



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΚΤΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΓΙΑ ΑΠΟΛΗΨΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Μπάρλας Γεώργιος
Αθήνα 2020**

Επιβλέπων Καθηγητής: Σουκισιάν Τακβόρ

Τριμελής Επιτροπή: Σουκισιάν Τακβόρ, Μαυράκος Σπυρίδων,
Μπελιμπασάκης Κωσταντίνος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τακβόρ Σουκισιάν για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την βοήθεια και την συνεργασία που μου παρείχε κατά την διάρκεια της συγγραφής της. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Κωνσταντίνο Μπελιμπασάκη και κ. Σπύρο Μαυράκο που δέχθηκαν να συνεργαστούν και να αξιολογήσουν την παρούσα εργασία.

Επιπλέον θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου η οποία με στήριξε υλικά, ψυχικά και πνευματικά καθ όλη την διάρκεια των σπουδών και της μέχρι τώρα ζωής μου.

Τέλος θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον εκλιπόντα κ. Ευάγγελο Χήνη, καθηγητή του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος μου πρότεινε να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και με βοήθησε σημαντικά στα πρώτα μου βήματα σε αυτό.

Περίληψη

Η ραγδαία επιδείνωση του γήινου κλίματος, έχει οδηγήσει την ανθρωπότητα σε σημείο να πρέπει να αλλάξει τρόπο ζωής ή να βρεθεί αντιμετώπιση με τον αφανισμό. Η βασικότερη αιτία ρύπανσης είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες οφείλονται στην χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας και μια απάντηση σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσουν οι ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες υπόσχονται ένα μέλλον όπου η ανάπτυξη του κοινωνικού περιβάλλοντος δεν θα συνεπάγεται και την άμεση καταστροφή του φυσικού.

Μια βασική μορφή ανανεώσιμης πηγής η οποία δεν έχει αξιοποιηθεί είναι η ενέργεια που φέρουν οι θαλάσσιοι κυματισμοί, καθώς το ιδιαίτερα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί μεγάλο εμπόδιο στην κατασκευή βιώσιμων τεχνολογιών. Παρ' όλα αυτά την τελευταία τριακονταετία έχουν γίνει σοβαρότατες προσπάθειες από πλευράς της ακαδημαϊκής κοινότητας για να παραχθεί μια τέτοια τεχνολογία.

Στην παρούσα εργασία λοιπόν μελετάται αρχικά η κίνηση των κυματισμών με σκοπό το να γίνει αντιληπτό το πως μπορεί η κίνηση τους να μοντελοποιηθεί και να παραχθούν οι κατάλληλες μαθηματικές σχέσεις οι οποίες θα μπορούν να μας δώσουν την ισχύ που αυτοί φέρουν. Στην συνέχεια θα αναφερθούν περιληπτικά οι διαφορετικές υπάρχουσες τεχνολογίες κυματικών μηχανών και από αυτές θα σταθούμε σε μια συγκεκριμένη τεχνολογία η οποία είναι και η πιο ανεπτυγμένη και δοκιμασμένη: η Παλλόμενη Στήλη Ύδατος.

Η μελέτη που θα ακολουθήσει θα αφορά όλες τις διαθέσιμες κυματικές μηχανές τύπου παλλόμενης στήλης ύδατος, με σύντομη περιγραφή της αρχής λειτουργίας τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, ενώ θα μελετηθούν αναλυτικότερα τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις των τεχνολογιών αυτών σε ό,τι αφορά κυρίως τον απαραίτητο μηχανολογικό εξοπλισμό, τις δυνατότητες και διαδικασίες εγκατάστασης, αλλά και τις κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους. Από τις διαθέσιμες τεχνολογίες που βρίσκονται σε σχετικά ώριμο επίπεδο τεχνολογικής ανάπτυξης, θα γίνει επιλογή αυτών που είναι οι πλέον κατάλληλες για μαζική παραγωγή ενέργειας.

Επί πλέον θα γίνει μια εκτενής ανάλυση του τρόπου που λειτουργεί το βασικό μηχανολογικό κομμάτι της παλλόμενης στήλης ύδατος που δεν είναι άλλο από τον αεροστρόβιλο διπλής ροής με τον οποίο είναι εξοπλισμένη έτσι ώστε να μετασχηματίζει την ενέργεια των κυματισμών σε ηλεκτρική. Θα αναλυθούν οι δύο βασικοί τύποι αεροστρόβιλων και θα συγκριθούν μεταξύ τους με σκοπό να συμπεράνουμε ποιος είναι ο βέλτιστος από πλευράς αποδοτικότητας.

Τέλος θα ασχοληθούμε με την φυσική περιγραφή και την μαθηματική μοντελοποίηση της υδροδυναμικής της παλλόμενης στήλης ύδατος. Σκοπός είναι το να μελετήσουμε το πεδίο των ταχυτήτων και πιέσεων που δημιουργείται εντός της και με βάση αυτά τα δεδομένα να υπολογίσουμε την ισχύ που απορροφά από τους θαλάσσιους κυματισμούς.

Abstract

The rapid deterioration of the earth's climate has led mankind to the point of having to change lifestyles or face extinction. The main cause of pollution is carbon dioxide emissions due to the use of conventional energy sources, and the answer to this problem comes from renewable sources which promise a future where the development of the social environment will not lead to the destruction of the nature.

A key form of renewable energy that has not been exploited is the energy that comes from ocean waves, as the highly corrosive marine environment poses a major obstacle to building sustainable technologies. However, over the last thirty years there has been considerable effort on the part of the academic community to produce such technology.

In the present work, therefore, the motion of the waves is first studied in order to understand how they can be modeled and to produce the appropriate mathematical relations that can give us their power. The following will summarize the different existing wave engine technologies and focus on one specific technology that is the most developed and tested: the Oscillating Water Column.

The following thesis will cover all available oscillating water column type wave engines, with a brief description of their principle and specific characteristics, and the specific features and requirements of these technologies will be studied in more detail in particular necessary mechanical equipment, installation capabilities and procedures, but also socio-economic parameters. Of the technologies available at a relatively mature level of technological development, those that are most suitable for mass production will be selected.

In addition, an extensive analysis will be made of how the basic mechanical part of the oscillating water column operates other than the dual-flow turbine it is equipped to transform the wave energy into electric. The two main types of turbines will be analyzed and compared with each other in order to determine which one is the best in terms of efficiency.

Finally, we will deal with the physical description and mathematical modeling of hydrodynamics of the oscillating water column. The purpose is to study the fluid velocity and pressure it receives and to calculate the power it absorbs from the ocean waves.

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Διαγραμμάτων	xiv
Κατάλογος Πινάκων	xv
1. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας από την Θάλασσα	1
1.1 Η οικολογική Κρίση	1
1.2 Οι ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας	4
1.3 Ενέργεια από την θάλασσα	9
1.4 Οι βασικές μορφές ΑΠΕ από την θάλασσα	10
1.4.1 Αιολική Ενέργεια	10
1.4.2 Ηλιακή ενέργεια	11
1.4.3 Ενέργεια από το φαινόμενο των παλιρροιών	13
1.4.4 Ενέργεια από θαλάσσια ρεύματα	14
1.4.5 Ωκεάνια θερμική ενέργεια	15
1.4.6 Ωσμωτική Ενέργεια	16
2. Η ενέργεια των κυματισμών	18
2.1 Βασικά είδη Κυματισμών	18
2.1.1 Επιφανειακοί κυματισμοί	20
2.1.2 Ανεμογενείς κυματισμοί	22
2.2 Οι μέθοδοι φυσικής μελέτης των θαλάσσιων Κυματισμών	25
2.3 Γραμμική Αρμονική θεώρηση κυματισμών – Θεωρία Airy	26
2.3.1 Οι εξισώσεις Κίνησης και οι οριακές συνθήκες	28
2.3.2 Γραμμικοποίηση του κυματικού προβλήματος	30
2.3.3 Οι σχέσεις του δυναμικού και της ελεύθερης επιφάνειας	33
2.3.4 Μιγαδικό δυναμικό και μιγαδική ελεύθερη επιφάνεια	36
2.3.5 Η εξίσωση Διασποράς	40
2.3.6 Η φασική ταχύτητα και η ταχύτητα διάδοσης του κυματοσυρμού	41
2.3.7 Περιπτώσεις βάθους του νερού	42
2.3.8 Κινηματική του πεδίου ροής των απλών αρμονικών κυματισμών	44
2.3.9 Οι τροχιές των σωματιδίων του ρευστού	45
2.3.10 Πεδίο πιέσεων των προσδευτικών κυματισμών	48
2.3.11 Η Ενέργεια των Κυματισμών	50
2.3.12 Η ροή ενέργειας (Ισχύς) των κυματισμών	54

2.4	Στατιστική – Στοχαστική θεώρηση Κυματισμών	59
2.4.1	Στατιστική θεώρηση	59
2.4.2	Στοχαστική θεώρηση	63
2.4.3	Το φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών.....	64
2.5	Η κατανομή του κυματικού δυναμικού ανά την υφήλιο	67
2.5.1	Το κυματικό δυναμικό της Μεσογείου	68
2.5.2	Το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών	70
2.6	Τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της κυματικής ενέργειας	72
3.	Τεχνολογίες για την απόληψη κυματικής ενέργειας	75
3.1	1 ^ο κριτήριο διαχωρισμού: Τοποθεσία εγκατάστασης.....	77
3.1.1	Επάκτιες Τεχνολογίες (<i>On-Shore</i>).....	77
3.1.2	Παράκτιες Τεχνολογίες (<i>Near-Shore</i>).....	77
3.1.3	Υπεράκτιες Τεχνολογίες (<i>Off-shore</i>).....	77
3.2	2 ^ο κριτήριο διαχωρισμού: Μέγεθος κατασκευής και κατεύθυνση κυματισμού	79
3.2.1	Σημειακοί απορροφητές (<i>Point Absorbers</i>)	79
3.2.2	Εξασθενητές κυματισμών (<i>Wave Attenuators</i>).....	80
3.2.3	WEC's τερματικού τύπου (<i>Wave Terminators</i>)	81
3.3	3 ^ο κριτήριο διαχωρισμού: Αρχή λειτουργίας της συσκευής.....	83
3.3.1	Πλωτοί ταλαντευόμενοι συλλέκτες (<i>Floating-Oscillating Body WEC's Devices</i>).....	83
3.3.2	Βυθισμένοι μετατροπείς διαφορικής πίεσης (<i>submerged pressure differential</i>)	84
3.3.3	Συσκευές υπερχείλισης (<i>Overtopping Devices</i>)	86
3.4	4 ^ο κριτήριο διαχωρισμού: Τρόπος μετατροπής της κυματικής ισχύος σε ηλεκτρική (<i>Power Take Off - PTO</i>)	90
3.4.1	Μετατροπή μέσω πνοής αέρα – Μεταφορά μέσω Στροβίλου (<i>Pneumatic PTO - Turbine Transfer</i>).....	90
3.4.2	Υδραυλική Μετατροπή - Μεταφορά μέσω στροβίλου/μοτέρ (<i>Hydraulic PTO - Turbine/Motor Transfer</i>).....	91
3.4.3	Ηλεκτρική γεννήτρια γραμμικού τύπου (<i>Electrical linear generator</i>).....	91
4.	Η παλλόμενη στήλη ύδατος και οι επικρατέστερες τεχνολογίες	94
4.1	Οι κατηγορίες της τεχνολογίας Π.Σ.Υ	97
4.2	Οι παλαιότερες ευρεσιτεχνίες (1799-1978).....	97
4.3	Τα πρώτα σχέδια & κατασκευές ΠΣΥ κατά την δεκαετία 1980.....	100
4.4	Επάκτιες μονάδες Π.Σ.Υ.....	102
4.4.1	Η μονάδα LIMPET στο νησί Islay της Σκωτίας	102
4.4.2	Η μονάδα ΠΣΥ στο νησί Pico της Πορτογαλίας	107

