$. Συνδυάζοντας αυτές τις σχέσεις με την εξίσωση $P=cQ^2$ έχουμε :

$$P_n = cQ^2 = k\omega(V_xA)^2 \quad (3.3)$$

Αν όμως ο στόχος είναι να διατηρηθεί ο **συντελεστής ροής** για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του στροβίλου τότε: $V_x/V_t = \Phi_{opt}$ ή $V_x = \Phi_{opt}V_t = \Phi_{opt} r\omega$, όπου r είναι η ακτίνα άκρου στροβίλου. Αν γίνει αντικατάσταση στην $P_n=k\omega(V_xA)^2$, θα έχουμε:

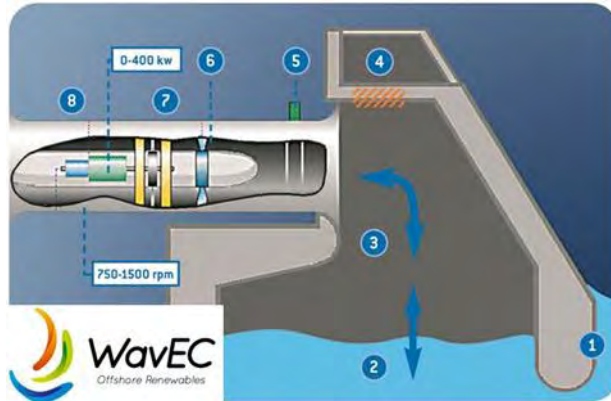
$$P_n = k\omega(\Phi_{opt} r\omega A)^2 = k^*\omega^3 \quad (3.4)$$

όπου $k^* = k\Phi_{opt}^2 r^2 A^2$.

Αυτό σημαίνει ότι για βέλτιστη απόδοση στροβίλου η ταχύτητα του στροβίλου πρέπει να ποικίλει ανάλογα με τα $\sqrt[3]{P_n}$. Εάν η βέλτιστη απόσβεση που μετράται για τον συλλέκτη LIMPET συγκρίνεται με ένα γράφημα απόσβεσης έναντι του $22P_n^{1/3}$, **μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι υπάρχει εύλογη εφαρμογή μεταξύ των δύο, επιβεβαιώνοντας ότι ο στρόβιλος Wells έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για καλή παραγωγή κάτω από ευρύ φάσμα θαλάσσιων συνθηκών.** Είναι ενδιαφέρον ότι με τα συστήματα μεταβλητών στροφών (inverter) είναι τελείως εφικτό να μεταβάλλεται η ταχύτητα εργασίας του στροβίλου κατά συντελεστή 4 ή περισσότερο, έτσι ώστε να διατηρείται ο βέλτιστος συντελεστής ροής για ισχύ εισόδου που κυμαίνεται σε μία περιοχή 64: 1 ενώ διατηρείται ο συντελεστής απόσβεσης κοντά στο ιδανικό. Αυτό προσφέρει μια εξαιρετική αναλογία απόκλισης (turn-down ratio) που επιτρέπει μετατροπή ενέργειας τόσο

από τις συχνά εμφανιζόμενες ήπιες θαλάσσιες καταστάσεις όσο και από τις πιο έντονες συνθήκες καταιγίδας.

Η πλειοψηφία της πρακτικής εμπειρίας με τα συστήματα OWC έχει ληφθεί από τα συστήματα ακτογραμμής (shoreline systems) όπου η πρόσβαση στην γη είναι εφικτή, αλλά αναπτύσσονται επίσης πολλά πλωτά συστήματα OWC και θα γίνουν πιο διαδεδομένα καθώς αναπτύσσεται η τεχνολογία.



Εικόνα 3-11: OWC Pico plant

Πηγή: <http://www.pico-owc.net/cms.php?page=542&wnsid=dbb177dd9668f08318207830330904df>

Η παραπάνω εικόνα εγκάρσιας διατομής του συστήματος Pico OWC δείχνει:

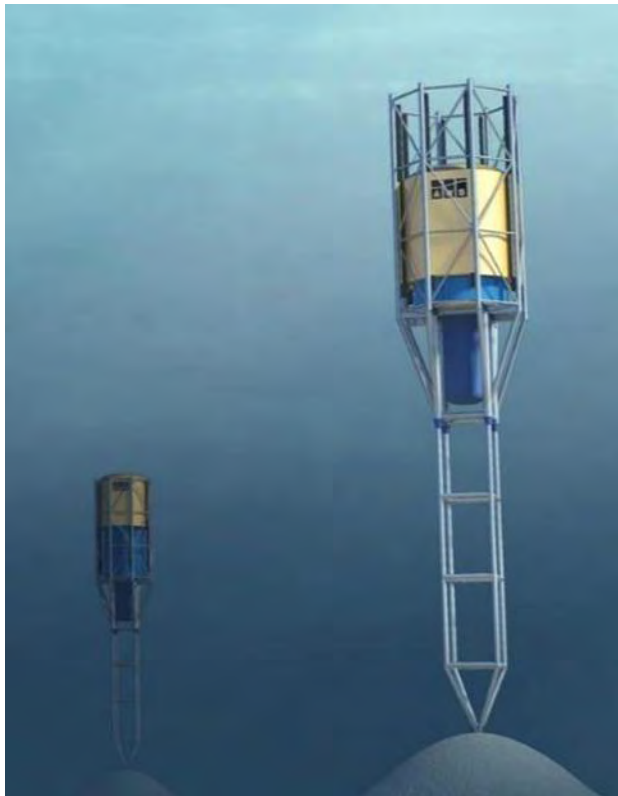
(1) το προσπίπτον κύμα, (2) θάλαμος ταλάντωσης, (3) the bound air pressure chamber, (4) by-pass βαλβίδα εκτόνωσης, (5) κύρια βαλβίδα απομόνωσης, (6) Fast acting βαλβίδα απομόνωσης, (7) τουρμπίνα Wells, (8) ασύγχρονη γεννήτρια.

3.4 Σημειακός Απορροφητής (point absorber)

Οι σημειακοί απορροφητές (point absorbers) είναι πλωτοί μετατροπείς κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, των οποίων το μήκος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος των κυμάτων. Ταλαντεύονται με τα κύματα του ωκεανού με ένα ή περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Ένας σημειακός απορροφητής μπορεί να απορροφήσει ενέργεια κύματος από ένα μέτωπο κύματος μεγαλύτερο από τις φυσικές διαστάσεις της συσκευής. Ένας σημειακός απορροφητής χρησιμοποιεί την κίνηση των επιφανειακών κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η διαδικασία μετατροπής κυματικής ενέργειας μπορεί να οριστεί ως η δύναμη ή η ροπή που δημιουργείται σε ένα WEC από ένα προσπίπτον κύμα που προκαλεί σχετική κίνηση ανάμεσα σε έναν απορροφητή και ένα σημείο αντίδρασης. Ο σημειακός απορροφητής ανταποκρίνεται στην κίνηση του κύματος και παράγει μηχανικό έργο.

Επίσης θα βιώσει πολλά εξωτερικά φορτία (όπως άνεμοι, κύματα, ρεύματα) και εσωτερικά φορτία (όπως οι μετατοπίσεις μάζας στη συσκευή). Θα πρέπει οπότε να είναι αρκετά σταθερός για να αντέξει αυτά τα φορτία και να αποτρέψει πιθανό αναποδογύρισμα του. Η απόκριση του σημειακού απορροφητή εξαρτάται από τη συχνότητα των ταλαντευόμενων κυμάτων. Οι κινήσεις του γίνονται πιο έντονες και παρατηρείται μέγιστη δύναμη απορρόφησης όταν η συχνότητα του κύματος συγχρονίζεται με τη φυσική συχνότητα της συσκευής. Φυσικά, για σημειακούς απορροφητές, λόγω του μικρού μεγέθους τους, η ζώνη των συχνοτήτων του κύματος για την οποία ο WEC δίνει μέγιστη απόδοση είναι πολύ μικρή. Προκειμένου να αποφευχθεί η περίπτωση ο σημειακός απορροφητής να φύγει από την επιθυμητή θέση, η συσκευή είναι αγκυροβολημένη με τη βοήθεια συστημάτων πρόσδεσης. Ένας σημειακός απορροφητής μαζί με το σύστημα πρόσδεσης του αντιμετωπίζουν μεγάλες δυνάμεις ταλάντωσης.

Πολλοί σημειακοί απορροφητές με γραμμικές γεννήτριες μελετώνται και αναπτύσσονται στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης είναι η συσκευή Archimedes Wave Swing(AWS) που αναπτύχθηκε από την εταιρία AWS Ocean Energy.



Εικόνα 3-12: Archimedes Wave Swing, Point Absorber

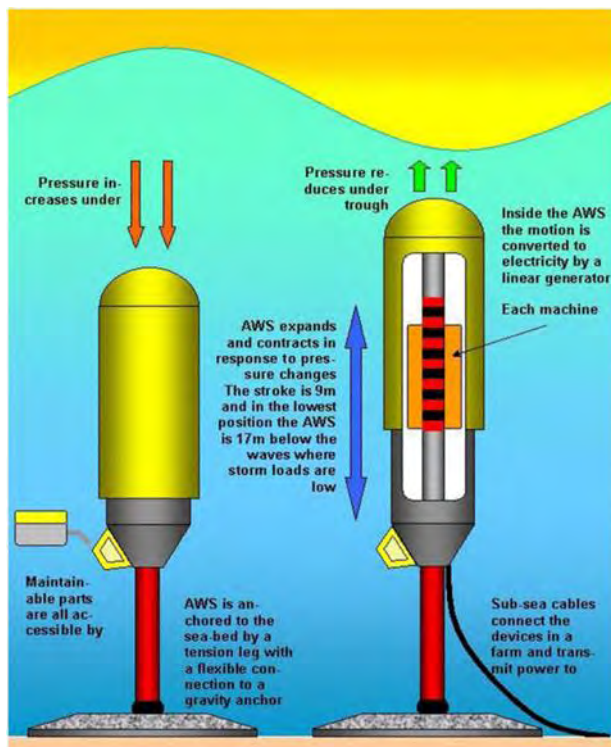
Πηγή: <https://www.altenergymag.com/article/2015/09/technical-summaries-of-wave-energy-prize-official-qualified-teams/21560>

3.4.1 Συσσκευή Archimedes Wave Swing (AWS)



Εικόνα 3-13: Archimedes Wave Swing

Πηγή: <http://www.we-engineering.nl/en/projects/8/archimedes-wave-swing.html>



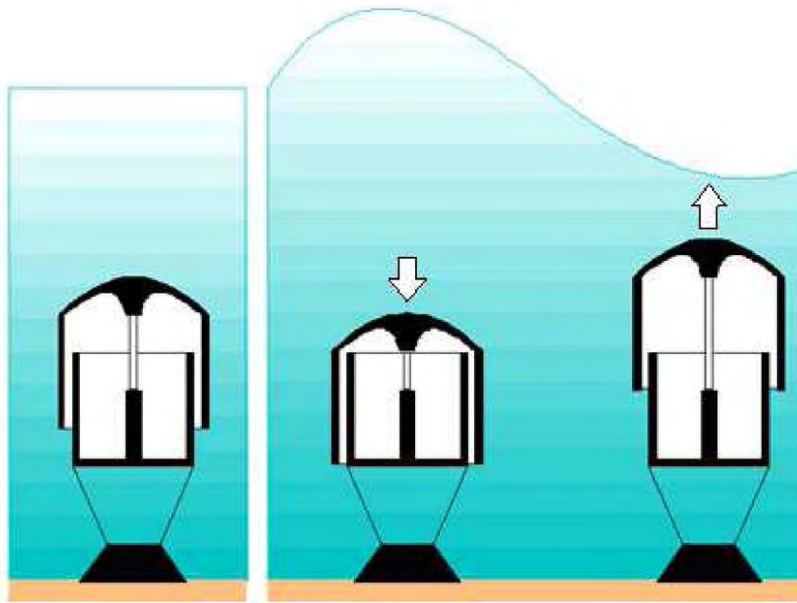
Εικόνα 3-14: Archimedes Wave Swing by AWS Ocean Energy

Πηγή: *Estimation of Wave Energy from Wind Velocity*, Jonathan Blackledge, Eugene Dermot Coyle et al.,(2013)

Μεταξύ των κύριων τεχνολογιών πλήρους κλίμακας, ο Archimedes Wave Swing (AWS) αποτελεί έναν μοναδικό μετατροπέα ενέργειας κύματος επειδή είναι εντελώς βυθισμένος. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για το σχεδιασμό του, καθιστώντας το σύστημα λιγότερο ευάλωτο στις καταιγίδες. Επίσης, δεν είναι ορατό, οπότε η δημόσια αποδοχή ενός AWS wave farm δεν είναι τόσο προβληματική όσο, για παράδειγμα, ένα αιολικό πάρκο. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι τύπου point absorber (χαρακτηριστικό μήκος, στην περίπτωση αυτή η διάμετρος, μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος). Επίσης προβλέπεται όπως και στην περίπτωση του Pelamis (για παράδειγμα), να αναπτυχθεί σε συστοιχίες συσκευών (arrays of devices) με ονομαστική ισχύ μερικά MW.

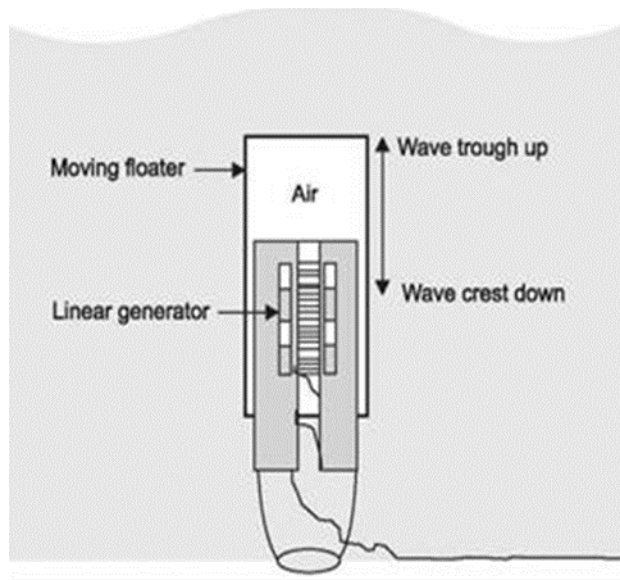
Το AWS αποτελείται από ένα θάλαμο γεμάτο με αέρα που είναι στερεωμένος στον πυθμένα και ανοίγει στην κορυφή (το σιλό), που κλείνει από έναν άλλο κύλινδρο (τον πλωτήρα). Μία παγίδα αέρα δημιουργείται μεταξύ των δύο κυλίνδρων και έτσι το νερό δεν μπορεί να πλημμυρίσει το σιλό. Ο πλωτήρας μπορεί να κινηθεί προς τα επάνω (ή προς τα κάτω), λόγω της αύξησης (ή μείωσης) της πίεσης που συνδέεται με την εισερχόμενη κορυφή κύματος (wave crest) ακριβώς πάνω από τη συσκευή. Με την προσθήκη συστήματος λήψης ισχύος (PTO) αυτή η ταλάντωση μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ισχύ. Στην περίπτωση του AWS, ο PTO είναι μια γραμμική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (permanent-magnet linear generator).

Ρυθμίζοντας τη συχνότητα του συστήματος στη μέση συχνότητα κύματος, η διαδρομή της γραμμικής κίνησης μπορεί να γίνει μεγαλύτερη από το ύψος κύματος.



Εικόνα 3-15: Archimedes wave swing converter

Πηγή: *Thermal modelling of tubular linear machines using a hybrid analytical method*, S. Ouagued, M. A. Ben Hamida, Yacine Amara, Ghias Barakat, Johannes J.H. Paulides, (2015)



Εικόνα 3-16: Archimedes Wave Swing

Πηγή: <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=28923>

3.4.2 Σχεδιασμός Πλήρους Κλίμακας Πειραματικής Μονάδας

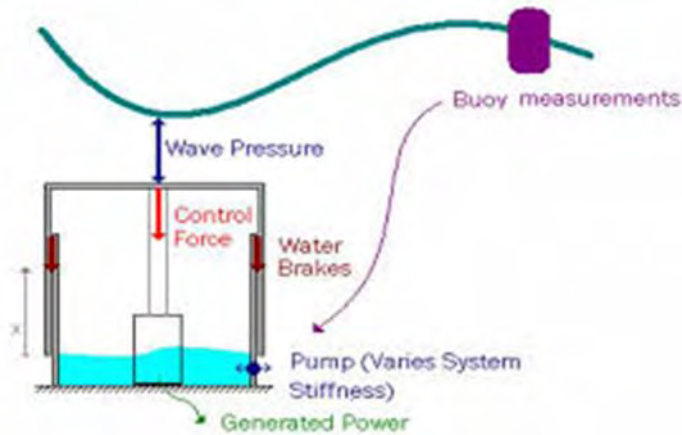


Εικόνα 3-17: Πιλοτική εγκατάσταση AWS αγκυροβολημένη το 2004 στο Leixões, Πορτογαλία
Πηγή: Ocean Wave Energy, J.Cruz (2008)

Μέχρι τις αρχές του 1999, ο σχεδιασμός του AWS ήταν έτοιμος και εξαρτήματα παραγγέλθηκαν από διάφορους συνεργάτες. Η πιλοτική εγκατάσταση συναρμολογήθηκε στην Ρουμανία. Τον Νοέμβριο του 2001, ο AWS ρυμουλκήθηκε στο χώρο δοκιμών και η πρώτη απόπειρα βυθίσματος έγινε στην ακτή της Πορτογαλίας. Όμως προέκυψαν ζητήματα σταθερότητας και η λειτουργία αναβλήθηκε. Ο AWS οδηγήθηκε πίσω στο λιμάνι του Leixões (κοντά στο Πόρτο). Μια δεύτερη απόπειρα ήταν επίσης ανεπιτυχής ένα έτος αργότερα, αλλά η εμπειρία που συγκεντρώθηκε αποδείχθηκε πολύτιμη όταν η πιλοτική μονάδα βυθίστηκε τελικά το 2004. Η πειραματική μονάδα στη συνέχεια δοκιμάστηκε σε ποικίλες θαλάσσιες καταστάσεις και συνθήκες λειτουργίας με τη βοήθεια των διαφόρων κωδίκων που αναπτύχθηκαν, συμπεριλαμβανομένης μιας χρονικής προσομοίωσης του συνολικού συστήματος.

Η μέγιστη ισχύς είναι 2 MW. Η ονομαστική διαδρομή είναι 7 μέτρα και η ονομαστική ταχύτητα είναι 2,2 m / s. Ένα σύστημα πέδησης έπρεπε να συμπεριληφθεί στη συσκευή για να καθηλώσει την κίνηση σε περίπτωση περιορισμού ή βλάβης της γεννήτριας. Αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο κυλίνδρους που ολισθαίνουν μεταξύ τους, αναγκάζοντας το νερό που παγιδεύεται στο εσωτερικό να ρέει μέσα από ένα στόμιο. Με την αλλαγή της διατομής του

ανοίγματος η δύναμη φρεναρίσματος μπορεί να ρυθμιστεί στο επιθυμητό επίπεδο. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, η διατομή του στομίου διατηρήθηκε πάντα στο ελάχιστο (τα φρένα νερού ήταν κλειστά) και ως εκ τούτου η απόσβεση ήταν αρκετά υψηλή.



Εικόνα 3-18: Φρένα Νερού

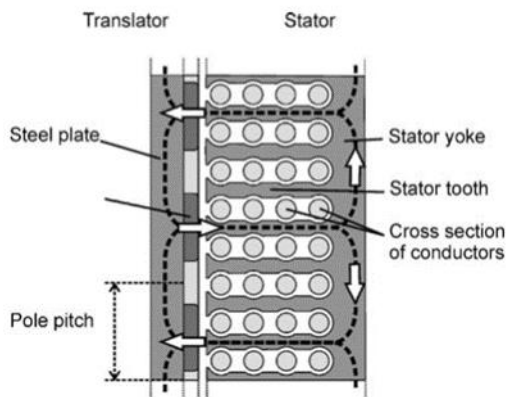
Πηγή : [file:///C:/Users/User/Downloads/Gieske2007%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Gieske2007%20(1).pdf)

Το κινητό τμήμα της συσκευής έχει μάζα περίπου 400 τόνων και η συνολική μάζα της συσκευής, συμπεριλαμβανομένου του πλωτήρα, είναι περίπου 7000 τόνοι (εκ των οποίων περίπου 5000 τόνοι οφείλονται στις δεξαμενές έρματος άμμου (sand ballast tanks)). Το μεγαλύτερο μέρος του όγκου είναι διαθέσιμο για τις δεξαμενές έρματος που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία βύθισης /εκτόνωσης. Ο όγκος αέρα της συσκευής στη μεσαία θέση είναι περίπου 3000 m^3 και μπορεί να αλλάξει με την άντληση νερού. Ο συνολικός όγκος νερού που μπορεί να αντληθεί είναι περίπου 1500 m^3 και επιτρέπει τον συντονισμό της φυσικής περιόδου της συσκευής στην περιοχή 7-13s.

3.4.3 Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη Διαμήκουσ Ροής (LFPM)

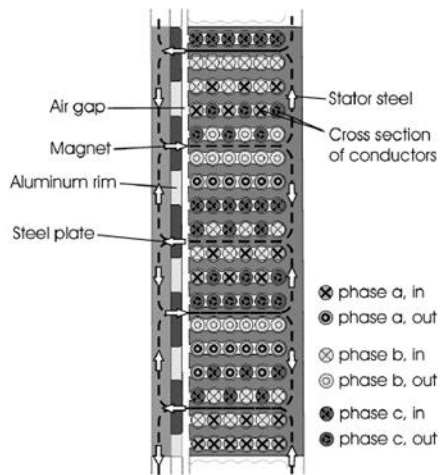
Το όνομα αναφέρεται στη διαδρομή ροής (flux path) στον ζυγό (yoke) που βρίσκεται στη διαμήκη κατεύθυνση. Αυτό το μηχάνημα είναι επίσης γνωστό ως σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, η οποία αντανακλά το γεγονός ότι η ροή περιέλιξης σπλισμού (armature winding flux) και η ροή μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet flux) κινούνται συγχρόνως στο διάκενο αέρα. Οι γεννήτριες LFPM έχουν διερευνηθεί με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (Danielsson et al., 2006) και αναλυτικές μεθόδους (Polinder et al., 2004) για εφαρμογές κυματικής ενέργειας και δοκιμάστηκαν offshore τόσο στο έργο AWS όσο και στο έργο του

Πανεπιστημίου της Ουψάλα. Μία διατομή του μαγνητικού κυκλώματος μιας γεννήτριας διαμήκους μόνιμου μαγνήτη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3-19: Η διατομή μιας γεννήτριας LFPM, η διαδρομή μαγνητικής ροής απεικονίζεται με μια διακεκομμένη γραμμή και η κατεύθυνση της ροής με βέλη
Πηγή: Ocean Wave Energy, J.Cruz(2008)

Η κύρια μαγνητική ροή απεικονίζεται με διακεκομμένες γραμμές και η κατεύθυνση της ροής υποδεικνύεται με βέλη. Η μαγνητική ροή από ένα μαγνήτη διασχίζει το διάκενο αέρα και οδηγείται από τα δόντια του στάτορα (stator tooth) μέσω των πηνίων στάτορα (stator coils). Στον ζυγό του στάτορα η ροή χωρίζεται σε δύο διαδρομές, οι οποίες επιστρέφουν μέσω των δοντιών στάτορα, μέσω του διακένου αέρα και διαμέσου των γειτονικών μαγνητών. Η χαλύβδινη πλάκα στον μεταφορέα συνδέει τη μαγνητική ροή στο πίσω μέρος των μαγνητών. Η LFPM έχει εγγενώς μικρή σύγχρονη αντίδραση και η κατασκευή του στάτορα είναι απλή και στιβαρή. Η γεωμετρία της LFPM, ωστόσο, περιορίζει το πλάτος των δοντιών του στάτορα και την περιοχή εγκάρσιας διατομής των αγωγών για ένα δεδομένο βήμα πόλων. Η αύξηση του πλάτους των δοντιών για την αύξηση της μαγνητικής ροής στον στάτορα ή η αύξηση της διατομής του αγωγού απαιτεί μεγαλύτερο βήμα πόλου και έτσι μειώνεται η γωνιακή συχνότητα της ροής. Αυτό θέτει ένα όριο για την επαγόμενη emf (ηλεκτρεγερτική δύναμη) ανά πόλο και κατά συνέπεια την ισχύ ανά περιοχή διακένου αέρα.



Εικόνα 3-20: Σχήμα γεννήτριας Longitudinal flux permanent magnet generator(LFPM)

Πηγή: Detailed study of the magnetic circuit in a longitudinal flux permanent-magnet synchronous linear generator, O. Danielsson, M. Leijon, E. Sjostedt, (2005)

Για να οριστικοποιηθεί η βασική περιγραφή της τεχνολογίας AWS, γίνονται ορισμένες γενικές σκέψεις σχετικά με το σχεδιασμό του συστήματος λήψης ισχύος. Κατά τον σχεδιασμό του PTO για το AWS, οι βασικές κινητήριες δυνάμεις προσδιορίστηκαν ως εξής:

- Μέγιστη διαδρομή: 7 μέτρα
- Μέγιστη ταχύτητα: 2,2 m / s
- Μέγιστη δύναμη: 1 MN
- Ευστάθεια
- Συντήρηση όσο το δυνατόν χαμηλότερη
- Απόδοση(efficiency)
- Κόστος

Επειδή το σύστημα εξαγωγής ισχύος (PTO) είναι κρίσιμο, αλλά συχνά η σημασία του σε πρώτη θεώρηση υποβαθμίζεται, μεταφέρονται παρακάτω ορισμένοι λεπτομερείς προβληματισμοί. Ειδικότερα, εξετάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που επιβάλλει η διάταξη απόληψης της κυματικής ενέργειας.

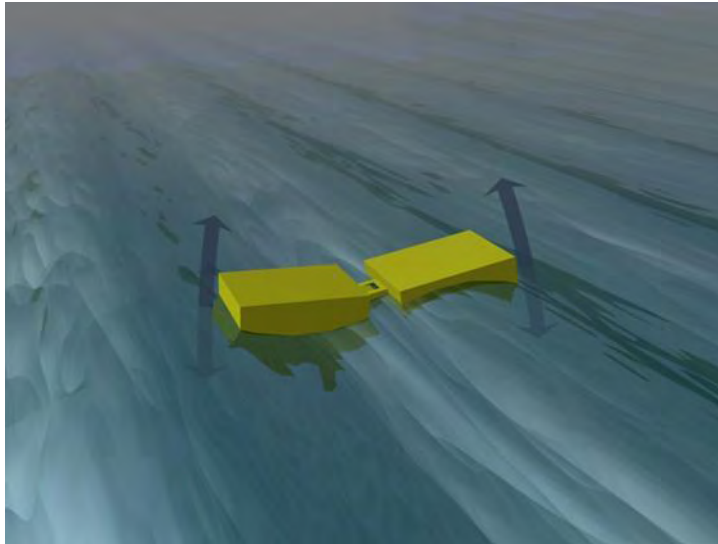
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού, έγιναν στη συγκεκριμένη υλοποίηση οι ακόλουθες επιλογές προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις όσο το δυνατόν καλύτερα. (J.Cruz, 2008)

1. Πιθανόν, ένα σύστημα γεννήτριας που αποτελείται από κιβώτιο ταχυτήτων που μετατρέπει τη γραμμική κίνηση του πλωτήρα σε περιστροφική κίνηση και μια τυπική περιστρεφόμενη γεννήτρια θα ήταν μια φτηνή και μάλλον αποδοτική λύση. Ωστόσο, φαίνεται ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να δημιουργηθεί μία διάταξη ανθεκτική και χωρίς απαιτήσεις συντήρησης. Επομένως, χρησιμοποιείται μια γραμμική γεννήτρια.
2. Είναι σχεδόν αδύνατο και εξαιρετικά δαπανηρό να γίνει η γεννήτρια αρκετά μεγάλη για να πάρει όλες τις δυνατές δυνάμεις που παράγονται από τα κύματα. Ως εκ τούτου, το AWS έχει επίσης αποσβεστήρες νερού που μπορούν να απορροφήσουν πολύ υψηλές δυνάμεις. Αυτό σημαίνει ότι η γεννήτρια μπορεί να σχεδιαστεί ως συμβιβασμός μεταξύ της απόδοσης ενέργειας και του κόστους.
3. Η γραμμική γεννήτρια που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PM) επειδή έχει μάλλον υψηλή πυκνότητα δυνάμεως και απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες.
4. Οι μαγνήτες βρίσκονται στον μεταβιβαστή (translator) που μετακινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω, έτσι ώστε να μην υπάρχει ηλεκτρική επαφή μεταξύ του κινούμενου μέρους και του στάτορα, κάτι που είναι σημαντικό επειδή μια τέτοια ηλεκτρική επαφή θα προκάλούσε φθορά.
5. Η γεννήτρια είναι επίπεδη. Ενδεχομένως, κατασκευές στρογγυλής γεννήτριας ταιριάζουν καλύτερα στην κατασκευή του AWS. Ωστόσο, για μία μόνο γεννήτρια για πειραματική εγκατάσταση, ήταν πολύ φθηνότερο να παραμείνουμε κοντά στην υπάρχουσα τεχνολογία παραγωγής και να φτιάξουμε μια επίπεδη γεννήτρια.
6. Ο αριθμός των υποδοχών ανά πόλο ανά φάση είναι ένας. Η αύξηση αυτού του αριθμού θα οδηγούσε σε μεγάλους στίβους πόλων, με αποτέλεσμα παχύτεροι ζυγοί και υψηλότερο κίνδυνο απομαγνήτισης. Η μείωση του αριθμού των σχισμών ανά πόλο ανά φάση (χρησιμοποιώντας περιελίξεις κλασματικού βήματος) θα οδηγούσε σε πρόσθετες απώλειες με φούσκες λόγω πρόσθετων αρμονικών χώρου.
7. Οι μαγνήτες είναι λοξοί για να μειώσουν την οδόντωση.
8. Ο μεταβιβαστής (translator) με τους μαγνήτες, είναι μόνο μερικά μέτρα μακρύτερος από τον στάτορα για να μειώσει το κόστος. Αυτό σημαίνει ότι στην κεντρική θέση οι μαγνήτες του μεταβιβαστή καλύπτουν πλήρως τον στάτορα έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν μέγιστες δυνάμεις, αλλά στις ακραίες θέσεις, οι μαγνήτες επικαλύπτουν μόνο εν μέρει τον στάτορα.

9. Για να εξισορροπηθούν οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ του στάτορα και του μεταβιβαστή (translator), η γεννήτρια είναι διπλής όψης.
10. Για την ψύξη του στάτορα της γεννήτριας, εφαρμόστηκε ένα σύστημα ψύξης νερού.
11. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος (power electronic converter) για τη σύνδεση δικτύου(grid) τοποθετείται στην ακτή έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύκολη επίλυση πιθανών προβλημάτων με τα ηλεκτρονικά ισχύος και τον έλεγχο. Ένα καλώδιο μήκους 6 χλμ. συνδέει τους ακροδέκτες της γεννήτριας με τον μετατροπέα στην ακτή.
12. Ένας μετατροπέας πηγής συνεχούς ρεύματος (current source inverter) στην ακτή χρησιμοποιείται για τη σύνδεση ηλεκτρικού δικτύου. Ένας μετατροπέας πηγής τάσης (voltage source inverter) θα είχε τα εξής πλεονεκτήματα: καλύτερα χαρακτηριστικά ελέγχου, καλύτερο συντελεστή ισχύος, καλύτερη απόδοση γεννήτριας και υψηλότερες δυνάμεις και απόδοση ενέργειας (Leijon et al., 2005). Ωστόσο, φαινόταν να είναι ευκολότερο και φθηνότερο να χρησιμοποιείται ένας εύκολα διαθέσιμος μετατροπέας πηγής ρεύματος.
13. Οι επικαλύψεις χρησιμοποιούνται για την προστασία της γεννήτριας από το επιθετικό περιβάλλον.

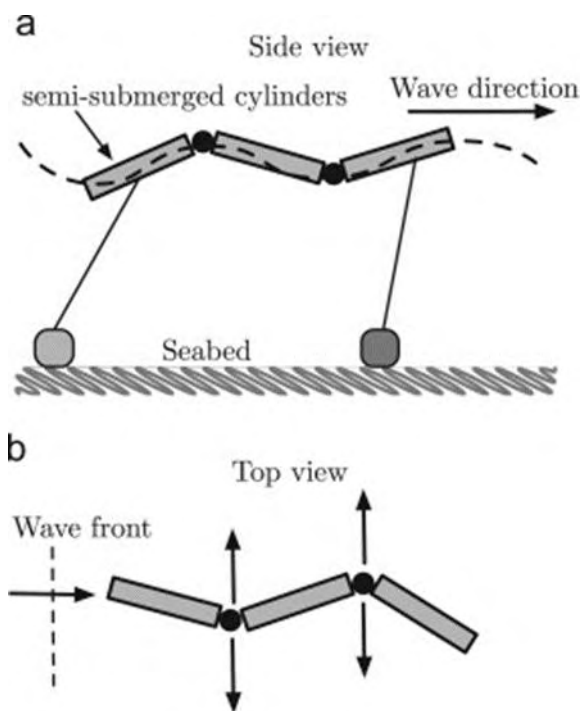
3.5 Εξασθενητής (Attenuator)

Η συγκεκριμένη συσκευή αποτελείται από πολλά τμήματα τα οποία επιπλέον στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο εξασθενητής (attenuator) είναι αγκυροβολημένος στη θέση του με μια αλυσίδα και τοποθετείται παράλληλα προς την κατεύθυνση των κυμάτων. Οι διαστάσεις του είναι μεγαλύτερες από το μήκος του κύματος. Η συσκευή λαμβάνει ενέργεια καθώς η κίνηση των κυμάτων τείνει να κάμψει τα σημεία ένωσης των τμημάτων της συσκευής. Αυτή η κίνηση έπειτα κινεί υδραυλικές αντλίες ή μετατροπείς.