4.5	Τεχνολογίες ΠΣΥ εγκατεστημένες σε κυματοθραύστες λιμένων.....	109
4.5.1	Η μονάδα στο λιμάνι Vizhinjam, στην πόλη Trivandrum της Ινδίας.....	110
4.5.2	Η μονάδα στο λιμάνι Sakata, στην Ιαπωνία.....	112
4.5.3	Η μονάδα U-OWC λιμάνι της Civitavecchia στην Ιταλία.....	113
4.6	Παράκτιες και υπεράκτιες μονάδες Π.Σ.Υ.....	115
4.6.1	Η πλωτή κατασκευή OSPREY.....	115
4.6.2	Αξονοσυμμετρικές πλωτές συσκευές ΠΣΥ (spar buoy).....	118
4.6.3	Οι ευρεσιτεχνίες greenWave και blueWave της Oceanlinx.....	119
4.6.4	Το φαινόμενο του πολυσυντονισμού και η ευρεσιτεχνία της Energetech.....	120
4.6.5	Ο πλωτήρας ΟΕ Buoy τύπου BBDB.....	123
4.6.6	Η μονάδα Mighty Whale στην Ιαπωνία.....	125
4.6.7	Η πακτωμένη πιλοτική μονάδα στο Yongsoo της Νότιας Κορέας.....	125
4.7	Σχολιασμός και συμπεράσματα σχετικά με τις τεχνολογίες της Π.Σ.Υ.....	126
4.7.1	Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι επάκτιες τεχνολογίες Π.Σ.Υ.....	127
4.7.2	Σύγκριση των παράκτιων με τις επάκτιες μονάδες Π.Σ.Υ.....	130
4.7.3	Επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας Π.Σ.Υ.....	131
4.7.4	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας μονάδας Π.Σ.Υ.....	132
5.	Οι αεροστρόβιλοι της τεχνολογίας Παλλόμενης Στήλης Ύδατος.....	133
5.1	Οι αυτορυθμιζόμενοι αεροστρόβιλοι (self-rectifying turbines).....	135
5.2	Η Φυσική εξήγηση περιστροφής των αεροστροβίλων (Θεωρία αεροτομών).....	136
5.3	Η εξίσωση του Euler για τις στροβιλομηχανές.....	138
5.4	Δισδιάστατη ανάλυση ροής ενός αξονικού στροβίλου (2D Cascade Flow Analysis).....	141
5.5	Ο αυτορυθμιζόμενος αεροστρόβιλος Wells.....	146
5.5.1	Αεροστρόβιλος Wells με πτερύγωση σταθερής γωνίας.....	151
5.5.2	Αεροστρόβιλος Wells με πτερύγωση μεταβλητής γωνίας.....	153
5.5.3	Αεροστρόβιλος Wells με οδηγά πτερύγια.....	154
5.5.4	Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells αντίθετης φοράς.....	156
5.5.5	Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells ίδιας φοράς.....	159
5.5.6	Σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων του στροβίλου Wells.....	161
5.6	Ο αυτορυθμιζόμενος αεροστρόβιλος impulse.....	165
5.6.1	Οι παραλλαγές του αυτορυθμιζόμενου αεροστροβίλου impulse.....	170
5.7	Σύγκριση των αυτορυθμιζόμενων αεροστροβίλων Wells & Impulse.....	173
6.	Η φυσική περιγραφή και μαθηματική μοντελοποίηση της Π.Σ.Υ.....	179
6.1	Δυνάμεις αλληλεπίδρασης Πλωτών σωμάτων και κυματισμών.....	182

6.1.1 Δυνάμεις Διέγερσης (excitation).....	185
6.1.2 Δυνάμεις Ακτινοβολίας (Radiation).....	186
6.2 Το παραγόμενο δυναμικό κατά την αλληλεπίδραση Π.Σ.Υ και κυματισμών	189
6.3 Απορροφούμενη και άεργος ισχύς κατά την λειτουργία της Π.Σ.Υ	194
6.3.1 Άεργος Ισχύς και φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας.....	199
6.4 Η κυλινδρική αξονοσυμμετρική Π.Σ.Υ.....	203
Βιβλιογραφία	211

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Οι πιο «τρωτές» περιοχές του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής για το 2017 [5]	3
Εικόνα 2: Το μεγαλύτερο θαλάσσιο Αιολικό πάρκο στον Κόσμο [14].....	11
Εικόνα 3 : Πάρκο φωτοβολταϊκών στοιχείων στην πόλη Huainan στην Κίνα	12
Εικόνα 4 : Το παραπάνω σχήμα βοηθάει στην κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας αυτών των παλιρροϊκών φραγμάτων.....	13
Εικόνα 5 Το παλιρροϊκό φράγμα «La Rance» και η ακριβής τοποθεσία του στην Γαλλία [17]	14
Εικόνα 6 : Τεχνολογία SeaGen εκμετάλλευσης παλιρροϊακού ρεύματος [18].....	15
Εικόνα 7: Μια εγκατάσταση εκμετάλλευσης ωκεάνιας θερμικής ενέργειας που βρίσκεται στο Keahole Point στην Hawai.....	16
Εικόνα 8: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση του φαινομένου της ώσμωσης [18]	17
Εικόνα 9: Η φάση δημιουργίας, ανάπτυξης και απόσβεσης των ανεμογενών κυματισμών βαρύτητας.	24
Εικόνα 10: Τα βασικά μεγέθη ενός θαλάσσιου κυματισμού.....	26
Εικόνα 11: Η μορφή των τριχιών των ρευστών σωματιδίων του νερού κατά την διάρκεια του κυματισμού	46
Εικόνα 12: Οι τροχιές των σωματιδίων του ρευστού στην περίπτωση των προοδευόντων κυματισμών για διαφορετικά σχετικά βάθη του νερού.....	48
Εικόνα 13: Η σχηματική απεικόνιση της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας των κυματισμών [27]	50
Εικόνα 14: Το σχήμα που περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού της δυναμικής ενέργειας του αρμονικού οδεύοντος κυματισμού.....	51
Εικόνα 15 : Μέση ετήσια κατανομή της ροής κυματικής ενέργειας ανά μέτρο μετώπου κύματος (kW/m) [42]	68
Εικόνα 16 : Η μέση ετήσια ροή ενέργειας των κυματισμών στην Μεσόγειο [13]	69
Εικόνα 17: Τα σημεία τοποθέτησης των πλωτήρων του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ [50] (Αριστερά) και το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών (Δεξιά) [48].....	71
Εικόνα 18 : Τα 6 βασικά σχέδια για WEC's [54].....	76
Εικόνα 19: Ταξινόμηση WEC's ανάλογα με την απόσταση από την ακτή [52].....	78
Εικόνα 20 : Διαφορετικά μοντέλα WEC's ανάλογα με την απόσταση εγκατάστασης τους από την ακτή (Τα μοντέλα που φαίνονται στο σχήμα θα αναλυθούν παρακάτω) [54]	78
Εικόνα 21 : Point Absorbers με αγκυρώσεις ή πακτωμένοι στον πυθμένα [54]	79
Εικόνα 22 : Πάρκο με Point Absorbers τύπου OPT PowerBuoy [52]	80
Εικόνα 23: Ο εξασθενητής κυματισμών και η διάταξη Pelamis [36]	81
Εικόνα 24 : Ο διαχωρισμός των WEC's ανάλογα με το μέγεθος: (α) OPT point absorber, (b) Pelamis Attenuator (c) Wave Dragon Terminator	82
Εικόνα 25 : Η συσκευή κυματικής ενέργειας «Πάπια του Salter» [62]	82
Εικόνα 26 : Βαθμοί ελευθερίας ενός πλωτού WEC	83
Εικόνα 27 : Σχήμα προσομοίωσης της κατασκευής Wavestar σε κατάσταση λειτουργίας (αριστερά) και σε κατάσταση παύσης λόγω καταιγίδας (δεξιά) [63].....	84
Εικόνα 28 : Σχηματική αναπαράσταση της πίεσης στον πυθμένα από το κύμα (αριστερά) και η τυπική μορφή μετατροπέα διαφορικής πίεσης (δεξιά) [27]	85
Εικόνα 29 : Θαλάσσιο πάρκο με WEC's τύπου AWS.....	85

Εικόνα 30 : Η αρχή λειτουργίας μιας συσκευής υπερχειλίσης.....	86
Εικόνα 31 : Η πιλοτική κατασκευή Wave Dragon που βρίσκεται 1,7 km έξω από την ακτή Pembrokeshire στην Ουαλία (Ηνωμένο Βασίλειο).....	86
Εικόνα 32 : Το σχεδιάγραμμα της κατασκευής Wave Dragon.....	87
Εικόνα 33 : Το σχεδιάγραμμα της συσκευής Tarchan.....	88
Εικόνα 34 : (Αριστερά) επάκτια και (δεξιά) υπεράκτια συσκευή υπερχειλίσης τύπου SSG [70].....	88
Εικόνα 35 : Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της συσκευής OWSC.....	89
Εικόνα 36 : (Αριστερά) Μεταφορά συσκευής Oyster σε πραγματικό μέγεθος και (Δεξιά) η συσκευή Oyster σε λειτουργία.....	90
Εικόνα 37 : Τρόποι μετάδοσης της κίνησης του WEC, στην γεννήτρια για την απόληψη της κυματικής ενέργειας [52].....	92
Εικόνα 38 : Σχηματική αναπαράσταση του γεωλογικού φυσητήρα [27].....	94
Εικόνα 39 : Σχηματική απεικόνιση της ΠΣΥ (αριστερά) και η αλυσίδα μετατροπής ενέργειας της ΠΣΥ (δεξιά) [74].....	95
Εικόνα 40 : Η αρχή λειτουργίας της παλλόμενης στήλης ύδατος.....	96
Εικόνα 41 : Σημαδούρα-σφικτήρας (whistling buoy) – αριστερά – και η εφαρμοσμένη τεχνολογία ΠΣΥ για την ηλεκτροδότηση της οικίας του Bochaux-Praceique – δεξιά.....	98
Εικόνα 42 : Το σχέδιο του πλωτήρα (αριστερά), οι λεπτομέρειες του μηχανικού συστήματος (στην μέση) και ο πραγματικός πλωτήρας ΠΣΥ «Uruga» του Masuda που χρησίμευε ως φωτεινός σηματοδότης (δεξιά) [73].....	99
Εικόνα 43 : Η φορτηγίδα Kai mei [79].....	100
Εικόνα 44 : Ο Πλωτήρας Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα (BBDB).....	101
Εικόνα 45: Η επάκτια ΠΣΥ στο Toftestallen της Νορβηγίας (1985).....	101
Εικόνα 46 : Η μονάδα των 75 kW του Παν/μιου του Belfast (αριστερά) και ο στρόβιλος της κατασκευής (δεξιά) [73].....	102
Εικόνα 47 : Η μονάδα LIMPET κατά την κατασκευή (αριστερά) και η ολοκληρωμένη κατασκευή (δεξιά) [81].....	103
Εικόνα 48 : Το σχεδιάγραμμα των μερών της μονάδας LIMPET (πάνω) [82] Τρισδιάστατη καλλιτεχνική απεικόνιση της μονάδας LIMPET (κάτω) [83].....	104
Εικόνα 49: Ο αεροστρόβιλος Voith Hydro Wavegen RT2 LIMPET (110 kW) [73].....	104
Εικόνα 50: Το εμπρόσθιο (δεξιά) και το πίσω (αριστερά) μέρος της μονάδας στο νησί Pico [83]....	107
Εικόνα 51 : Το σχεδιάγραμμα της μονάδας στο νησί Pico [83] (αριστερά) Ο στρόβιλος Wells μεταβλητής γωνίας που χρησιμοποιήθηκε στην μονάδα στο νησί Pico [79] (δεξιά).....	108
Εικόνα 52 : Η μονάδα ΠΣΥ στο Trivandrum της Ινδίας [27] [83].....	110
Εικόνα 53 Το 3D σχεδιάγραμμα της μονάδας (αριστερά) και η μονάδα κατά την περίοδο κατασκευής της (δεξιά) [83].....	110
Εικόνα 54: Το σχεδιάγραμμα της μονάδας Π.Σ.Υ στην μπροστινή όψη του [78].....	112
Εικόνα 55 : Η μονάδα ΠΣΥ στο λιμάνι Sakata της Ιαπωνίας κατά την περίοδο κατασκευής της (Αριστερά) & κατά την φάση λειτουργίας της (δεξιά) [27] [83].....	113
Εικόνα 56: Το σχεδιάγραμμα της Π.Σ.Υ U-OWC.....	114
Εικόνα 57 : Το σχεδιάγραμμα της Τομής της τεχνολογίας U-OWC (δεξιά) και η πραγματική μονάδα στο λιμάνι της Civitavecchia κατά την διάρκεια κατασκευής της (αριστερά) [79] [85].....	115
Εικόνα 58 : Η συσκευή OSPREY 1 κατά την διάρκεια της κατασκευής της [83].....	116

Εικόνα 59 : Η τομή της συσκευής spar buoy (αριστερά) και το μοντέλο κλίμακας 1:16 που δοκιμάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο (μέση) [75] Η μονάδα Sperbooy με πολλαπλούς σωλήνες ΠΣΥ (δεξιά) [78] [27].....	118
Εικόνα 60 : Η κατασκευή greenWave στο λιμάνι Adelaide της Αυστραλίας πριν ρυμουλκηθεί προς το σημείο εγκατάστασης, 2014 (αριστερά) [79] και η πλέον εγκατεστημένη μονάδα greenWave (δεξιά).....	119
Εικόνα 61 : Το πιλοτικό μοντέλο Mk3, κλίμακας 1:3, τύπου blueWave της Oceanlinx [73]	120
Εικόνα 62 : Η πακτωμένη μονάδα ΠΣΥ με τοιχώματα συντονισμού, της Oceanlinx (ή Energetech), 2005 (αριστερά) [86] και ένα καλλιτεχνικό σχέδιο της (δεξιά) [46]	121
Εικόνα 63: Καλλιτεχνική απεικόνιση του πλωτήρα ΟΕ Buoy (αριστερά), ένα σχεδιάγραμμα σχετικό με τον τρόπο λειτουργίας του (δεξιά) [87]	123
Εικόνα 64 : Η συσκευή ΟΕ Buoy τύπου BBDB στην Ιρλανδία, σε φυσιολογικές συνθήκες θάλασσας (αριστερά) και κατά την διάρκεια καταιγίδας (δεξιά) [73]	124
Εικόνα 65 : Η μονάδα Mighty Whale. Η κατασκευή στον Όρμο Gokasho στην Ιαπωνία (δεξιά) και το σχεδιάγραμμα του προφίλ της (αριστερά) [79] [78]	125
Εικόνα 66 : Η πακτωμένη κατασκευή ΠΣΥ στο Yongsoo της νότιας Κορέας. Αριστερά το σχεδιάγραμμα της και δεξιά η πραγματική μονάδα από την πίσω πλευρά. [75] [79]	125
Εικόνα 67: (α) Τομή μιας τουρμπίνας ακτινικής ροής παράλληλη στον άξονα περιστροφής του δρομέα (β) Τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής του δρομέα. [90]	134
Εικόνα 68: (α) Τομή μιας τουρμπίνας αξονικής ροής, παράλληλη στον άξονα περιστροφής του δρομέα (β) Τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής του δρομέα. [90]	134
Εικόνα 69: Η αεροτομή του πτερυγίου ενός αεροστροβίλου	136
Εικόνα 70: Η κατανομή της πίεσης και οι δυνάμεις που ασκούνται σε αεροτομή μέσα σε ρεύμα αέρα.	137
Εικόνα 71: Ο δρομέας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω και φαίνεται με κόκκινο χρώμα. Η διαδρομή ενός σωματιδίου του ρευστού φαίνεται με μπλε χρώμα καθώς μετακινείται από την είσοδο 1, στην έξοδο 2 του δρομέα.....	138
Εικόνα 72: Πτερύγιο ενός αεροστροβίλου αξονικής ροής. Με γκρι χρώμα παριστάνεται ένα τμήμα του δρομέα, ενώ η κόκκινη γραμμή είναι ο άξονας του δρομέα [92].....	142
Εικόνα 73: Τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ταχυτήτων της ροής μιας στροβιλομηχανής..	143
Εικόνα 74: Ένα πρωτότυπο μοντέλο αεροστροβίλου Wells [95] (αριστερά). Το σκιαγράφημα του αεροστροβίλου Wells [72] (δεξιά)	146
Εικόνα 75 : οι δυνάμεις που ασκούνται στην αεροτομή κατά τις δύο φορές της ροής του αέρα [95]	147
Εικόνα 76: Δισδιάστατη αναπαράσταση των τριγώνων ταχυτήτων ενός αεροστροβίλου Wells	149
Εικόνα 77: Η παροχή όγκου αέρα συναρτήσεως του χρόνου σε μια μονάδα απόληψης κυματικής ενέργειας OWC.....	152
Εικόνα 78: Σχηματική απεικόνιση του αεροστροβίλου Wells με χρήση πτερυγίων υπό γωνία γ	152
Εικόνα 79 : Στροβιλομηχανή που χρησιμοποιεί στροβίλο Wells με λεπίδες αυτορυθμιζόμενης γωνίας κλίσης. [100].....	153
Εικόνα 80 : Τα τρίγωνα ταχυτήτων για τον αεροστροβίλο Wells με οδηγία πτερύγια.	155
Εικόνα 81 : Το δισδιάστατο προφίλ της διπλής αντίρροπης πτερύγωσης του αεροστροβίλου Wells και τα αντίστοιχα τρίγωνα των ταχυτήτων. [79].....	157
Εικόνα 82: Το δισδιάστατο προφίλ της διπλής ομόρροπης πτερύγωσης του αεροστροβίλου Wells και τα αντίστοιχα τρίγωνα των ταχυτήτων. [102].....	160

Εικόνα 83: : Τρισδιάστατο σκίτσο του αεροστρόβιλου impulse . [102]	165
Εικόνα 84: Προφίλ των πτερυγίων του Δρομέα (α) Απλό προφίλ (β) Ελλειπτικό προφίλ [104]	166
Εικόνα 85: Τυπική σχηματική απεικόνιση του προφίλ αεροστρόβιλου Impulse και των αντίστοιχων τριγώνων ταχυτήτων. [77].....	168
Εικόνα 86 : Δισδιάστατη απεικόνιση του προφίλ του αεροστρόβιλου Mc Cormick και των τριγώνων ταχυτήτων	171
Εικόνα 87 : Η δισδιάστατη απεικόνιση του αεροστρόβιλου με οδηγά πτερύγια μεταβλητής γωνίας, σε δύο γωνιακές θέσεις	172
Εικόνα 88: Υποβρύχιος θάλαμος που περιέχει παγιδευμένο αέρα πίεσης P_{k0} σε ηρεμία (αριστερά) και υπό την επίδραση κυματισμού (αριστερά) [32].....	180
Εικόνα 89: Η κίνηση ενός παλλόμενου πλωτού σώματος.....	183
Εικόνα 90: Ένα σύστημα πλωτών σωμάτων και Π.Σ.Υ μέσα στην θάλασσα	189
Εικόνα 91: Η κυλινδρική αξονοσυμμετρική Π.Σ.Υ.....	203
Εικόνα 92: Οι κυλινδρικές συντεταγμένες στο επίπεδο (x,y) και η γωνία β του προσπίπτοντος κυματισμού	204

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Παγκόσμια μέση θερμοκρασία από τον 19 ^ο αιώνα μέχρι σήμερα [2]	1
Διάγραμμα 2 : Συγκέντρωση CO ₂ στην ατμόσφαιρα βάση μετρήσεων που έγιναν στην Mauna Loa [3]	2
Διάγραμμα 3: Η έκταση που καταλαμβάνουν οι πάγοι της Αρκτικής από το 1979 έως το 2018 τον μήνα Σεπτέμβριο [4]	2
Διάγραμμα 4 : Η παγκόσμια αύξηση των αναγκών σε ενέργεια το έτος 2017-18 [6].....	4
Διάγραμμα 5 : Παγκόσμια ζήτηση ενέργειας από το 1990 έως και το 2035.....	5
Διάγραμμα 6: Παγκόσμια παραγωγή Ενέργειας από Α.Π.Ε και οι 6 χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή (2018). [7].....	6
Διάγραμμα 7: Ποσοστιαία παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε στην Ευρώπη [9]	8
Διάγραμμα 8: Το γενικό φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών, βάση του μήκους κύματος τους ή/και της περιόδου τους, το οποίο δίνει μια γενική εικόνα όλων των ανωτέρω φαινομένων. [25].....	21
Διάγραμμα 9 : Η κυματομορφή που δημιουργείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου, με την πάροδο του χρόνου. [5]	59
Διάγραμμα 10 : Το φάσμα μιας συγκεκριμένης ενεργειακής κατάστασης της θάλασσας	64
Διάγραμμα 11 : Η ποσοστιαία τεχνολογική ανάπτυξη WEC's σε παγκόσμιο επίπεδο. [52]	93
Διάγραμμα 12: Το διάγραμμα απόδοσης του Voith Hydro Wavegen [73]	105
Διάγραμμα 13: Οι καμπύλες απόδοσης των στροβίλων Wells και impulse [77]	178
Διάγραμμα 14 : Η συνάρτηση της συνολικής απορροφούμενης ισχύος, συναρτήσε της δυναμικής πίεσης. Στο σχήμα φαίνεται και η ισχύς διέγερσης (διακεκομμένη γραμμή), καθώς και η μέγιστη τιμή της ισχύος.....	198
Διάγραμμα 15: Η φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας για μια κυλινδρική Π.Σ.Υ αμελητέας καταβύθισης [32]	208

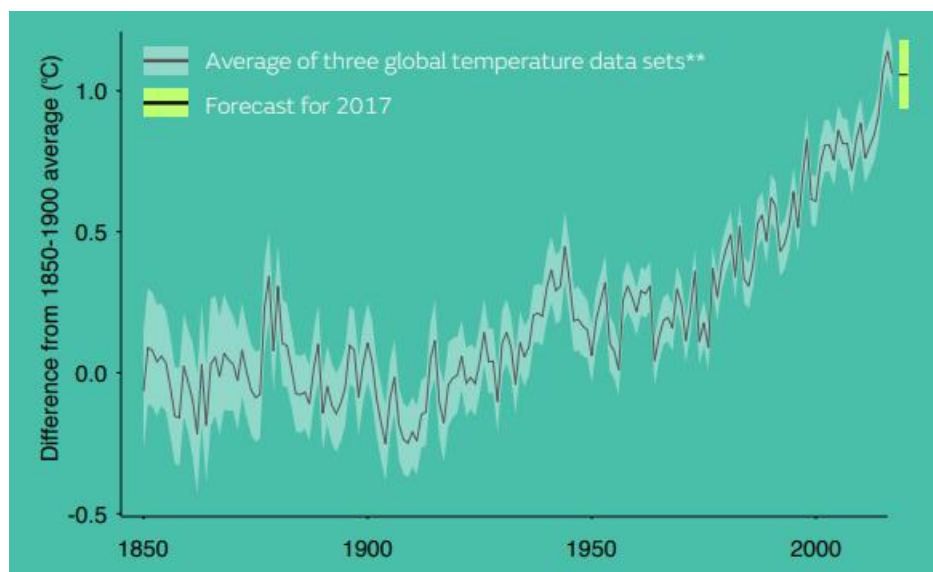
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Το δυναμικό των διαφόρων θαλάσσιων Α.Π.Ε από την θάλασσα	17
Πίνακας 2 : Ασυμπτωτικές μορφές των υπερβολικών συναρτήσεων [30]	43
Πίνακας 3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας LIMPET [83]	106
Πίνακας 4 : Εκτιμούμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας LIMPET [83]	106
Πίνακας 5 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του ερευνητικού έργου Pico [83]	109
Πίνακας 6 : Ο πίνακας με την εκτιμούμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας [83].....	111
Πίνακας 7 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της Π.Σ.Υ στο Trivandrum [83]	111
Πίνακας 8 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της Π.Σ.Υ στο λιμάνι Sakata [83]	113
Πίνακας 9 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της μονάδας OSPREY 1 [83]	116
Πίνακας 10 : Ο πίνακας με την εκτιμούμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας OSPREY 1 [83]	117
Πίνακας 11: Ο πίνακας με την εκτιμούμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας Π.Σ.Υ της Oceanlinx [83]	122
Πίνακας 12 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της μονάδας Π.Σ.Υ της Oceanlinx [83]	122
Πίνακας 13 Οι ερμηνείες των μεταβλητών που εμπεριέχονται τις παραπάνω σχέσεις [103].....	167
Πίνακας 14 : Οι προδιαγραφές ενός αυτορυθμιζόμενου στροβίλου impulse [103]	170
Πίνακας 15 : Λόγοι παραμέτρων μεταξύ των στροβίλων Wells και impulse	175
Πίνακας 16 : Οι έξι συνιστώσες της κίνησης ενός πλωτού ταλαντευόμενου σώματος	184

1. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας από την Θάλασσα

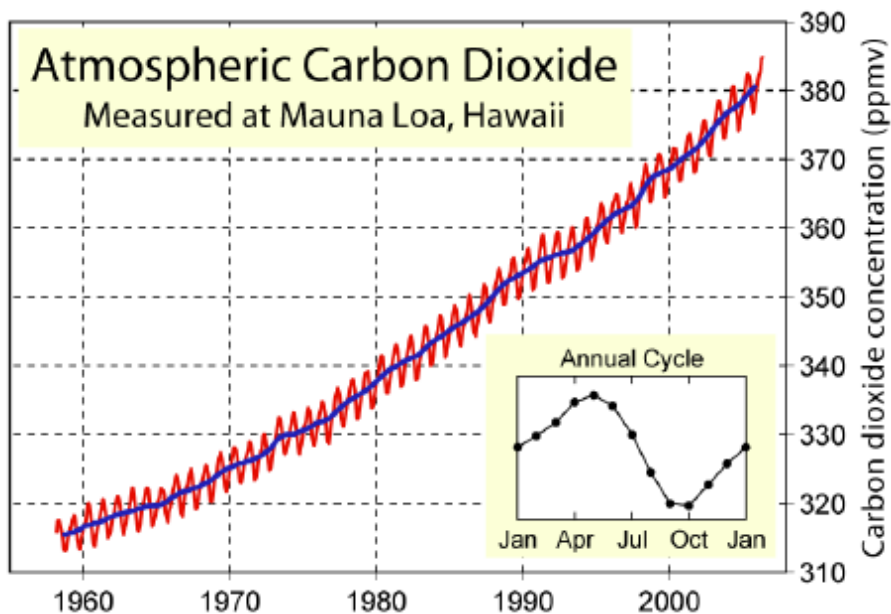
1.1 Η οικολογική Κρίση

Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, η εξαφάνιση πολλών ειδών της χλωρίδας και της πανίδας, οι φυσικές καταστροφές, η διαρκής τήξη των πάγων στους πόλους και γενικότερα η ραγδαία επιδείνωση του κλίματος της Γής είναι πλέον ένα γεγονός που κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει. Το 2016 αποτέλεσε την χρονολογία ορόσημο καθώς τον Σεπτέμβριο του ίδιου έτους ανιχνεύθηκαν τα υψηλότερα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ενώ για δεύτερη συνεχή χρονιά η μέση θερμοκρασία ήταν κατά 1 °C μεγαλύτερη από αυτήν της προβιομηχανικής εποχής. [1] Τα όρια ασφάλειας της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχουν πλέον ξεπεραστεί και η πορεία της κλιματικής αλλαγής είναι μη αναστρέψιμη. Στο διάγραμμα 1 φαίνεται ξεκάθαρα η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας τις τελευταίες δεκαετίες. Το 2017 κατανέμεται στα 3 έτη με την μεγαλύτερη καταγραφή θερμοκρασίας στα χρονικά.



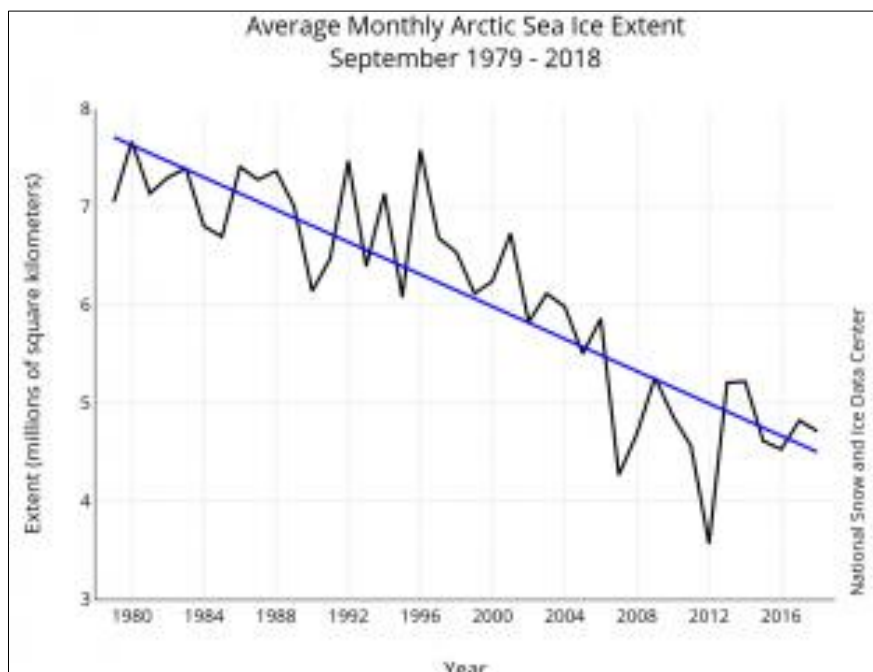
Διάγραμμα 1 : Παγκόσμια μέση θερμοκρασία από τον 19^ο αιώνα μέχρι σήμερα [2]

Ένας από τους βασικότερους λόγους ρύπανσης του περιβάλλοντος και συνεχούς αύξησης της τιμής του υδραργύρου ανά την υφήλιο είναι οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) προς την ατμόσφαιρα λόγω της χρήσης *συμβατικών πηγών* καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας. Μερικά παραδείγματα είναι η χρήση του ξύλου, του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, του λιγνίτη και άλλων ορυκτών καυσίμων. Αυτή η «στάση» της σύγχρονης παραγωγής, δηλαδή η αχαλίνωτη «ανάπτυξη» μέσω της χρήσης συμβατικών πηγών καυσίμων και ο ανταγωνισμός, τόσο μεταξύ των εταιριών, όσο και μεταξύ των κρατών χωρίς καμία μέριμνα ή σεβασμό προς την φύση έχει φέρει τον πλανήτη στο χείλος της καταστροφής.

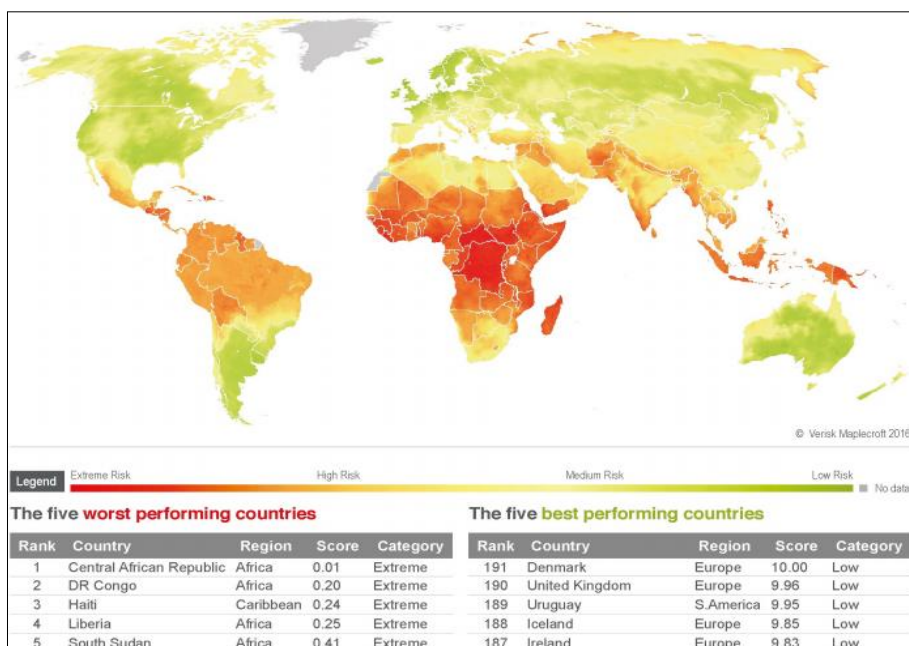


Διάγραμμα 2 : Συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα βάση μετρήσεων που έγιναν στην Mauna Loa [3]

Εάν η αρνητική αυτή κατάσταση συνεχιστεί την ίδια συχνότητα, μέχρι το 2050 η θερμοκρασία θα αυξηθεί για 2 ακόμη βαθμούς πράγμα που με την σειρά του θα απειλήσει το ίδιο το ανθρώπινο είδος. Αρκετές αστικές περιοχές (πιθανόν και ολόκληρες χώρες) θα βυθιστούν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας εξ αιτίας της ανόδου της θαλάσσιας στάθμης, ενώ προβλέπεται πως κάποιες περιοχές της τροπικής (και όχι μόνο) ζώνης πιθανών να καταστούν μη κατοικήσιμες. Προβλέπεται λοιπόν πως μια ακόμη αιτία μετανάστευσης στο μέλλον θα είναι η κλιματική αλλαγή.