Εικόνα 3-21: Εξασθενητής (Attenuator)

Πηγή: http://www.aquaret.com/indexfca4.html?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=en



Εικόνα 3-22: Απλοποιημένο σχήμα του εξασθενητή Pelamis, (α)πλάγια όψη,(b)κάτοψη

Πηγή: *Computational intelligence in wave energy: Comprehensive review and case study*, L.Cuadra, S.S.Sanz, J.C.N.Borge, G.Rodriguez (2016)

3.5.1 Συσσκευή Pelamis



Εικόνα 3-23: Συσσκευή Pelamis

Πηγή: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, ο Richard Yemm και η εταιρεία του Pelamis Wave Power Ltd άρχισαν να αναπτύσσουν τη συσκευή Pelamis (Yemm et al., 2000). Το πρωτότυπο που ξεκίνησε το 2004 είναι αναμφισβήτητα ο πιο προηγμένος μετατροπέας ενέργειας κύματος που έχει περάσει στη θάλασσα. (J.Cruz, 2008).

Ο μετατροπέας ενέργειας κύματος Pelamis (WEC) είναι μια ημι-βυθισμένη, αρθρωτή δομή αποτελούμενη από κυλινδρικά τμήματα που συνδέονται με κυλινδρικές αρθρώσεις και συγκρατείται στη θέση του με ένα εύκαμπτο σύστημα πρόσδεσης που επιτρέπει στο μηχάνημα να ευθυγραμμίζεται αφού συγκρουστεί με τα εισερχόμενα κύματα. Καθώς τα κύματα μετακινούνται κατά μήκος του μηχανήματος, προκαλούν κίνηση της δομής γύρω από τις αρθρώσεις. Η κίνηση αυτών των αρθρώσεων αντισταθμίζεται από υδραυλικά έμβολα που αντλούν λάδι υψηλής πίεσης μέσω υδραυλικών κινητήρων με τη χρήση συσσωρευτών εξομάλυνσης. Οι υδραυλικοί κινητήρες κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς από όλες τις αρθρώσεις τροφοδοτείται με ένα μόνο καλώδιο τροφοδοσίας σε μια σύνδεση (junction) στον πυθμένα. Ορισμένες συσκευές μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και στη συνέχεια με την ακτή μέσω ενός μόνο καλωδίου στο βυθό (seabed cable).

Επισημαίνονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά:

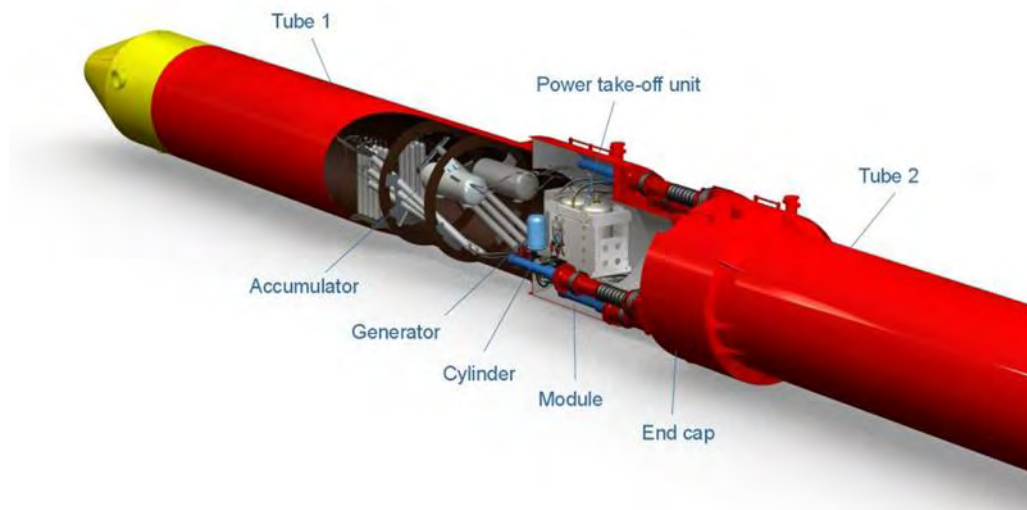
1. Μια Pelamis wave farm μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα εύρος υπεράκτιου βάθους νερού (offshore water depths) και συνθηκών βυθού (sea bed conditions) και επιτρέπει ευελιξία όσον αφορά την επιλογή τοποθεσιών εγκατάστασης (installation sites).
2. Το Pelamis κατασκευάζεται, συναρμολογείται και τίθεται σε λειτουργία εκτός τοποθεσίας (off-site) σε ασφαλείς συνθήκες στη στεριά ή σε προστατευόμενες αποβάθρες και έτσι απαιτείται ελάχιστη εργασία εγκατάστασης σε σχέση με εκείνη που θα χρειαζόταν αν γινόταν στην

τοποθεσία λειτουργίας (on-site). Έτσι αποφεύγονται οι πιο δαπανηρές εκτεταμένες υπεράκτιες κατασκευές, οι οποίες υπόκεινται σε μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις.

3. Το Pelamis διαθέτει μια γρήγορη σύνδεση/αποσύνδεση ηλεκτρικών συνδέσεων και αγκυροβολίων, η οποία επιτρέπει επίσης την ταχεία ανάκτηση και απόσυρση της μηχανής σε μια ασφαλή εγκατάσταση αποβάθρας για τυχόν απαιτήσεις συντήρησης, αποφεύγοντας έτσι τις δαπανηρές υπεράκτιες εργασίες με ειδικό εξοπλισμό και σκάφη.

3.5.2 Σύστημα Λήψης Ισχύος

Το σύστημα λήψης ισχύος στο Pelamis στεγάζεται σε μονάδες μετατροπής ισχύος (Power Conversion Modules-PCM).



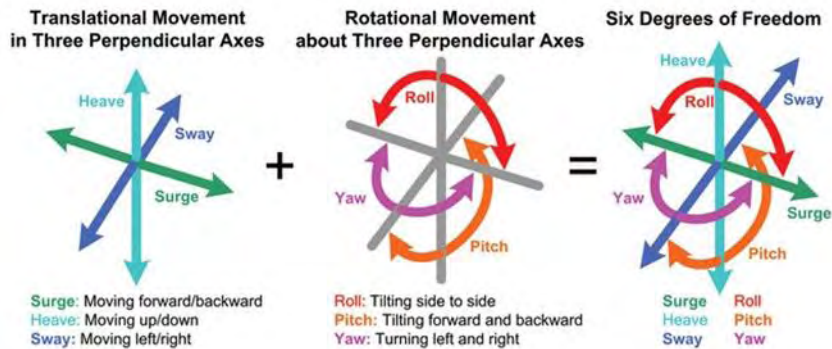
Εικόνα 3-24: Μονάδα μετατροπής ισχύος Pelamis
Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/pelamiswave/6279744410>

Υδραυλικά κυκλώματα (Hydraulic Circuits)

Οι συσσωρευτές (accumulators) που παρέχουν την κρίσιμη αποσύνδεση (decoupling) μεταξύ των υδραυλικών κυλίνδρων και των υδραυλικών κινητήρων είναι συσκευές που αποθηκεύουν υδραυλική ενέργεια μέσω της συμπίεσης ενός αερίου μέσα σε ένα δοχείο πίεσης (pressure vessel). Το αέριο διαχωρίζεται από το υγρό μέσα σε μια κύστη από ένα ελεύθερο έμβολο. Η αύξηση της πίεσης του υγρού συμπιέζει το αέριο και το δοχείο δέχεται περισσότερο ρευστό. Η πτώση της πίεσης διαστέλλει το αέριο και εξωθεί το ρευστό πίσω στο κύκλωμα(circuit). Με τον κίνδυνο της μεγάλης θερμοδυναμικής απλοποίησης, ο συσσωρευτής

συμπεριφέρεται σαν ελατήριο. Εάν διαθέτει επαρκή όγκο και κατάλληλη πίεση αερίου πριν την πλήρωση (gas pre-charge pressure), μπορεί να παρέχει αρκετή αποθήκευση ενέργειας για να αποσυνδέσει την πρωτογενή διαδικασία απόληψης της κυματικής ενέργειας από την δευτερογενή διαδικασία μετατροπής της σε ηλεκτρική. Για να αποφευχθεί ο κίνδυνος σπηλαιώσης (cavitation) (δηλαδή δημιουργία και κατάρρευση καταστροφικών φυσαλίδων ατμών λόγω μεταβατικών συνθηκών χαμηλής πίεσης), είναι συνήθης πρακτική η λειτουργία υδραυλικών μηχανών με μια μικρή πίεση ώθησης, μέχρι 5 bar, στη θύρα εισαγωγής.

Στην λήψη ισχύος του Pelamis, διαφορετικοί συνδυασμοί θαλάμων εντός των υδραυλικών κυλίνδρων χρησιμοποιούνται για την άντληση λαδιού απευθείας στον συσσωρευτή. Οι θάλαμοι ανοίγουν και κλείνουν από ηλεκτρονικά ελεγχόμενες βαλβίδες κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου κύματος. Η ροπή της αντίδρασης γύρω από κάθε κίνηση heave ή sway της άρθρωσης του Pelamis μπορεί έτσι να μεταβάλλεται μέσω μιας περιοχής τιμών που εξαρτάται από την πίεση του συσσωρευτή και τον αριθμό των θαλάμων κυλίνδρων που συνδέονται. **Η πίεση στον συσσωρευτή εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ του ρυθμού με τον οποίο τροφοδοτείται ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα και του ρυθμού με τον οποίο απάγεται από το δευτερογενές κύκλωμα της γεννήτριας. Με τρεις αρθρώσεις heave, τρεις αρθρώσεις sway και έξι γεννήτριες στο πρωτότυπο μηχάνημα, αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς ελέγχου του Pelamis να δοκιμάσουν διάφορες στρατηγικές ελέγχου.**

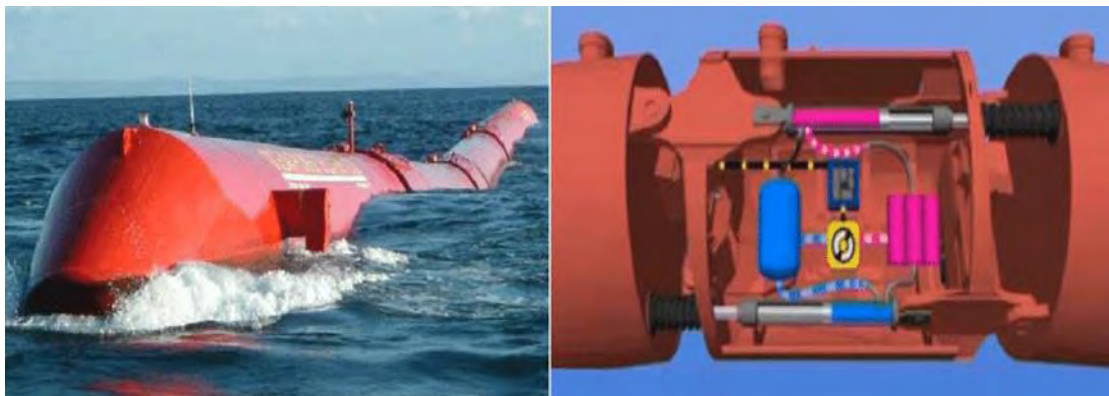


Εικόνα 3-25: Γενικοί ορισμοί 6 βαθμών ελευθερίας

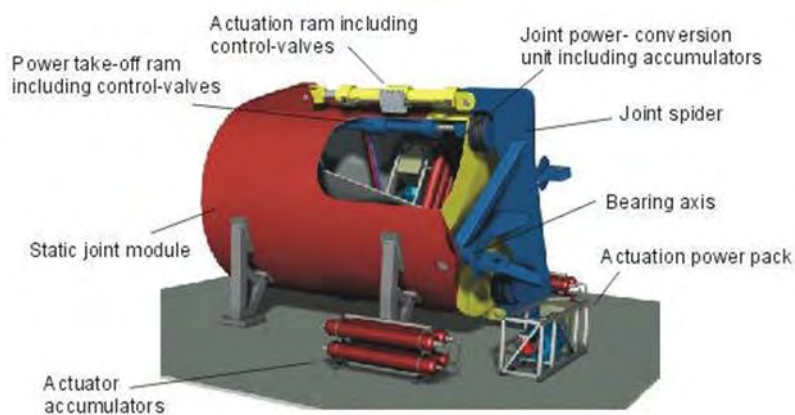
Πηγή: <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-inertial-measurement-unit-6df-applicationnote.pdf>

Υπάρχει μία τέτοια μονάδα μετατροπής ισχύος (PCM) τοποθετημένη ανάμεσα σε κάθε μακρύ σωληνοειδές τμήμα του μηχανήματος. Υπάρχουν τέσσερα σωληνοειδή τμήματα μεγάλου μήκους σε μια συσκευή Pelamis και τρεις μονάδες PCM. Το σύστημα απομάκρυνσης ισχύος χρησιμοποιεί υδραυλικά έμβολα για να αντισταθεί στις ροπές κάμψης (bending moments) που εφαρμόζονται στις

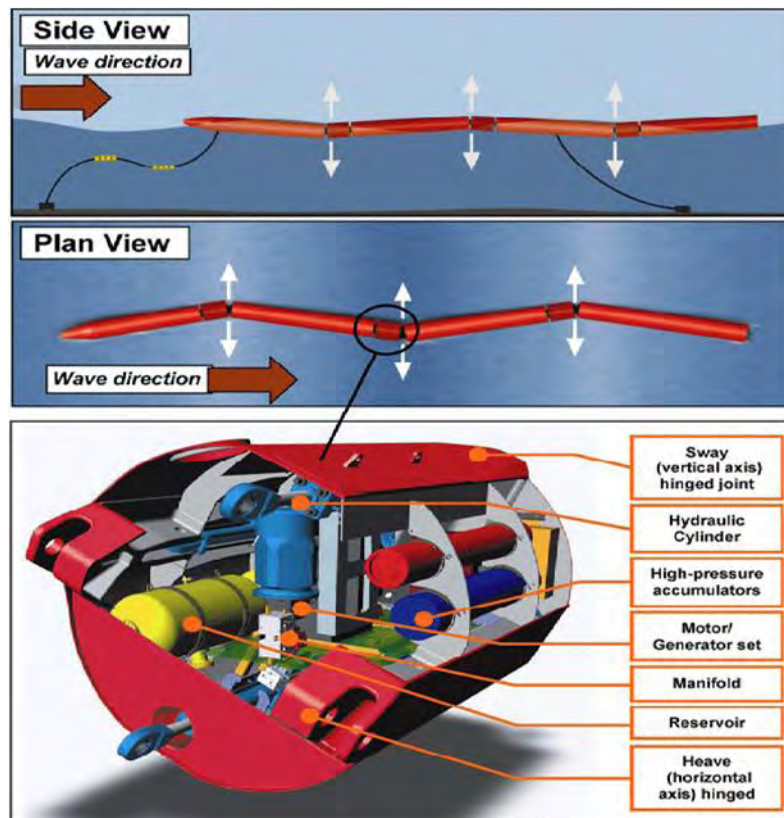
κυλινδρικές αρθρώσεις (hinged joints) σε κάθε άκρο της μονάδας PCM [1 × άρθρωση κάθετης κίνησης (heave joint) και 1 × άρθρωση εγκάρσιας κίνησης (sway joint)]. Οι ροπές κάμψης είναι αποτέλεσμα της κάμψης του μηχανήματος υπό μεταβλητές δυνάμεις άνωσης από την τοπική κατάσταση κύματος. Οι δυνάμεις κάμψης οδηγούν τα υδραυλικά έμβολα σε συμπίεση και αποσυμπίεση δημιουργώντας ροή υψηλής πίεσης υδραυλικού υγρού. Αυτό το ρευστό αποθηκεύεται σε συσσωρευτές πίεσης (pressure accumulators) όπου μπορεί να απελευθερωθεί υπό τον έλεγχο μιας βαλβίδας υψηλής πίεσης για να διέλθει μέσω ενός υδραυλικού κινητήρα μεταβλητής μετατόπισης (variable displacement hydraulic motor) που συνδέεται απευθείας με μια τριφασική ασύγχρονη γεννήτρια (three-phase asynchronous generator) με ονομαστική ισχύ 125 kW. Ο έλεγχος της ροής ρευστού υψηλής πίεσης από τον συσσωρευτή στη διάταξη γεννήτριας κινητήρα επιτρέπει την εξομάλυνση των παλμών από την απορροφούμενη ενέργεια κυμάτων εντός του συσσωρευτή έτσι ώστε η συνεχής ροή του ρευστού σε σταθερή πίεση να παρέχει μια ομαλή ηλεκτρική έξοδο (electrical output) από τη γεννήτρια.



Εικόνα 3-26: Pelamis σε λειτουργία (αριστερά) και υδραυλικός κινητήρας του (δεξιά)
Πηγή: Simulation of Single Phase and Two Phase Flow using OpenFOAM, Jignesh Thaker(2012)



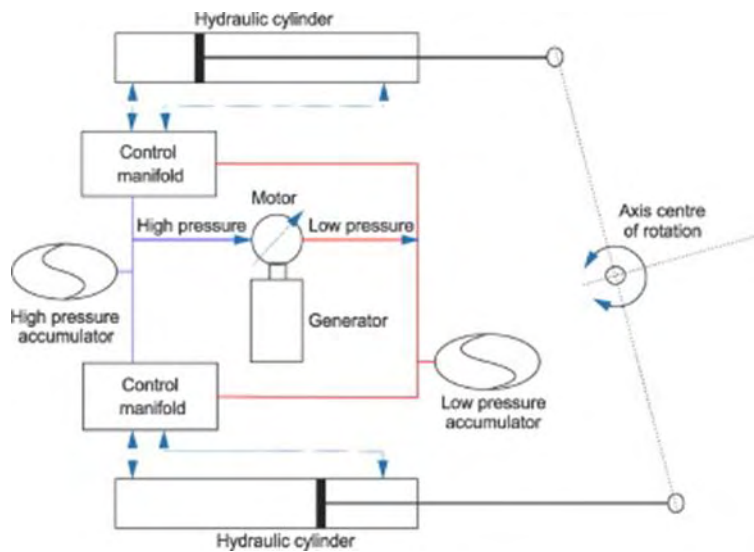
Εικόνα 3-27: Pelamis PTO
Πηγή: <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/>



Εικόνα 3-28: Σύστημα παραγωγής ενέργειας τύπου Pelamis

Πηγή: *Study on the Motion of Floater Structure for Design of Wave Energy Generation in Ocean*, Kui Ming Li, Nanjundan Parthasarathy, Young-Kyu Park, Ho-Yun Jung, (2011)

Μόλις το ρευστό περάσει από τον υδραυλικό κινητήρα, τροφοδοτείται πίσω στο υδραυλικό κύκλωμα χαμηλής πίεσης όπου αποθηκεύεται και ανακυκλώνεται πίσω στο κύκλωμα υψηλής πίεσης. Για περιβαλλοντικούς λόγους, στη συσκευή Pelamis χρησιμοποιείται μόνο βιοδιασπώμενο υδραυλικό υγρό, έτσι ώστε στην περίπτωση διαρροής υγρού στο θαλάσσιο περιβάλλον να διασπάται μέσα σε λίγες ημέρες.



Εικόνα 3-29: Απλοποιημένο σχήμα του Pelamis PTO
Πηγή: Henderson, 2006

Σε κάθε μονάδα PCM υπάρχουν δύο ξεχωριστά υδραυλικά κυκλώματα παρόμοια με αυτά που παρουσιάζονται παραπάνω. Αυτά τα κυκλώματα μπορούν να λειτουργούν σε συνδυασμό ή σε περίπτωση βλάβης εξαρτήματος, ή σε μια προσπάθεια να αυξηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος, τα κυκλώματα μπορούν να λειτουργούν μεμονωμένα μεταξύ τους. Κάθε κύκλωμα περιέχει ένα υδραυλικό έμβολο που αντιστέκεται στη heave ροπή κάμψης και ένα υδραυλικό έμβολο που αντιστέκεται στη sway ροπή κάμψεως - αυτό παρέχει έλεγχο και στους δύο άξονες σε περίπτωση βλάβης εξαρτήματος μέσα σε ένα από τα κυκλώματα. Η συσκευή Pelamis έχει επίσης την ικανότητα να "απορρίπτει" όλη την απορροφούμενη ισχύ ως απόκριση σε περιορισμούς δικτύου ή αποτυχία σύνδεσης καλωδίων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω εναλλακτών θερμότητας.

Καθώς κάθε ένα από τα υδραυλικά κυκλώματα έχει την ικανότητα να παράγει 125 kW, κάθε μονάδα PCM έχει ως εκ τούτου την ικανότητα να παράγει 250 kW. Τα τρία PCM μέσα σε μία μηχανή Pelamis δίνουν μια ονομαστική δυναμικότητα 750 kW. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από τις τρεις μονάδες PCM από το μήκος του μηχανήματος προς τη μύτη μέσω καλωδίων μέσης τάσης, όπου στη συνέχεια διέρχεται μέσω ενός μετασχηματιστή (step-up transformer) (11 kV στο πρωτότυπο σύστημα) πριν συνδεθεί με το υποβρύχιο καλώδιο μέσω μιας ευέλικτης γραμμής ηλεκτρικής διασύνδεσης.

Η συσκευή Pelamis επωφελείται από μια σειρά εγγενών χαρακτηριστικών και τεχνολογικών αρχών που της προσδίδουν μια μοναδική και βελτιστοποιημένη

ισορροπία μεταξύ των χαρακτηριστικών απορρόφησης ισχύος και ικανότητας επιβίωσης.

3.5.3 Υδροδυναμική της Συσκευής Pelamis

Κύριος οδηγός

Η ικανότητα ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας να απορροφά την ισχύ συνδέεται άμεσα με το εμβαδό διατομής ισάλου (water-plane area) [για συστήματα ενεργοποιούμενα με πίεση, όπως Oscillating Water Columns ή Archimedes Wave Swing, αυτό αντιστοιχεί στην περιοχή του πεδίου πίεσης (pressure-plane area)]. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή ισάλου, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις που θα προκληθούν και τόσο μεγαλύτερη είναι και η δυνατότητα δέσμευσης ενέργειας. Ωστόσο, μια μεγάλη διατομή ισάλου θα σήμαινε κανονικά έναν πολύ μεγάλο όγκο. Ο όγκος ισούται με το βάρος και το βάρος είναι ένας καλός δείκτης για το κόστος. Η Pelamis το αποφεύγει, δημιουργώντας έναν λόγο μεγάλης διατομής ισάλου προς τον όγκο, κατανέμοντας τον όγκο του σε μικρό βάθος.

Μηχανισμός αντίδρασης

Ένας από τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα δηλώνει ότι κάθε δύναμη ή δράση πρέπει να έχει μια «ίση και αντίθετη αντίδραση». Αυτή η θεμελιώδης αρχή πρέπει να τηρείται από όλα τα φυσικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των μετατροπέων κυματικής ενέργειας. Προκειμένου να απορροφηθεί η ισχύς, ο μηχανισμός αντίδρασης πρέπει να είναι σε θέση να απορροφά αποτελεσματικά έργο ως συνέπεια των φορτίων που προκαλούνται από μεγάλα κύματα. Η παροχή μιας αποτελεσματικής αντίδρασης είναι επομένως μια βασική πρόκληση σχεδιασμού για τις WEC. Οι υπεράκτιες κατασκευές και οι μετατροπείς ενέργειας κυμάτων έχουν συμπεριλάβει διάφορες πηγές αντίδρασης: άκαμπτη σύζευξη με τον βυθό (rigid coupling to the sea bed), εσωτερική μάζα αντίδρασης (Internal reaction mass), εξωτερική πλάκα ή σώμα αντίδρασης (external reaction plate or body). Η συσκευή Pelamis εισάγει την έννοια της «αυτοαναφοράς» με την οποία οι δυνάμεις άνωσης που ασκούνται από τα κύματα αντιτίθενται σε δυνάμεις άνωσης σε άλλες θέσεις της μηχανής. Το μήκος του μηχανήματος επιλέγεται έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμο με το μέγιστο μήκος κύματος ενδιαφέροντος, έτσι ώστε το σύστημα να δρα ως γέφυρα μεταξύ διαδοχικών κορυφών κύματος που περνούν. Η σχετική κίνηση του σώματος του μηχανήματος στις επιφάνειες νερού προκαλεί ισχυρές ροπές κάμψης κατά μήκος της συσκευής διατηρώντας παράλληλα μια συνολική κατακόρυφη ισορροπία με το κύμα. Είναι αυτές οι ροπές κάμψης (bending moments) που οδηγούν τις αρθρώσεις να απορροφήσουν την ισχύ. Όλες οι

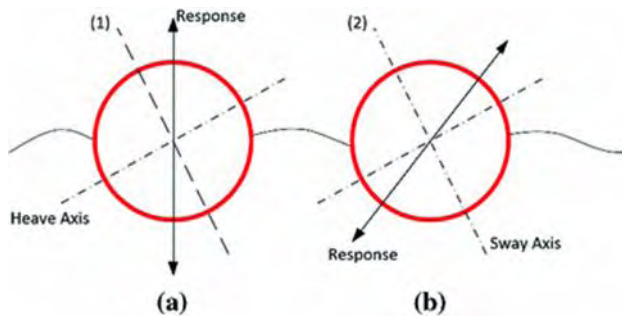
δυνάμεις είναι εσωτερικές της μηχανής, δεν απαιτείται εξωτερική πηγή αντίδρασης και όλα τα μέρη του συστήματος απορροφούν άμεσα ενέργεια από το κύμα και παρέχουν πηγή αντίδρασης για το υπόλοιπο της μηχανής. Αυτός ο άμεσος σύνδεσμος μεταξύ της απορρόφησης ισχύος και της πηγής αντίδρασης καθιστά την λειτουργία του Pelamis μοναδική.

Ρύθμιση(tuning-up)

Η απορρόφηση ισχύος από ένα αρμονικό κύμα μεγιστοποιείται όταν ρυθμίζουμε τη φυσική συχνότητα της συσκευής στη συχνότητα της εισερχόμενης δύναμης από το κύμα. Η ιδανική αντιστοιχία μεταξύ αυτής της δύναμης και της απόκρισης του συστήματος στην φυσική του συχνότητα είναι γνωστή ως «συντονισμός». Η φυσική υπαγορεύει ότι η φυσική συχνότητα (natural frequency) με την οποία ένα μηχανικό σύστημα θα ταλαντεύεται όταν διεγείρεται είναι μια απλή συνάρτηση της δυσκαμψίας και της μάζας του. Όσο πιο άκαμπτο και ελαφρύτερο είναι το σύστημα, τόσο υψηλότερη είναι η φυσική του συχνότητα και αντίστροφα. Για να είναι ένας απορροφητής αποτελεσματικός, θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά η μάζα και η δυσκαμψία της WEC για να παρέχει μια φυσική περίοδο που ταιριάζει με εκείνη των εισερχόμενων κυμάτων.

Ο Pelamis επιτυγχάνει έναν συντονισμό με έναν δημιουργικό τρόπο: η διατομή του μηχανήματος επιλέγεται για να δώσει μια φυσική περίοδο πολύ μικρότερη από τα κύματα ενδιαφέροντος - συνήθως, η δομή του Pelamis θα αναπηδούσε πάνω και κάτω μια φορά κάθε 2 ή 3 δευτερόλεπτα, που είναι τρεις ή τέσσερις φορές γρηγορότερα από τα πιο συχνά συναντώμενα κύματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα είναι υδροστατικά υπερβολικά άκαμπτο για το βάρος του.

Για να επιτύχουμε συντονισμό, πρέπει να βρούμε έναν τρόπο είτε να αυξήσουμε τη μάζα είτε να μειώσουμε τη δυσκαμψία. Η πρώτη περίπτωση δεν είναι δυνατή χωρίς να επιβαρυνθεί με μεγάλο κόστος. Ωστόσο, η γεωμετρία των αρθρώσεων Pelamis έχει σχεδιαστεί για να μειώσει δραματικά τη δυσκαμψία του συστήματος, όταν είναι επιθυμητό, μέσω του ακόλουθου μηχανισμού. Κάθε μονάδα μετατροπής ισχύος (PCM) του Pelamis επιτρέπει κίνηση γύρω από δύο ανεξάρτητους άξονες. Αυτοί οι άξονες διατάσσονται μεταξύ τους κατά 90 °. Ωστόσο, οι άξονες δεν είναι οριζόντια και κατακόρυφα τοποθετημένοι, αλλά βρίσκονται σε κλίση 25-30 ° για να δώσουν ένα ορθογώνιο ζεύγος κεκλιμένων αξόνων κίνησης. Ο άξονας που επιτρέπει την κίνηση σε μια πιο κάθετη κατεύθυνση είναι γνωστός ως άξονας ορθής κίνησης (heave axis), ο άξονας που επιτρέπει την κίνηση σε μια πιο πλευρική κατεύθυνση είναι γνωστός ως άξονας εγκάρσιας κίνησης (sway axis). Μαζί αυτοί οι άξονες επιτρέπουν κίνηση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. [J.Cruz (2008)]



Εικόνα 3-30: Σχέδιο της απόκρισης του Pelamis υπό συνθήκες μη-συντονισμού (1) και συντονισμού (2)
Πηγή: *Ocean Wave Energy*, J.Cruz(2008)

3.6 Συσσκευή Wave Dragon



Εικόνα 3-31: Συσσκευή Wave Dragon
Πηγή: <http://www.wavedragon.net/>

Ο εφευρέτης, Erik Friis-Madsen, ξεκίνησε την ανάπτυξη του Wave Dragon το 1986. Στα πρώτα χρόνια ανέπτυξε την αρχή του Wave Dragon και το 1994 υποβλήθηκε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Κατά την περίοδο 1995-1999 πραγματοποιήθηκαν διάφορες μελέτες δομικής διάταξης, υπερπήδηση (overtopping) σταθερού μοντέλου, αποδοτικότητα ανακλαστήρα, οικονομικές πτυχές, γεωμετρία, βέλτιστη επιλογή του σχήματος τουρμπίνας και κινήσεις του Wave Dragon. Μετά από αυτές τις επιτυχημένες δοκιμές, το επόμενο στάδιο για το Wave Dragon ήταν η κατασκευή, η εγκατάσταση και η λειτουργία ενός πρωτότυπου σχεδίου. Η χρηματοδότηση από τη Δανική Ενεργειακή Αρχή (Danish Energy

Authority) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή οδήγησε στην ανάπτυξη αυτού του πρωτοτύπου τον Απρίλιο του 2003 στο The Nissum Bredning (Broads), μια εσωτερική θάλασσα που συνδέεται με τη Δανική Βόρεια Θάλασσα. Ο τρέχων στόχος στην τεχνολογία Wave Dragon είναι να κατασκευασθεί και να αναπτυχθεί μια μονάδα αρκετών MW. Ένα πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ξεκίνησε τον Μάιο του 2006 για την υλοποίηση του σχεδιασμού αυτού σε εμπορική κλίμακα.

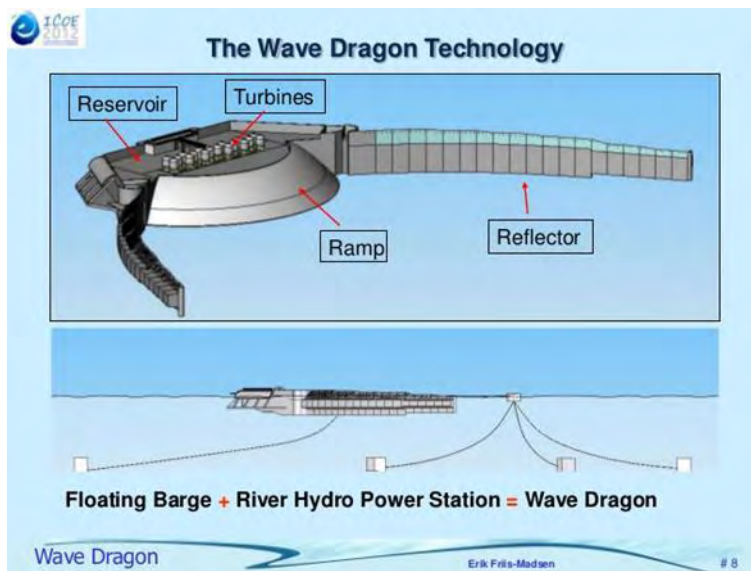
Το Wave Dragon είναι μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες στον τομέα της κυματικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες άλλες συσκευές δεν ταλαντεύεται με τα κύματα, αλλά συγκεντρώνει παθητικά την ενέργεια των κυμάτων με την εφαρμογή της αρχής της υπερπήδησης (overtopping principle). Η μπροστινή όψη της συσκευής είναι μια καμπύλη ράμπα, στην οποία τα εισερχόμενα κύματα κατευθύνονται ορμητικά, σαν να ήταν παραλία. Πίσω από την κορυφογραμμή αυτής της ράμπας βρίσκεται μια δεξαμενή που συγκεντρώνει το νερό "υπερπηδώντας" την ράμπα που τώρα έχει υψηλότερη δυναμική ενέργεια από το περιβάλλον νερό. Η απόδοση του Wave Dragon ενισχύεται από τα μακριά φτερά ανακλαστήρα, τα οποία είναι τοποθετημένα στη δεξαμενή και διοχετεύουν τα κύματα προς τη ράμπα. Η ενέργεια παραλαμβάνεται καθώς το νερό αποχετεύεται πίσω στη θάλασσα μέσω υδροηλεκτρικών στροβίλων χαμηλού μανομετρικού ύψους (low head hydro turbines), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μέσα στη δεξαμενή.