Διάγραμμα 3: Η έκταση που καταλαμβάνουν οι πάγοι της Αρκτικής από το 1979 έως το 2018 τον μήνα Σεπτέμβριο [4]



Εικόνα 1: Οι πιο «τρωτές» περιοχές του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής για το 2017 [5]

Στο διάγραμμα 3 είναι εμφανής η σταδιακή μείωση της έκτασης που καλύπτουν οι πάγοι στην Αρκτική. Συγκεκριμένα ανά δεκαετία η έκταση τους μειώνεται ποσοστιαία κατά 12,8% [4]. Βλέπουμε λοιπόν πως το βασικότερο πρόβλημα του πλανήτη αποτελεί η υπερθέρμανση λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και φυσικά η σταδιακή μείωση των πάγων της Αρκτικής. Εάν ωστόσο θέλαμε να ορίσουμε τα βασικά οικολογικά προβλήματα θα καταλήγαμε στα παρακάτω:

- Η τρύπα του όζοντος (Ozone hole)
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Greenhouse effect)
- Η όξινη βροχή (Acid Rain)
- Η καταστροφή των δασών (Deforestation)
- Η ατμοσφαιρική ρύπανση (Atmospheric Pollution)
- Η ηχορύπανση (Noise Pollution)
- Η καταστροφή του εδάφους (Soil destruction)
- Τα οικιακά απόβλητα ή κοινώς σκουπίδια (Household wastes)
- Τα ραδιενεργά κατάλοιπα (Radioactive residues)
- Η χρήση φυτοφαρμάκων (Pesticides use)
- Η μείωση της βιοποικιλότητας (Biodiversity reduce)

Οι βασικότερες αιτίες των παραπάνω προβλημάτων είναι:

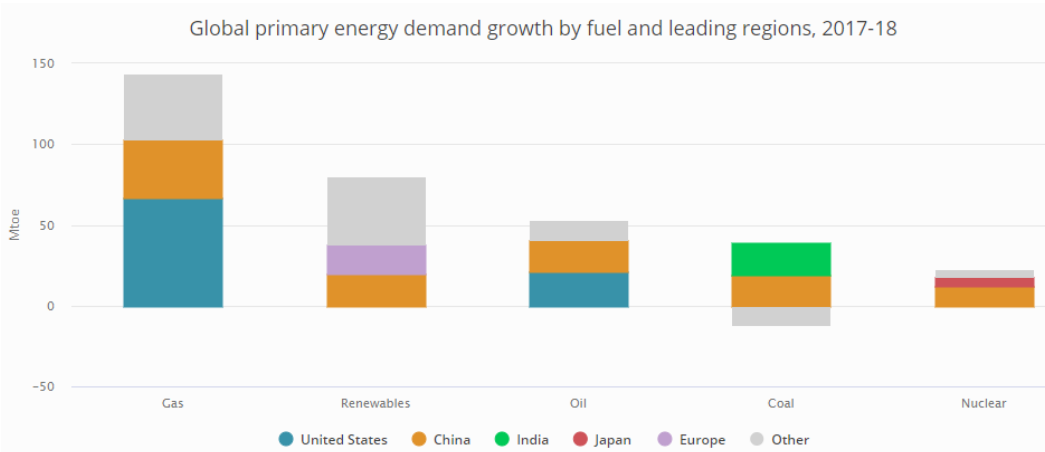
- Οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής (Industrial production methods)
- Ο υπερκαταναλωτισμός (Consumerism)
- Η αστικοποίηση (Urbanization)
- Η αλόγιστη και βάνουση εκμετάλλευση των φυσικών πόρων (Overexploitation of natural resources)

1.2 Οι ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας

Με βάση τα δεδομένα της παραπάνω παραγράφου καθίσταται πλέον αναγκαία η προσπάθεια αλλαγής του ενεργειακού τοπίου έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Μια καθοριστική διέξοδος είναι η στροφή προς άλλες πηγές ενέργειας, πέραν των συμβατικών και αυτές δεν είναι άλλες από τις **Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)** ή *ήπιες μορφές ενέργειας*, ή *νέες πηγές ενέργειας*, ή αλλιώς την *πράσινη ενέργεια*.

Ο χαρακτηρισμός τους ως «ήπιες» μορφές ενέργειας αφορά το γεγονός πως οι αντίστοιχες τεχνολογικές εφαρμογές απλώς δεσμεύουν μέρος της ροής ενέργειας του πλανήτη που προέρχεται από υπέργειες, επίγειες ή υπόγειες πηγές και φυσικά αφορά την ελαχιστοποιημένη επιβάρυνση του περιβάλλοντος κατά την αξιοποίησή τους. Πρόκειται για μορφές ενέργειας που με μεγάλη γεωγραφική διασπορά και μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις. Επομένως τα σχέδια και οι προοπτικές για κάθε χώρα και περιοχή διαφοροποιούνται αισθητά.

Εκτιμάται ότι οι παγκόσμιες ανάγκες σε κατανάλωση ενέργειας το 2040 θα είναι περίπου κατά 30% πιο αυξημένη από αυτήν το 2010. Επίσης εκτιμάται ότι την ίδια περίοδο η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια θα καταλαμβάνει το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης [1]. Αυτό μάλιστα είναι ιδιαίτερα εμφανές από το γεγονός πως η παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε κατά 2,3% το 2018, ποσοστό σχεδόν διπλάσιο του μέσου ρυθμού ανάπτυξης του έτους 2010.



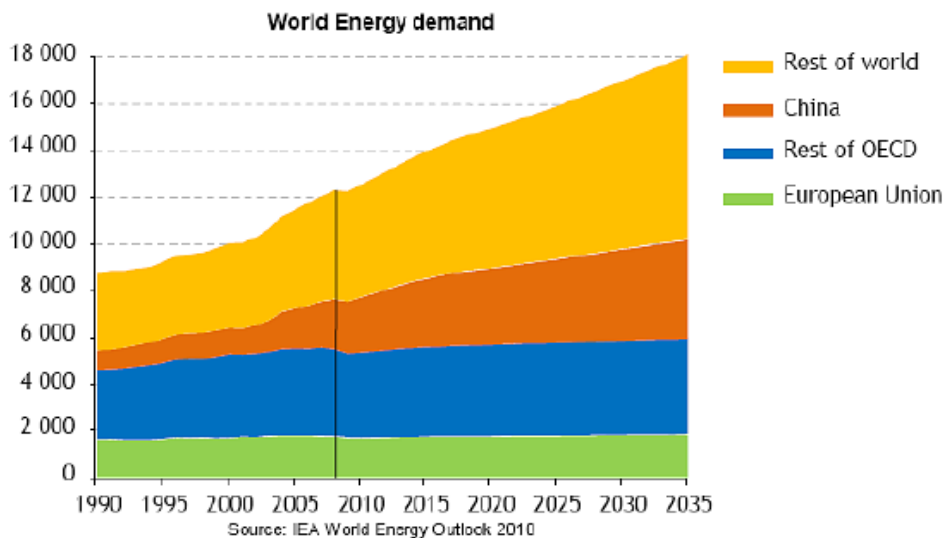
Διάγραμμα 4 : Η παγκόσμια αύξηση των αναγκών σε ενέργεια το έτος 2017-18¹ [6]

Εάν προστεθεί σε αυτό ότι οι παραδοσιακές συμβατικές πηγές ενέργειας είναι πεπερασμένες μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών είναι απαραίτητη για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών.

Άρα, πέρα από το περιβαλλοντικό πρόβλημα, η ανάπτυξη των ΑΠΕ είναι απαραίτητη και για έναν ακόμη λόγο: την ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση του σύγχρονου πολιτισμού σε

¹ Στον κάθετο άξονα διαβάζουμε «Mtoe : Million Tonnes of Oil Equivalent», δηλαδή ενέργεια ισοδύναμη σε εκατομμύρια τόνους πετρελαίου.

παραγωγή ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε πως το επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας είναι ένας από τους πιο ακριβείς τρόπους για να μετρηθεί η πρόοδος και η ευημερία μιας σύγχρονης κοινωνίας.



Διάγραμμα 5 : Παγκόσμια ζήτηση ενέργειας από το 1990 έως και το 2035

Στις ΑΠΕ, σύμφωνα με απόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (2009/28/ΕΚ), συγκαταλέγονται οι παρακάτω:

- Η *αιολική ενέργεια* που κάνει χρήση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, δηλαδή της μεταφοράς μαζών αέρα λόγω διαφοράς πίεσης και θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα. Έχει ήδη αξιοποιηθεί ευρέως στην ηλεκτροπαραγωγή και αποτελεί ίσως την πιο ώριμη τεχνολογία στον τομέα των ΑΠΕ.
- Η *ηλιακή ενέργεια* η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι). Η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια με βάση τις ραγδαίες εξελίξεις πάνω στον τεχνολογικό σχεδιασμό πιο αποδοτικών ηλιακών κυψελών.
- Η *υδραυλική ενέργεια* η οποία επίσης χρησιμοποιείται στην ηλεκτροπαραγωγή με την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του νερού λόγω υδατικής πτώσης.
- Η ενέργεια από την βιομάζα, η οποία χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό κατά τη φωτοσύνθεση. Ως πρώτη ύλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης αστικά απόβλητα και απορρίμματα οδηγώντας στην παραγωγή καυσίμων φιλικών προς το περιβάλλον.
- Η *γεωθερμική ενέργεια* που προέρχεται από τη θερμότητα λόγω της ραδιενεργούς αποσύνθεσης των πετρωμάτων και είναι εκμεταλλεύσιμη όταν η θερμότητα αυτή εκτονώνεται κοντά στην επιφάνεια της γης. Χρησιμοποιείται είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία για παράδειγμα καλύπτει το 80-90% των θερμικών ενεργειακών αναγκών και το 20%

των αναγκών της σε ηλεκτρισμό με την βοήθεια της γεωθερμικής ενέργειας.

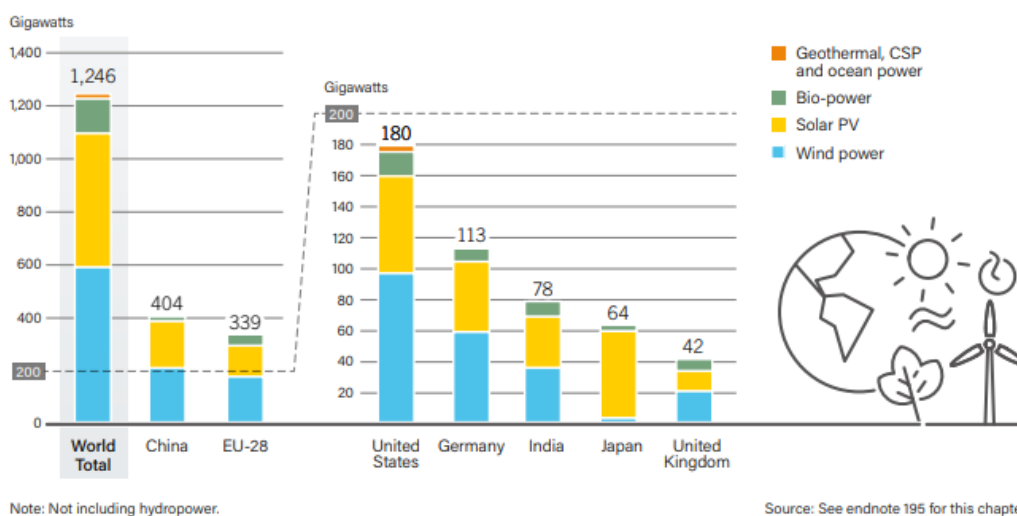
- Η ενέργεια από τη θάλασσα, η οποία χωρίζεται σε αρκετές υποκατηγορίες που θα αναλυθούν παρακάτω.

Η μείωση των εκπομπών του CO₂ στην ατμόσφαιρα πρέπει να πέσει τουλάχιστον στο 40% της σημερινής τιμής της μέχρι το 2050 και αρκετές εταιρίες παραγωγής ενέργειας στρέφονται ολοένα και περισσότερο προς την κατεύθυνση ανάπτυξης των ΑΠΕ. Ο τελικός στόχος είναι να πάψει μελλοντικά η ανθρωπότητα να εξαρτάται από τα ορυκτά καύσιμα και ειδικά από το Πετρέλαιο που σε λίγες δεκαετίες θα έχει εκλείψει.

Κάθε παρέμβαση του ανθρώπου στην φύση – πόσο μάλλον η άντληση και η μεταφορά ενέργειας – δημιουργεί επιπτώσεις και διαταραχές, οπότε και οι ΑΠΕ με την σειρά τους επιβαρύνουν αρνητικά το περιβάλλον. Αυτό που πρέπει να αξιολογηθεί σε κάθε περίπτωση είναι η σπουδαιότητα αυτών των διαταραχών και κυρίως η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ενεργειακών διαδικασιών. Εάν φυσικά ακολουθηθούν και οι κατάλληλες μελέτες για την σωστή εγκατάσταση και λειτουργία των διαθέσιμων τεχνολογιών, οι επιπτώσεις αυτές μειώνονται στο ελάχιστο και σίγουρα είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες επιπτώσεις που επιφέρουν οι συμβατικές πηγές.

Σχετικά με τις ακριβείς επιπτώσεις των τεχνολογιών αυτών υπάρχουν αρκετές αντιτιθέμενες απόψεις οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις έχουν να κάνουν περισσότερο με αντικρουόμενα συμφέροντα και όχι τόσο με αντικειμενικές συνθήκες. Αυτή η κατάσταση, σε συνδυασμό με την έλλειψη σωστής ενημέρωσης του κόσμου σχετικά με το ζήτημα, γεννούν σε αρκετές περιπτώσεις σφοδρές αντιδράσεις απέναντι στην εγκατάσταση ΑΠΕ κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

FIGURE 9. Renewable Power Capacities in World, EU-28 and Top 6 Countries, 2018



Διάγραμμα 6: Παγκόσμια παραγωγή Ενέργειας από Α.Π.Ε και οι 6 χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή (2018). [7]

Στα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ συγκαταλέγονται τα εξής βασικά:

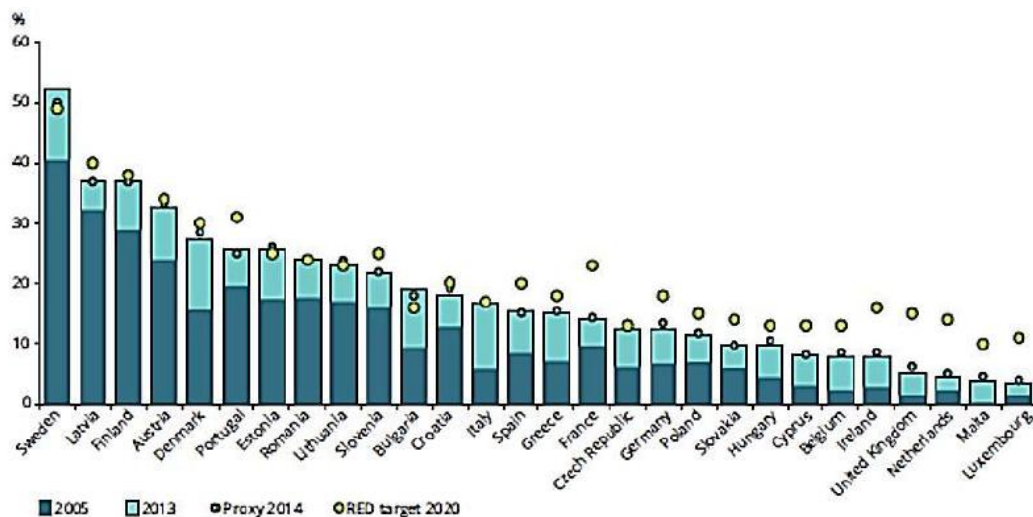
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, με μηδενικά κατάλοιπα, απόβλητα και εκπομπές σε CO₂.
- Αποτελούν ανεξάντλητες πηγές, σε αντίθεση προς τα ορυκτά καύσιμα
- Αποτελούν έναν καθοριστικό παράγοντα επίτευξης της ενεργειακής αυτάρκειας πολλών κρατών, συμβάλλοντας έτσι στην σταθερότητα τους.
- Οι εφαρμογές τους είναι ευέλικτες, έχοντας χαρακτήρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση επιθυμητής μορφής ενέργειας προς παραγωγή.
- Παρουσιάζουν πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης με αποτέλεσμα η αρχική επένδυση να παρουσιάζει πολύ γρήγορη απόσβεση.
- Οι περισσότερες κυβερνήσεις επιδοτούν με διάφορους τρόπους τέτοιας μορφής επιχειρηματική δραστηριότητα.
- Δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας.
- Παρουσιάζουν γεωγραφική διασπορά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος επιτρέποντας την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

Σε ό,τι αφορά τα μειονεκτήματά των ΑΠΕ, αυτά αφορούν κατά βάση θέματα ενεργειακής απόδοσης και διαθεσιμότητας, καθώς και διάφορους οικονομικούς παράγοντες:

- Η γεωγραφική διασπορά τους αποτελεί μειονέκτημα, όταν είναι επιθυμητή μεγάλη ενεργειακή συγκέντρωση σε ορισμένη περιοχή
- Παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλης κλίμακας ενεργειακά πάρκα.
- Ακολουθώντας την κατανομή και τις διακυμάνσεις των φυσικών φαινομένων που εκμεταλλεύονται, και η παραγόμενη ενέργεια θα παρουσιάζει εποχιακές και γεωγραφικές διακυμάνσεις καθιστώντας αναγκαία την ύπαρξη εναλλακτικών πηγών ή τεχνολογίας αποθήκευσης μεγάλου κόστους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους επιτρέπει μόνο μικρούς συντελεστές απορρόφησης από το δίκτυο και δύσκολη γεωγραφική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας.

Η περεταίρω ανάπτυξη των διαθέσιμων τεχνολογιών, καθώς και ανάδειξη νέων καινοτομιών, αποτελεί την καλύτερη δυνατή πρόταση για την συντήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Η πρόοδος της τεχνολογίας στο συγκεκριμένο πεδίο οδεύει με γοργούς ρυθμούς και αυτό είναι κάτι το ιδιαίτερα ενθαρρυντικό για το ευρωπαϊκό ενεργειακό πλάνο «20-20-20» [8] που αποτελεί στόχο όλων των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής ένωσης μέχρι το 2020:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με έτος αναφοράς το 1990
- 20% διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Αφορά την βελτίωση της απόδοσης (efficiency) των υφιστάμενων μεθόδων.



Διάγραμμα 7: Ποσοστιαία παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε στην Ευρώπη [9]

Οι παραπάνω στόχοι έχουν κατανομηθεί ανά χώρα [10], με την Ελλάδα να υποχρεούται να πετύχει τα παρακάτω:

- Μείωση των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου κατά 4%
- Διεύρυνση των ΑΠΕ κατά 18% στην εγχώρια τελική κατανάλωση με έτος αναφοράς το 2005.

Η ελληνική κυβέρνηση με τον Νόμο 3851/2010 [11] αποφάσισε την αναβάθμιση της συμβολής της Ελλάδας στην επίτευξη των τελικών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθορίζοντας ως εθνικό στόχο την συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 20% στην τελική κατανάλωση με την εξής επιμέρους κατανομή:

- 40% συμμετοχή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή
- 20% συμμετοχή ΑΠΕ σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης
- 15% συμμετοχή ΑΠΕ στις μεταφορές

Μεταφράζοντας τους παραπάνω στόχους προκύπτει ότι για το 2020, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των ενεργειακών μοντέλων, αναμένεται να ικανοποιηθούν για το μεν 40% της ηλεκτροπαραγωγής ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ (4000MW σήμερα), με συμμετοχή των τεχνολογιών στο σύνολό τους, με προεξέχουσες τα αιολικά πάρκα με 7500MW, τα υδροηλεκτρικά με 3000MW και τα ηλιακά με περίπου 2500MW, ενώ για τη θέρμανση και ψύξη με την ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας, των θερμικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και των εφαρμογών βιομάζας.

Τα αποτελέσματα της ανάληψης δράσης είναι αρκετά ευοίωνα αφού η κατανάλωση άνθρακα μειώθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση περίπου κατά 5%, ενώ μείωση 4% σημειώθηκε στη χρήση άνθρακα για ηλεκτροπαραγωγή κατά την περίοδο 2008-2013 [12]. Την ίδια

στιγμή η Κίνα, η οποία καταναλώνει περίπου το 50% του άνθρακα παγκοσμίως, κινείται όλο και πιο δραστικά προς την κατεύθυνση ανθρακικής ενεργειακής ανεξαρτησίας. Η κατανάλωση στο πρώτο τετράμηνο του 2015 μειώθηκε κατά 8% σε σχέση με την αντίστοιχη περίοδο του 2014, ενώ την ίδια χρονική περίοδο περιορίστηκαν οι εισαγωγές άνθρακα κατά 38%. Σε ό,τι αφορά τις επενδύσεις στην βιομηχανία του άνθρακα, οικονομικοί αναλυτές τις αξιολογούν ως πλέον ριψοκίνδυνες, σε αντίθεση με τις επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες και είναι σε ανοδική πορεία.

1.3 Ενέργεια από την θάλασσα

Οι ωκεανοί αποτελούν τους μεγαλύτερους συλλέκτες ηλιακής ενέργειας, η οποία είναι η μοναδική πηγή ενέργειας προς στην Γή. Ως εκ τούτου μπορούν να αποδώσουν τεράστια ποσά κινητικής και θερμικής ενέργειας, εάν αξιοποιηθούν οι μεταβολές των διαφόρων ωκεανογραφικών παραμέτρων (ύψος κύματος, μεταβολές θερμοκρασίας – αλατότητας, μεταφορές μάζας νερού κτλ). Ακόμη οι θαλάσσιες μάζες καλύπτουν το 71% της γήινης επιφάνειας και λόγω των ποικίλων υδροδυναμικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτές, αποτελούν μια τεράστια παγκόσμια ενεργειακή δεξαμενή που θα μπορούσε να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών.

Μερικά πλεονεκτήματα [5] της ενέργειας των ωκεανών είναι τα παρακάτω:

- Είναι απολύτως καθαρή – δηλαδή δεν υπάρχουν εκπομπές CO₂ προς την ατμόσφαιρα κατά την συλλογή της – και πλήρως ανανεώσιμη.
- Δίνει την δυνατότητα στην βιομηχανία παραγωγής ενέργειας να επεκταθεί και στην θάλασσα, η οποία είναι πολύ μεγάλη σε έκταση σε σχέση με την στεριά και δεν εγείρει μια σειρά από άλλα προβλήματα (προβλήματα ιδιοκτησίας, οπτική όχληση κτλ)
- Υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής συστημάτων παραγωγής ενέργειας από την θάλασσα, κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα, πράγμα που καθιστά εύκολη και φτηνή την μεταφορά της παραγόμενης ισχύος.
- Η τεχνολογία μετατροπής της ενέργειας από την θάλασσα εξελίσσεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες.

Ωστόσο υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα [5] παράλληλα, τα οποία συνδέονται συνήθως με οικονομικούς και τεχνολογικούς παράγοντες:

- Το κόστος παραγωγής ενέργειας από την θάλασσα είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας που ήδη χρησιμοποιούνται.
- Τα ενεργειακά πάρκα στην θάλασσα έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης καθώς το θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό. Τα υλικά κατασκευής λοιπόν θα πρέπει να είναι υψηλής αντοχής, ενώ οι διαδικασίες εγκατάστασης και συντήρησης είναι δύσκολες και αρκετά δαπανηρές.

- Πολλές τεχνολογίες δεν βρίσκονται σε ώριμο τεχνολογικά επίπεδο, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη σε βιομηχανικό επίπεδο.
- Υπάρχουν κάποιες, έστω και μικρές, περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες δεν συνδέονται με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα αλλά με επιπτώσεις κυρίως στην θάλασσα και υποθαλάσσια πανίδα.
- Αποτελούν διαλείπουσες και όχι συνεχείς μορφές ενέργειας και αυτό διότι εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες οι οποίες δεν είναι πάντα σταθερές σε ένταση ή/και διάρκεια, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να τροφοδοτηθεί το δίκτυο με ρεύμα σταθερής τάσης. Έχουν γίνει προσπάθειες κατασκευής προσωρινών αποθηκευτικών μηχανισμών (μπαταρίες κτλ) έτσι ώστε να παρέχεται ομαλά η παραγόμενη ηλεκτρική τάση προς την στεριά αλλά η τεχνολογία αυτή είναι ακόμη σε πολύ πρωτόλειο στάδιο.
- Η θάλασσα και οι ακτές αποτελούν συχνά πεδίο αλληλοσυγκρουόμενων προτεραιοτήτων. Ο θαλάσσιος χώρος χρησιμοποιείται για μεταφορές, τουρισμό, αλιεία και πολλές άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Επίσης υπάρχουν πολλές προστατευόμενες περιοχές στις οποίες υπάρχουν περιορισμοί ή και απαγόρευση εγκατάστασης ενεργειακών πάρκων και άλλων μόνιμων κατασκευών. Έτσι οι εν δυνάμει κατάλληλες περιοχές εγκατάστασης μειώνονται αισθητά.