Εικόνα 3-32: Wave Dragon πρωτότυπο κλίμακας 1:4.5 συνδεδεμένο με το δίκτυο, δοκιμή στο Nissum Bredning, Denmark

Πηγή: Handbook of Ocean Wave Energy, Jens Peter Kofoed(2017)

Το Wave Dragon έχει σχεδιαστεί ως μια πλωτή συσκευή ανοικτής θάλασσας (offshore) που τοποθετείται σε βάθη νερού άνω των 20 μ. Σε αυτές τις περιοχές βρίσκεται η μεγαλύτερη ενέργεια κύματος, και επίσης είναι πιο εύκολο να αποκτηθεί άδεια για αξιοποίηση. Σε πρωτότυπο μοντέλο στη Βόρεια Δανία έχουν διεξαχθεί περισσότερα από τρία χρόνια θαλάσσιων δοκιμών.

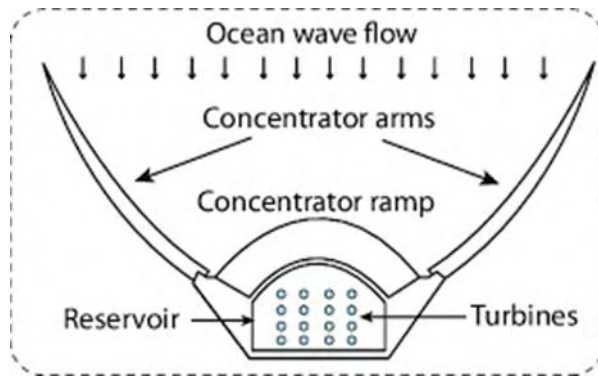


Εικόνα 3-33: Τεχνολογία Wave Dragon

Πηγή: <https://www.slideshare.net/ErikFriisMadsen/icoe-2012-wave-dragon-b>

Ο Wave Dragon αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

- Δύο ανακλαστήρες κύματος που συνδέονται με την κύρια δομή και συγκεντρώνουν τα κύματα προς τη ράμπα,. Αυτοί οι ανακλαστήρες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους του κύματος και κατά συνέπεια την αύξηση της ενέργειας που δεσμεύεται.
- Η κύρια δομή αποτελείται από μια διπλή καμπύλη ράμπα και μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού φτιαγμένη από τσιμέντο.
- Ένα σύνολο υδρογεννητριών χαμηλού μανομετρικού ύψους για τη μετατροπή του υδραυλικού φορτίου στη δεξαμενή σε ηλεκτρική ενέργεια.

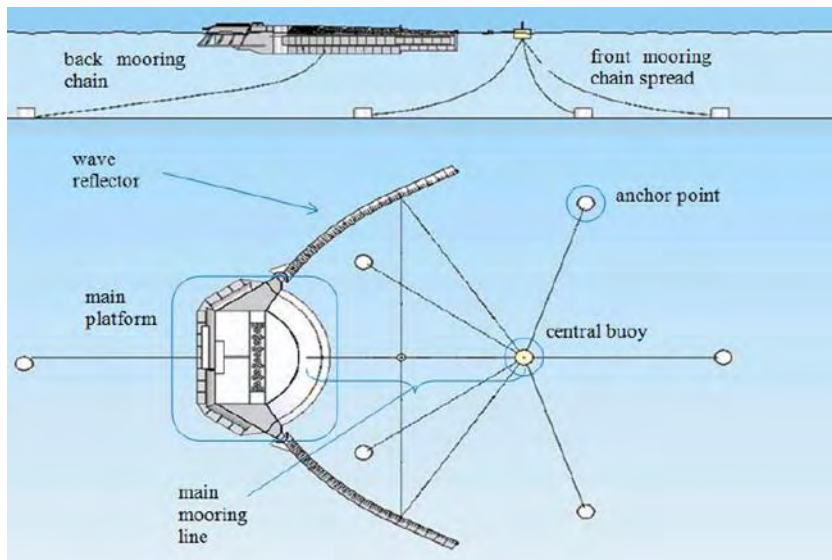


Εικόνα 3-34: Σχηματική απεικόνιση Wave Dragon

Πηγή: *Medium-voltage power converter interface for Wave Dragon wave energy conversion system*, Nicolás Müller-Pollmann, Samir Kouro, Jaime Glaria, Mariusz Malinowski, 2013

Η πρόκληση είναι να βάλουμε μαζί αυτά τα υποσυστήματα για να δουλέψουμε σε αυτή τη νέα μέθοδο και να επιβιώσουν στο ακραίο περιβάλλον που υπάρχει στις υπεράκτιες συνθήκες θαλάσσης.

Ο Wave Dragon είναι μακράν ο μεγαλύτερος μετατροπέας κυμάτων ενέργειας σήμερα. Κάθε μονάδα θα έχει ονομαστική ισχύ 4-11 MW ή περισσότερο, ανάλογα με το πόσο ενεργητικό είναι το κλίμα κύματος στον τόπο εγκατάστασης. Θα είναι μια συσκευή με εκτόπισμα περίπου 30.000 τόνων. Αυτό το μέγεθος φέρνει πολλά πλεονεκτήματα. Η συσκευή θα ανταποκρίνεται ελάχιστα στα κύματα, μειώνοντας τα προβλήματα κόπωσης της συσκευής. Επίσης, καθώς είναι μεγάλη και σταθερή, θα είναι δυνατό να εργάζεται κανείς στη συσκευή, πράγμα που θα μειώσει δραματικά το κόστος συντήρησης και το χρόνο διακοπής λειτουργίας. Η εμπρόσθια πρόσδεση της διάταξης θα είναι μία σημαδούρα αγκυροβόλησης Catenary Anchored Leg Mooring (CALM), με μία μόνο οπίσθια πρόσδεση για να συγκρατήσει τη συσκευή σε μια δεδομένη περιστροφή γύρω από την εμπρόσθια πρόσδεση. Η επιλογή της άγκυρας εξαρτάται από τη θάλασσα.



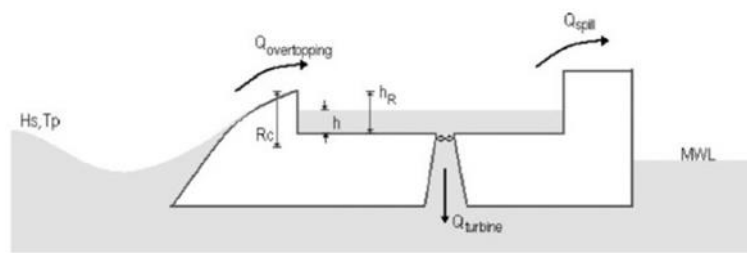
Εικόνα 3-35: Σύστημα πρόσδεσης του Wave Dragon

Πηγή: *Experimental Study Related to the Mooring Design for the 1.5 MW Wave Dragon WEC Demonstrator at DanWEC, Stefano Parmeggiani, Jens Peter Kofoed et al., (2013)*

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή στην θεωρία υπερπήδησης. Εξετάζεται λεπτομερώς το σκεπτικό πίσω από το σχεδιασμό για τα φτερά που αντανακλούν τα κύματα, τους υδραυλικούς στροβίλους χαμηλής κεφαλής και τις στρατηγικές ελέγχου του Wave Dragon.

3.6.1 Θεωρία Υπερπήδησης (Overtopping Theory)

Η θεωρία για τη μοντελοποίηση συσκευών υπερπήδησης ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό από την παραδοσιακή γραμμική προσέγγιση συστημάτων που χρησιμοποιείται για τις περισσότερες WECs. Μια προσέγγιση γραμμικών συστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις συσκευές υπερπήδησης. Κατά την προσέγγιση αυτή θεωρείται το νερό, που ταλαντεύεται πάνω και κάτω από τη ράμπα, ως το διεγερμένο σώμα (the excited body) και η κορυφή της ράμπας ως ένα μη γραμμικό σύστημα λήψης ισχύος. Ωστόσο, λόγω της μη-γραμμικότητας, είναι πολύ απαιτητικό υπολογιστικά να μοντελοποιηθεί το σύστημα. Επομένως, λαμβάνεται μια πιο φυσική προσέγγιση. Διαμορφώνεται έτσι η χρονοσειρά της ροής υπερπήδησης, βασιζόμενη σε εμπειρικά δεδομένα.



Εικόνα 3-36: Σχήμα ροών στο Wave Dragon
 Πηγή: Ocean Wave Energy, J.Cruz(2008)

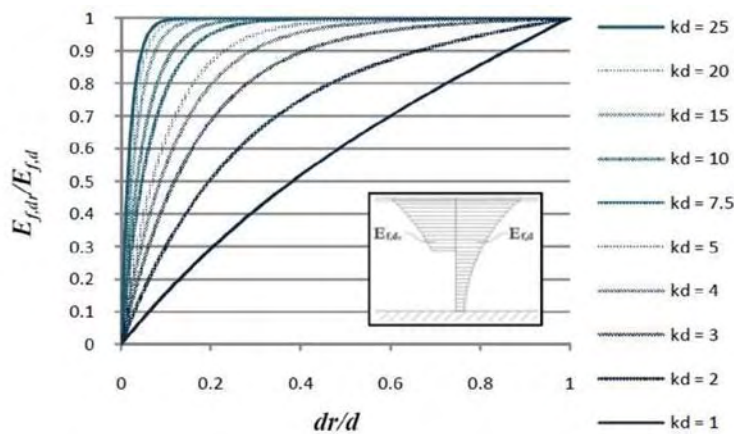
Ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση κύματος (H_s , T_p) και το ύψος εξόρμησης της συσκευής (crest freeboard) R_c (ύψος της κορυφής της ράμπας πάνω από τη μέση στάθμη νερού), το νερό θα υπερπηδήσει μέσα στη δεξαμενή ($Q_{\text{overtopping}}$). Η ισχύς που συγκεντρώνεται από τη δεξαμενή είναι το γινόμενο αυτής της ροής υπερπήδησης, του ύψους εξόρμησης και της βαρύτητας. Εάν η δεξαμενή γεμίσει όταν ένας μεγάλος όγκος νερού έχει μπει στη λεκάνη θα υπάρξει απώλεια από αυτήν (Q_{spill}). Για να ελαχιστοποιηθεί το Q_{spill} , η στάθμη της δεξαμενής h πρέπει να διατηρείται κάτω από τη μέγιστη στάθμη (h_R). Η χρήσιμη υδραυλική ισχύς που μετατρέπεται από τους στροβίλους είναι το γινόμενο της ροής στον στρόβιλο (Q_{turbine}), του μανομετρικού ύψους, της πυκνότητας του νερού και της βαρύτητας.

Στο πεδίο της παράκτιας μηχανικής υπάρχει ένα σημαντικό έργο που εξετάζει τους ρυθμούς υπερπήδησης των κυματοθραυστών, των θαλάσσιων τοίχων και των αναχωμάτων. Οι μελέτες των Van der Meer και Janssen (1994) παρείχαν τη βάση της θεωρίας σχετικά με τον μέσο αναμενόμενο ρυθμό υπερπήδησης. Οι Gerloni et al. (1995) διερεύνησαν τη χρονική κατανομή της ροής. Ωστόσο, αυτή η εργασία επικεντρώθηκε σε δομές που αποσκοπούσαν στην ελαχιστοποίηση του ρυθμού υπερπήδησης, σε αντίθεση με τους στόχους του Wave Dragon. Ο Kofoed (2002) διεξήγαγε εργαστηριακές δοκιμές σε πολλές μεταβολές των γωνιών ράμπας, των προφίλ, των επιπέδων ύψους εξόρμησης σε μια ποικιλία θαλάσσιων καταστάσεων, όλα με υψηλούς ρυθμούς υπερπήδησης. Αυτές οι μελέτες έδειξαν ότι η ράμπα διπλής καμπύλης (double curved ramp) του Wave Dragon είναι εξαιρετικά αποδοτική στη μετατροπή της ισχύς των κυμάτων.

Κατά τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμών διαφορετικής κλίμακας μοντέλων είναι πολύ χρήσιμο να χρησιμοποιούμε αδιάστατους αριθμούς για να περιγράψουμε τις μεταβλητές. Τα αποτελέσματα από την κλίμακα μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε μέγεθος συσκευής. **Στην παράκτια τεχνική η μέση ροή \bar{Q} μετατρέπεται σε αδιάστατη μορφή διαιρώντας με το πλάτος της συσκευής b , τη βαρύτητα g και το σημαντικό ύψος κύματος H_s :**

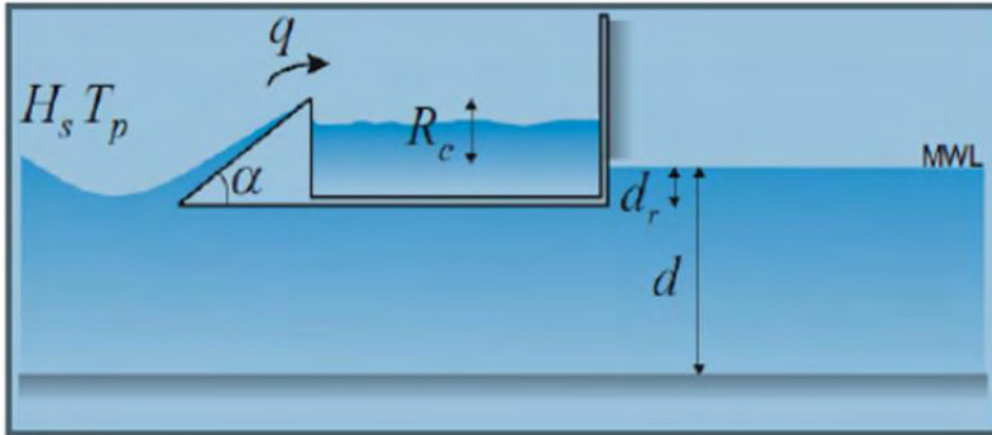
$$Q_{ND} = \frac{\bar{Q}}{b\sqrt{gH_s^3}} \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση του πλωτού Wave Dragon έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει εξάρτηση από την περίοδο των κυμάτων (wave period). Η κυρίαρχη φυσική εξήγηση γι 'αυτό είναι η επίδραση της ενέργειας που διέρχεται κάτω από το βύθισμα (draft) της δομής.



Εικόνα 3-37: Κατακόρυφη κατανομή ενέργειας σε στήλη νερού
 Πηγή: Kofoed, 2002

Το παραπάνω σχήμα δείχνει μια τυπική κατανομή της ενέργειας των κυμάτων στη στήλη νερού (water column), με την αριστερή πλευρά να δείχνει το τμήμα που επηρεάζεται από τη ράμπα του Wave Dragon και επομένως είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση.



Εικόνα 3-38: Βύθισμα και χαρακτηριστικά μεγέθη της συσκευής
 Πηγή: A. Juza et al. (2015)

Σύμφωνα με τον Kofoed (2002), τα κύματα μικρότερης περιόδου έχουν την ενέργεια τους συγκεντρωμένη στο πάνω μέρος της στήλης νερού, έτσι ο Wave Dragon θα απορροφήσει αναλογικά περισσότερη ενέργεια από αυτά. Για τον Wave Dragon χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη αδιάστατη μορφή για να συμπεριλάβει την επίδραση της περιόδου:

$$Q_N = \frac{1}{\lambda_{dr}} \frac{\bar{Q}}{b \sqrt{g H_s^3}} \quad (3.5)$$

Χρησιμοποιείται ο διορθωτικός συντελεστής λ_{dr} για περιορισμένο βύθισμα, δηλαδή ο λόγος ενέργειας μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και βυθίσματος συσκευής ($E_{f, dr}$) προς την ενέργεια προσπίπτοντος κύματος ($E_{f, d}$). Αυτό βασίζεται στην θεωρία των γραμμικών κυμάτων και ορίζεται ως εξής:

$$\lambda_{dr} = 1 - \frac{\sinh(2k_p d(1 - \frac{dr}{d})) + 2k_p d(1 - \frac{dr}{d})}{\sinh(2k_p d) + 2k_p d} \quad (3.6)$$

όπου k_p είναι ο κυματάριθμος (wave number) στη μέγιστη περίοδο, d είναι το βάθος του νερού και dr είναι το βύθισμα (draft) της συσκευής.

Για να αναλυθεί η απόδοση της ροής υπερπήδησης, ο αδιάστατος ρυθμός υπερπήδησης συγκρίνεται με το **σχετικό ύψος εξόρμησης R (relative crest freeboard)**, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Αυτό επιτρέπει στα αποτελέσματα των δοκιμών κλίμακας (scale test results) να αναχθούν σε κλίμακα συσκευής πλήρους μεγέθους:

$$R = \frac{R_c}{H_s} \quad (3.7)$$

Η χρονική μεταβολή της ροής υπερπήδησης είναι επίσης πολύ σημαντική για τη μοντελοποίηση της ισχύος που παράγεται από το Wave Dragon. Για να γίνει το μοντέλο, υποθέτονται τυχαία και ανεξάρτητα φαινόμενα υπερπήδησης, με την κατανομή Weibull.

Με αυτή την καλή κατανόηση των ροών υπερπήδησης, σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για τη βελτιστοποίηση και μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του Wave Dragon. Αυτό το πρόγραμμα παρέχει ως είσοδο (input) ένα τυχαία παραγόμενο ιστορικό χρόνου των κυμάτων που υπερπηδούν τη ράμπα σύμφωνα με ένα μέσο ρυθμό και μια καθορισμένη κατανομή. Αυτό επιτρέπει την τροποποίηση πολλών χαρακτηριστικών (όπως: βάθος και εμβαδόν δεξαμενής, ύψος εξόρμησης (crest freeboard height), αριθμός και τύπος στροβίλων και στρατηγική λειτουργίας του στροβίλου) προκειμένου να επιλεγεί η σύνθεση που θα παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για κάθε θαλάσσια κατάσταση που υπάρχει σε μια τοποθεσία.

3.6.2 Φτερά-Ανακλαστήρες Κυμάτων (Wave Reflector Wings)

Μια από τις πιο χαρακτηριστικές πτυχές του Wave Dragon είναι τα μακριά φτερά που τοποθετούνται στις μπροστινές γωνίες της πλατφόρμας δεξαμενής. Αυτά έχουν σχεδιαστεί για να αντανakλούν τα επερχόμενα κύματα προς την ράμπα. Ο όγκος υπερπήδησης ενός κύματος εξαρτάται πολύ από το ύψος κύματος, επομένως παρέχοντας μόνο μέτρια αύξηση του ύψους, μπορεί να υπερπηδήσει από τη ράμπα πολύ περισσότερη ενέργεια.

Για να επιλεγθούν τα σωστά μήκη, γωνίες και θέση αυτών των πτερυγίων, οι Kramer και Frigaard (2002) έκαναν εκτενή υπολογιστική μοντελοποίηση πολλών συνδυασμών αυτών. Στην υπολογιστική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μια τρισδιάστατη μέθοδος συντοριακών στοιχείων (**3D boundary element method**). **Η διακριτοποίηση περιορίζεται στην συντοριακή επιφάνεια της δομής (structure's boundary surface), με αποτέλεσμα να παρέχει μια γρήγορη, αποτελεσματική και ακριβής λύση στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain) για προβλήματα αλληλεπίδρασης γραμμικών κυμάτων (linear wave structure interaction problems).** Η μέθοδος μοντελοποίησε τα φτερά. Η ροή ενέργειας μέσω του κεντρικού κενού (όπου θα ήταν η ράμπα και η δεξαμενή) έδωσε έναν συντελεστή απόδοσης για κάθε εγκατάσταση.

Μία επιλογή μικρότερων θαλάσσιων καταστάσεων και προσομοιώσεων δοκιμάστηκε με παρόμοιο τρόπο σε μια λεκάνη κυμάτων. Εδώ και πάλι τα πτερύγια σταθεροποιήθηκαν, η πλατφόρμα αφαιρέθηκε και οι ανιχνευτές κύματος μέτρησαν

τα κύματα που περνούσαν από το κεντρικό διάκενο. Βρέθηκε μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεθόδων.

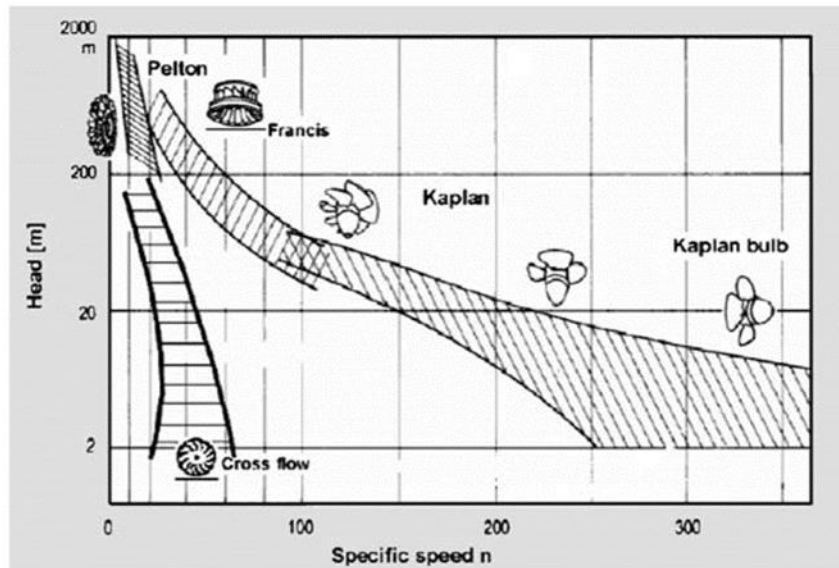
Οι ανακλαστές που επιπλέουν και έχουν πεπερασμένο βύθισμα θα αντανακλούν τα κύματα υψηλότερης συχνότητας καλύτερα από εκείνα χαμηλότερης συχνότητας. Συνήθως αυτά τα κύματα είναι και τα μικρότερα κύματα. Επομένως, η αύξηση της εισόδου τους είναι πολύ συμφέρουσα, βελτιώνοντας το εύρος ζώνης συχνοτήτων (bandwidth) της συσκευής.

Η χρήση των φτερών ανακλαστήρα κύματος επίσης προσφέρει καλύτερες επιδόσεις για την αντιμετώπιση των καιρικών συνθηκών, μικρότερες μέγιστες δυνάμεις πρόσδεσης (lower peak mooring forces) και καλύτερη οριζόντια σταθερότητα της κύριας πλατφόρμας.

3.6.3 Στρόβιλοι Χαμηλού Μανομετρικού Ύψους

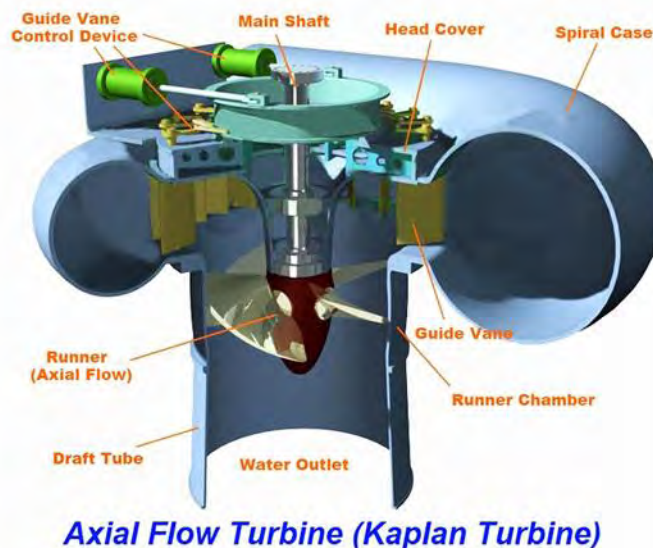
Σύμφωνα με τον Cruz (2008), οι υδρογεννήτριες που είναι κατάλληλες για τον σκοπό μας, έχουν χρησιμοποιηθεί σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής χαμηλής τάσης ποταμού για πολλές δεκαετίες και έχουν αναπτυχθεί σε υψηλό επίπεδο απόδοσης και αξιοπιστίας. Στη Γαλλία, ο παλιρροϊκός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής 240 MW La Rance χρησιμοποίησε τους εν λόγω στρόβιλους σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον από το 1967. Έτσι, σε αντίθεση με τις περισσότερες από τις άλλες αρχές των WEC, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αποδεδειγμένη και ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πρέπει να ακολουθηθούν ειδικά κριτήρια για την επιλογή και κατασκευή των υδραυλικών στρόβιλων για το Wave Dragon. Είναι σκόπιμο να επιδιώκεται η κατασκευαστική απλότητα παρά η μέγιστη απόδοση. Οι συνθήκες λειτουργίας των στρόβιλων σε WEC είναι αρκετά διαφορετικές από αυτές σε μια κανονική μονάδα υδροηλεκτρικής ενέργειας. Στο Wave Dragon, η περιοχή μανομετρικού ύψους των στρόβιλων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1,0 και 4,0 μέτρων, η οποία βρίσκεται στα χαμηλότερα όρια της υπάρχουσας εμπειρίας στον υδροστρόβιλο.



Εικόνα 3-39: Πίνακας εύρους μανομετρικού ύψους των κοινών τύπων στροβίλων
Πηγή: Voith and Ossberger characteristics, Knapp et al., (2000)

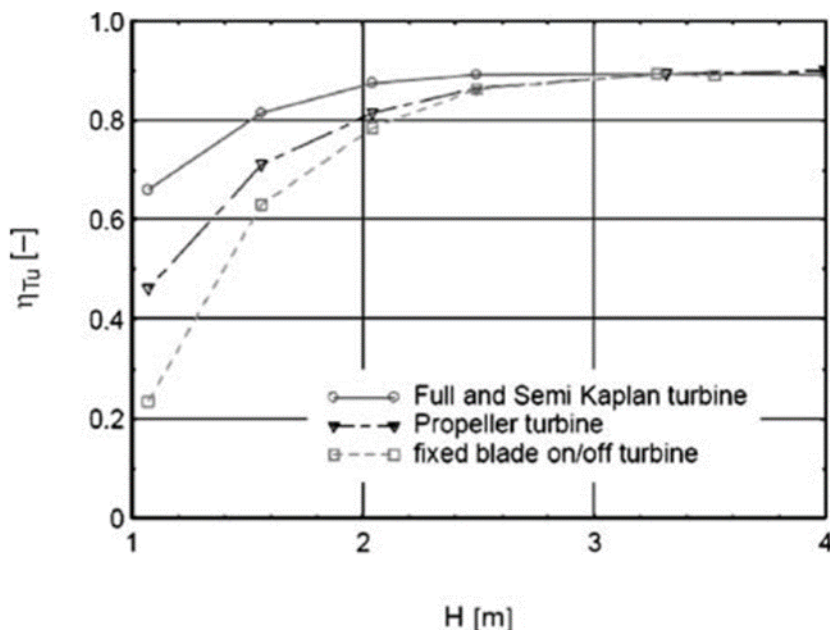
Η εικόνα 3.39 δείχνει τις περιοχές εφαρμογής των γνωστών τύπων στροβίλων σε ένα γράφημα του μανομετρικού ύψους H σε σχέση με την ειδική ταχύτητα n_q . Η ειδική ταχύτητα (specific speed) n_q είναι μια παράμετρος στροβίλου που συσχετίζει την συχνότητα περιστροφής, την ογκομετρική παροχή και το μανομετρικό ύψος.



Εικόνα 3-40: Kaplan turbine
Πηγή: <http://www.eternohydro.com/turbines/axial-flow-turbines.html>

Ο τύπος **Kaplan** είναι ο μοναδικός στρόβιλος κατάλληλος για τα διαθέσιμα μανομετρικά ύψη. Το σχήμα των πτερυγίων οδηγών του στρόβιλου και των πτερυγίων δρομέων έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια βέλτιστη μετατροπή ενέργειας στο σημείο σχεδιασμού του, το οποίο ορίζεται από τις βέλτιστες τιμές του μανομετρικού ύψους και της ροής (H_{opt} και Q_{opt}) με δεδομένη ταχύτητα. Για κάθε άλλο σημείο λειτουργίας, θα υπάρξει ασυμφωνία μεταξύ των γωνιών ροής και των γωνιών της λεπίδας, μειώνοντας την απόδοση του στρόβιλου. Κάθε φορά που ένας στρόβιλος απαιτείται να λειτουργεί σε σχετικά ευρεία περιοχή κεφαλής και περιοχή ροής, είναι σημαντικό η καμπύλη αποδοτικότητας να είναι επίπεδη και ευρέως απλωμένη. Αυτό το κριτήριο επιτυγχάνεται καλύτερα με τον διπλό τύπο Kaplan (double regulated Kaplan type).

Σε αυτόν τον τύπο του στρόβιλου, τόσο τα πτερύγια οδήγησης (guide vanes) όσο και τα πτερύγια δρομέων (runner blades) είναι ρυθμιζόμενα, κάνοντας έτσι τον στρόβιλο πολύ προσαρμόσιμο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Αποτελεί σύνθετη κατασκευή και για αυτό υπάρχει άμεση αντανάκλαση στο κόστος κατασκευής, καθώς και στο κόστος συντήρησης, ειδικά όταν ο στρόβιλος λειτουργεί σε επιθετικό περιβάλλον, δηλαδή αλμυρό νερό με πιθανά περιεχόμενα λάσπης. Για τους λόγους αυτούς έχουν σχεδιαστεί απλές ρυθμιζόμενες παραλλαγές του στρόβιλου Kaplan, δηλαδή ο τύπος Propeller με σταθερά πτερύγια δρομείς, ο τύπος Semi-Kaplan με σταθερά πτερύγια οδηγούς και ο μη ρυθμιζόμενος στρόβιλος με σταθερά πτερύγια δρομείς και σταθερά πτερύγια οδήγησης. Αυτοί οι στρόβιλοι είναι απλούστεροι στην κατασκευή, αλλά έχουν στενότερη καμπύλη απόδοσης.

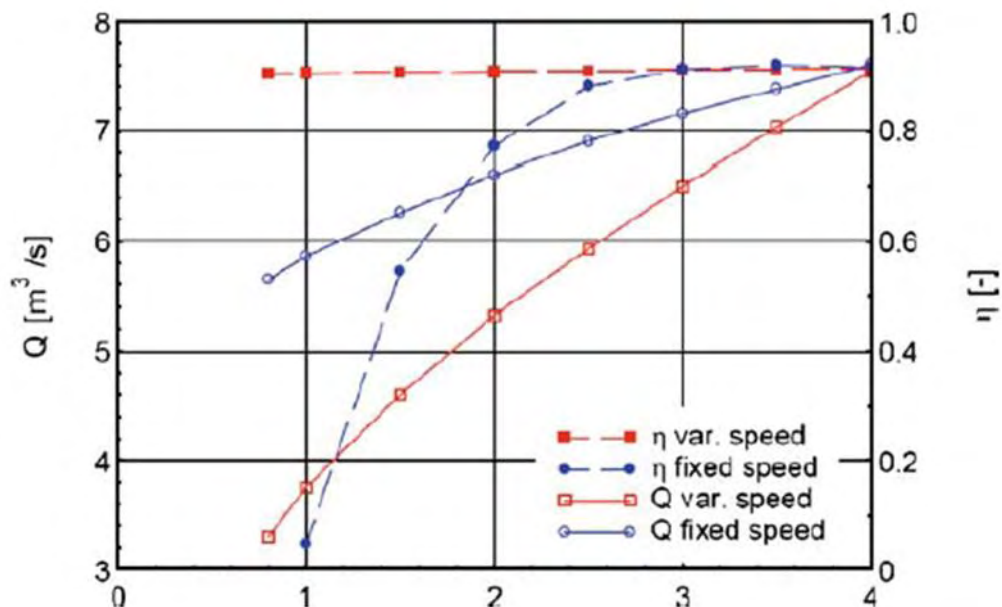


Εικόνα 3-41: Απόδοση σε σχέση με το μανομετρικό ύψος για παραλλαγές της τουρμπίνας Kaplan
 Πηγή: Ocean Wave Energy, J. Cruz(2008)

Για μια σχεδιασμένη εγκατάσταση μεγάλου μεγέθους θα πρέπει να θεωρείται ότι χρησιμοποιείται ένας αριθμός μικρότερων στροβίλων αντί για έναν μεγαλύτερο στρόβιλο. Ανάλογα με τη τοποθεσία ενός Wave Dragon, προβλέπεται ότι θα τοποθετηθούν μεταξύ 16 και 24 στροβίλων.

Έχουμε έτσι τα εξής πλεονεκτήματα:

- Με τη διακοπή ενός αριθμού στροβίλων σε χαμηλότερες ταχύτητες ροής, ο ρυθμός ροής μπορεί να ρυθμίζεται χωρίς να χάνεται η απόδοση
- Οι μονάδες μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας για συντήρηση χωρίς διακοπή της παραγωγής.
- Η απαιτούμενη χωρητικότητα για εξοπλισμό ανύψωσης και μεταφοράς για την εκτέλεση εργασιών επισκευής και συντήρησης μειώνεται σημαντικά.
- Οι μικρότεροι στρόβιλοι έχουν βραχύτερους σωλήνες βυθίσματος (draft tubes) και έτσι είναι ευκολότερο να εγκατασταθούν σε ολόκληρη τη συσκευή.
- Οι μικρότεροι στρόβιλοι έχουν υψηλότερη ταχύτητα, γεγονός που μειώνει το κόστος της γεννήτριας



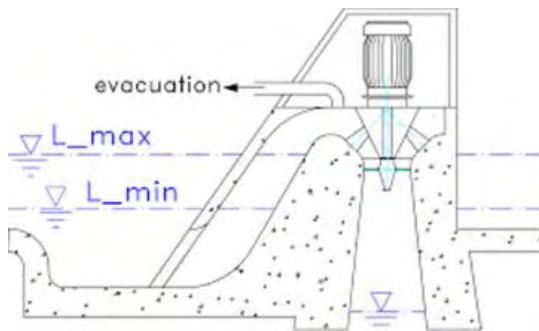
Εικόνα 3-42: Απόδοση και παροχή τουρμπίνας προς το μονομετρικό ύψος για σταθερή και μεταβλητή ταχύτητα
Πηγή: Ocean Wave Energy, J. Cruz(2008)

Στην ανάπτυξη του Wave Dragon, διάφορες στρατηγικές ρύθμισης των στροβίλων έχουν αξιολογηθεί μέσω λογισμικού προσομοίωσης. **Η μέγιστη απόδοση της συνολικής εγκατάστασης λήφθηκε όταν μειώθηκε η ροή στροβίλου μαζί με την εκκένωση της δεξαμενής.** Οι τουρμπίνες μεταβλητής ταχύτητας

προσαρμόζονται καλά σε αυτό, μειώνοντας φυσικά τη ροή στο χαμηλότερο ύψος. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας αρκετές τουρμπίνες μεταβλητής ταχύτητας on/off (variable speed on/off turbines), επιτυγχάνεται καλή απόδοση, με ομαλή παροχή ισχύος και υψηλό συντελεστή φορτίου (load factor).