1.4 Οι βασικές μορφές ΑΠΕ από την θάλασσα

1.4.1 Αιολική Ενέργεια

Η Γή προσλαμβάνει $1.74 \cdot 10^{17} \text{ watt / hour}$ από την ακτινοβολία του ηλίου και περίπου το 2% αυτής της ενέργειας μετατρέπεται σε αιολική. Ο άνεμος δημιουργείται από την ανισομερή θέρμανση της επιφάνειας του πλανήτη, καθώς και από την περιστροφική του κίνηση. Μέσω αυτών των φυσικών διαδικασιών δημιουργούνται άνισες τιμές πίεσης της ατμόσφαιρας σε διαφορετικά σημεία και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το να μετακινούνται οι αέριες μάζες. Ακόμα ο άνεμος επηρεάζεται σημαντικά από το ανάγλυφο της επιφάνειας της Γής για τα πρώτα 100 μέτρα από πάνω της, ενώ επιβραδύνεται και δημιουργεί στροβιλισμούς όταν προσπίπτει σε εμπόδια.

Από τις αρχές τις δεκαετίας του 1990 ξεκίνησε να αξιοποιείται η αιολική ενέργεια με την τοποθέτηση ανεμογεννητριών κατά βάση σε κορυφογραμμές, δηλαδή εκεί που ο άνεμος εκεί είναι δυνατότερος και το πεδίο των ταχυτήτων του δεν αλλοιώνεται. Τα τελευταία χρόνια ανεμογεννήτριες τοποθετούνται και μέσα στην θάλασσα και οι λόγοι είναι πολλοί [5], [13]:

- Αρχικά οι άνεμοι στην θάλασσα είναι πολύ πιο ισχυροί απ ότι στην στεριά, καθώς τα εμπόδια που συναντούν είναι ελάχιστα
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι μικρότερες

- Δεν δημιουργούν οπτική όχληση εφόσον μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την στεριά
- Υπάρχουν πολύ περισσότερα κατάλληλα σημεία τοποθέτησης αιολικών πάρκων επειδή η έκταση της θάλασσας είναι τεράστια
- Δεν υπάρχουν τα προβλήματα ιδιοκτησίας που υπάρχουν στην στεριά.



Εικόνα 2: Το μεγαλύτερο θαλάσσιο Αιολικό πάρκο στον Κόσμο [14]

Η εικόνα 2 είναι από το μεγαλύτερο θαλάσσιο αιολικό πάρκο, εν ονόματι Walney στην θάλασσα της Ιρλανδίας, 19 χιλιόμετρα από τις ακτές του Μπάροου-ιν-Φέρνες. Καταλαμβάνει έκταση 145 τετραγωνικών χιλιομέτρων (20.000 ποδοσφαιρικά γήπεδα!), αποτελείται από 189 ανεμογεννήτριες και παράγει ρεύμα 659 MW (μεγαβάτ) ετησίως που αντιστοιχούν στην κατανάλωση ενέργειας 600.000 νοικοκυριών. [15]

1.4.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο βασικούς τρόπους:

- Συλλέγεται έτσι ώστε να παράγει θερμότητα και στην συνέχεια από αυτήν παράγεται ατμός ο οποίος χρησιμοποιείται για την περιστροφή τουρμπίνων η κινητική ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συλλέγεται άμεσα με την βοήθεια φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλιακή ενέργεια είναι πρακτικά ανεξάντλητη, τροφοδοτεί τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας και τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία που την αφορά έχει εξελιχθεί ραγδαία. Ωστόσο τα ηλιακά πάνελ καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις Γης, οπότε έχουν αρχίσει να τοποθετούνται και στο θαλάσσιο περιβάλλον ή ακόμη και σε λίμνες. Μερικά πλεονεκτήματα είναι τα εξής [5], [13]:

- Αρχικά, όπως προαναφέραμε, γίνεται εκμετάλλευση της υδάτινης επιφάνειας που είναι τεράστια σε σχέση με την χερσαία.
- Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μεγαλύτερη στο υδάτινο περιβάλλον, λόγω της φυσικής ψύξης τους από το νερό
- Περιορίζεται η εξάτμιση του νερού και βελτιώνεται η ποιότητα του σε περίπτωση κλειστών υδάτινων επιφανειών

Τα μειονεκτήματα από την άλλη είναι τα εξής [5], [13]:

- Το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης τους είναι μεγαλύτερο, λόγω της χρήσης ανθεκτικότερων υλικών που θα αντέχουν στις θαλάσσιες συνθήκες, καθώς και λόγω των συστημάτων αγκυρώσεως που είναι απαραίτητα για την σταθεροποίηση τους
- Η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι πιο δύσκολη και φυσικά δαπανηρή
- Ο καθαρισμός τους και η συντήρηση γίνονται πολύ δυσκολότερα λόγω της δύσκολης πρόσβασης σε σχέση με τις εγκαταστάσεις στην στεριά.
- Δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη η απαραίτητη τεχνολογία για την επαρκή αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας μέσα στην θάλασσα.
- Δημιουργούνται και κάποια περιβαλλοντικά ζητήματα λόγω της μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από την επιφάνεια της κατασκευή πράγμα που με την σειρά του πιθανών να έχει αρνητικές επιδράσεις στην βιοποικιλότητα.



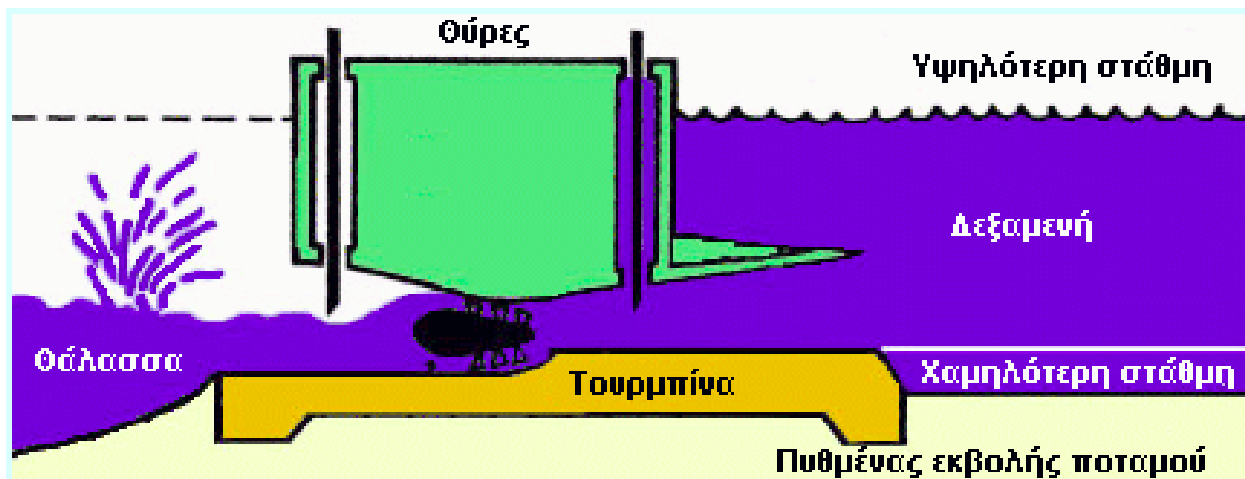
Εικόνα 3 : Πάρκο φωτοβολταϊκών στοιχείων στην πόλη Huainan στην Κίνα

Στην εικόνα 3 βλέπουμε το μεγαλύτερο πλωτό πάρκο φωτοβολταϊκών στοιχείων στην Huainan στην Κίνα, σε μια τεχνητή λίμνη δίπλα σε ορυχεία εξόρυξης άνθρακα. Παράγει 70 MW ετησίως και αποτελείται από 194700 ηλιακά panels συνολικής έκτασης 0.64 τετραγωνικών χιλιομέτρων. [16]

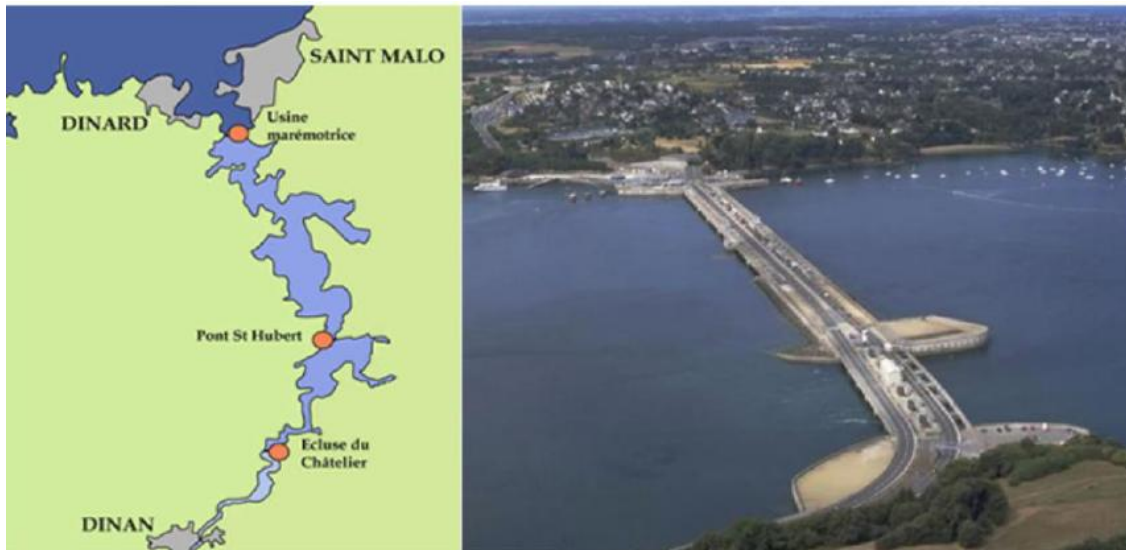
1.4.3 Ενέργεια από το φαινόμενο των παλίρροιών

Παλίρροια ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο της περιοδικής ανόδου και καθόδου της στάθμης του νερού μίας μεγάλης λίμνης και κυρίως των θαλασσών. Η άνοδος της στάθμης ονομάζεται *πλημμυρίδα* (flood tide), ενώ η κάθοδος ονομάζεται *άμπωτη* (ebb ή low tide). Από κοινού, πλημμυρίδα και άμπωτη αποτελούν το φαινόμενο της παλίρροιας. Το φαινόμενο αυτό που επαναλαμβάνεται δύο φορές το 24ώρο (ακριβέστερα 24 ώρες 50' και 30") οφείλεται στη βαρυτική έλξη της Σελήνης αλλά και του Ήλιου πάνω στη Γη, καθώς και στην περιστροφή των ουρανίων αυτών σωμάτων. [17]

Η ενέργεια των παλίρροιών αξιοποιείται με την βοήθεια τεχνητών φραγμάτων τα οποία βρίσκονται συνήθως στις εκβολές ποταμών και η τεχνολογία τους είναι παρόμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται στα υδροηλεκτρικά έργα. Τα φράγματα αυτά έχουν κάποιες θύρες που επιτρέπουν την είσοδο θαλασσινού νερού στη δεξαμενή που σχηματίζεται πίσω από το φράγμα. Η κίνηση του νερού προς τη δεξαμενή κατά την άνοδο της παλίρροιας κινεί τουρμπίνες οι οποίες παράγουν ηλεκτρισμό. Στην συνέχεια το φράγμα κλείνει εμποδίζοντας το νερό να διαφύγει πάλι προς την θάλασσα κατά την φάση της άμπωτης. Όταν λοιπόν η παλίρροια βρίσκεται στην φάση της πλημμυρίδας, το νερό λόγω της ανύψωσης του αποκτά δυναμική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια αυτή αξιοποιείται καθώς οι θύρες του φράγματος ξανανοίγουν και το νερό χύνεται προς τον ωκεανό περιστρέφοντας πάλι τις τουρμπίνες. Σε αντίθεση με τα υδροηλεκτρικά έργα, το νερό κινείται σε δύο κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα τόσο κατά την διάρκεια της πλημμυρίδας, όσο και κατά την διάρκεια της άμπωτης. Αυτό σημαίνει ότι δύναται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από δύο έως τέσσερις φορές το εικοσιτετράωρο.