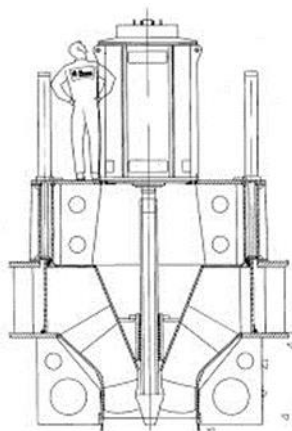
Δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τη διακοπή της ροής έχουν αναλυθεί, η πρώτη χρησιμοποιεί μια μεγάλη μηχανικά ενεργοποιημένη κυλινδρική θύρα (cylinder gate), η δεύτερη χρησιμοποιεί μια αρχή σιφονιού (siphon principle).

Ο τύπος σιφόνι δεν έχει θύρα, σταματά απλά εισάγοντας αέρα στην κορυφή του αγωγού εισόδου. Ο στρόβιλος αρχίζει και πάλι εκκενώνοντας μερικώς τον αέρα μέχρις ότου αρχίσει ξανά η ροή και παίρνει μαζί της τον υπόλοιπο αέρα.



Εικόνα 3-43: Siphon on/off turbine
Πηγή: Ocean Wave Energy, J.Cruz(2008)

Ο τύπος της θύρας κυλίνδρου έχει το πλεονέκτημα του μικρότερου χρόνου έναρξης και ελαφρώς καλύτερης απόδοσης. Αν σχεδιαστεί κατάλληλα, διαπιστώθηκε ότι έχει χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης.



Εικόνα 3-44: Wave Dragon cylinder gate turbine
Πηγή: Ocean Wave Energy, João Cruz(2008)

3.6.4 Έλεγχος

Οι βελτιωμένοι αλγόριθμοι ελέγχου είναι πολύτιμοι, διότι χωρίς πρόσθετο κόστος κεφαλαίου ή κόστος συντήρησης μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση μιας συσκευής, πράγμα που σημαίνει αποτελεσματική άντληση επιπλέον ενέργειας. Ως εκ τούτου, πρόκειται για έναν τομέα ο οποίος επί του παρόντος αποτελεί μείζονος σημασίας ερευνητικό έργο. Σε βασικό επίπεδο, όπως και με αρκετές άλλες WEC, το Wave Dragon έχει δύο βρόχους ελέγχου. Χρησιμοποιείται ένας βρόχος ελέγχου αργής ανάδρασης για να συντονιστεί η συσκευή στην τρέχουσα κατάσταση της θάλασσας. Και χρησιμοποιείται μια πολύ πιο γρήγορη στρατηγική ελέγχου για να εξαγάγει τη μέγιστη ενέργεια από κύμα σε κύμα.

Κεφάλαιο Τέταρτο

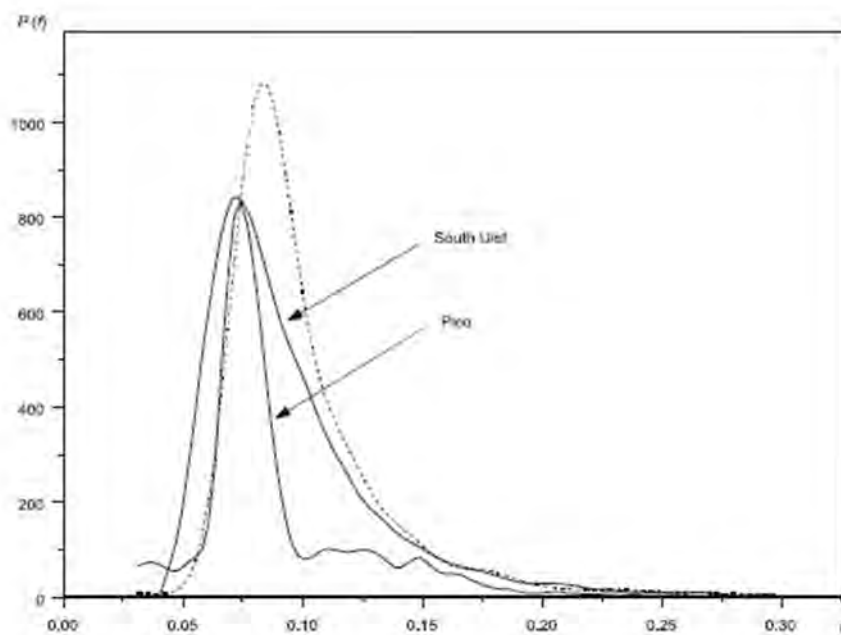
4 Μοντελοποίηση

4.1 Προκαταρκτικές Εκτιμήσεις

Σύμφωνα με τον Cruz (2008), η στιγμιαία πηγή μπορεί να μετρηθεί κοντά ή πάνω σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, μέσω μιας κατάλληλης μετρητικής συσκευής, όπως μια σηματοδότη καταγραφής κυμάτων και συνήθως καταγράφεται ως μια διακριτή χρονοσειρά. Η πρόκληση είναι να μετατρέψουμε την ενέργεια που περιέχεται στην κίνηση των κυμάτων και που περιγράφεται από τη χρονοσειρά σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η εκτίμηση μιας ευνοϊκής τοποθεσίας γίνεται παρακολουθώντας το περιβάλλον των κυματισμών (wave climate) για μια αξιολογημένη περίοδο, ώστε να καθοριστεί η ποικιλία κι η ενέργεια που περιέχονται στις διάφορες καταστάσεις της θάλασσας. Σημειώνουμε ότι ως κατάσταση θάλασσας (sea state) ορίζεται μια περιγραφή των ιδιοτήτων των θαλάσσιων επιφανειακών κυμάτων σε δεδομένη στιγμή και δεδομένη τοποθεσία και πολλές φορές θα δίνεται σε όρους κυματικού φάσματος.

Αυτή η πρόκληση μπορεί να παρουσιασθεί θεωρώντας δύο ενεργειακά φάσματα, το καθένα συνδεδεμένο με τις τοποθεσίες που θεωρούνται ευνοϊκότερες για την παραγωγή ενέργειας.

- “Select spectrum” of Crabb (1980) όπου δίνεται ένα μοντέλο αντιπροσωπευτικού φάσματος, σύμφωνα με μετρήσεις από το South Uist (νησί της Σκωτίας). Με βάθος νερού 42m και μέση ισχύ πηγής να υπολογίζεται στα 47.8 kW/m.
- Spectrum (φάσμα) από το νησί Pico στις Αζόρες, που αποτελεί κομμάτι του προγράμματος ανάπτυξης για την OWC, που χτίστηκε στο νησί. Η τοποθεσία είναι onshore (παράκτια) με βάθος νερού στα 8m και εκτιμώμενη ισχύ πηγής στα 26.5 kW/m, όπου το φάσμα φαίνεται να είναι σε λογικά πλαίσια ενέργειας για την τοποθεσία.



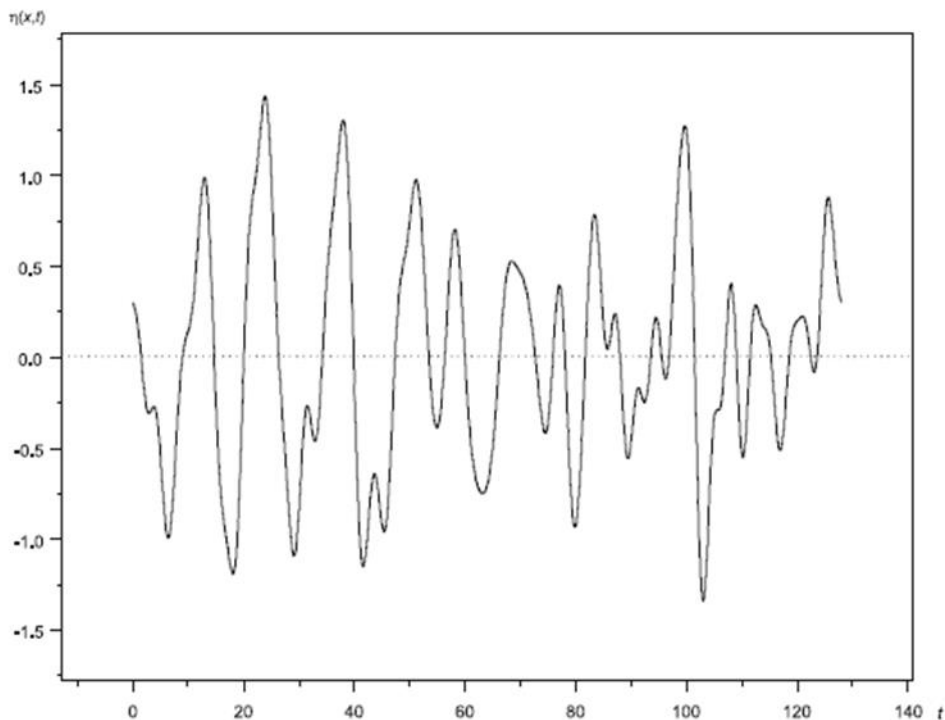
Εικόνα 4-1: Διάγραμμα πυκνότητας ισχύος (kW/m/Hz) σε σχέση με τη συχνότητα (Hz) στις τοποθεσίες Pico και South Uist (συνεχείς γραμμές) και στην αντίστοιχη offshore τοποθεσία για το Pico (διακεκομμένη).
Πηγή : Ocean Wave Energy, J.Cruz (2008)

Και τα δύο φάσματα έχουν παρόμοια μέγιστη τιμή σχεδόν στην ίδια συχνότητα, αλλά η καμπύλη του South Uist είναι πιο φαρδιά και περιέχει 80% περισσότερη ισχύ από αυτή του Pico.

Εδώ φαίνεται ακόμη μία καμπύλη (διακεκομμένη γραμμή) για το φάσμα του Pico, η οποία αντιστοιχεί στην πηγή βαθέων υδάτων πριν αυτή φτάσει στην ακτή και έχει μετρηθεί σε βάθος νερού 40 m και με επίπεδα ισχύος 40.3 kW/m. Συγκρίνοντας την παράκτια και την υπεράκτια πηγή, βλέπουμε ότι το 1/3 της ενέργειας των κυμάτων έχει χαθεί στη μεταβατική περιοχή μεταξύ των δύο τοποθεσιών, με τις απώλειες να οφείλονται στα μικρότερα μήκη κύματος. Άλλη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η μέγιστη τιμή, ανάμεσα στα δύο φάσματα,

προκύπτει σε διαφορετική συχνότητα, καταδεικνύοντας έτσι τη σημαντικότητα των καθορισμένων επιπέδων ενέργειας σε κάθε τοποθεσία.

Τα ενεργειακά φάσματα της εικόνας παρέχουν καλές εκτιμήσεις της πηγής κι αποκτήθηκαν από καταγραφικά ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας, τα οποία ενδέχεται να περιέχουν και κάποιο μετρητή της κατευθυντικότητας των κυμάτων. Παρέχουν πληροφορίες για μεμονωμένες καταστάσεις θαλάσσης, αλλά όχι για την κίνηση των θαλάσσιων επιφανειών. **Μια τυπική ανύψωση της επιφάνειας, σχετιζόμενη με ένα συγκεκριμένο φάσμα μπορεί να αποκτηθεί εξάγοντας τιμές του πλάτους κύματος σε συγκεκριμένες συχνότητες κι έπειτα αθροίζοντας τις συνεισφορές από τις αρμονικές, έχοντας αναθέσει μια τυχαία διαφορά φάσης σε κάθε μια από αυτές.** Μια τέτοια επιφανειακή ανύψωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, για το φάσμα του Ρίκο. Αναπαριστά τη στιγμιαία πηγή και ταυτοποιεί την πραγματική πρόκληση, που είναι το πως θα μετατρέψουμε τη χρονομεταβαλλόμενη προσπίπτουσα ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια ή σε κάποια άλλη χρήσιμη μορφή αποθηκευμένης ενέργειας.



Εικόνα 4-2: Προφίλ επιφάνειας του κύματος, όπου φαίνεται η ανύψωση (m) σε σχέση με τη χρόνο (s) και αντιστοιχεί στο φάσμα του Ρίκο της Εικόνας 1 Πηγή : *Ocean Wave Energy*, J.Cruz (2008)

4.2 Μοντελοποίηση της Πηγής

Πληροφορίες σχετικά με τη μηχανική των θαλάσσιων κυμάτων μπορούν να ληφθούν από τους Dean και Dalrymple (1991), έτσι ώστε να ξεκινήσουμε με μια

απλοποιημένη αναπαράσταση της πηγής. Αρχικά ορίζουμε το σύστημα συντεταγμένων με τις x, y οριζόντιες και την z κάθετη, με τα θετικά προς τα πάνω. Η επιφανειακή ανύψωση του νερού με μέσος βάθος h μετριέται από ένα καταγραφικό ύψους κύματος σε ένα σταθερό σημείο του χώρου με οριζόντιες συνιστώσες (x_0, y_0) και το σήμα $z = \eta(x_0, y_0, t)$ που μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακριτό. Μιας και το σημείο μέτρησης είναι σταθερό και καθολικό το (x_0, y_0) τμήμα μπορεί να αγνοηθεί, δηλώνοντας έτσι ότι για διαφορετικό σημείο αναφοράς θα λάβουμε και διαφορετικό σήμα. Συνεπώς η ανύψωση μπορεί να θεωρηθεί απλά ως μια συνεχής συνάρτηση του χρόνου $\eta(t)$, η οποία είναι γνωστή για κάθε χρονική στιγμή t . Γενικά, μεγέθη που απαιτούν φυσικές μετρήσεις συνήθως χρησιμοποιούν την f , συχνότητα σε Hz, ενώ συχνά είναι ευκολότερο στις μελέτες μοντελοποίησης να χρησιμοποιούμε το ω , συχνότητα σε rad/s, όπου συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης $\omega = 2\pi f$.

Τυπικά το σήμα σε ένα σταθερό σημείο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συνεχές φάσμα συχνοτήτων, όπου η κάθε μία χαρακτηρίζεται από ένα πλάτος πυκνότητας, $\alpha(\omega)$, και μία φάση, $\gamma(\omega)$, της συχνότητας ω ώστε η επιφάνεια να χαρακτηρίζεται από τη σχέση :

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} \alpha(\omega) \cos(\omega t - \gamma(\omega)) d\omega \quad (4.1)$$

Το πλάτος πυκνότητας ενός φάσματος (Amplitude spectral density-ASD) ισούται με τη ρίζα της ισχύος πυκνότητας φάσματος (Power spectral density-PSD) κι αποτελεί ένα μέγεθος προερχόμενο από τον κλάδο της στατιστικής. Το τελευταίο περιγράφει στην ουσία πως κατανέμεται η ισχύς ενός σήματος ή μιας χρονοσειράς σε σχέση με τη συχνότητα. Επίσης σε σύγκριση με τις σχέσεις του 1^{ου} κεφαλαίου, $\gamma = -kx + \psi$.

Κάθε στιγμή το $\eta(t)$ αντιπροσωπεύει το ολοκλήρωμα κάτω από μία καμπύλη στο πεδίο της συχνότητας και έτσι μπορεί να προσεγγισθεί ως το γραμμικό άθροισμα ενός άπειρου αριθμού αρμονικών.

$$\eta(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m \cos(\omega_m t - \gamma_m). \quad (4.2)$$

Η σύγκριση των δύο σχέσεων (4.1) και (4.2) υπονοεί ότι το διακριτό πλάτος α_m και το συνεχόμενο μέγεθος $\alpha(\omega)$ συνδέονται μέσω της σχέσης: $\alpha_m = \alpha(\omega_m) d\omega$.

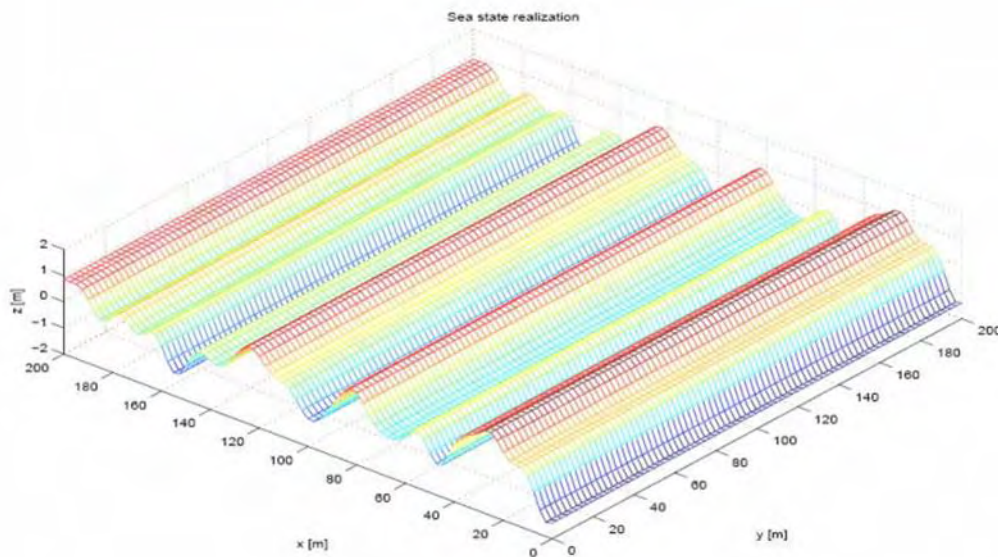
Αν όλα τα πλάτη α_m είναι μικρά σε κάποιο βαθμό, έτσι ώστε οι διαφορετικές συχνότητες να μην αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, τότε η (4.2) μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια σειρά ανεξάρτητων ημιτονοειδών κυμάτων. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την υπόθεση μιας και τα κύματα που μελετώνται στην παρούσα εργασία ακολουθούν τη γραμμική θεωρία κυμάτων.

Άλλη μια σημαντική παράμετρος, η οποία χάριν ευκολίας έχει αγνοηθεί σε όλη την παραπάνω ανάλυση κι η οποία είναι πολύ σπάνιο να μην είναι σημαντική, είναι η κατευθυντικότητα του κυματικού πεδίου. Μπορεί να είναι ιδιαίτερης σημασίας σε ένα επιλεγμένο σημείο, όπου η τοπογραφία του βυθού θα μπορούσε

να παρέχει ένα μηχανισμό εστίασης για να αυξηθεί η τιμή της πηγής. Αυτό μπορεί να συνοψιστεί για τα γραμμικά κυματικά στοιχεία ξαναγράφοντας τη (4.2) ως

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m \cos(k_m x \cos \beta_m + k_m y \sin \beta_m - \omega_m t + \psi_m) \quad (4.3),$$

υπολογίζοντας για $x = x_0$, $y = y_0$ και $\gamma_m = -(k_m x_0 \cos \beta_m + k_m y_0 \sin \beta_m + \psi_m)$, με το β_m να είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης διάδοσης και του x-άξονα. Συνεπώς η (4.3) θεωρούμε ότι αποτελείται από έναν αριθμό διδιάστατων κυματικών στοιχείων, δηλαδή οι κορυφές τους εμφανίζονται πολύ μεγάλες σε σχέση με το μήκος τους (long-crested waves), που διαδίδονται σε τυχαίες κατευθύνσεις.



Εικόνα 4-3: Μορφή διδιάστατων κυμάτων (long-crested)

Πηγή : *Modelling and Simulation of Environmental Disturbances*, Dr Tristian Perez et al.(2007)

Μια επιπλέον συνέπεια της (4.3) είναι ότι αρκεί να μελετήσουμε κάθε αρμονική ξεχωριστά, σε μια τυχαία γωνία πρόσπτωσης με βάση τη γραμμική θεωρία, δηλαδή να υποθέσουμε ότι η επιφανειακή ανύψωση δίνεται από τη σχέση

$$\eta(x, y, t) = \alpha \cos(kx \cos \beta + ky \sin \beta - \omega t), \quad (4.4)$$

με τη φάση ψ_m να λαμβάνεται μηδέν. Αυτό δεν καθιστά την προσέγγιση της χρονοσειράς ασήμαντη σε καμία περίπτωση, αλλά η (4.4) επιβεβαιώνει ότι πολλά από τα σημαντικά χαρακτηριστικά της συσκευής μπορούν να βρεθούν από μια ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας.

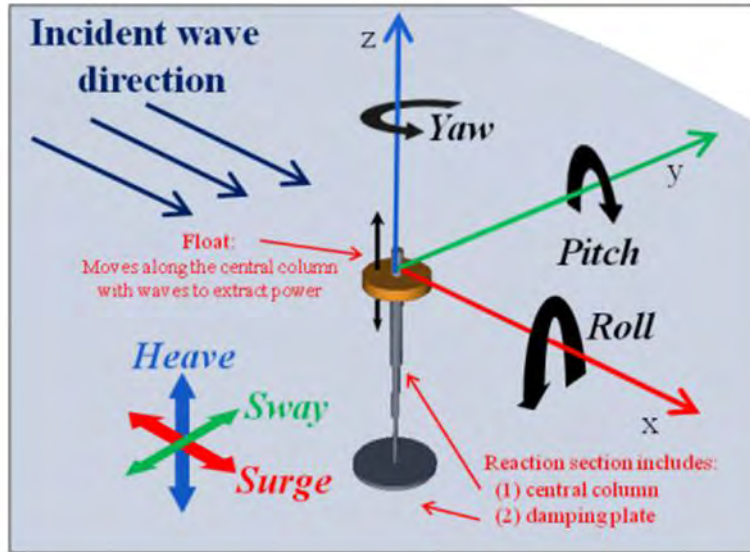
4.2.1 Ισχύς Πηγής και Εύρος Αποτελεσματικής Σύλληψης

Για ένα κανονικό προσπίπτον κύμα όπως αναπαριστάται στην (4.4), η μέση ισχύς ανά μονάδα πλάτους κύματος (υπολογισμένη στην περίοδο κύματος) είναι $P_w = \frac{1}{2} \rho g a^2 c_g$, όπου c_g είναι η ταχύτητα ομάδας κυματισμών. Αν P είναι η μέση ισχύς που απορροφάται από τη συσκευή, τότε το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης $L(\omega, \beta)$, όπου περιγράφηκε παραπάνω, ορίζεται από τη σχέση: $L(\omega, \beta) = \frac{P}{P_w}$ (4.5). **Συνεπώς δε θα υπάρχει καμία εξάρτηση από το β , αν η συσκευή είναι αξονοσυμμετρική ως προς ένα κάθετο άξονα.**

Η ιδέα του εύρους αποτελεσματικής σύλληψης είναι αρκετά δελεαστική, μιας και δείχνει ότι η συσκευή απάγει ένα ποσό LP_w από το μέτωπο κύματος. Αυτό δεν αντιστοιχεί στην ισχύ που λαμβάνεται από μία μόνο λωρίδα του εύρους L , παρότι αναμένεται η ισχύς να εξαχθεί κυρίως από την μπροστινή περιοχή κοντά στη συσκευή. Παρόλα αυτά, δεν είναι ένα αδιάστατο μέτρο της βέλτιστης απορρόφησης της συσκευής. Το εύρος σύλληψης έχει διαστάσεις μήκους κι αυτό ισχύει επειδή χρησιμοποιεί σαν μέτρο αναφοράς τη μέση ισχύ ανά μονάδα πλάτους κορυφής κυμάτων. **Αν D είναι μια τυπική διάσταση της συσκευής, που πιθανώς να αναπαριστά την πρόσοψη ως προς τα προσπίπτοντα κύματα, τότε ένα σημαντικό μέγεθος της συσκευής μπορεί να είναι το L/D . Είναι προφανές ότι διαισθητικά αυτό χρειάζεται να είναι όσο μεγαλύτερο γίνεται κι οι τιμές κάτω τις μονάδες θα μπορούσαν να θεωρηθούν φτωχές.**

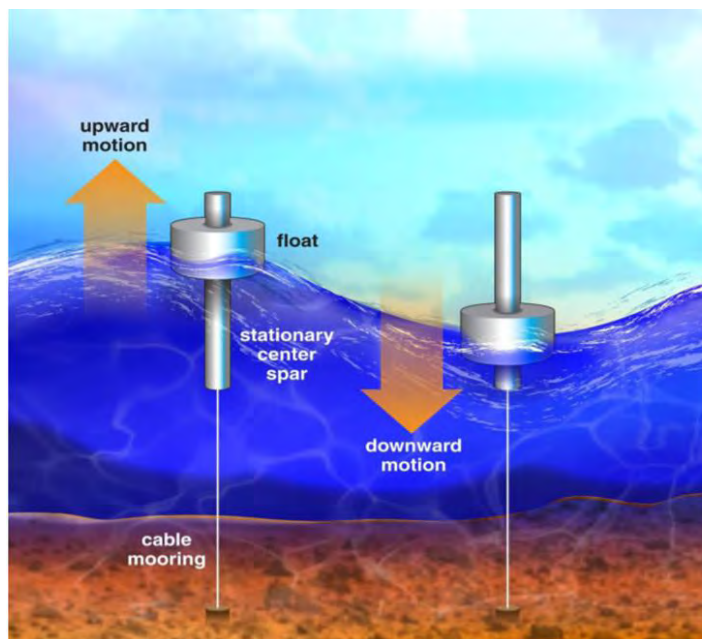
4.3 Υδροδυναμική των Υπεράκτιων Συσκευών (Offshore Devices)

Η προσοχή μας στην παρούσα ανάλυση περιορίζεται σε εκείνες τις συσκευές που προορίζονται να λειτουργούν σε υπεράκτιο περιβάλλον (offshore) και ιδιαίτερα σε πλωτές κατασκευές. Στην Υδροδυναμική ανοιχτής θάλασσας (offshore hydrodynamics), ο σκοπός ενός μαθηματικού μοντέλου είναι συνήθως ο προσδιορισμός του φορτίου κύματος σε μια σταθερή ή πλωτή δομή συγκεκριμένου σχεδιασμού (design). Στην υδροδυναμική πλοίων (ship hydrodynamics), σκοπός ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η ανταπόκριση ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού του πλοίου σε ορισμένες συνθήκες θάλασσας. Σύμφωνα με τον Cruz (2008), καμία από τις παραπάνω προσεγγίσεις δεν εφαρμόζεται στις μελέτες για την ενέργεια των κυμάτων. **Το κλειδί για την μοντελοποίηση των WECs είναι η απόδοση.** Αν μια συσκευή δεν μπορεί να απορροφήσει ένα αποδεκτό επίπεδο ισχύος σε μικρές ή μέτριες θάλασσες, τότε δεν εξετάζονται περαιτέρω εκτιμήσεις.



Εικόνα 4-4: Περιγραφή τρόπων κίνησης για ένα σημειακό απορροφητή, 3 κινήσεις περιστροφής (yaw, pitch, roll) και 3 μεταφορικές κινήσεις (heave, sway, surge)
Πηγή : A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point Absorbers, Ye Li et al. (2012)

Μια γενική άκαμπτη κίνηση του σώματος αποτελείται από 3 μεταφορικούς τρόπους κίνησης (surge,sway,heave) και 3 περιστροφικούς τρόπους κίνησης (roll,pitch,yaw) στις κατευθύνσεις και γύρω από τους άξονες (x,y,z). Η διαδικασία της μοντελοποίησης περιγράφεται καλύτερα με την εξέταση μονοδιάστατης κίνησης (single translational mode) σε ένα διδιάστατο (long-crested) πεδίο προσπιπτόνων κυμάτων.



Εικόνα 4-5: Κίνηση σημειακού απορροφητή
Πηγή : A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point Absorbers, Ye Li et al. (2012)

Αν m η μάζα του σώματος και $X(t)$ η χρονική μετατόπιση του, τότε η εξίσωση κίνησης σώματος θα είναι:

$$m\ddot{X} = F_T(t) + F_{ext}(X, \dot{X}, t) \quad (4.6)$$

Όπου η ολική δύναμη $F_T(t)$ έχει συνιστώσες της $F_f(t)$ και εκφράζει τις δυνάμεις που προκαλούνται από το κύμα/ρευστό στην κατεύθυνση $X(t)$ και η $F_{ext}(X, \dot{X}, t)$ εκφράζει τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην κατεύθυνση $X(t)$. Οι εξωτερικές δυνάμεις μπορεί να αντιπροσωπεύουν μηχανισμούς λήψης ισχύος (power take-off system) ή/και τους περιορισμούς πρόσδεσης (mooring). Εναλλακτικά ο μηχανισμός λήψης ισχύος μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα πρόσδεσης. Είναι σαφές ότι η δύναμη θα εξαρτάται από τον τύπο πρόσδεσης και την εργασία που αναμένεται να εκτελέσει.

4.3.1 Υδροδυναμικές Προσεγγίσεις

Ένα κανονικό πεδίο προσπίπτοντος κύματος (regular incident wave field) σε νερό βάθους h όπως στην εξίσωση (4.4) μπορεί να χαρακτηριστεί από το μέτρο πλάτους α , από τον κυματάριθμο (wavenumber) k (ή μήκος κύματος $\lambda=2\pi/k$) και από την κυκλική συχνότητα ω . Αυτές σχετίζονται με μια σχέση διασποράς (dispersion relation) της μορφής $G(\alpha, k, \omega, h)=0$ και ο χαρακτήρας του πεδίου κύματος μπορεί να περιγραφεί από τις αδιάστατες παραμέτρους ak και kh που σχετίζονται με την κλίση κύματος και τον λόγο βάθος νερού προς μήκος κύματος αντίστοιχα. Σε ύδατα ενδιάμεσου βάθους ή σε βαθιά ύδατα, ταξινομημένα με $kh=O(1)$ ή $kh \gg 1$, η μη-γραμμικότητα καθορίζεται από την τιμή κλίσης κύματος ak . Σε ρηχά ύδατα, $kh \ll 1$, η μη-γραμμικότητα εξαρτάται από τα ak και kh . Επίσης σημαντικοί είναι οι αριθμοί Reynolds (Re) και Keulegan-Carpenter (Kc). Οι γενικοί ορισμοί αυτών των ποσοτήτων μπορούν να προσαρμοστούν στο πλαίσιο της γραμμικής θεωρίας των κυμάτων. Το K_c ερμηνεύεται ως η απόσταση που διανύεται από ένα σωματίδιο σε σχέση με την κλίμακα μήκους του αντικειμένου

$$Re = \frac{\alpha D \omega}{\nu}, \quad Kc = \frac{2\pi}{\tanh(kh)} \frac{\alpha}{D} \quad (4.7)$$

όπου D είναι η διάμετρος του σώματος.

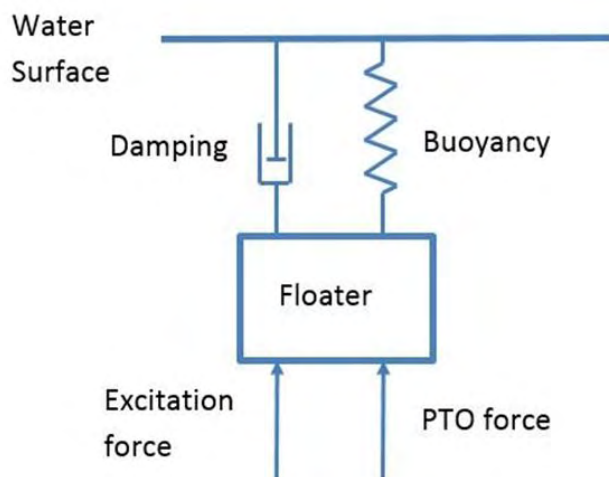
Φαινόμενα περίθλασης κυριαρχούν όταν η ροή παραμένει στρωτή στη γύρω περιοχή της συσκευής, ενώ τα ιξώδη φαινόμενα είναι αμελητέα και δεν εμφανίζονται δίνες (no vortex shedding). Μια συνέπεια είναι ότι αν τα

προσπίπτοντα κύματα είναι αστρόβιλα τότε η ροή εντός της περιοχής του σώματος θα είναι επίσης αστρόβιλη και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μορφοποίηση όσον αφορά το δυναμικό ροής (velocity potential). Αυτή η μορφοποίηση είναι ικανοποιητική τόσο από αναλυτική όσο και από αριθμητική άποψη.

Η παράμετρος kD (ή $D/\lambda = kD/2\pi$) συχνά θεωρείται ότι είναι το μέτρο της σπουδαιότητας της περίθλασης (diffraction) και οι Sarikaya και Isaacson(1981) θεωρούν ότι η περίθλαση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν $kD > 1,3$ ισοδύναμο με $D/\lambda > 0,2$. Με βάση το επιτρεπόμενο εύρος παραμέτρων πριν το σπάσιμο των κυμάτων (wave breaking), αυτοί οι συγγραφείς θεωρούν ότι ο προκύπτων αριθμός Keulegan-Carpenter περιορίζεται από $Kc < 0,07kD$ και θα είναι το πολύ 2,2 και συνήθως λιγότερο από 1. Η απαίτηση ότι $D/\lambda > 0,2$ για να συμπεριλάβουμε την περίθλαση στο σύστημα είναι σημαντική από την άποψη της μοντελοποίησης και ελέγχεται εύκολα. Στο παρόν πλαίσιο, ο αριθμός των συχνοτήτων στην προσπίπτουσα ακολουθία κυμάτων (incident wavetrain) όπως περιγράφονται στις εξισώσεις (4.2),(4.3) πρέπει να ληφθούν υπόψη. Θεωρείται ότι το καθεστώς περίθλασης ισχύει για κάθε αρμονική του φάσματος και για ένα σώμα δεδομένης διάστασης αυτό επιβάλλει περιορισμούς στις αρμονικές που μπορούν να θεωρηθούν ότι βρίσκονται εντός του πλαισίου περίθλασης.

4.3.2 Δυνάμεις εντός του Πλαισίου Περίθλασης

Θεωρούμε συνήθως στα προκαταρκτικά μοντέλα WECs ότι οι δυνάμεις παραμένουν εντός του πλαισίου περίθλασης και ότι η σημασία άλλων γνωστών δυνάμεων μπορεί να εξεταστεί σε μεταγενέστερο στάδιο.



Εικόνα 4-6: Δυνάμεις που ασκούνται σε σημειακό απορροφητή
Πηγή: S.Zou et al. (2016)

Με την προσοχή να περιορίζεται στη θεωρία γραμμικού κύματος στο σχήμα περίθλασης, οι δυνάμεις $F_f(t)$ μπορούν να προσεγγιστούν από τον συνδυασμό:

$$F_f(t) = F_s(t) + F_R(t) + F_H(t) \quad (4.8)$$

Όπου : $F_s(t)$: Δύναμη Διέγερσης (excitation force)

$F_R(t)$: Δύναμη Ακτινοβολίας (radiation force)

$F_H(t)$: Υδροστατική Δύναμη (hydrostatic force-buoyancy)

Οι δυνάμεις διέγερσης και ακτινοβολίας σχετίζονται με την απόκριση του σώματος στην κίνηση του προσπίπτοντος κύματος και η υδροστατική συνιστώσα είναι ανεξάρτητη από τα κύματα. Κάθε συνιστώσα θα εξεταστεί ξεχωριστά.

Όταν το προσπίπτον κύμα περιγράφεται από την εξίσωση (4.4), είναι συχνά βολικό για την γραμμική θεωρία να χρησιμοποιηθεί μια μιγαδική αναπαράσταση , έτσι ώστε η επιφανειακή ανύψωση να γραφεί ως:

$$\eta(x,y,t) = Re \{ a \exp i(kx \cos \beta + ky \sin \beta - \omega t) \}$$

Αναλογικά η κίνηση του σώματος μπορεί να γραφεί ως :

$$X(t) = Re \{ \xi e^{-i\omega t} \} \quad (4.9)$$

όπου ξ είναι κάποια άγνωστη μιγαδική σταθερά που μπορεί να προσδιοριστεί από την λύση των εξισώσεων (4.6) και (4.8).

Αυτή η μιγαδική μορφή είναι μια χρήσιμη αναπαράσταση του $X(t)$. Το μέγεθος του ξ αντιστοιχεί στο μέγεθος της ταλάντωσης και η φάση είναι επίσης σημαντική και μπορεί να διαφέρει από εκείνη του προσπίπτοντος κύματος. Η συνθήκη που επιβάλλεται από την θεωρία της περίθλασης είναι ότι η ποσότητα $|\xi|/a$ είναι το πολύ τάξης μεγέθους $O(1)$ και είναι συνεπής με την αναπαράσταση των 3 όρων που εμφανίζονται στην εξίσωση (4.8). Ενώ η εξίσωση (4.9) είναι σαφώς ελκυστική, δεν μπορεί να επιβληθεί χωρίς αιτιολόγηση και η εξωτερική δύναμη $F_{ext}(X, \dot{X}, t)$ θα πρέπει να είναι σύμφωνη με μια τέτοια μορφή.

Το συνοδευτικό πεδίο ταχύτητας, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά θα είναι:

$$\dot{X}(t) = U(t) = Re \{ \mathbb{U} e^{-i\omega t} \}, \quad \mathbb{U} = -i\omega \xi \quad (4.10)$$

Η γραμμική θεωρία θα ισχύει για τις περισσότερες συσκευές στις περισσότερες συνθήκες λειτουργίας και κύρια εξαίρεση αποτελούν οι συνθήκες καταιγίδας. Αυτό συμβαίνει βεβαίως στην περίπτωση των πλωτών συσκευών, αλλά

πρέπει να επιβληθεί μια προειδοποίηση όταν εξετάζονται WECs στην ακτή ή κοντά στην ακτή (onshore or nearshore). Η κατάσταση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave climate nearshore) συχνά βρίσκεται εντός του καθεστώτος ρηχών υδάτων και οι απαιτήσεις που τίθενται από τη συνθήκη ότι η παράμετρος Stokes (ή Ursell) $(ak)/(kh)^3 \ll 1$ για την εφαρμογή της γραμμικής θεωρίας είναι αρκετά περιοριστικές. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιούμε γραμμική θεωρία για WECs κοντά στην ακτή (nearshore), αλλά ότι η γραμμική θεωρία μπορεί να μην παρέχει επαρκώς ακριβές εργασιακό περιβάλλον για σημαντικό χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Δύναμη Διέγερσης (ή Σκέδασης) $F_s(t)$

Η δύναμη διέγερσης είναι η δύναμη που θα βιώσει το σώμα αν κρατηθεί σταθερό στη μέση θέση του και σύμφωνα με την Εξ.(4.9) γράφεται ως:

$$F_s(t) = \text{Re}\{\mathbb{X}e^{-i\omega t}\} \quad (4.11)$$

για κάποια μιγαδική σταθερά \mathbb{X} . Η ποσότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από 2 μέρη :

$$\mathbb{X} = \mathbb{X}_{inc} + \mathbb{X}_{diff} \quad (4.12)$$

που αντιστοιχούν σε: $\mathbb{X}_{inc} \rightarrow$ προσπίπτοντα κύματα (incident waves)

$\mathbb{X}_{diff} \rightarrow$ κύματα περίθλασης (diffracted waves)

Η ποσότητα \mathbb{X}_{inc} αντιστοιχεί στην δύναμη λόγω προσπιπτόντων κυμάτων. Προκύπτει από την ολοκλήρωση της πίεσης πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος (wetted surface), κάνοντας την υπόθεση ότι το σώμα δεν επηρεάζει τη ροή γύρω του- υπόθεση σώματος- «φάντασμα» και προσδιορίζεται εύκολα. Αντίθετα, ο προσδιορισμός του δεύτερου όρου \mathbb{X}_{diff} είναι δύσκολος και αυτή η ποσότητα μπορεί να υπολογιστεί μόνο όταν έχει προσδιοριστεί το πεδίο πίεσης σε όλη τη βρεχόμενη επιφάνεια. Και για αυτόν τον προσδιορισμό θεωρούμε ότι η ροή εκτρέπεται από την πορεία της, υποθέτοντας εδώ ότι το σώμα είναι στάσιμο. Οι αναλυτικές ή ημιαναλυτικές λύσεις είναι σπάνιες και περιορίζονται σε πολύ απλές γεωμετρίες. Οι λύσεις πρέπει να αναζητηθούν αριθμητικά στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος και χρησιμοποιούνται οι πρότυποι κώδικες της βιομηχανίας.

Αν $|\mathbb{X}_{diff}| \ll |\mathbb{X}_{inc}|$, τότε η συνιστώσα περίθλασης (diffracted component) (\mathbb{X}_{diff}) μπορεί να παραληφθεί και η δύναμη διέγερσης να αντιπροσωπεύεται μόνο από την συνεισφορά των προσπιπτόντων κυμάτων (\mathbb{X}_{inc}). Αυτή είναι γνωστή ως προσέγγιση Froude-Krylov και είναι χρήσιμη όταν το επιτρέπουν οι περιστάσεις.

Δύναμη Ακτινοβολίας $F_R(t)$

Η δύναμη ακτινοβολίας αντιστοιχεί στη δύναμη που βιώνει το σώμα λόγω της δικής του ταλαντευόμενης κίνησης με την απουσία του πεδίου προσπίπτοντος κύματος και είναι ανάλογη προς το πλάτος $|\xi|$ της μετατόπισης στην γραμμική θεωρία. Θεωρούμε δηλαδή τη δημιουργία κυμάτων λόγω της ταλάντωσης του σώματος. Η συνήθης πρακτική είναι να θεωρηθεί ότι η δύναμη ως αποτελείται από δύο συνιστώσες. Μία σε φάση με την επιτάχυνση του σώματος και η άλλη σε φάση με την ταχύτητα του σώματος:

$$F_R(t) = - \{A(\omega)\ddot{X} + B(\omega)\dot{X}\} \quad (4.13)$$

όπου $A(\omega)$ είναι συντελεστής προστιθέμενης μάζας και $B(\omega)$ είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.9) και (4.11) γράφουμε την (4.13) ως:

$$F_R(t) = \text{Re} \{F_R e^{-i\omega t}\} , \quad F_R = [\omega^2 A(\omega) + i\omega B(\omega)]\xi \quad (4.14)$$

Ο Falnes (2002) χρησιμοποίησε διάφορες αντιστοιχίες με άλλες εφαρμογές ταλαντευόμενων συστημάτων. Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η δύναμη ακτινοβολίας γράφεται τότε:

$$F_R = -\bar{Z}(\omega)U \quad Z(\omega) = B(\omega) + i\omega A(\omega) \quad (4.15)$$

όπου οι μιγαδικές ποσότητες : $Z(\omega)$: αντίσταση ή αντίσταση ακτινοβολίας,

$\bar{Z}(\omega)$: μιγαδικό συζυγές του $Z(\omega)$

U : η ταχύτητα από Εξ. (4.10).

Στην Εξ.(4.15) εμφανίζεται είτε το $Z(\omega)$ είτε το $\bar{Z}(\omega)$, ανάλογα με την μορφή της εξάρτησης χρόνου που χρησιμοποιείται στις Εξ.(4.9) και (4.11). Αν η εξάρτηση του χρόνου είναι της μορφής $e^{-i\omega t}$ τότε εμφανίζεται το $\bar{Z}(\omega)$, ενώ αν είναι $e^{i\omega t}$ τότε το $Z(\omega)$. Αν και η τελευταία μορφή μπορεί να φαίνεται πιο κατάλληλη σε τυπικές εφαρμογές ταλαντωτή, η πρώτη μορφή χρησιμοποιείται εδώ για να διατηρήσει την ίδια χρονική εξάρτηση με εκείνη του πεδίου εισερχόμενου κύματος που δίνεται στην Εξ.(4.9).

Όπως και με την δύναμη περίθλασης X_{diff} στην Εξ.(4.12), ο προσδιορισμός των $A(\omega)$ και $B(\omega)$ υπολογίζεται αριθμητικά.

Υδροστατική Δύναμη $F_H(t)$

Η υδροστατική δύναμη είναι η ανωστική δύναμη στη συσκευή και δίνεται από:

$$F_H(t) = -CX(t) = -\text{Re}\{C\xi e^{-i\omega t}\} \quad (4.16)$$

όπου C: συντελεστής άνωσης.

Αν το σώμα είναι σε θέση ισορροπίας, εν απουσία κυμάτων, τότε το C είναι μη-μηδενικό για heave τρόπο κίνησης (κατακόρυφη κίνηση) και για τους τρόπους κύλισης(roll) και περιστροφής(yaw) ενός πλωτού σώματος.

4.3.3 Εξίσωση Κίνησης

Επιστρέφουμε στην Εξ.(4.6) και χρησιμοποιούμε τις προσεγγίσεις που είναι σύμφωνες με τις υποθέσεις ότι τα προσπίπτοντα κύματα είναι κανονικά και γραμμικά, ότι οι δυνάμεις παραμένουν εντός του καθεστώτος περίθλασης (diffraction regime) και ότι το μέγεθος της κίνησης του σώματος είναι συγκρίσιμο με το πλάτος (amplitude) του προσπίπτοντος κύματος. Συνδυάζοντας τις Εξ. (4.6) και (4.8), για τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης κύματος/ρευστού δίνεται η εξίσωση κίνησης του ρευστού:

$$m\ddot{X} = F_s(t) + F_R(t) + F_H(t) + F_{ext}(X, \dot{X}, t)$$

Εισάγοντας τις κατάλληλες μορφές των εξ. (4.11)-(4.16) για τη μορφή των δυνάμεων έχουμε:

$$(m + A)\ddot{X} + B\dot{X} + C X = \text{Re}\{X e^{-i\omega t}\} + F_{ext}(X, \dot{X}, t) \quad (4.17)$$

όπου με την χρήση της (4.9) επίσης γράφεται ως εξής:

$$\text{Re}\{[-\omega^2(m + A) - i\omega B + C]\xi e^{-i\omega t}\} = \text{Re}\{X e^{-i\omega t}\} + F_{ext}(X, \dot{X}, t) \quad (4.18)$$

Οι Εξ. (4.17) και (4.18) μπορεί να φαίνεται ότι περιγράφουν έναν τυπικό αρμονικό ταλαντωτή, αλλά αυτό δεν συμβαίνει, καθώς η εξίσωση μπορεί να είναι συνεπής μόνο αν η F_{ext} έχει την ίδια χρονική εξάρτηση με τους όρους εκείνους που βασίζονται στην προσπίπτουσα ακολουθία κυμάτων (incident wavetrain). Η μορφή της $F_{ext}(X, \dot{X}, t)$ είναι πολύ σημαντική για την περαιτέρω πρόοδο και αυτό έχει αναγνωριστεί ήδη αφού αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην σύσταση της Εξ. (4.9), από την οποία προκύπτει και η (4.18).

Συχνά επιλέγεται ένα απλό μοντέλο γραμμικού αποσβεστήρα για να αντιπροσωπεύσει τον μηχανισμό λήψης ισχύος (power take-off system), αλλά

αυτή μπορεί να μην είναι πάντα μια ρεαλιστική προσέγγιση. Οι δυνάμεις πρόσδεσης θα πρέπει επίσης να συμπεριλαμβάνονται όταν υπάρχουν και μια τεντωμένη/σφιχτή πρόσδεση (taut mooring) μπορεί να προσφέρει σημαντική επίδραση στις κινήσεις της συσκευής.

Επίσης είναι δυνατή μια επέκταση στην προσέγγιση της αντίστασης στις εξ.(4.14) και (4.15). Με το $Z_T(\omega)$ να ορίζεται ως εξής:

$$Z_T(\omega) = Z(\omega) + i(\omega m - C/\omega^2) = B(\omega) + i\omega(A(\omega) + m - C/\omega^2) \quad (4.19)$$

Και έτσι η (4.18) γίνεται:

$$\text{Re} \{ \overline{Z_T}(\omega) \cup e^{-i\omega t} \} = \text{Re} \{ \mathbb{X} e^{-i\omega t} \} + F_{ext}(X, \dot{X}, t) \quad (4.20)$$

Η χρησιμότητα αυτής της μορφής εξαρτάται από την δομή της F_{ext} , κυρίως από την χρονική της εξάρτηση και θα εξεταστεί αργότερα.

4.3.3.1 Εξίσωση Κίνησης σε έξι τρόπους κίνησης

Για την παραπάνω παραδοχή έχουμε υποθέσει για απλότητα, ότι το σώμα επιχειρεί έναν μόνο μεταφορικό τρόπο κίνησης (translational). Όπως έχει προαναφερθεί, μια γενική άκαμπτη κίνηση σώματος θα αποτελείται από 3 τρόπους μεταφοράς και 3 τρόπους περιστροφής. Αυτά μπορούν να φιλοξενηθούν στο παρόν πλαίσιο με την επέκταση του $X(t)$, που αντιπροσωπεύει έναν μόνο τρόπο μεταφοράς (single translational mode), στο διάνυσμα στήλης $X = \{ X_j, j=1,2,\dots,6 \}$. Όπου οι τρεις πρώτες συνιστώσες του X αντιπροσωπεύουν τους μεταφορικούς τρόπους κίνησης και οι επόμενες τρεις, τους τρόπους περιστροφής.

Κατά παρόμοιο τρόπο, οι ποσότητες που εμφανίζονται ως δυνάμεις είναι επίσης διανύσματα στήλης 6 στοιχείων και συσχετίζονται με τις δυνάμεις και τις χρονικές στιγμές με τον ίδιο τρόπο όπως το X . Η αντίστοιχη επέκταση στην εξίσωση (4.17) είναι:

$$\sum_{j=1}^6 [(m_{kj} + A_{kj})\ddot{X}_j + B_{kj}\dot{X}_j + C_{kj}X_j] = \text{Re} \{ (\mathbb{X})_k e^{-i\omega t} \} + (F_{ext}(X, \dot{X}, t))_k \quad (4.21)$$

όπου $k=1,2,\dots,6$

Οι πίνακες προστιθέμενης μάζας και απόσβεσης είναι συμμετρικοί και συνήθως απαιτούν αριθμητικό προσδιορισμό (numerical determination). Μια μιγαδική περιγραφή ημιτονοειδούς κίνησης παρέχεται από τον Newman(1977).

4.3.3.2 Εξίσωση Κίνησης για ολόκληρο το πεδίο συχνοτήτων

Ενώ η εξίσωση (4.6) είναι ακριβής, όλη η συζήτηση που ακολουθεί υποθέτει ότι τα κύματα είναι μονοχρωματικά και γραμμικά, ότι το φορτίο κύματος βρίσκεται εντός του πλαισίου περίθλασης και ότι η εξωτερική δύναμη (F_{ext}) συμφωνεί με τα παραπάνω. Ας υποθέσουμε ότι οι τελευταίες δύο από τις τρεις συνθήκες παραμένουν έγκυρες, αλλά τα κύματα δεν έχουν πλέον μία μόνο συχνότητα. Είναι δυνατό να υιοθετήσουμε την προσέγγιση των εξισώσεων (4.2) και (4.3) και να εξετάσουμε όλες τις αρμονικές ανεξάρτητα, με το τελικό αποτέλεσμα να απαιτεί προσεκτικό συνδυασμό όλων των αρμονικών και των φάσεων τους. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η χρονομεταβαλλόμενη μορφή της εξίσωσης κίνησης και εξετάζονται οι μεταβολές καθώς κινούμαστε από κανονικά σε ακανόνιστα (irregular) πεδία κυμάτων.

Η εξίσωση (4.18) προέκυψε από την χρήση της εξίσωσης (4.8) και προσεγγίζοντας τους όρους κάθε συνιστώσας για κανονική κίνηση κύματος (regular wave motion). Όταν υπάρχει ακανόνιστο πεδίο κύματος:

- Το υδροστατικό στοιχείο $F_H(t)$ στην Εξ.(4.16) είναι το μόνο που παραμένει αμετάβλητο.
- Η $F_S(t)$ δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με αρμονικό τρόπο και πρέπει να συμπεριληφθεί σε μια γενική μορφή.
- Η $F_R(t)$ μοντελοποιείται μέσω της αποδόσεως που δίνεται από τον Cummins (1962).

Για έναν μόνο τρόπο κίνησης, η εξίσωση κίνησης είναι:

$$(m+A_\infty)\ddot{X} + \int_0^t K(t-\tau)X(\tau) d\tau + C\dot{X} = F_S(t) + F_{ext}(X, \dot{X}, t) \quad (4.22)$$

όπου το A_∞ αποτελεί σταθερά που σχετίζεται με την προστιθέμενη μάζα (added mass) και $K(t-\tau)$ είναι η ωθητική συνάρτηση απόκρισης που σχετίζεται με την απόσβεση ακτινοβολίας (radiation damping).

4.4 Βέλτιστη Υδροδυναμική Απόδοση

Ακολουθώντας την σημειογραφία του Evans(1980,1981a) έχουμε :

- Τη στιγμιαία ισχύ που συνδέεται με μια γενική δύναμη $F(t)$, που ενεργεί πάνω σε ένα σώμα με έναν μόνο μεταφορικό τρόπο κίνησης που περιγράφεται από την μετατόπιση $X(t)$, είναι ο στιγμιαίος ρυθμός έργου που δίνεται από :

$$P(t) = F(t)\dot{X}(t) = F(t)U(t) \quad (4.23)$$

- Τη μέση ισχύ (P_M) που απορροφάται ανά κύκλο κύματος, ή ανά οποιοδήποτε άλλο χρονικό διάστημα που ορίζεται , θα είναι η εξής :

$$P_M = \langle F(t)\dot{X}(t) \rangle = \langle F(t)U(t) \rangle \quad (4.24)$$

όπου $\langle \rangle$ δηλώνει το χρονική μέση τιμή κατά την καθορισμένη περίοδο και $U(t) = \dot{X}(t)$ από εξ.(4.10).

Ισχύς για έναν τρόπο κίνησης

Ας υποθέσουμε ότι τα κύματα είναι μονοχρωματικά (monochromatic), γραμμικά και ότι οι δυνάμεις βρίσκονται μέσα στο σχήμα περίθλασης. Η μέση ισχύς που παράγεται από τις (υδροδυναμικές) δυνάμεις του ρευστού, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.8) και (4.24), είναι:

$$P_{M,f} = \langle F_f(t)U(t) \rangle = \langle [F_s(t) + F_R(t) + F_H(t)]U(t) \rangle$$

όπου οι επιμέρους δυνάμεις δίνονται από τις εξισώσεις (4.11)-(4.16) και η ταχύτητα από την (4.10). **Ο μέσος όρος θα παράγει μη-μηδενικές συνεισφορές μόνο από εκείνες τις συνιστώσες δυνάμεων που βρίσκονται στην ίδια φάση με την ταχύτητα $U(t)$ και έτσι δεν θα συνεισφέρουν η προστιθέμενη μάζα και η υδροστατική δύναμη.**

Ισχύς για 6 τρόπους κίνησης

Αυτή η ιδέα μπορεί εύκολα να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς τρόπους κίνησης, όπως η εξίσωση κίνησης για έναν μόνο τρόπο κίνησης (4.17) επεκτάθηκε στην εξίσωση (4.21) για όλους τους τρόπους. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέση υδροδυναμική ισχύς που παράγεται από ένα σώμα σε γενική κίνηση, δηλαδή με 6 τρόπους κίνησης είναι:

$$P_{M,f} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\mathbb{X}^* \mathbb{U}\} - \frac{1}{2} \mathbb{U}^* \mathbf{B} \mathbb{U} \quad (4.25)$$

όπου ο δείκτης * υποδηλώνει το μιγαδικό συζυγές ανάστροφο (complex conjugate transpose), όταν εφαρμόζεται σε διάνυσμα στήλης ή τετραγωνικό πίνακα. Η παραπάνω έκφραση μπορεί επίσης να γραφτεί:

$$P_{M,f} = \frac{1}{8} \mathbb{X}^* \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} - \frac{1}{2} \left(\mathbb{U} - \frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} \right)^* \mathbf{B} \left(\mathbb{U} - \frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} \right) \quad (4.26)$$

ύπο την προϋπόθεση ότι υπάρχει το \mathbf{B}^{-1} , το οποίο ισχύει για τις περισσότερες περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν. Και οι δύο όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι πάντα θετικοί. **Ο πρώτος όρος είναι σταθερός για μια συγκεκριμένη γεωμετρία, ενώ ο δεύτερος όρος δεν είναι σταθερός δεδομένου ότι το \mathbb{U} μπορεί να ελεγχθεί.**

Έτσι, η μέγιστη τιμή της $P_{M,f}$ δίνεται από τον πρώτο όρο και προκύπτει όταν ο δεύτερος όρος παίρνει την ελάχιστη τιμή του, η οποία είναι μηδέν και έχουμε:

$$P_{opt} = \frac{1}{8} \mathbb{X}^* \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} \quad (4.27)$$

και αυτό προκύπτει όταν $\mathbb{U} - \frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} = 0$, δηλαδή

$$\mathbb{U} = -i\omega\xi = \frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} \Rightarrow \xi = \frac{i}{2\omega} \mathbf{B}^{-1} \mathbb{X} \quad (4.28)$$

Έτσι, η P_{opt} εξαρτάται τόσο από την γεωμετρία του σώματος (μέσω του \mathbf{B}), όσο και από την αλληλεπίδραση προσπιπτόντων κυμάτων και σώματος (μέσω του \mathbb{X}). Επίσης, η Εξ.(4.28) προσδιορίζει ξεκάθαρα την απαιτούμενη κίνηση του σώματος τόσο σε πλάτος (amplitude) όσο και σε φάση, για μέγιστη απορρόφηση ισχύος. Δεδομένου ότι το \mathbf{B} είναι σταθερό μετά την κατασκευή, η απαιτούμενη φάση της ταχύτητας είναι αυτή της δύναμης διέγερσης. Η ένδειξη P_{opt} χρησιμοποιείται για να δηλώσει το μέγιστο, αντί της P_{max} , καθώς η ποσότητα αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη τιμή (optimal value), δηλαδή το καλύτερο που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να μειωθεί από τους περιορισμούς που εισάγονται από το σύστημα λήψης ισχύος (power take-off system) ή άλλους φυσικούς περιορισμούς.

Το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης (capture width) $L(\omega, \beta)$ εισήχθη προηγουμένως στην Εξ.(4.5) ως κατάλληλο μέτρο απορρόφησης ισχύος. Ο Newman(1976) έδειξε το εκπληκτικό αποτέλεσμα ότι είναι δυνατόν να συσχετιστεί ο πίνακας απόσβεσης \mathbf{B} με το διάνυσμα δύναμης διέγερσης (exciting force vector) \mathbb{X} , έτσι ώστε οι εξισώσεις (4.5) και (4.27) να συνδυαστούν και να έχουμε:

$$L(\omega, \beta) = \frac{\lambda}{2\pi} \mathbb{X}^* \mathbf{W}^{-1} \mathbb{X} \quad (\mathbf{W})_{mn} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathbb{X}_m(\theta) \overline{\mathbb{X}_n(\theta)} d\theta \quad (4.29)$$

όπου η άνω γραμμή στο $\overline{\mathbb{X}_n(\theta)}$ δηλώνει το μιγαδικό συζυγή. Έτσι το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης (capture width) και η κίνηση του σώματος που

απαιτείται για την επίτευξη της μέγιστης σύλληψης (maximum capture), εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των προσπιπτόντων κυμάτων και του σώματος όταν αυτό μένει σε σταθερή θέση. Αυτό είναι ένα γενικό και αξιοσημείο αποτέλεσμα.

Η μορφή της Εξ.(4.29) καθίσταται πολύ απλούστερη όταν η συσκευή περιορίζεται σε **έναν τρόπο κίνησης** και έτσι οι εξισώσεις (4.27) και (4.28) γίνονται :

$$P_{opt} = \frac{|\mathbb{X}(\beta)|^2}{8B} \quad \text{όταν} \quad \mathbb{U} = \frac{\mathbb{X}}{2B} \quad (4.30)$$

Ο Newman(1976) επίσης έδειξε ότι η δύναμη διέγερσης \mathbb{X} σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να σχετίζεται με τη γωνιακή εξάρτηση $\mathbb{A}(\beta)$ του ακτινοβολούμενου πεδίου κύματος(radiated wave field). Έτσι, η Εξ.(4.29) μπορεί να αντικατασταθεί από μια από τις ακόλουθες εναλλακτικές εκδοχές:

$$L_{opt}(\omega, \beta) = \lambda \frac{|\mathbb{X}(\beta)|^2}{\int_0^{2\pi} |\mathbb{X}(\theta)|^2 d\theta} = \lambda \frac{|\mathbb{A}(\beta)|^2}{\int_0^{2\pi} |\mathbb{A}(\theta)|^2 d\theta} \quad (4.31)$$

και η επιλογή του τύπου εξαρτάται από το ποιο από τα $\mathbb{X}(\theta)$ και $\mathbb{A}(\theta)$ είναι ευκολότερο να προσδιοριστεί.

4.4.1 Μια Αξονοσυμμετρική Συσκευή (Single Axisymmetric Device)

Η δύναμη διέγερσης \mathbb{X} και η γωνιακή μεταβολή \mathbb{A} θα είναι ανεξάρτητες από την κατεύθυνση πρόσπτωσης θ . Για μια αξονοσυμμετρική συσκευή που λειτουργεί με **ανύψωτική κίνηση** (heave), σύμφωνα με την Εξ. (4.31) έχουμε μια πιο απλή μορφή:

$$L_{opt}(\omega, \beta) = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4.32)$$

Γράφοντας την κίνηση σώματος ως $X(t)=\text{Re}\{\alpha \mathbb{D} e^{-i\omega t}\}$ επιτρέπει στο \mathbb{D} προσδιοριστεί μέσω των Εξ.(4.9) και (4.28) ως:

$$\mathbb{D} = \frac{i}{2\alpha\omega} \times \frac{\mathbb{X}}{B} = \frac{4iP_w}{\alpha k\omega \mathbb{X}} \quad (4.33)$$

και $|\mathbb{D}|$ είναι γνωστό ως **πλάτος μετατόπισης** ή το **λόγος πλάτους**, που αντιπροσωπεύει τον λόγο της μετατόπισης του σώματος προς το πλάτος κύματος σε βέλτιστη λήψη ισχύος (power take-off). Η γραμμική θεωρία και το σχήμα περίθλασης το επιτρέπουν να είναι το πολύ $O(1)$, αλλά αυτό το μέτρο δεν μπορεί να παρέχει ουσιαστικές πληροφορίες για τη φυσική μετατόπιση και η αποδοχή της προβλεπόμενης μέτρησης πρέπει να προσδιορίζεται από πρακτικές εκτιμήσεις. Εάν το πλάτος μετατόπισης προκαλεί υπερβολικά μεγάλες κινήσεις στο μηχανισμό

λήψης ισχύος, μπορεί να παραβιάσει κάποιο φυσικό περιορισμό στην πιθανή κίνηση και αυτό μερικές φορές αναφέρεται ως πρόβλημα τελικής στάσης (end-stop problem). Ένας λόγος που βασίζεται στο πλάτος του προσπίπτοντος κύματος, όπως το $|\mathbb{D}|$, είναι μια χρήσιμη ποσότητα από μια προοπτική μαθηματικής μοντελοποίησης, αλλά η φυσική τιμή που καθορίζει τον τελικό σταθμό (end-stop) εξαρτάται από τη συσκευή και όχι από το αδιάστατο πλάτος.

Η σημασία των Εξ. (4.32) και (4.33) είναι ξεκάθαρη: η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εξαγει ένας αξονοσυμμετρικός πλωτήρας/σημαδούρα σε κίνηση heave δίνεται από $\lambda/2\pi$ ανεξάρτητα από την κλίμακα της συσκευής. **Ωστόσο, ως γενικός κανόνας, το μέγεθος του \mathbb{X} θα αυξηθεί με τη διάμετρο του σώματος και ένα μεγαλύτερο σώμα θα έχει μικρότερο πλάτος μετατόπισης. Συνεπώς, μικρότεροι σημαντήρες θα χρειαστεί να εκτελούν όλο και μεγαλύτερες ταλαντώσεις και αυτό μπορεί να παραβιάζει τους φυσικούς περιορισμούς και τους περιορισμούς μοντελοποίησης.** Μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για την εφαρμογή της θεωρίας περίθλασης σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας το κριτήριο ότι τα αποτελέσματα περίθλασης γίνονται σημαντικά όταν η αδιάστατη παράμετρος $kD > 1,3$ ($D/\lambda > 0,2$) και όπου D θεωρείται η διάμετρος της συσκευής. Καθώς το D γίνεται μικρότερο, η προσέγγιση του point absorber για τον προσδιορισμό του \mathbb{X} από το \mathbb{X}_{inc} , όπως συζητήθηκε στην Εξ.(4.12), γίνεται πιο έγκυρη. Ωστόσο, η ακρίβεια του μοντέλου μπορεί να μειωθεί σε τέτοιες περιπτώσεις, καθώς η μείωση των φαινομένων περίθλασης συνοδεύεται από αύξηση της σημασίας του ιξώδους.

Υπάρχει επίσης μια περαιτέρω εκτίμηση. Εάν το αδιάστατο βέλτιστο πλάτος σύλληψης \hat{L}_{opt} ορίζεται ως ο λόγος του εύρους σύλληψης προς το πλάτος της συσκευής, τότε από την εξίσωση (4.33),

$$\hat{L}_{opt}(\omega, \theta) = \lambda/2\pi D = \lambda/4\pi R \quad (4.34)$$

όπου D και R είναι η διάμετρος και η ακτίνα της συσκευής, αντίστοιχα. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο της κατασκευαστικής απόδοσης, καθώς αυξάνεται με τη μείωση της ακτίνας και δείχνει με την εξ. (4.32), ότι πρέπει να αναζητηθεί ισορροπία μεταξύ αποδεκτού κόστους και ρεαλιστικών πλατών (amplitudes).

Για μια **οριζόντια κίνηση**, ο Newman (1962) έχει δείξει ότι το $A(\theta)$ είναι ανάλογο του $\cos\theta$ και έτσι η Εξ.(4.31) παρέχει το ανάλογο αποτέλεσμα:

$$L_{opt}(\omega, \theta) = \frac{\lambda}{\pi} \cos^2\theta \quad (4.35)$$

Αυτό είναι μέγιστο όταν $\beta = 0$ ή π , δίνοντας ένα βέλτιστο εύρος σύλληψης λ/π όταν η κίνηση του σώματος ευθυγραμμίζεται με τα κύματα. **Έτσι, η μέγιστη απορρόφηση ισχύος για οριζόντια λειτουργία είναι διπλάσια από τη λειτουργία heave. Ο κατακόρυφος και οριζόντιος σημειακός απορροφητής (point absorber) που καταλήγουν στις εξ. (4.32) και (4.35) αντίστοιχα, είναι σημαντικά**

αποτελέσματα, αλλά η σημασία τους δεν έγκειται απλώς σε σημειακούς απορροφητές, αλλά παρέχουν ένα σημείο αναφοράς για τις ιδιότητες απορρόφησης οποιασδήποτε συσκευής σε σύγκριση με έναν σημειακό απορροφητή.

4.5 Περιορισμένη Κίνηση (Constrained Motion)

Ένα μειονέκτημα του βέλτιστου αποτελέσματος της Εξ. (4.28) είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν επιτρέπονται μεγάλα πλάτη μετατόπισης, όπως αυτά που δίνονται από την Εξ. (4.32) για ένα μόνο τρόπο λειτουργίας. Αυτό συνήθως δεν συμβαίνει και το πρόβλημα τελικής στάσης (end-stop problem) θα προσθέσει έναν ακόμα φυσικό περιορισμό στις θεωρήσεις που σχετίζονται με τη διασφάλιση της εγκυρότητας της μοντελοποίησης στο πλαίσιο του σχήματος περίθλασης.

Για ένα σώμα που διεξάγει έναν και μοναδικό τρόπο κίνησης, ο Evans (1981b) επέβαλε έναν περιορισμό:

$$|\mathbb{D}| < \varepsilon \quad (4.36)$$

Η αντίστοιχη μέγιστη απορροφούμενη ισχύς P_{opt}^c , που λαμβάνεται με περιορισμένη βελτιστοποίηση, μπορεί να γραφεί ως:

$$P_{opt}^c(\beta) = \frac{|\mathbb{X}(\beta)|^2}{8B} \{1 - (1 - \delta)^2 H(1 - \delta)\},$$

όπου $\delta = \varepsilon / |\mathbb{D}|$ είναι ο λόγος του μέγιστου επιτρεπτού πλάτους που επιβάλλεται από τον περιορισμό προς τη μετατόπιση σε βέλτιστη απόδοση. Η συνάρτηση $H(x)$ είναι η Heaviside step function (βηματική συνάρτηση), η οποία έχει οριστεί για να πάρει τις τιμές 0 και 1 όταν το όρισμα είναι αρνητικό ή θετικό αντιστοίχως. Έτσι, ο περιορισμός ενεργοποιείται κάθε φορά που $\delta < 1$ και συνοδεύεται από μείωση της μέγιστης ισχύος.

Καθώς η βέλτιστη ισχύς P_{opt} δίνεται από την εξ.(4.30), ορίζουμε τον **λόγο αδιάστατης περιορισμένης απορρόφησης ισχύος** ως :

$$\widehat{P_{opt}^c} = \frac{P_{opt}^c(\beta)}{P_{opt}(\beta)} = 1 - (1 - \delta)^2 H(1 - \delta) \quad (4.37)$$

όπου φαίνεται ξεκάθαρα η επίδραση του περιορισμού.

Εάν ζητηθεί το $\widehat{P_{opt}^c}$ ή το περιορισμένο εύρος σύλληψης $P_{opt}^c(\beta)$ για μια συγκεκριμένη συσκευή, μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση (4.37), αλλά ο

υπολογισμός της δεν είναι καθόλου τετριμμένος. Η παράμετρος περιορισμού δ εξαρτάται από τη δύναμη διέγερσης και την απόσβεση, όπως και η βέλτιστη ισχύς P_{opt} . Αυτές οι δύο ποσότητες πρέπει να υπολογίζονται για συγκεκριμένες συσκευές και ο υπολογισμός τους μπορεί να είναι αναλυτικός ή αριθμητικός, πιο συχνά αριθμητικός.

Ο αρχικός περιορισμός που προέκυψε από τον Evans είναι γενικότερος από αυτόν που παρουσιάστηκε παραπάνω για έναν τρόπο κίνησης και είναι ένας παγκόσμιος περιορισμός συμπληρωματικός για έναν αριθμό σωμάτων που ταλαντεύονται ανεξάρτητα, καθένα από τα οποία μπορεί να απορροφά ενέργεια από το προσπίπτον κυματικό πεδίο (incident wavefield). Επιβάλλεται μέσω του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους ταχυτήτων. Ο Pizer (1993) έχει επεκτείνει αυτόν τον περιορισμό για ένα σώμα που κινείται με περισσότερους από έναν ανεξάρτητους τρόπους, πράγμα που επιτρέπει μια ενδιαφέρουσα εκτίμηση της πιθανής απορρόφησης ισχύος στην πολυδιάστατη (multi-mode) λήψη ισχύος (power take off). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η αναλυτική προσέγγιση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβολή ανεξάρτητων περιορισμών (individual constraints), είτε σε ένα συγκεκριμένο σώμα είτε σε έναν τρόπο κίνησης, κι έτσι πρέπει να επιβληθούν αριθμητικά.

4.6 Συστοιχίες Συσκευών (Arrays of Devices)



Εικόνα 4-7: Συστοιχία AWS (Archimedes Wave Swing) τύπου σημειακού απορροφητή

Πηγή : http://www.4cdesign.co.uk/work/aws-wave-swing-wave-energy-prize/?fbclid=IwAR0UjydlFF4F42UoiltzrlQUx29JiyxYbA1tTkl8vAn_x2PtevNLuGK-aqA

Πολλές συσκευές αναμένεται να λειτουργούν σε μια συστοιχία και η συμπεριφορά των μελών της συστοιχίας μπορεί να ελεγχθεί για την καλύτερη

απόδοση ενός μέλους ή για την καλύτερη απόδοση ολόκληρης της συστοιχίας. Η θεμελιώδης μοντελοποίηση σε συστοιχίες συσκευών κυματικής ενέργειας παρουσιάστηκε ανεξάρτητα από τους Evans (1979) και Falnes (1980). Οι περισσότερες εργασίες έχουν υποθέσει ότι οι συσκευές θα είναι αξονοσυμμετρικές και ο περιορισμός αυτός θα εφαρμοστεί εδώ. Για ένα σύστημα N σωμάτων που περιορίζονται να λειτουργούν μόνο με ανυψωτική κίνηση (heave), η μέγιστη απορρόφηση ισχύος δίνεται από μια εξίσωση της μορφής (4.26),

$$P_{opt} = \frac{1}{8} X^* B^{-1} X.$$

Η μιγαδική δύναμη διέγερσης X και η απόσβεση B περιγράφουν τώρα την αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών N της συστοιχίας και είναι ένα N -διάστατο διάνυσμα στήλης και ένας τετραγωνικός πίνακας $N \times N$ αντίστοιχα.

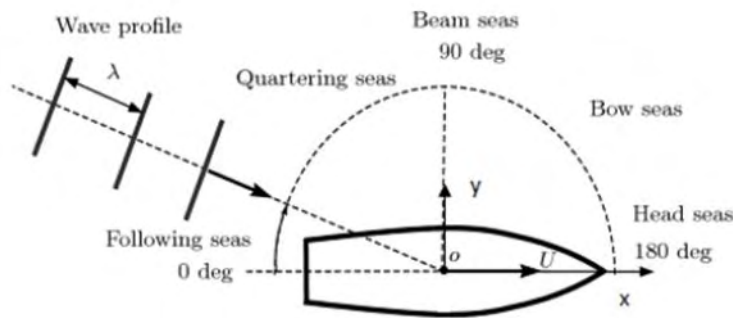
Το αντίστοιχο εύρος αποτελεσματικής σύλληψης (capture width) μπορεί να γραφτεί ως:

$$L_{opt}(\omega, \beta) = \frac{\lambda}{2\pi} Nq(\omega, \beta) \quad (4.38)$$

Είναι γνωστό από την εξ. (4.32) ότι το $\lambda / 2\pi$ είναι το εύρος σύλληψης μίας μόνο συσκευής κατά την ανύψωση (heave) και επομένως το q αντιπροσωπεύει την αναλογία της ισχύος που απορροφάται από τη συστοιχία σε σχέση με εκείνη που θα απορροφάται από τα μέλη της συστοιχίας N που δρουν ανεξάρτητα, κατά την ανύψωση και μόνα τους. **Έτσι, το q εξαρτάται από τις παραμέτρους που καθορίζουν τον σχηματισμό της συστοιχίας και τη γεωμετρία των μελών της, τη συχνότητα του προσπίπτοντος κυματικού πεδίου και τον προσανατολισμό της συστοιχίας σε σχέση με το πεδίο εισερχόμενου κύματος.**

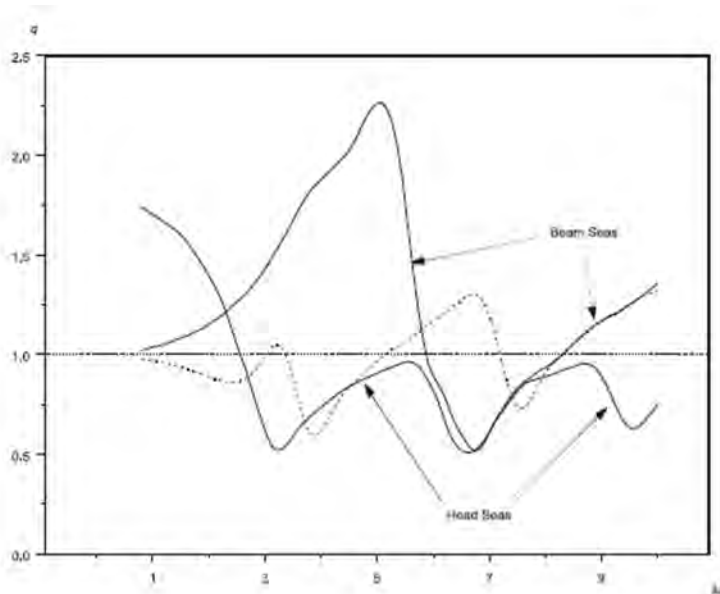
Η τιμή $q = 1$ δείχνει ότι ο σχηματισμός συστοιχίας δεν επηρεάζει την απορρόφηση ισχύος. Η *Ενισχυτική Συμβολή (Constructive Interference)* εμφανίζεται όταν η συνολική ισχύς εξόδου της συστοιχίας υπερβαίνει εκείνη των N ξεχωριστών συσκευών και η *Καταστροφική Συμβολή (Destructive Interference)* συμβαίνει όταν υπάρχει καθαρή απώλεια της παραγόμενης ισχύος, δηλαδή όταν $q > 1$ και $q < 1$ αντίστοιχα. Για μια σειρά σωμάτων δεδομένης διάστασης, ο στόχος είναι να επιτευχθεί $q \geq 1$ με την κατάλληλη επιλογή παραμέτρων λήψης ισχύος (power takeoff) και απόστασης μεταξύ τους (spacing parameters).

Η γενική ιδέα έχει σαφείς αναλογίες με τη θεωρία των κεραιών ραδιοσυχνοτήτων και η πρόβλεψη των αλληλεπιδράσεων, μέσω των πεδίων διάσπαρτων κυμάτων, απαιτεί τον προσδιορισμό των X και B . Αυτό είναι ένα δύσκολο έργο εκτός εάν γίνουν κάποιες απλουστευτικές προσεγγίσεις. Μια από τις αρχικές έρευνες ήταν των Thomas και Evans (1981), οι οποίοι μελέτησαν συστοιχίες μονής και διπλής σειράς, με κάθε σειρά αποτελούμενη από πέντε εξίσου ισάπεχοντα μέλη.



Εικόνα 4-8: Προσδιορισμός των σχετικών γωνιών πρόσπτωσης κύματος
 Πηγή : *Modelling and Simulation of Environmental Disturbances* , Dr Tristian Perez et al.(2007)

Η εικόνα 9 παρακάτω από τους Thomas και Evans (1981) δείχνει τη μεταβολή του παράγοντα q με το αδιάστατο μέτρο $kd = 2\pi d/\lambda$, όπου το d είναι η απόσταση μεταξύ των μελών, για μια σειρά πέντε ημι-βυθισμένων σφαιρών για head seas, beam seas και $\pi/4$ incident seas. Παρουσιάζεται εδώ για επεξηγηματικούς λόγους και όχι με σκοπό να καθορίσουμε το μέγεθος q , δεδομένου ότι η ανάλυση συστοιχιών περιέχει πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων και τα συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν εύκολα από ένα μόνο σχήμα.



Εικόνα 4-9: Μεταβολή του συντελεστή q με την αδιάστατη παράμετρο διαστήματος kd , για μια ομοιόμορφα διαχωρισμένη γραμμική συστοιχία πέντε ημι-βυθισμένων σφαιρών και προσπίπτοντα κύματα που αντιστοιχούν σε beam seas και head seas (συνεχείς γραμμές) και σε $\pi/4$ (διακεκομμένη γραμμή). Η διακεκομμένη γραμμή $q = 1$ είναι ισοδύναμη με καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών συστοιχίας.
 Πηγή : *Ocean Wave Energy*, J. Cruz (2008)

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του διαγράμματος είναι η επιβεβαίωση ότι υπάρχουν περιοχές τόσο ενισχυτικής (constructive interference) όσο και καταστροφικής συμβολής (destructive interference) και ότι αυτές οι περιοχές δεν μπορούν να αποφευχθούν για τις παραμετρικές ρυθμίσεις της μελέτης. Η απόδοση είναι γενικά καλύτερη σε beam seas, αν και όχι πάντα, σύμφωνα με την διαισθητική έννοια της μεγαλύτερης πρόσοψης στα κύματα, παρέχοντας μεγαλύτερη δυνατότητα απορρόφησης. Παρόλο που δεν φαίνονται εδώ, τα μέλη της συσκευής δεν λειτουργούσαν εξίσου αποδοτικά, αν και υπήρχε συμμετρία ως προς το κεντρικό μέλος, σε καμία από τις περιπτώσεις δεν εμφανίστηκε εξασθένηση. Καθολικοί και μεμονωμένοι περιορισμοί επιβλήθηκαν αριθμητικά, ως επέκταση των εξισώσεων (4.37) και (4.38). Διαπιστώθηκε ότι ο περιορισμός των μετατοπίσεων σε δύο ή τρεις φορές το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος δεν ήταν αυστηρά περιοριστικός. Η ενισχυτική συμβολή μειώθηκε σε μέγεθος αλλά οι περιοχές των καταστροφικών παρεμβολών δεν επηρεάστηκαν σημαντικά.

Οι μεταγενέστερες μελέτες από τους McIver (1994), Mavrakos και McIver (1997) και οι Justino και Clément (2003) επικεντρώθηκαν επίσης σε μία ή περισσότερες γραμμικές συστοιχίες μικρών συσκευών τύπου point absorber, σφιχτά αγκυροβολημένες οι οποίες λειτουργούσαν με ανυψωτική κίνηση (heave). Η επέκταση της παραπάνω ανάλυσης περιλαμβάνει την επίδραση των άνιων αποστάσεων, των περιορισμένων κινήσεων, της πλήρους προσομοίωσης περίθλασης και της ταυτόχρονης εκτίμησης και των τριών τρόπων μεταφοράς κίνησης. Ωστόσο, τα γενικά χαρακτηριστικά των επιδόσεων των συστοιχιών που περιγράφονται από τους Thomas και Evans (1981) παραμένουν αμετάβλητα: περιοχές με ενισχυτικές και καταστροφικές συμβολές εμφανίζονται γενικά και τα κέρδη θα συνοδεύονται από απώλειες. Αυτό παραμένει ένα θέμα για πολύ περαιτέρω εργασία.

4.7 Έλεγχος και Σχεδιασμός

Η ανάλυση που έγινε παραπάνω και τα μεγέθη που παρουσιάστηκαν ανήκουν στη βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής ανάλυσης και δεν είναι καθόλου βέβαιο ότι τέτοια επίπεδα ενέργειας μπορούν να επιτευχθούν στην πραγματικότητα. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν αποτελούν χρήσιμο εργαλείο, μιας και μας δίνουν το άνω όριο της ενέργειας που μπορούμε να πάρουμε και μια διαδικασία διαχωρισμού ώστε να φτάσουμε σε καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό που αρκεί να κάνουμε είναι να επικεντρωθούμε στο σχεδιασμό της συσκευής και στον έλεγχο της ισχύς εξόδου από υδροδυναμική σκοπιά.

Οι αρχικές στρατηγικές ελέγχου καταστρώθηκαν για να διασφαλίσουν ότι οι σημειακοί απορροφητές λειτουργώντας σε κανονικά κύματα θα μπορούν να μεγιστοποιήσουν τη μετατρεπόμενη ισχύ. Αυτό βέβαια απαιτεί να επιλεγεί η βέλτιστη φάση και το βέλτιστο πλάτος της ταλάντωσης, ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία. Παρόλο αυτά, η φάση και το πλάτος μπορούν να μεταβάλλονται ανεξάρτητα κι έτσι ο Έλεγχος Φάσης κι ο Έλεγχος Πλάτους αποτελούν σημαντικά κομμάτια του πεδίου του Ελέγχου. Ο όρος Βέλτιστος Έλεγχος χρησιμοποιείται συχνά στις περιπτώσεις όπου σκοπός είναι η μετατροπή του βέλτιστου ποσού ενέργειας. Συνεπώς η μέγιστη απορρόφηση ισχύος, βασισμένη μόνο σε υδροδυναμικές προϋποθέσεις, αντιστοιχεί στο βέλτιστο έλεγχο και καθορίζει τόσο τη φάση όσο και το πλάτος της επιθυμητής κίνησης. Αυτό μπορούμε να το δούμε πιο καθαρά και στις σχέσεις (4.27) και (4.28) και για ένα μόνο τρόπο κίνησης στην (4.30), όπου τα βέλτιστα αποτελέσματα βρίσκονται αφού αναγκάσουμε τη φάση και το πλάτος να πάρουν συγκεκριμένες τιμές.

Σύμφωνα με διάφορες έρευνες στις οποίες αναφέρεται και ο Falcao (2009) φάνηκε ότι **μια συσκευή είναι αποδοτικός απορροφητής όταν η συχνότητα ταλάντωσης της είναι ίδια με τη συχνότητα των προσπιπτόντων κυμάτων, δηλαδή βρίσκεται σε συνθήκες συντονισμού ή έστω κοντά σε αυτές. Για ένα σώμα με ένα τρόπο κίνησης σε κανονικά κύματα αυτό συμβαίνει όταν η ταχύτητα του σώματος έχει την ίδια φάση με τη δύναμη διέγερσης.** Η διαδικασία όπου ρυθμίζουμε τα δεδομένα εισόδου του ΡΤΟ ώστε να επιτύχουμε αυτή την ταύτιση φάσης καλείται *Έλεγχος Φάσης*.

Όπως φαίνεται κι από τη σχέση (4.17) για κίνηση κανονικού κύματος, οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μηχανικό σύστημα με δύο συστήματα παραμέτρων. Για ευκολία αυτές οι παράμετροι ορίζονται ως *Γεωμετρικές Παράμετροι* και *Παράμετροι Ελέγχου*, αν και αυτή δεν αποτελεί επίσημη ορολογία τους. Οι Γεωμετρικές Παράμετροι ορίζουν τη δομή της συσκευής και δεν μπορούν να αλλάξουν εφόσον αυτή κατασκευαστεί και συμβολίζονται με το διάνυσμα **G**. Οι Παράμετροι Ελέγχου ορίζουν το μηχανισμό λήψης ισχύος και συνήθως αποτελούν μεταβλητές παραμέτρους, ικανές να ρυθμιστούν έτσι ώστε να ταιριάζουν στο περιβάλλον των κυμάτων και συμβολίζονται με το διάνυσμα **J**. Ο αριθμός των συνιστωσών στα δύο διανύσματα, **G** και **J**, συνήθως δεν είναι ο ίδιος και θα εξαρτάται από τη δομή της συσκευής και την πολυπλοκότητα του μηχανισμού λήψης ισχύος. Σκοπός του *Σχεδιασμού* είναι να καθορίσει τις γεωμετρικές παραμέτρους **G** και κάποιος μέρος των παραμέτρων ελέγχου **J**. Αντίστοιχα σκοπός του *Ελέγχου* είναι να κάνει τη συσκευή να λειτουργήσει αποδοτικά, κατά κάποιο τρόπο, πιθανώς χρησιμοποιώντας μια καλύτερη τιμή του **J** αφότου αυτό έχει φτιαχτεί. Βέβαια η διάκριση των **G** και **J** μπορεί να είναι εύκολη στη χρήση, αλλά δεν είναι απόλυτη, αφού υπάρχει ανάμειξη των παραμέτρων τους στο στάδιο του σχεδιασμού.

4.7.1 Ρύθμιση (Tuning) και Καμπύλη Εύρους Συχνοτήτων (Bandwidth)

Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης του βέλτιστου ελέγχου είναι ότι δε συμπεριλαμβάνει ένα μοντέλο για το μηχανισμό λήψης ισχύος, αναγνωρίζει ότι είναι απαραίτητος ένας τέτοιος μηχανισμός αλλά υποθέτει ότι έχει τη <<μορφή μαύρου κουτιού>>, ότι δηλαδή μπορούμε να ρυθμίσουμε τα δεδομένα εισόδου και να κρίνουμε τα δεδομένα εξόδου που παίρνουμε αλλά δε γνωρίζουμε τι γίνεται στο εσωτερικό του και έτσι θεωρούμε ότι μπορεί πάντα να ρυθμιστεί ώστε να διασφαλίσει τη μέγιστη απορρόφηση ισχύος. Συνεπώς δεν κάνει καμία αναφορά στην εξίσωση που διέπει την κίνηση της συσκευής ή στη συνεισφορά της εξωτερικής δύναμης. Αυτή μπορεί να αποτελείται από δυνάμεις πρόσδεσης και δυνάμεις του μηχανισμού λήψης ισχύος ή μόνο από τους περιορισμούς πρόσδεσης που θα συμπεριλαμβάνουν και το μηχανισμό λήψης ισχύος. Αυτή ήταν η πρακτική μέχρι τώρα που παρουσιάζονταν η μέση ισχύς κι άλλες συναφείς ποσότητες, ως συναρτήσεις της παραμέτρου β , οποία εκφράζει τη γωνία πρόσπτωσης του κύματος.

Χρησιμοποιώντας ξανά την αντιστοιχία με τα ταλαντευόμενα συστήματα, όπως έγινε με την έκφραση της δύναμης ακτινοβολίας $F_R(t)$ στις Εξ. (4.14) και (4.15), γράφουμε την εξωτερική δύναμη $F_{ext.}(t)$:

$$F_{ext.}(t) = \text{Re}\{-\overline{Z_E}(\omega)\mathbb{U}e^{-i\omega t}\}, \quad Z_E(\omega) = B_E(\omega) + i\omega A_E(\omega) \quad (4.40)$$

όπου το $Z_E(\omega)$ μπορεί να περιγραφεί ως η μηχανική αντίσταση και \mathbb{U} είναι η συνήθης μιγαδική ταχύτητα, δηλαδή $\mathbb{U} = -i\omega\xi$, όπου αυτή η μορφοποίηση για ένα σώμα σε ένα τρόπο κίνησης μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε μία multi-mode κίνηση.

Θεωρώντας την εξίσωση κίνησης στη μορφή της (4.20) κι αντικαθιστώντας για τη μορφή της $F_{ext.}(t)$ στην (4.40), παίρνουμε τη μιγαδική ταχύτητα και μετατόπιση :

$$\mathbb{U} = \frac{\mathbb{X}}{\overline{Z_T}(\omega) + \overline{Z_E}(\omega)} = -i\omega\xi \quad (4.41)$$

Ο στιγμιαίος ρυθμός εργασίας της εξωτερικής δύναμης $F_{ext.}(t)U(t)$ και η στιγμιαία εξαγόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση $P_{ext.} = -F_{ext.}(t)U(t)$, με το πλην(-) να παρέχει τη σύνδεση μεταξύ του ρυθμού εργασίας και της απορροφούμενης ισχύος. Χρησιμοποιώντας τις (4.40) και (4.41) η μέση εξαγόμενη ισχύς γίνεται :

$$P_{ext.} = -\langle F_{ext.}(t)U(t) \rangle = \frac{1}{4}(Z_E + \overline{Z_E})|\mathbb{U}|^2 = \frac{|\mathbb{X}|^2}{4} \frac{(Z_E + \overline{Z_E})}{|\overline{Z_T} + \overline{Z_E}|^2} \quad (4.42)$$

με το Z_T να θεωρείται σταθερό, η ποσότητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν

$$Z_E = \overline{Z_T} \quad (4.43)$$

για να δώσει $P_{max} = \max\{P_{ext.}\} = \frac{|\mathbb{X}|^2}{8B}$, όταν $\mathbb{U} = \frac{\mathbb{X}}{2B}$ (4.44)

Η παραπάνω σχέση είναι σύμφωνη με το βέλτιστο αποτέλεσμα της (4.30) κι η προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί από ένα σώμα με ένα τρόπο κίνησης σε ένα σώμα με περισσότερους τρόπους κίνησης κι επίσης βεβαιώνεται ότι ισχύουν τα βέλτιστα αποτελέσματα που εξήχθησαν νωρίτερα. Ο έλεγχος που ορίστηκε από τη σχέση (4.40), συνήθως αναφέρεται ως *Συζυγής Μιγαδικός Έλεγχος*. Η δομή του ελέγχου μπορεί να φανεί σχηματίζοντας το λόγο των δύο όρων των σχέσεων (4.42) και (4.44) κι έπειτα χρησιμοποιώντας την (4.41),

$$\text{ώστε } \frac{P_{ext}}{P_{max}} = 2B \frac{Z_E + \bar{Z}_E}{|Z_T + \bar{Z}_E|^2} = \left\{ 1 - \frac{|Z_T - \bar{Z}_E|^2}{|Z_T + Z_E|^2} \right\} \quad (4.45)$$

στην οποία φαίνεται καθαρά η σημαντικότητα τη σχέσης μεταξύ Z_T και Z_E .

Είναι σίγουρα ανεπαρκές να περιορίσουμε το Z_E ώστε να περιέχει μόνο τον όρο της απόσβεσης, το οποίο θα σήμαινε ότι ο Z_E είναι πραγματικός. Τόσο το πραγματικό και φανταστικό μέρος του Z_E θα είναι σημαντικά αλλά ο βαθμός σημαντικότητας τους εξαρτάται από τα σχετικά μεγέθη του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του Z_T . Μια ενδιαφέρουσα μελέτη πάνω στην εφαρμογή του συζυγή ελέγχου στη μονάδα του Salter Duck έχει γίνει από τον Nebel (1992), όπου περιγράφει τα δυνατά κι αδύνατα σημεία της μεθόδου.

Τα βέλτιστα αποτελέσματα της ενότητας της υδροδυναμικής απόδοσης δείχνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, ενώ η εξαγόμενη ισχύς εξαρτάται από τη μορφή του συστήματος λήψης ισχύος. Συνεπώς η P_{max} της σχέσης (4.44) εξαρτάται από τη μορφή της F_{ext} στην (4.40) και μια διαφορετική έκφραση ίσως να μην παρήγαγε τόση εξαγόμενη ισχύ. Σε όρους διανύσματος ελέγχου \mathbf{J} , η (4.40) γίνεται :

$$\mathbf{J} = (\text{Re}\{Z_E\}, \text{Im}\{Z_E\}) \quad (4.46)$$

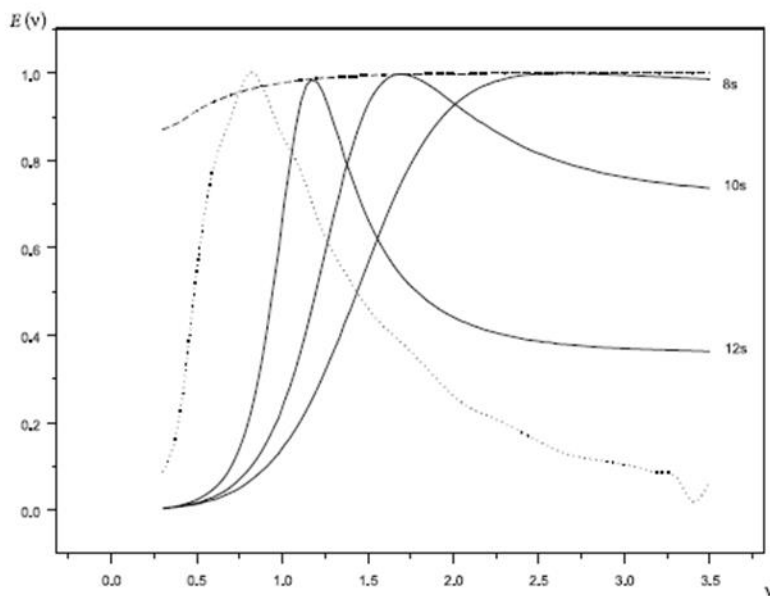
και η διαδικασία που υιοθετήθηκε είναι ισοδύναμη με το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή τον καθορισμό της P_{max} από τη σχέση :

$$P_{max} = \max\{P_{ext}(\omega; \mathbf{J})\} \quad (4.47)$$

για άγνωστο \mathbf{J} , με δεδομένα από τις σχέσεις (4.40), (4.42) και (4.46). Ισοδύναμα και συνηθέστερα αυτή η σχέση θα μορφοποιείται με τη χρήση του εύρους αποτελεσματικής σύλληψης $L(\omega; \mathbf{J})$ από τη σχέση (4.5), μιας και δεν εξαρτάται από το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος.

Υποθέτουμε ότι το σύστημα συντονίζεται ώστε να δίνει τη μέγιστη εξαγόμενη ισχύ σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ω_T , η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον των κυμάτων. Αυτό επιτρέπει να βρούμε το \mathbf{J} , περιγράφοντας το από το $J_0(\omega_T)$ και θεωρώντας το σταθερό. Το εύρος συχνοτήτων (**bandwidth**) δίνεται από τη συνάρτηση $L(\omega; J_0(\omega_T))$ και αυτή μας δίνει τη μεταβολή του εύρους αποτελεσματικής σύλληψης με το ω για ένα σύστημα συντονισμένο στην ω_T . Δε σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή του L βρίσκεται στην ω_T , μιας κι η εξάρτηση των υδροδυναμικών συντελεστών από την ω μπορεί να είναι ισχυρή.

Κάποια παραδείγματα καμπυλών εύρους συχνοτήτων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, τα οποία έχουν ληφθεί από την αριθμητική μελέτη του Bristol Cylinder, μια WEC συσκευή πλήρους κλίμακας από το Πανεπιστήμιο του Bristol, από τους Thomas και Ó Gallachóir (1993). Η συσκευή ανήκει στην κατηγορία *Τρίτης Γενιάς* κι η ισχύς εξάγεται από δύο τρόπους κίνησης, ενώ στο παρόν μοντέλο η λήψη ισχύος επηρεάζεται από σφικτά δεμένα ελαστικά καλώδια. Μια πλήρης περιγραφή της συσκευής, μαζί με μια προσέγγιση της μοντελοποίησης και μια πειραματική μελέτη δίνονται από τους Davis et al. (1981). Οι υπολογισμοί έγιναν για μια συσκευή ακτίνας 6m, η οποία λειτουργεί σε νερό βάθους 42m και με ένα ελεύθερο ύψος 3m πάνω από τον κύλινδρο. Χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατο μοντέλο κι έτσι οι καμπύλες εκφράζουν υδροδυναμική απόδοση.



Εικόνα 4-10: Τυπικές καμπύλες εύρους συχνοτήτων για το Bristol Cylinder, όπου φαίνεται η μεταβολή της υδροδυναμικής απόδοσης E με την αδιάστατη συχνότητα ν για τρεις συχνότητες συντονισμού (συνεχόμενες γραμμές). Η καμπύλη μέγιστης απόδοσης (διακεκομμένη) και η καμπύλη της πηγής του South Uist (διακεκομμένη-τελείες) φαίνονται επίσης. Πηγή : Ocean Wave Energy, J. Cruz (2008)

Φαίνονται τρεις καμπύλες που υποδηλώνουν συντονισμό (tuning) για κύματα περιόδων (T) 8s, 10s και 12s, και το μέτρο της συχνότητας είναι η αδιάστατη ποσότητα $\nu = \omega^2 h/g$. Η καμπύλη της μέγιστης υδροδυναμικής απόδοσης φαίνεται να προσεγγίζεται σε κάθε συχνότητα συντονισμού. **Φαίνεται ότι η καμπύλη εύρους συχνοτήτων στενεύει όσο αυξάνει η περίοδος, με αντίστοιχη αύξηση του μήκους κύματος. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτή η συσκευή λειτουργεί καλύτερα και πολύ αποδοτικά όταν οι τροχιές των μοριων είναι κυκλικές, όπως στα βαθιά ύδατα, και γίνεται λιγότερο αποδοτική όταν αυξάνει η εκκεντρότητα των ελλειπτικών τροχιών.** Αυτό φαίνεται κι αν δούμε ότι η καμπύλη των 8s είναι η πιο φαρδιά κι η

καμπύλη των 12s η πιο στενή. Έτσι καταλήγουμε στο γενικό συμπέρασμα ότι η μεταβολή των παραμέτρων της καμπύλης εύρους συχνοτήτων (bandwidth) αποτελεί σημαντική θεώρηση. Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο κίνησης και τη γεωμετρία της συσκευής κι έτσι κάποιες συσκευές παρουσιάζουν φαρδιά καμπύλη με μεγάλο εύρος (broad-banded) ενώ κάποιες άλλες στενή καμπύλη (narrow-banded). Παρόλο αυτά, όπως φάνηκε κι από το παράδειγμα **είναι πιθανό για μία συσκευή να έχει φαρδιά καμπύλη για ένα κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων και στενή για ένα άλλο κομμάτι.**

4.7.2 Σχεδιασμός

Μια κανονικοποιημένη μορφή του φάσματος του South Uist που είδαμε στην αρχή του κεφαλαίου φαίνεται κι ως διακεκομμένη γραμμή στο ακριβώς από πάνω σχήμα, με την κανονικοποίηση να γίνεται αν διαιρέσουμε τη φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) με το μέγιστο επίπεδο ισχύος στο φάσμα. Αυτό που χρειάζεται να κάνουμε είναι να δείξουμε πως η πηγή-στόχος αλληλεπιδρά με την προσέγγιση του μοντέλου και να βρούμε που πρέπει να λειτουργεί μια συσκευή μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα. Συνεπώς η λειτουργία μιας συσκευής πρέπει με κάποιο τρόπο να στοχεύει σε ένα αντιπροσωπευτικό(-ά) φάσμα (ή φάσματα) τοποθεσίας. Αναγνωρισμένοι μηχανισμοί για να ικανοποιηθεί αυτή η απαίτηση περιλαμβάνουν το συντονισμό σε μια κατάλληλη συχνότητα ή κάποια μεθοδολογία που θα επηρεάζει την καμπύλη συχνοτικού φάσματος της συσκευής. Αυτές είναι οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην ιδέα του ελέγχου όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, αλλά ο έλεγχος δεν παρέχει το μόνο μηχανισμό μιας και κάθε ευελιξία στη γεωμετρική κατασκευή της συσκευής, οι οποίες συνοψίζονται στο διάγραμμα **G**, μπορεί επίσης να έχει πιθανό αντίκτυπο. Οι γεωμετρικές παράμετροι ενσωματώνονται στην έννοια του σχεδιασμού, μόνο από υδροδυναμική σκοπιά και αυτό είναι ένα αναγνωρισμένο όριο της παρούσας προσέγγισης.

Εδώ μπορούμε να κάνουμε κάποια προκαταρκτικά σχόλια γύρω από δύο συγκεκριμένες υδροδυναμικές πλευρές του σχεδιασμού της συσκευής. Αρχικά να αναφέρουμε ότι είναι ευρέως αποδεκτό ότι οι WECs που είναι καλοί απορροφητές της κυματικής ενέργειας είναι και καλοί γεννήτορες κυματικής ενέργειας, δηλαδή αν το σώμα αναγκάζεται να κινηθεί με τον προβλεπόμενο τρόπο κίνησης του, με το νερό αρχικά σε ηρεμία, τότε θα δημιουργηθεί μια μονοδιάστατη (unidirectional) ακολουθία κυμάτων. Συμπληρωματικά έχουμε και τον περιορισμό ότι το πλάτος της κίνησης που αναγκάζεται να κάνει το σώμα θα είναι συγκρίσιμο με το πλάτος του παραγόμενου κύματος για έναν αποδοτικό γεννήτορα κυμάτων, ο οποίος θα ακολουθεί τη χρήση της μοντελοποίησης που γίνεται σε συνθήκες περίθλασης.

Κατά δεύτερον βλέπουμε ότι οι περισσότερες συσκευές πρώτης και δεύτερης γενιάς είτε έχουν ισχυρή εξάρτηση από την τοποθεσία που βρίσκονται, είτε είναι τελείως ανεξάρτητες από αυτήν. Συνήθως η διάκριση αυτή εξαρτάται από

το αν η συσκευή είναι στηριγμένη στην ακτή ή είναι μια μικρή υπεράκτια (offshore) συσκευή. Μια τυπική συσκευή στηριγμένη στην ακτή, πρώτης γενιάς, είναι μια OWC που έχει κατασκευαστεί για να χρησιμοποιεί μια μικρή τοποθεσία της ακτής ως χείμαρρο, ενώ μια παράκτια δεύτερης γενιάς συσκευή αναμένεται να λειτουργεί καλά σε ένα μεγάλο εύρος τοποθεσιών και καταστάσεων θαλάσσης. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων συνδέεται ουσιαστικά με την καμπύλη συχνοτικού φάσματος : **οι συσκευές συγκεκριμένης τοποθεσίας παρουσιάζουν συνήθως στενή καμπύλη, ενώ οι υπεράκτιες συσκευές προορίζονται να έχουν φαρδύτερη καμπύλη, κάτι που βέβαια δε συμβαίνει πάντα.**

Αυτό φαίνεται και στο παράδειγμα του Pico, όπου απεικονίζεται η διαφορά μεγέθους των μέγιστων επιπέδων ισχύος και του εύρους του φάσματος μεταξύ της offshore και onshore πηγής. Παρόλο αυτά μιας κι οι πιθανές offshore τοποθεσίες καθορίζονται από κριτήρια προερχόμενα από τη μελέτη της κυματικής πηγής, **ακόμη κι οι φαινομενικά ανεξάρτητες τοποθεσίες WECs θα απαιτούν αλλαγές για να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή ισχύος τους. Οι αλλαγές αυτές υπαγορεύονται από παράγοντες όπως τα πλάτη απόκρισης του σώματος στις κυρίαρχες συχνότητες ενέργειας και οι περιορισμοί του μηχανισμού λήψης ισχύος.** Έτσι είναι σημαντικό να κατέχουμε μοντέλα που μπορούν να ανταποκριθούν στις παραπάνω απαιτήσεις.

Εδώ να υπενθυμίσουμε ότι ως κατάσταση θάλασσας (sea state) ορίζεται μια περιγραφή των ιδιοτήτων των θαλάσσιων επιφανειακών κυμάτων σε δεδομένη στιγμή και δεδομένη τοποθεσία και συνήθως δίνεται σε όρους κυματικού φάσματος.

Τώρα ας θεωρήσουμε μια συσκευή που λειτουργεί σε μια κατάσταση θάλασσας, με πυκνότητα ενέργειας $S_f(f)$ ή πυκνότητα ισχύος $P(f)$. Η συνολική ισχύς του προσπίπτοντος φάσματος είναι $P_\infty = \int_0^\infty P(f) df = \rho g \int_0^\infty S_f(f) c_g(f) df$. Αξιολογώντας τη δυνατότητα απορρόφησης ισχύος μιας συγκεκριμένης συσκευής σε μια δεδομένη τοποθεσία χρειάζεται να γνωρίζουμε ότι μόνο ένα μέρος αυτού του φάσματος ισχύος μπορεί να θεωρηθεί προσιτό και άρα στοχεύσιμο. Έτσι εισάγεται η ισχύς στόχος P_T του φάσματος ως :

$$P_T = P[f_1, f_2] = \rho g \int_{f_1}^{f_2} S_f(f) c_g(f) df \quad (4.48)$$

Η φυσική συχνότητα f (σε Hz) ίσως να μην είναι το καλύτερο μέγεθος συχνότητας για το μαθηματικό μοντέλο, όπως κι από το τελευταίο σχήμα κι η συχνότερη εναλλακτική είναι η γωνιακή συχνότητα ω . Άλλες χρήσιμες εναλλακτικές είναι τα αδιάστατα μεγέθη $\nu = \omega^2 h/g$ και $\omega^2 D/g$, με το πρώτο να είναι χρησιμότερο σε ενδιάμεσα ή ρηχά ύδατα και το δεύτερο σε βαθιά. Αυτό οφείλεται στην κατάλληλη επιλογή κλίμακας μήκους, που διαλέγουμε για την αδιαστατοποίηση σε κάθε περίπτωση. Για να καλύψουμε κάθε περίπτωση, γράφουμε την P_T ως :

$$P_T = P[\mu_1, \mu_2] = \int_{\mu_1}^{\mu_2} P_\mu(\mu) d\mu, \quad \text{όπου} \quad P_\mu(\mu) = \rho g c_g S_\mu(\mu) \frac{d\mu}{df} \quad (4.49)$$

το οποίο συμπεριλαμβάνει όλες αυτές τις εφαρμογές, επιτρέποντας στο μ να είναι ένα κοινό μέγεθος της συχνότητας με το φυσικό μέγεθος να αντιστοιχεί σε $\mu = f$. Ένα παράδειγμα δίνεται αν συγκρίνουμε τα σχήματα 4.2 και 4.10 για το φάσμα του South Uist. Στο τελευταίο σχήμα φαίνεται το εύρος $0.3 \leq \nu \leq 3.5$ κι αυτό αντιστοιχεί στο εύρος $0.0042 \leq f \leq 0.144$ του αρχικού σχήματος. Το κομμάτι στόχος του φάσματος έχει επίπεδα μέσης ισχύος 43.2 kW/m, σε αντίθεση με την τιμή 47.8 kW/m, που αναφέρθηκε για ολόκληρο το φάσμα.

Η απλούστερη στρατηγική για τη διεύρυνση της καμπύλης εύρους συχνοτήτων μιας συσκευής με σταθερή καθορισμένη γεωμετρία είναι να μεγιστοποιήσουμε το εύρος αποτελεσματικής σύλληψης κι αυτό επιτυγχάνεται αν καθορίσουμε το διάνυσμα των παραμέτρων ελέγχου \mathbf{J}_1 από τη σχέση

$$L_1(\mathbf{J}_1) = \text{Max} \left\{ \frac{1}{L_T} \int_{\mu_1}^{\mu_2} L(\mu; \mathbf{J}(\mu)) d\mu \right\}, \quad L_T = \int_{\mu_1}^{\mu_2} L_{max}(\mu) d\mu. \quad (4.50)$$

Μιας και ο παρανομαστής L_T αντιστοιχεί στην περιοχή κάτω από τη διακεκομμένη γραμμή του σχήματος, η μέγιστη τιμή του $L_1(\mathbf{J})$ είναι μονάδα κι η καμπύλη που προκύπτει από αυτό το μέγεθος είναι $L(\mu, \mathbf{J}_1)$. Η διαδικασία βελτιστοποίησης γενικά θα απαιτεί αριθμητικές μεθόδους και η πολυπλοκότητα τους θα εξαρτάται από τον αριθμό των παραμέτρων ελέγχου που περιέχονται στο \mathbf{J} . Παρόλο αυτά ο καθορισμός του L_T συνδέεται με το σταθερό παράγοντα κλίμακας και χρειάζεται να υπολογισθεί μόνο μια φορά. **Μια τέτοια προσέγγιση αντιστοιχεί στην απορρύθμιση (de-tuning), αφού η στρατηγική επιλογής των παραμέτρων επιχειρεί να απομακρυνθεί από την επιρροή του συντονισμού (resonance).**

Το βασικό μειονέκτημα της (4.50) είναι ότι παρόλο ότι αντιμετωπίζει τα θεωρούμενα μειονεκτήματα στην καμπύλη εύρους συχνοτήτων (bandwidth), δε διασφαλίζει ότι οποιαδήποτε βελτίωση στην καμπύλη θα λάβει χώρα σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του εύρους συχνοτήτων. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα, όπου η διακεκομμένη γραμμή δείχνει μια κανονικοποιημένη μορφή της πηγής και είναι ξεκάθαρο ότι οποιαδήποτε βελτίωση στην καμπύλη θα πρέπει να ταιριάζει με την περιοχή όπου η πηγή παίρνει τις μέγιστες τιμές της. Για να αντιμετωπίσουμε αυτή την έλλειψη, θεωρούμε το μέτρο

$$L_2(\mathbf{J}_2) = \text{Max} \left\{ \frac{1}{P_T L_T} \int_{\mu_1}^{\mu_2} P_\mu(\mu) L(\mu; \mathbf{J}(\mu)) d\mu \right\}, \quad (4.51)$$

Με τη βέλτιστη τιμή \mathbf{J}_2 και την αντίστοιχη συνάρτηση συχνοτικού εύρους φάσματος να είναι $L(\mu, \mathbf{J}_2)$. Είναι προφανές ότι η πυκνότητα ισχύος προσφέρει μια στάθμιση (weighting) που κινεί την καμπύλη προς τις περιοχές στόχους με την υψηλότερη ισχύ. Εδώ να σημειώσουμε ότι ο παράγοντας κλίμακας $P_T L_T$ είναι μια εναλλακτική λύση, αφού μπορεί να μην περιέχει μεταβλητές παραμέτρους αλλά μπορεί να φανεί χρήσιμος από πρακτική αριθμητική σκοπιά.

Τόσο οι εξισώσεις (4.50) και (4.51) περιγράφουν μια προσέγγιση αποσυντονισμού για τη βελτίωση της καμπύλης εύρους συχνοτήτων (bandwidth) για ένα σώμα καθορισμένης γεωμετρίας αλλά καμία δε λαμβάνει υπόψιν της τις παραμέτρους του σώματος παρά μόνο στον υπολογισμό των υδροδυναμικών συντελεστών. Αυτή η έλλειψη καλύπτεται αν συμπεριλάβουμε το διάνυσμα παραμέτρων του σώματος \mathbf{G} στο σύστημα αγνώστων και συνεπώς η (4.51) επεκτείνεται ώστε να παραχθεί το τελικό μέγεθος :

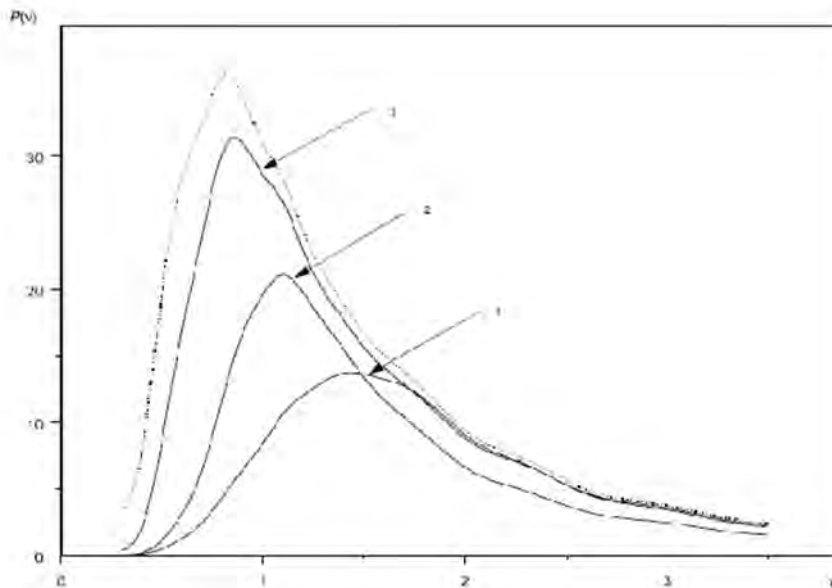
$$L_3(\mathbf{G}_3, \mathbf{J}_3) = \text{Max} \left\{ \frac{1}{P_T} \int_{\mu_1}^{\mu_2} P_\mu(\mu) L(\mu; \mathbf{G}(\mu), \mathbf{J}(\mu)) d\mu \right\}, \quad (4.52)$$

με την αντίστοιχη καμπύλη εύρους (bandwidth) $L(\mu, \mathbf{G}_3, \mathbf{J}_3)$.

Μια παραλλαγή της πάνω σχέσης είναι η :

$$\widehat{L}_3(\mathbf{G}_3, \mathbf{J}_3) = \text{Max} \left\{ \frac{1}{P_T} \int_{\mu_1}^{\mu_2} P_\mu(\mu) \widehat{L}(\mu; \mathbf{G}(\mu), \mathbf{J}(\mu)) d\mu \right\}, \quad (4.53)$$

όπου το \widehat{L} είναι το αδιάστατο εύρος σύλληψης όπως ορίστηκε στην εξίσωση (4.34) και η σημαντικότητα του επιβεβαιώνει την παρουσία του γεωμετρικού πλάτους της συσκευής στη διαδικασία απορρόφησης ισχύος. Η ποσότητα L_T δεν εμφανίζεται στις (4.52) και (4.53), αφού εξαρτάται από το \mathbf{G} κι ο υπολογισμός του πιθανώς να απαιτούσε μεγαλύτερη προσπάθεια και να μη μας έδινε και την καλύτερη στρατηγική.



Εικόνα 4-11: Μεταβολή της πυκνότητας ισχύος $P(v)$ με την αδιάστατη συχνότητα v για το Bristol Cylinder για τις τρεις στρατηγικές βελτιστοποίησης των Εξ.(4.50)-(4.53) (συνεχείς γραμμές) με την πηγή στόχο του South Uist (διακεκομμένη) Πηγή : *Ocean Wave Energy*, J. Cruz (2008)

Τα μεγέθη των εξισώσεων (4.50)-(4.52) χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τους Thomas και Ó Gallachóir (1993) προσπαθώντας να φτιάξουν ένα μοντέλο σχεδιασμού για το Bristol Cylinder. Στην Εικόνα 4.11 φαίνονται οι ισοδύναμες δισδιάστατες μορφές των L_1, L_2, L_3 για το Bristol Cylinder, για τον οποίο δίνεται ένα μέτρο της βασικής του απόδοσης από τις καμπύλες εύρους συχνοτήτων (bandwidth) του σχήματος 4.10. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την πυκνότητα ισχύος της πηγής των εικόνων 4.2 και 4.10 κι αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως η ισχύς στόχος. Όπως αναμένεται μια παραπάνω βελτίωση της καμπύλης παρέχεται από τα L_1, L_2, L_3 αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας για τα L_1, L_2 την ίδια σταθερή γεωμετρία με αυτή της εικόνας 4.10. Η βελτίωση που επετεύχθη μέσω της στόχευσης της πηγής είναι ξεκάθαρη και δείχνει μια σημαντική πλευρά του σχεδιασμού, αν και μόνο από υδροδυναμική σκοπιά

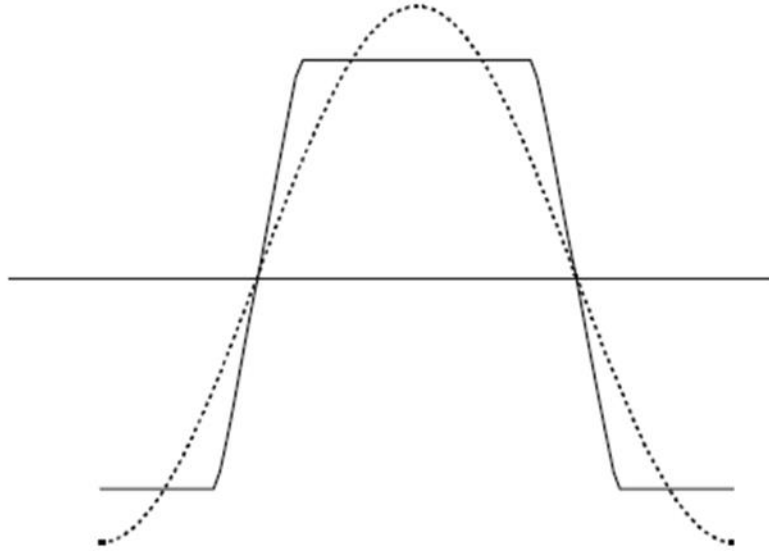
Η κομβική απαίτηση αυτών των προσεγγίσεων είναι να υπάρχει ένα ακριβές υδροδυναμικό μοντέλο για τον καθορισμό τους εύρους αποτελεσματικής σύλληψης $L(v, G, J)$. Άρα είναι απαραίτητο να μπορούν να καθοριστούν οι υδροδυναμικοί συντελεστές σε έναν αποδεκτό βαθμό ακρίβειας, ώστε να είναι πραγματοποιήσιμη η αριθμητική διαδικασία βελτιστοποίησης. Μια τέτοια προσέγγιση προϋποθέτει την αριθμητική εκτίμηση τους σε παραγώγους και συνήθως αντιστοιχεί σε μια απαίτηση ακρίβειας τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερης από ότι αν οι συντελεστές χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά στην εξίσωση κίνησης. Αυτές οι προϋποθέσεις θέτουν αυστηρούς περιορισμούς στις αριθμητικές μεθόδους. Επίσης όταν διεξάγεται μια αριθμητική μελέτη για τον καθορισμό των βέλτιστων G και J , υπάρχει και η ανάγκη να επιβληθούν περιορισμοί αντιπροσωπευτικοί του επιτρεπόμενου εύρους γεωμετρικών παραμέτρων. Αυτές οι στρατηγικές πρέπει επίσης να εφαρμοστούν αριθμητικά, αλλά αυτό δεν έχει παρά ένα πλεονέκτημα, ότι έπειτα είναι σχετικά εύκολο να περιορίσουμε οποιαδήποτε παράμετρο σχεδιασμού σε συγκεκριμένες περιοχές.

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να στοχεύει τη συσκευή σε ένα συγκεκριμένο φάσμα ισχύος αλλά δεν είναι ολοκληρωμένη ως προς το σχεδιασμό. Θα υπάρχουν πολλές διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας, οι οποίες χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν και οποιαδήποτε διαδικασία βελτιστοποίησης χρειάζεται να διευθετήσει αυτό το πρόβλημα. Θα μπορούσε να προσφέρει μια σημαντική μέθοδο διαλογής για τον καθορισμό του πότε μπορεί ή όχι μια συσκευή να λειτουργεί για μια σειρά καταστάσεων θαλάσσης.

4.7.3 Στρατηγικές Ελέγχου

Η μεθοδολογία των παραπάνω ενοτήτων αφορούσε μια προσέγγιση στο πεδίο της συχνότητας, όμως ένα τέτοιο πεδίο κυμάτων όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 4.2 πιθανώς να μην παρέχει μια αποδεκτή μέθοδο σχεδιασμού της συσκευής

όταν αυτή έρχεται αντιμέτωπη με μεγάλα κύματα σε μια θάλασσα όπου επικρατούν γενικά ήπιες συνθήκες. Επίσης το σύστημα λήψης ισχύος ενδέχεται να μην μπορεί να λειτουργήσει με αρμονικό τρόπο όπως υποθέσαμε και έτσι απαιτείται μια κατάλληλη περιγραφή του ως συνάρτηση του χρόνου η οποία δε θα μπορεί να ενσωματωθεί στην εξίσωση κίνησης (4.17). Έτσι σύμφωνα με τους Budal και Falnes (1980) υπάρχει μια άλλη πτυχή του υδροδυναμικού ελέγχου, η οποία δε θεωρείται κανονικά κύματα και αρμονικό PTO, γνωστή ως *Ασφάλιση (Latching)*. Θεωρούμε ένα σώμα τύπου σημειακού απορροφητή το οποίο έχει συντονιστεί βέλτιστα ώστε να δίνει τη μέγιστη ισχύ σε συνθήκες κανονικών κυμάτων. Για ένα τέτοιο μικρό σώμα η προσέγγιση των Froude-Krylon ισχύει ακόμη και έτσι η δύναμη διέγερσης X μπορεί να βρεθεί αν ολοκληρώσουμε την πίεση λόγω του προσπίπτοντος κύματος πάνω στη συσκευή. **Αυτό θα μας δώσει μία δύναμη που έχει την ίδια φάση με τα προσπίπτοντα κύματα και το μέγεθος της είναι ανάλογο της ακτίνας του σώματος. Η γενική συνθήκη συντονισμού απαιτεί η ταχύτητα του σώματος να έχει την ίδια φάση με τη δύναμη διέγερσης, που σημαίνει ότι η μετατόπιση του σώματος καθυστερεί κατά $\pi/2$ ως προς την ανύψωση του κύματος.** Όσο μειώνεται η ακτίνα του σώματος, το πλάτος της μετατόπισης αυξάνει μέχρι κάποια τιμή, όπου αναπόφευκτα θα παραβιάζονται είτε το μαθηματικό μοντέλο είτε οι φυσικοί περιορισμοί. Η μέθοδος της Ασφάλισης απαντάει σε αυτό το πρόβλημα ενώ διατηρεί την υπόθεση μικρού σώματος που είναι απαραίτητη για τους σημειακούς απορροφητές. Οι δύο καμπύλες της Εικόνα 4.12 δείχνουν τη μετατόπιση της συσκευής (συνεχής γραμμή) και μία αντιπροσωπευτική κίνηση του προσπίπτοντος κύματος (διακεκομμένη γραμμή). Το σχήμα χρησιμεύει μόνο για επεξηγηματικούς σκοπούς, αφού η ακριβής σχέση των φάσεων των δύο κινήσεων λαμβάνεται από την (4.30). Στο διάγραμμα φαίνεται η γενικότερη στρατηγική της Ασφάλισης, η οποία σταματά ακαριαία την κίνηση της συσκευής σε κάποιο σημείο του κύκλου λειτουργίας της μέσω μιας κατάλληλης δύναμης ελέγχου $F_{ext}(t)$. Η προσέγγιση αυτή μας βοηθάει να αποφύγουμε πολύ μεγάλα πλάτη μετατόπισης, αλλά η κίνηση του σώματος δεν είναι πια αρμονική και έτσι χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (4.22) που είναι εκφρασμένη στο πεδίο του χρόνου. Η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου είναι υπό-βέλτιστη κι η μέθοδος εκτέλεσης της, όπως η θέση των σημείων συγκράτησης και απελευθέρωσης (fix-and-release points), ανήκει στο χρήστη.

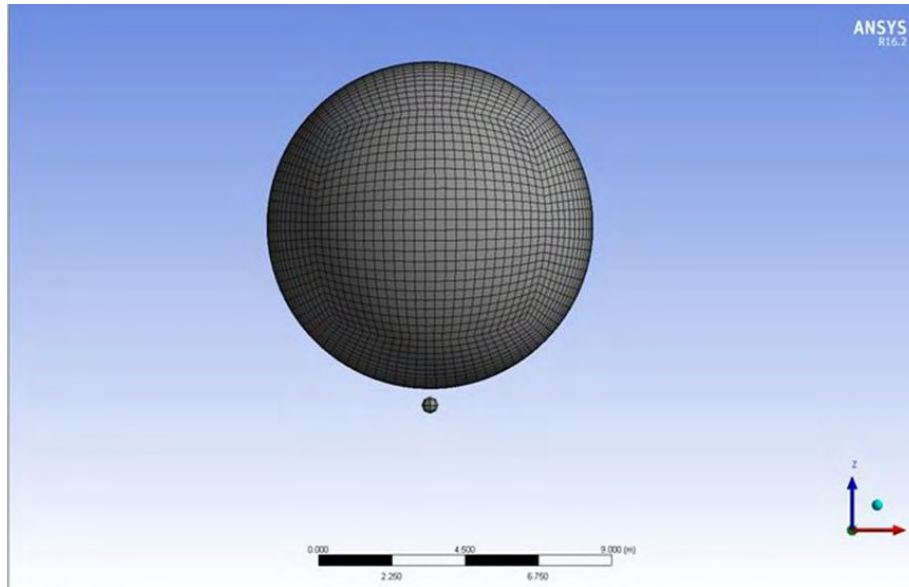


Εικόνα 4-12: Στρατηγική Ασφάλισης που δείχνει την επιθυμητή μετατόπιση του σώματος (συνεχής γραμμή) σε σχέση με την ημιτονοειδή χρονική εξάρτηση (διακεκομμένη) Πηγή : *Ocean Wave Energy*, J. Cruz (2008)

Περαιτέρω μελέτες σχετικά με τις στρατηγικές ελέγχου και άλλων σωμάτων πέρα των σημειακών απορροφητών έχουν γίνει από τους Barbarit και Clément (2006) και από το Falnes(2001).

4.8 Εισαγωγή στο Αριθμητικό Μοντέλο

Ο ρόλος της αριθμητικής προσομοίωσης έχει αποδειχθεί καθοριστικός τα τελευταία χρόνια σε όλα τα πεδία εφαρμογής του μηχανικού και όσον αφορά αυτή την εργασία στο σχεδιασμό μιας WEC. Ο βασικός λόγος είναι το χαμηλότερο κόστος της έναντι της πειραματικής προσομοίωσης και ότι αρχικά επιτρέπει να δοκιμαστούν εναλλακτικές μορφές μια ιδέας με το γρηγορότερο δυνατό τρόπο και έπειτα όταν δοκιμάζονται νέες τεχνολογίες μηχανισμών οι υπολογιστικές μέθοδοι είναι χρήσιμες για τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου. Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM) κι η Μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων (Boundary Element Method – BEM), η οποία είναι γνωστή και ως Panel Methods και η οποία χρησιμοποιείται συχνότερα στη μοντελοποίηση των θαλάσσιων κυμάτων. Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων αποτελεί τεχνική ανάλυσης της συμπεριφοράς των μηχανικών συστημάτων κι ειδικότερα κατασκευών που υποβάλλονται σε εξωτερική φόρτιση, η οποία στην περίπτωση των θαλάσσιων κυμάτων είναι επιφανειακές ή μαζικές δυνάμεις.



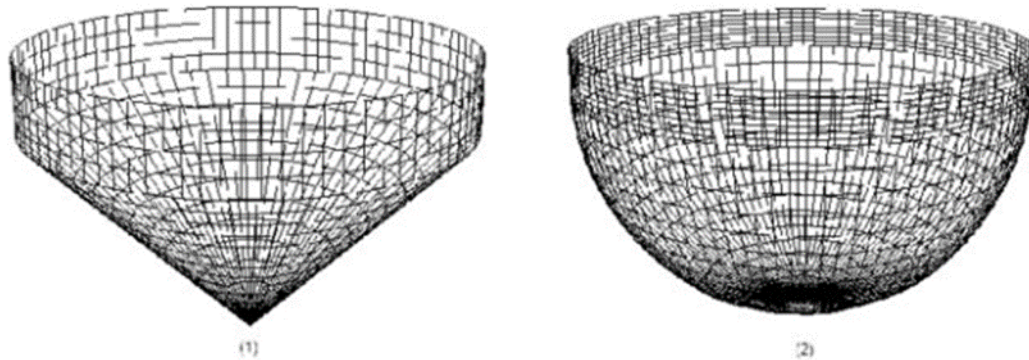
Εικόνα 4-13: Επιφανειακό πλέγμα σφαιρικού σημειακού απορροφητή από το AQWA (εργαλειοθήκη ANSYS)
Πηγή: F.Meng et al. (2017)

4.8.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου Συνοριακών Στοιχείων

Σύμφωνα με τον Κατσικαδέλη (2012), η διακριτοποίηση στην περίπτωση των BEM περιορίζεται στο σύνορο και έτσι η προσομοίωση γίνεται πιο εύκολη σε σχέση με άλλες αριθμητικές μεθόδους. Η μέθοδος των BEM είναι ιδιαίτερη αποτελεσματική στον υπολογισμό των παραγώγων, όσο και στο χειρισμό των συγκεντρωμένων δυνάμεων και ροπών στο εσωτερικό και στο σύνορο. Ακόμη η μέθοδος των BEM επιτρέπει τον υπολογισμό της λύσης και των παραγώγων σε όποια σημεία μας ενδιαφέρουν και όποτε θέλουμε, χρησιμοποιώντας την ολοκληρωτική παράσταση της λύσης ως μαθηματικό μοντέλο. Η μέθοδος BEM ενδείκνυται για την επίλυση προβλημάτων σε χωρία με γεωμετρικές ανωμαλίες, όπως ρωγμές.

Βέβαια και η μέθοδος BEM παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα, τα οποία φαίνονται να αντιμετωπίζονται με την ανάπτυξη των σύγχρονων υπολογιστών σε μεγάλο βαθμό. Η εφαρμογή της BEM βασίζεται στη γνώση της θεμελιώδους λύσης. Έτσι για τα προβλήματα όπου αυτή είναι άγνωστη ή αυτή δεν μπορεί να προσδιορισθεί, η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοσθεί. Επίσης δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για μη γραμμικά προβλήματα, όπου δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Τα μειονεκτήματα αυτά αντιμετωπίζονται μερικώς με τη Μέθοδο Δυϊκής Αμοιβαιότητας και πλήρως με τη Μέθοδο της Αναλογικής Εξίσωσης. Ακόμη η αριθμητική εφαρμογή της BEM οδηγεί σε συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων, των οποίων τα μητρώα συντελεστών των αγνώστων είναι πλήρη και μη συμμετρικά. Βέβαια το μειονέκτημα αυτό είναι ήσσονος σημασίας σήμερα, όπου οι σύγχρονοι υπολογιστές επιλύουν ταχύτατα συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων μεγάλων

διαστάσεων. Το γεγονός ότι το παραγόμενο μητρώο προστιθέμενων μαζών δεν ήταν συμμετρικό ήταν χαρακτηριστικό παράδειγμα των αντιφατικών αποτελεσμάτων της εργασίας του Katoiy (1996). Αυτή αποτέλεσε μία από τις πρώτες προσπάθειες αριθμητικής αναπαράστασης των πειραμάτων πάνω στη συσκευή Salter's Duck, η οποία αναφέρεται και παρακάτω.



Εικόνα 4-14: Επιφανειακό πλέγμα σημειακών απορροφητών για κωνικό (1) και ημισφαιρικό κύλινδρο (2)
Πηγή: J.Schay et al. (2013)

Μέθοδοι χαμηλής και υψηλής τάξης

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων συνήθως διακρίνεται σε μέθοδο υψηλής τάξης και μέθοδο χαμηλής τάξης. Ο όρος χαμηλής τάξης αναφέρεται στη χρήση σταθερών ιδιαιζουσών κατανομών (*constant-strength singularity distributions*) πάνω από κάθε στοιχείο, και τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε για να διακριτοποιήσουμε τη γεωμετρία και το δυναμικό ταχύτητας συνήθως είναι επίπεδα. Οι μέθοδοι υψηλής τάξης χρησιμοποιούν κατανομές μεγαλύτερης τάξης από σταθερές, όπως για παράδειγμα γραμμικές ή τετραγωνικές κατανομές, και τα στοιχεία είναι καμπύλα. Όπως καταλαβαίνουμε η δεύτερη περίπτωση απαιτεί πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό φορτίο, αλλά θεωρητικά επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι μέθοδοι μεγαλύτερης τάξης έχουν κάποια εγγενή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις χαμηλότερης τάξης. Αρχικά οι Lee et al. (1996) και ο Maniar (1995) έδειξαν ότι η υπολογιστική ακρίβεια αυξάνει και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή η μέθοδος συγκλίνει γρηγορότερα, αν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων. Η μέθοδος υψηλής τάξης δίνει τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών στοιχείων εισόδου για μια γεωμετρία, δηλαδή είναι πιθανή μια σαφέστερη αναπαράσταση της, το οποίο σαφώς αυξάνει την ακρίβεια της μεθόδου. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των στοιχείων της είναι ότι επιτρέπουν συνεχείς συναρτήσεις πίεσης και της ταχύτητας πάνω στην επιφάνεια του σώματος, η οποία είναι χρήσιμη στον

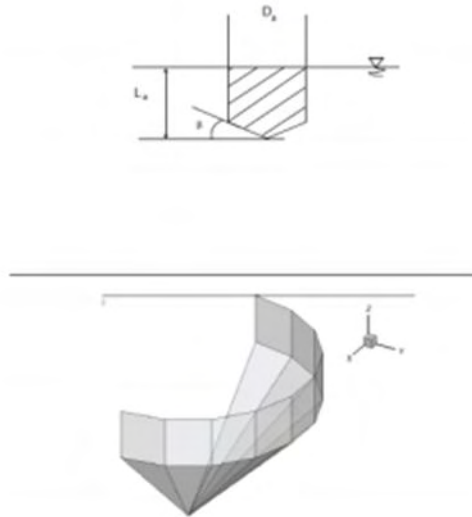
κατασκευαστικό σχεδιασμό της συσκευής. Από την άλλη το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου υψηλότερης τάξης έχει να κάνει με την έλλειψη ευστάθειας (robustness), αποτυγχάνοντας έτσι πολλές φορές να συγκλίνει, ιδιαίτερα αν ένα σημείο του πεδίου είναι στη γύρω περιοχή ενός στοιχείου (panel) ή κοντά σε αιχμηρές γωνίες.

4.8.2 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (BEM) και Ενέργεια από τα Κύματα της Θάλασσας

Σύμφωνα με τον Cruz (2008), ήδη από την αρχή της μοντελοποίησης συναντήσαμε διάφορα μεγέθη, όπως η δύναμη λόγω περίθλασης ή τα μητρώα των συντελεστών προστιθέμενη μάζας και δυσκαμψίας, τα οποία όπως αναφέρθηκε δεν μπορούν να υπολογισθούν αναλυτικά κι αυτός είναι ένας από τους πολλούς λόγους που η αριθμητική προσομοίωση είναι απαραίτητη. Επίσης είδαμε μερικές διαφορές ανάμεσα στην ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και στην ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας. Οι λύσεις των εξισώσεων στο πεδίο της συχνότητας βασίζονται στην υπόθεση ότι τα προσπίπτοντα κύματα είναι αποτέλεσμα της επαλληλίας απλών αρμονικών κυμάτων. Έτσι χρησιμοποιείται η γραμμική θεωρία κυμάτων, η οποία υποθέτει ότι οι κινήσεις του σώματος είναι μικρές συγκρινόμενες με το μήκος κύματος, και το πρόβλημα καταλήγει να χωρίζεται σε δύο επί μέρους προβλήματα : το πρόβλημα περίθλασης, όπου το σώμα είναι σταθερό και έρχεται αντιμέτωπο με ένα εισερχόμενο πεδίο κυμάτων, και το πρόβλημα ακτινοβολίας, όπου το σώμα αναγκάζεται να κινηθεί μέσα σε ένα αδιατάρακτο ρευστό. Το δυναμικό ταχύτητας ορίζεται ως το άθροισμα του δυναμικού περίθλασης και των δυναμικών ακτινοβολίας, τα οποία σχετίζονται με τις δυνάμεις και ροπές διέγερσης του κύματος και τους υδροδυναμικούς συντελεστές (προστιθέμενων μαζών και απόσβεσης), αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα παραπάνω εξάγονται οι σχέσεις για τις κινήσεις του σώματος, οι οποίες συνήθως εκφράζονται σε μια αδιάστατη μορφή μέσω του τελεστή πλάτους απόκρισης (response amplitude operator-RAO), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του μεγέθους της μετατόπισης του σώματος προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος. Επιπρόσθετοι περιορισμοί εισάγονται από την εξωτερική μάζα και τα μητρώα απόσβεσης λόγω δυσκαμψίας (π.χ. για να εκτιμήσουμε την επίδραση των διαφόρων διατάξεων πρόσδεσης ή των διαφόρων ρυθμίσεων μηχανισμού λήψης ισχύος).

Όταν στο μοντέλο κυριαρχούν μη γραμμικά φαινόμενα χρειάζεται να εφαρμοσθούν λύσεις στο πεδίο του χρόνου. Για να εξαχθούν τέτοια μοντέλα υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσέγγισης της μη γραμμικής ανάλυσης, η πλειοψηφία των οποίων βασίζεται στην άμεση ολοκλήρωση της πίεσης πάνω στην επιφάνεια του σώματος σε κάθε βήμα της προσομοίωσης. (McCabe, 2004). Μπορούν να εφαρμοσθούν διάφορες απλοποιήσεις, όπως ο περιορισμός της επιφάνειας του σώματος στην βρεχόμενη επιφάνεια του, οι οποίες οδηγούν σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τις προσομοιώσεις εις βάρος βέβαια της μέγιστης δυνατής ακρίβειας. Η κύρια διαφορά με την προσέγγιση στο πεδίο της

συχνότητας είναι η δυνατότητα να προστεθούν μη γραμμικά φαινόμενα στις εξισώσεις κίνησης.



Εικόνα 4-15: Τομή σημειακού απορροφητή (πάνω) και συμμετρικό πλέγμα (κάτω)
Φαίνεται μόνο η βρεχόμενη επιφάνεια και το μισό τμήμα που ορίζει ο xz άξονας συμμετρίας
Πηγή: http://www.ijetmr.com/Articles/Vol4Iss4/01_IJETMR17_A04_23.pdf

4.8.3 Αρχικά Βήματα της Μεθόδου BEM

Σύμφωνα με τους Li et al. (2012) , οι BEM είναι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, που μπορούν να εκφραστούν ως ολοκληρωτικές εξισώσεις. Είναι μια εξελιγμένη μέθοδος δυναμικού ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο σύνθετες γεωμετρίες. Δεδομένου ότι το δυναμικό ροής από το πρόβλημα οριακών συνθηκών, όπως αυτό ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2, λύνεται διακριτοποιώντας την επιφάνεια του συνόρου, οι BEM μειώνουν τη διάσταση του προβλήματος ώστε να αυτό να λυθεί αριθμητικά. Σύμφωνα με τον Lamb (1932), υπάρχουν δύο πιθανές προσεγγίσεις για την επίλυση της εξίσωσης Laplace, η μορφοποίηση δυναμικού και η μορφοποίηση πηγής. Όπου και στις δύο περιπτώσεις, στο τέλος μπορούν να λυθούν παρόμοιες Fredholm ολοκληρωτικές εξισώσεις. Παρακάτω ενδεικτικά θα χρησιμοποιήσουμε τη μορφοποίηση δυναμικού. Όπου η εξίσωση Laplace (από το Κεφάλαιο 2) παίρνει μια συνοριακή ολοκληρωτική μορφή, η οποία προκύπτει αν εισάγουμε τη συνάρτηση Green $G(\mathbf{p}, \mathbf{q})$, όπου τα \mathbf{p} και \mathbf{q} αναπαριστούν το σημείο πεδίου και το σημείο πηγής αντίστοιχα. Συνεπώς μέσω της χρήσης της τρίτης ταυτότητας του Green προκύπτει η συνοριακή ολοκληρωτική μορφή :

$$\alpha(\mathbf{p})\varphi(\mathbf{p}) + \int_S \varphi(\mathbf{p})G_n(\mathbf{p}, \mathbf{q}) - \varphi_n(\mathbf{p})G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) ds = 0 ,$$

όπου το S δηλώνει τα όρια του πεδίου ροής, $\alpha(\mathbf{p})$ είναι η εσωτερική γωνία που ορίζουν τα όρια, $G_n = \nabla G \cdot \mathbf{n}_q$ και $\varphi_n = \nabla \varphi \cdot \mathbf{n}_q$, όπου το \mathbf{n}_q είναι το κάθετο διάνυσμα στο \mathbf{q} . Χρησιμοποιώντας συνοριακές συνθήκες τύπου Neumann και Dirichlet, το δυναμικό πεδίο ροής μπορεί να βρεθεί λύνοντας το σύστημα γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Αφού λύσουμε το δυναμικό πεδίο ροής, η πίεση στην επιφάνεια του σώματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli.

$$p = -\rho \left(\varphi_t + \frac{1}{2} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi + gz \right) .$$

Οι δυνάμεις \mathbf{F} κι οι ροπές \mathbf{M} που ασκούνται στο σώμα υπολογίζονται αν ολοκληρώσουμε την πίεση για τη βυθισμένη επιφάνεια S_B ,

$$\mathbf{F} = \int_{S_B} p \mathbf{n} ds \text{ και } \mathbf{M} = \int_{S_B} p \mathbf{n} \times \mathbf{r} ds ,$$

όπου το \mathbf{n} υποδεικνύει το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του σώματος και \mathbf{r} είναι το διάνυσμα της απόστασης από το κέντρο περιστροφής.

Σχετικά με την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κυμάτων και πλωτών σωμάτων, δύο τύποι προσεγγίσεων χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση. Ο πρώτος ακολουθεί μια ασθενή μη-γραμμική θεωρία που χρησιμοποιεί μια επέκταση της διαταραχής για τη λύση και προσδιορίζει τις συνοριακές συνθήκες στην μέση ελεύθερη επιφάνεια και στην επιφάνεια του σώματος, χρησιμοποιώντας μια επέκταση των σειρών Taylor. Η άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί μία πλήρως μη-γραμμική προσέγγιση στο πεδίο του χρόνου. Η προσέγγιση της ασθενούς μη-γραμμικής θεωρίας έχει το πλεονέκτημα ότι διατηρεί τα ίδια μητρώα συντελεστών σε όλο το σύστημα εξισώσεων που λύνεται σε κάθε βήμα. Μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο συχνότητας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται στον κώδικα BEM, WAMIT, ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από το Τμήμα Ωκεανομηχανικής του MIT και αναφέρουμε παρακάτω. [Li et al. (2012)]

4.8.4 Διακριτοποίηση Σώματος

Σύμφωνα με τον Cruz (2008), το πρόβλημα της μετατροπής της κυματικής ενέργειας ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων μιας σταθερής κατασκευής που είναι εκτεθειμένη σε προσπίπτοντα κανονικά κύματα. Οι ιδιαιτερότητες (singularities) είναι πιο σύνθετες και για αυτό διακριτοποιείται μόνο το σώμα της συσκευής. Μια πρακτική τεχνική για τέτοια προβλήματα εφαρμόστηκε πρώτα από το Newman (1985) κι αργότερα επεκτάθηκε σε ένα πλήθος εφαρμογών. Από τη

μελέτη του φάνηκε ότι ένα πλήθος προβλημάτων όπως η αντίσταση του κύματος, οι κινήσεις των πλοίων και των παράκτιων συσκευών κι η αλληλεπίδραση κύματος και σώματος μπορούν να αντιμετωπιστούν από τη θεωρία του δυναμικού ροής, όταν τα ιξώδη φαινόμενα δε λαμβάνονται υπόψιν.

Από τον Newman αναφέρθηκε και η πρωτοπόρα δουλειά των Hess και Smith (1964), όπου η μορφοποίηση πηγής χρησιμοποιήθηκε για τρισδιάστατα σώματα τυχαίου σχήματος. Για πρώτη φορά, ένα γραμμικό σύστημα N εξισώσεων παράχθηκε από τον καθορισμό των οριακών συνθηκών σε ένα σημείο ταξίθεσίας (collocation point) σε κάθε στοιχείο N , που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψουμε το πεδίο ροής. Οι ίδιοι επίσης παρήγαγαν τις αναλυτικές εκφράσεις για το δυναμικό και την ταχύτητα που δημιουργούνται από μία μοναδιαία κατανομή πυκνότητας της πηγής σε ένα επίπεδο τετράγωνο στοιχείο, αποφεύγοντας έτσι την αριθμητική ολοκλήρωση που θα μπορούσε να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα όταν το σημείο υπολογισμού είναι πάνω στο στοιχείο ή στη γύρω περιοχή του.

Οι Newman και Lee (1992) πραγματοποίησαν μια αριθμητική ανάλυση ευαισθησίας για το πως επηρεάζει η διακριτοποίηση τους υπολογισμούς των κυματικών φορτίων. Μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού και της διάταξης των στοιχείων και πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σύγκλισης. **Κατέληξαν στο ότι αυξάνοντας τον αριθμό των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην γεωμετρική και στην υδροδυναμική αναπαράσταση οδηγούμαστε σε μεγαλύτερη ακρίβεια.** Μια σημαντική εργασία που δεν πρέπει να παραλείπεται όταν χτίζεται ένας κώδικας είναι η αριθμητική επαλήθευση, ότι η λύση δεν αποκλίνει ή δε συγκλίνει στη λάθος λύση. Βέβαια ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τη λύση του προβλήματος αυξάνει με την αύξηση των στοιχείων (panels). Έτσι ένας βέλτιστος λόγος μεταξύ ακρίβειας και αριθμού στοιχείων χρειάζεται να εξαχθεί, ώστε να δούμε κατά πόσο μας συμφέρει εν τέλει αυτή η διαδικασία. Επίσης σημαντική είναι και η διάταξη των στοιχείων, η οποία μπορεί να είναι και αποκλειστικά υπεύθυνη για λανθασμένες λύσεις. Παρακάτω δίνονται και κάποιες κατευθυντήριες γραμμές από τους Newman και Lee (1992), ώστε να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοντέλο μας :

- a. κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, τα κύματα μικρού μήκους (λ) απαιτούν αναλογικά πιο λεπτομερή διακριτοποίηση
- b. τοπικές ιδιαιτερότητες, που προκαλούνται π.χ. από αιχμηρές γωνίες (sharp corners), τείνουν να απαιτούν λεπτομερή τοπική διακριτοποίηση
- c. ασυνέχειες στη χαρακτηριστική διάσταση των στοιχείων (panels) πρέπει να αποφεύγονται : ιδανικά μια συνημιτονοειδής συνάρτηση κατανομής (cosine spreading function) (επίσης αναφέρεται και ως αραίωση-spreading) μπορεί να

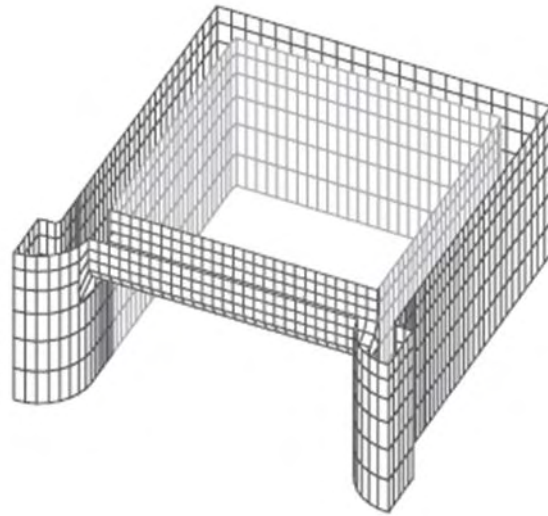
χρησιμοποιηθεί για τη διάταξη των στοιχείων (το πλάτος των στοιχείων είναι ανάλογο του συνημιτόνου των ισαπέχοντων αυξήσεων κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου)

- d. προβλήματα στα οποία εμπλέκονται σύνθετες γεωμετρίες μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων ακόμη και για απλούς υπολογισμούς (π.χ. όγκος)

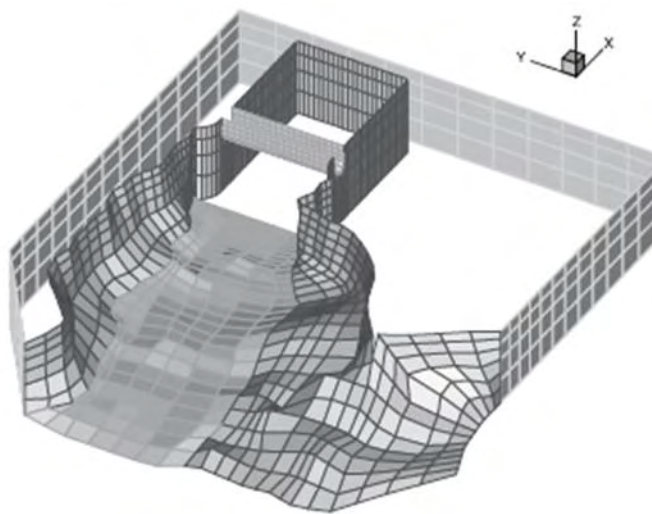
Η απάντηση για τη βέλτιστη διακριτοποίηση έρχεται συνήθως μέσω των ελέγχων σύγκλισης. Για αντιπροσωπευτικά μήκη κύματος και για την ίδια διάταξη πλέγματος, αυξάνουμε τον αριθμό των στοιχείων κι εκτιμούμε τα δεδομένα που παίρνουμε. Όταν υπάρχει υψηλή ακρίβεια, η αύξηση στον αριθμό των στοιχείων δε θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στη λύση .

4.8.5 Υπολογιστικά Προγράμματα BEM

Οι Newman και Lee (1992), όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι στενά συνδεδεμένοι με την ανάπτυξη ενός κώδικα BEM που ονομάζεται WAMIT, στο Τμήμα Ωκεανομηχανικής του MIT. Ο κώδικας αυτός αρχικά είχε επιβεβαιωθεί μέσω της σύγκρισης με αναλυτικές λύσεις, αλλά και μέσω εργασιών που χρησιμοποιούσαν πειραματικούς ελέγχους. Μαζί με αυτές τις διαδικασίες, σημαντικό ρόλο έπαιξε και η συγκριτική αξιολόγηση με παρόμοιους κώδικες , ώστε να διασφαλιστεί ότι ο κώδικας δε συγκλίνει στη λάθος απάντηση. Μερικά παραδείγματα που μελετήθηκαν από τη συγκεκριμένη ερευνητική ομάδα ήταν τα κυματικά φορτία σε υπεράκτιες (offshore) πλατφόρμες, οι κινήσεις πλοίων στο πεδίο του χρόνου, οι αλληλεπιδράσεις των πλοίων σε ένα κανάλι, η μετατροπή κυματικής ενέργειας, και σε θεωρητικότερο επίπεδο (με επιπτώσεις σε όλα τα πεδία) , η ανάπτυξη μιας μεθόδου συνοριακών στοιχείων βασισμένη σε B-splines. Αυτή η υψηλής τάξης προσέγγιση δικαιολογείται από μερικά βασικά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα να περιγράψουμε ακριβέστερα τη γεωμετρία και την ταχύτητα δυναμικού. Επίσης και άλλες επιστημονικές ομάδες έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη BEM κωδίκων, συγκεκριμένα μία αξιοσημείωτη είναι αυτή της Ecole Centrale της Νάντ, η οποία έχει αναπτύξει μέσα στα χρόνια διάφορα πακέτα για προβλήματα που αφορούν τη συμπεριφορά πλοίων σε κυματισμούς. Μερικά από τα πακέτα στα οποία κατέληξαν είναι το AQUADYN, για γενικά προβλήματα χωρίς ταχύτητα πορείας, το AQUAPLUS, το οποίο προϋποθέτει μια σχετική συχνότητα (encounter frequency) για ένα κινούμενο πλεούμενο και το CUVE, το οποίο λύνει το πρόβλημα για ένα πλεούμενο με εσωτερικές δεξαμενές. Το AQUADYN είναι ένας κώδικας BEM πολύ παρόμοιος με το WAMIT, ειδικά με τον επιτυχή χαμηλής τάξης του. Παρακάτω φαίνεται ένα χαρακτηριστικό πλέγμα για τη συσκευή OWC του νησιού Pico, που προέκυψε από τον κώδικα WAMIT.



Εικόνα 4-16: Αρχική προσομοίωση OWC με τη συσκευή απομονωμένη
Πηγή: Brito Melo et al. (1998)



Εικόνα 4-17: Τελική προσομοίωση OWC με την τελική γεωμετρία συσκευής, την ακτή και τη βαθυμετρία γύρω του
Πηγή: Brito Melo et al. (2000)

Συμπεράσματα

Οι κυριότερες ανησυχίες σχετικά με την χρήση των συσκευών WECs είναι η βιωσιμότητα, η δυνατότητα συντήρησης και η επιβίωση τους στις διάφορες συνθήκες θαλάσσης, με πρωταρχικό στόχο την μεγιστοποίηση της απόδοσης της δομής και την ελαχιστοποίηση του κόστους. Στην παρούσα διπλωματική δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην μελέτη της απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν την δυνατότητα συντήρησης και επιβίωσης της συσκευής.

Μελετώντας τα χαρακτηριστικά της καμπύλης εύρους συχνοτήτων παρατηρείται ότι εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο κίνησης και τη γεωμετρία της συσκευής κι έτσι κάποιες συσκευές παρουσιάζουν φαρδιά καμπύλη με μεγάλο εύρος ενώ κάποιες άλλες στενή καμπύλη. Παρ'όλα αυτά, είναι πιθανό για μία συσκευή να έχει φαρδιά καμπύλη για ένα κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων και στενή για ένα άλλο κομμάτι. Αυτό φαίνεται και στο παράδειγμα του Pico, όπου απεικονίζεται η διαφορά μεγέθους των μέγιστων επιπέδων ισχύος και του εύρους φάσματος μεταξύ της υπεράκτιας πηγής και της πηγής στην ακτή. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων συνδέεται ουσιαστικά με την καμπύλη συχνοτικού φάσματος : οι συσκευές συγκεκριμένης τοποθεσίας παρουσιάζουν συνήθως στενή καμπύλη, ενώ οι υπεράκτιες συσκευές προορίζονται να έχουν φαρδύτερη καμπύλη, κάτι που βέβαια δε συμβαίνει πάντα.

Όσον αφορά τις επιμέρους κατηγορίες συσκευών που μελετήθηκαν, για τους σημειακούς απορροφητές φάνηκε ότι είναι ικανοί να απορροφούν την ενέργεια από ένα κύμα πολλές φορές μεγαλύτερο από την οριζόντια διάσταση του απορροφητή και έτσι διαθέτουν ένα μεγάλο εύρος αποτελεσματικής σύλληψης . Θεωρητικά μια τέτοια απόδοση μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν η συσκευή υφίσταται ταλαντώσεις των οποίων το μέγεθος μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το πλάτους του προσπίπτοντος κύματος. Βέβαια αυτή η συμπεριφορά δεν είναι πρακτικά επιτρεπτή και έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη θεωριών για να προβλέψουν το μέγιστο εύρος σύλληψης όταν το πλάτος της ταλάντωσης της συσκευής περιορίζεται σε μέγεθος αλλά επιτρέπεται να διατηρηθεί η συχνότητα της ταλάντωσης.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που αφορούσε σημειακούς απορροφητές, αλλά αποτέλεσε σημείο αναφοράς και για οποιαδήποτε άλλη συσκευή, είναι ότι μέγιστη απορρόφηση ισχύος για οριζόντια λειτουργία είναι διπλάσια από την ανυψωτική (heave) λειτουργία.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι μεταξύ ενός εύκαμπτου εξολοθρευτή και ενός εξασθενητή υπάρχει μικρή υδροδυναμική διαφορά στη συμπεριφορά τους. Ουσιαστικά, οι κατευθύνσεις των προσπίπτοντων κυμάτων διαφέρουν κατά μία ορθή γωνία. Αυτό καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο τρόπος λειτουργίας τους συνδέεται στενά με το πεδίο προσπίπτοντος κύματος και αυτό θα ποικίλει. Χωρίς μηχανισμούς ελέγχου, μια επιμήκης συσκευή θα μπορούσε να αναγκαστεί να λειτουργήσει ως εξασθενητής ή ως εξολοθρευτής στην ίδια τοποθεσία και σε διαφορετικές καταστάσεις θαλάσσης. Η διαδικασία ευθυγράμμισης συνδέεται με τη διαμόρφωση πρόσδεσης και αυτό προσδιορίζει μία από τις βασικές απαιτήσεις για μία συσκευή WEC. Η πρόσδεση είναι απαραίτητη για να εξασφαλίζει τη διατήρηση μιας συσκευής σε επιλεγμένη περιοχή, καθώς και για την ευθυγράμμιση της συσκευής.

Μια ακόμη αξιόπιστη και οικονομική διάταξη φάνηκε να είναι ο συνδυασμός μιας Oscillating Water Column (OWC) και ενός στροβίλου Wells, ο οποίος έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε να είναι αποτελεσματικός σε διάφορες θαλάσσιες καταστάσεις.

Ο Wave Dragon αποτελεί τον μεγαλύτερο μετατροπέα ενέργειας κυμάτων σήμερα. Κάθε μονάδα προβλέπεται να έχει ονομαστική ισχύ 4-11 MW ή περισσότερο, ανάλογα με το πόσο ενεργητικό είναι το κλίμα κύματος στον τόπο εγκατάστασης. Σε αντίθεση με τις άλλες συσκευές που μελετήθηκαν είναι η μόνη που δεν ταλαντεύεται με τα κύματα. Χρησιμοποιώντας αρκετές τουρμπίνες μεταβλητής ταχύτητας on/off, με ομαλή παροχή ισχύος επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της συνολικής εγκατάστασης.

Τέλος, είναι απαραίτητη η χρήση ενός αριθμητικού αλγόριθμου, καθώς το κόστος είναι χαμηλότερο έναντι της πειραματικής προσομοίωσης και αρχικά επιτρέπει να δοκιμαστούν εναλλακτικές μορφές μια ιδέας με το γρηγορότερο δυνατό τρόπο. Η μέθοδος των Συνοριακών Στοιχείων (BEM) χρησιμοποιείται συχνότερα στη μοντελοποίηση των θαλάσσιων κυμάτων. Η διακριτοποίηση στην περίπτωση αυτής της μεθόδου περιορίζεται στο σύνορο και έτσι η προσομοίωση γίνεται πιο εύκολη σε σχέση με άλλες αριθμητικές μεθόδους.

Η παρούσα εργασία αφορά μια βιβλιογραφικά δουλειά, που ως στόχο της είχε την πρώτη επαφή τόσο των συντακτριών της, όσο και του αναγνώστη, με τη μελέτη των συσκευών μετατροπής της κυματικής ενέργειας (WECs). Πολλά ερωτήματα μπορεί να μένουν αναπάντητα, αλλά σίγουρα αποτελεί μαζί με τις αναφορές που παραπέμπονται μία χρήσιμη μελέτη για τους νέους αναγνώστες/ριες.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- U.S Department of Defense. (n.d.). *A dictionary of legal, industry-specific, and uncommon terms*. Ανακτήθηκε από <https://definedterm.com/>.
- Bevilacqua G., Z. B. (2011). *Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development*. DICAM, Università di Bologna.
- Brito-Melo A., S. A. (1998). Hydrodynamic Analysis of 3rd Geometrical Design Parameters of Oscillating Water Columns. *In Proceedings of 3rd European Wave Energy Conference, Vol. 1*. Patras, Greece.
- Brooke J. (2003). *Wave energy conversion*. Elsevier Ocean Energy Book Ser 6. ECOR, UK.
- Ceperley P. (2018). *Resonances, Waves and Fields*. Ανακτήθηκε από <http://resonanceswavesandfields.blogspot.com/>.
- Crowley S., P. R. (2012). The New Bristol Cylinder: A submerged cylinder wave energy converter. *In Proceedings of the International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*. Copenhagen, Denmark.
- Cruz J. (2008). *Ocean Wave Energy Current Status and Future Prepectives*. Berlin: Springer.
- Dalrymple R.G., D. R. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists (Advanced Series on Ocean Engineering-Vol2)*. World Scientific.
- Danielsson O., L. M. (2005). Detailed study of the magnetic circuit in a longitudinal flux permanent-magnet synchronous linear generator. *IEEE Trans Magnetics* 41(9):2490–2495.
- Drew B., P. A. (2009). *A review of wave energy converter technology*. Bath, UK: Department of Mechanical Engineering, University of Bath.
- Evans D.V. (1979). Some theoretical aspects of three-dimensional wave-energy absorbers. *In Proc. of the 1st Symposium Wave Energy Utilization*. Gothenburg, Sweden.
- Evans D.V. (1981b). Maximum wave-power absorption under motion constraints. *Applied Ocean Research* 3:200-203.
- Falcao A. (2009). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 899-918.
- Falnes J. (1980). Radiation impedance matrix and optimum power absorption for interacting oscillators in surface waves. *Applied Ocean Research* 2:75-80.
- Falnes J., B. K. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature* 256: 478-479.
- Folley M. (2016). *Numerical Modelling of Wave Energy Converters: State-of-the Art Techniques for Single WEC and Converter Arrays*. Belfast, N. Ireland: School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's University Belfast.
- French M.J. (2013). *Conceptual Design for Engineers*. Berlin: Springer-Verlag .

- Goda Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures (3rd ed.)*. Japan: Yokohama National University.
- Henderson R. (2006). Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy* 31(2): 271-283.
- Juza A., R. M. (2015). *Team 8: Electro-Wave FINAL DESIGN REPORT (Engineering 340 Senior Design Project)*. Calvin College .
- Kofoed J.P. (2002). *Wave Overtopping of Marine Structures – Utilization of Wave Energy (PhD thesis)*. Aalborg University.
- Krogstad H.E, A. O. (2000, February). *LINEAR WAVE THEORY Part A: Regular Waves*. Trondheim, Norway: NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- Lawson M., Y. Y. (2013). *Wave Energy in the United States and Numerical Modeling of Wave Energy Conversion Devices*. NREL, U.S. Department of Energy.
- Lee C.-H. (1995, October). *WAMIT Theory Manual, Report 95-2*,. Dept. of Ocean Engineering, MIT.
- Lee C-H., M. H. (1996a). Computations of Wave Loads Using 21st a B-Spline Panel Method. *In Proc. of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*. Trondheim, Norway.
- Maniar H. (1995). A three-dimensional higher order panel method based on B-splines (PhD Thesis). MIT.
- McCabe AP. (2004). *An Appraisal of a Range of Fluid Modelling Software*. Supergen Marine Workpackage 2 (T2.3.4).
- Nebel P. (1992). Maximising the efficiency of wave-energy plant using complex control. *Journal of Systems and Control Engineering. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers* 206:225-236.
- Newman JN. (1976). The interaction of stationary vessels with waves. *In Proc. of the 11th Symposium on Naval Hydrodynamics* . London.
- Newman JN. (1985). Algorithms for the free-surface Green's function . *Journal of Engineer Mathematics* 19(1):57-67.
- Newman JN., L. C. (1992). Sensitivity of Wave Loads to the Discretisation of Bodies. *In Proc. of the 6th International Conference on Behaviour of Offshore Structures*. London, UK.
- NPTEL, A Project funded by MHRD, Govt. of India. (2013). *Courses on Ocean Engineering*. Ανακτήθηκε από <https://nptel.ac.in/courses/114105002/>.
- O Gallachoir B.P, T. G. (1993). An assessment of design 1st parameters for the Bristol Cylinder. *In Proc. of the 1st European Wave Energy Symposium* . Edinburgh, Scotland.
- Pecher A., K. J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy (OEO, Vol. 7)*. Cham: Springer.
- Randlov P. (1996). Final report and annexes to the Offshore wave energy converters. (OWEC-1) project. EU Contract No. JOU2-CT93-0394. *Danish Wave Power aps*.
- Science Learning Hub Pokapū Akoranga Pūtaiao, N. Z. (2011, May). *Behavior of waves*. Ανακτήθηκε από <https://www.sciencelearn.org.nz/>.

- Tedd J., F. P. (2007). *Testing, Analysis and Control of Wave Dragon, Wave Energy Converter (DCE Thesis)*. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Toffoli A., B.-G. E. (2017). *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Wacher A., N. K. (2010). Mathematical and Numerical Modeling of the AquaBuOY Wave Energy Converter. *Mathematics-in-Industry Case Studies Journal* 2:16-33.
- Yemm R., H. R. (2000). The PWP Pelamis WEC: Current Status and Onward Programme. *In Proc. of the 4th European Wave Energy Conference*. Aalborg, Denmark.
- Yih C.S. (1979). *Fluid Mechanics: A concise introduction to the theory (Corrected Edition)*. Ann Arbor, Michigan, U.S.A.: West River Press.
- Yi-Hsiang, Y. Y. (2011). A RANS Simulation for the Heave Response of a Two-Body Floating Point Wave Absorber . *In Proc. of 21st International Offshore Ocean and Polar Engineering Conference* . Maui, Hi, United States.
- Yi-Hsiang, Y. Y. (2012). A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point Absorbers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6): 4352-4364.
- Zurkinden A.S., K. M. (2013). *Numerical Modeling and Experimental Testing of a Wave Energy Converter [DCE Technical reports]*. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Γεωργίου Γ. (1999). *Αγγλοελληνικό Λεξικό Μαθηματικής Ορολογίας*. Λευκωσία.
- Καραμπάς Θ., Κ. Ι. (2015). Στοιχεία Κυματομηχανικής. Στο *Εφαρμογές σε Fortran (12-27)*. Ανακτήθηκε από <https://repository.kallipos.gr/>.
- Κατσικαδέλης Ι. (2012). *ΣΥΝΟΡΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ : Θεωρία και Εφαρμογές*. Αθήνα: Συμμετρία.
- Κούρτζης Χ.Θ. (2013). *Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα (Διπλωματική εργασία)*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ.
- Παπαϊωάννου Α.Θ. (2002). *Μηχανική των Ρευστών (2η έκδ.)*. Αθήνα: ΚΟΡΑΛΙ.
- Πελεκάσης Ν. (2016). *Μηχανική Ρευστών Ι*. Βόλος: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Π.Θ.
- Τσουκαλά Β.Κ. (2017). *Σημειώσεις στους Μετασχηματισμούς Κυματισμών*. Αθήνα: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.