Εικόνα 4 : Το παραπάνω σχήμα βοηθάει στην κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας αυτών των παλίρροϊκών φραγμάτων



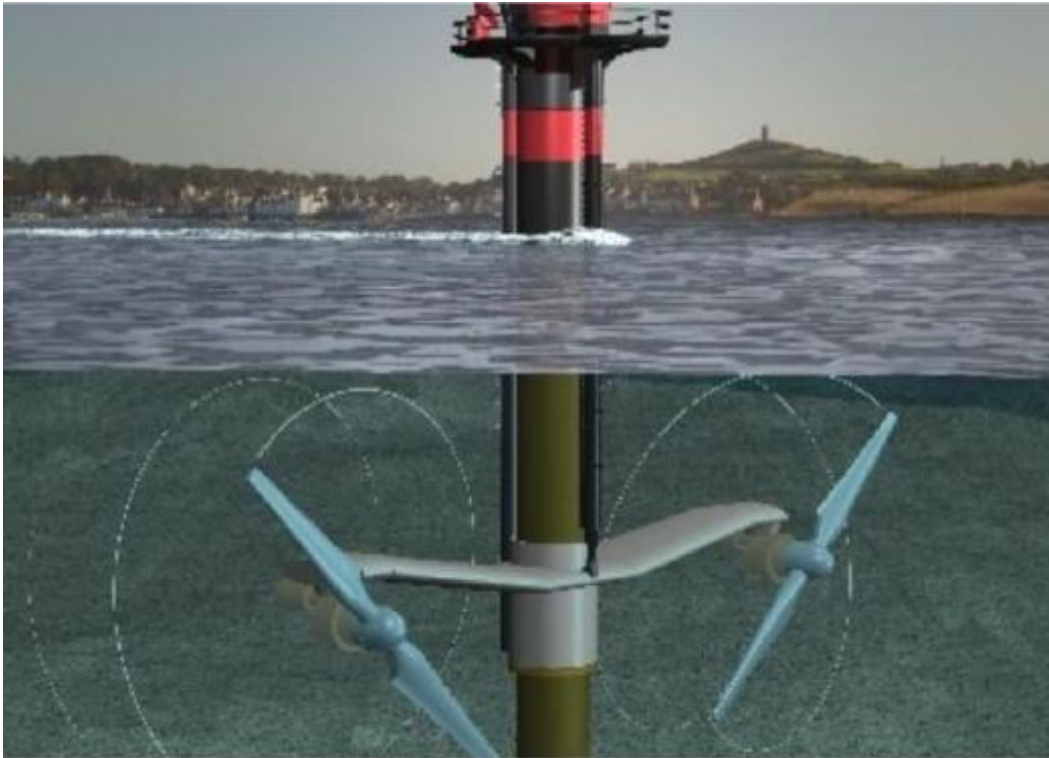
Εικόνα 5 Το παλιρροιακό φράγμα «La Rance» και η ακριβής τοποθεσία του στην Γαλλία [17]

Στην εικόνα 5 φαίνεται ένας από τους μεγαλύτερους παλιρροιακούς σταθμούς στον κόσμο. Η συγκεκριμένη περιοχή διαθέτει παλιρροιακό εύρος από 8,3-13,5 μέτρα, που χαρακτηρίζεται σαν ένα από τα μεγαλύτερα παγκοσμίως. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του έργου ανέρχεται στα 240 MW και προέρχεται από τις συνολικά 24 εγκατεστημένες γεννήτριες ισχύος 10 MW έκαστη. Οι τουρμπίνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου bulb, πρόκειται για τουρμπίνες οριζόντιου άξονα, βάρους 470 τόνων, με 4 πτερύγια και διάμετρο πτερυγίων 5,35 μέτρα. [14]

1.4.4 Ενέργεια από θαλάσσια ρεύματα

Η κίνηση των ρευμάτων είναι μεταφορά θαλάσσιων μαζών και ρυθμίζεται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες: την θραύση των κυμάτων στην παράκτια ζώνη και τις ηπείρους (κυματογενής κυκλοφορία), την επιρροή της κεντρομόλου δύναμης και της δύναμης Coriolis (γεωστροφική κυκλοφορία), τις οριζόντιες και κατακόρυφες διαφορές πυκνότητας (λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας και αλατότητας του νερού - θερμοαλατική κυκλοφορία), την αστρονομική παλίρροια (παλιρροιακή κυκλοφορία η οποία είναι η οριζόντια κυκλοφορία των ρευμάτων λόγω της κυκλικής διαδικασίας της πλημμυρίδας και της άμπωτης), τις οριζόντιες βαθμίδες της ατμοσφαιρικής πίεσης (μετεωρολογική παλίρροια), την επίδραση των ανέμων στην επιφάνεια της θάλασσας (ανεμογενής κυκλοφορία) και την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει και απορροφάται από την θάλασσα, επηρεάζοντας τόσο την κατανομή της θερμοκρασίας στη στήλη του νερού – συμβάλλοντας έτσι στην μεταβολή της πυκνότητας του – όσο και την εξάτμιση των επιφανειακών στρωμάτων – μεταβάλλοντας έτσι την αλατότητα άρα και πάλι την πυκνότητα τους. [13]

Σε αυτήν την περίπτωση η τεχνολογία μοιάζει αρκετά με αυτήν των ανεμογεννητριών. Ο στρόβιλος βρίσκεται απευθείας στο νερό και εκμεταλλευόμενος την ροή των υδάτων στρέφεται και δίνει ενέργεια στην γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 6 : Τεχνολογία SeaGen εκμετάλλευσης παλιρροιακού ρεύματος [18]

1.4.5 Ωκεάνια θερμική ενέργεια

Η τεχνολογία εκμετάλλευσης της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (ocean thermal energy conversion - OTEC) βασίζεται στην θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα, στα ανώτερα (και ταυτόχρονα θερμότερα) στρώματα ύδατος και στα βαθύτερα (και ψυχρότερα). Με βάση αυτό το δυναμικό διαφοράς θερμοκρασίας λειτουργεί μια θερμική μηχανή η οποία παράγει έργο που συνήθως μετατρέπεται σε ωφέλιμη θερμική ενέργεια. [19]

Μεταξύ των Α.Π.Ε από την θάλασσα η θερμική ενέργεια είναι μια πηγή που παράγει συνεχή ενέργεια και όχι διακοπτόμενη (όπως είναι για παράδειγμα η ενέργεια των παλιρροιών που παράγει ενέργεια 2 - 4 φορές το 24ωρο) και το δυναμικό που θα μπορούσε να προσφέρει θεωρείται πολύ μεγάλο. Συγκεκριμένα η μέγιστη ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί με αυτόν τον τρόπο, χωρίς να επηρεαστεί η θερμική δομή του ωκεανού, θα ήταν 88.000 TWh/yr. Ωστόσο αυτή η εκτίμηση δεν περιλαμβάνει διάφορους περιορισμούς τεχνολογικής και οικονομικής φύσεως.

Η εφαρμογή της παραπάνω τεχνολογίας ενδείκνυται σε παράκτιες περιοχές, κοντά στον ισημερινό, όπου η διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στα θερμότερα υψηλά και στα ψυχρότερα χαμηλά υδάτινα στρώματα είναι γύρω στους 20 βαθμούς Κελσίου.



Εικόνα 7: Μια εγκατάσταση εκμετάλλευσης ωκεάνιας θερμικής ενέργειας που βρίσκεται στο Keahole Point στην Hawaii.

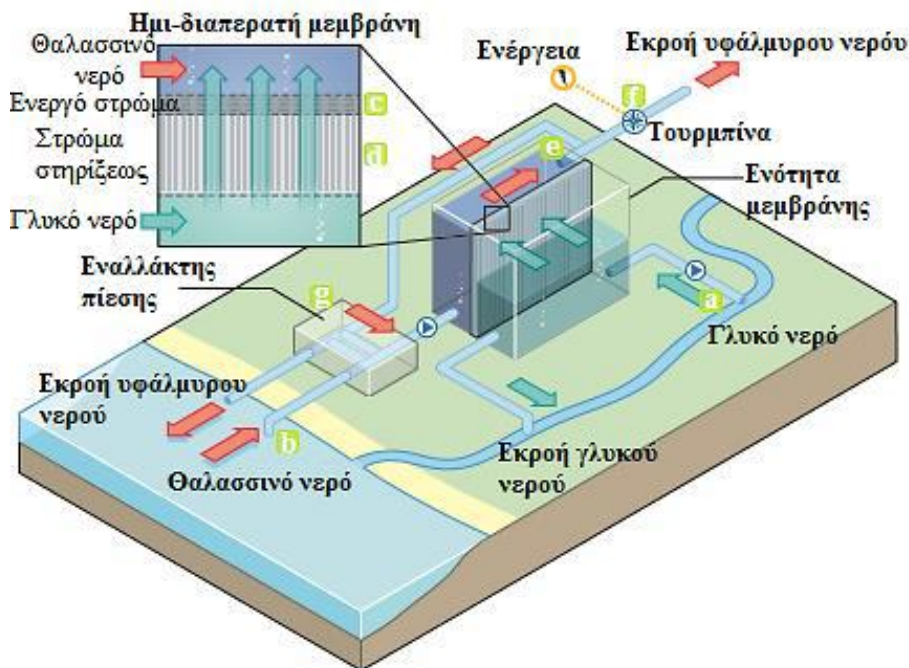
1.4.6 Ωσμωτική Ενέργεια

Ώσμωση ονομάζεται το φαινόμενο της διέλευσης περισσότερων μορίων διαλύματος μικρότερης συγκέντρωσης (δηλαδή το γλυκό νερό που είναι αραιότερο), προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης (δηλαδή το αλμυρό θαλασσινό νερό που είναι πυκνότερο) σε διαλυμένη ουσία (η διαλυμένη ουσία στην περίπτωση μας είναι το αλάτι) λόγω ύπαρξης μεταξύ τους μιας ημιπερατής μεμβράνης η οποία δεν επιτρέπει την διέλευση των μορίων της διαλυμένης ουσίας (αλάτι).

Συγκεκριμένα όταν θα φέρουμε τα δύο υγρά σε επαφή δια της μεμβράνης το αλάτι του αλμυρού νερού θα «προσπαθήσει» να διαπεράσει την μεμβράνη για να διεισδύσει στο γλυκό νερό χωρίς επιτυχία. Με αυτόν τον τρόπο θα αναπτυχθεί μια υπερπίεση στο εσωτερικό του αλμυρού νερού η οποία θα οδηγήσει σε άνοδο της στάθμης του. Όταν το φαινόμενο της ώσμωσης παύσει και τα δύο υγρά ομογενοποιηθούν η στάθμη του αλμυρού νερού θα πέσει παράγοντας έτσι ωφέλιμο έργο δια μέσου ροής η οποία είναι ικανή να περιστρέψει έναν στρόβιλο ο οποίος με την σειρά του θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **ωσμωτική**.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας κοντά σε εκβολές ποταμών όπου το γλυκό και το αλμυρό νερό «συναντιούνται», ενώ η ποσότητα ενέργειας που παράγεται εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα γλυκού νερού και την αλατότητα του θαλάσσιου νερού. Κατά κανόνα, η συνεχής παροχή $1 \text{ m}^3/\text{s}$ γλυκού νερού, όταν αναμειγνύεται με θαλασσινό νερό αλατότητας 3,5% NaCl, αποδίδει περίπου 1 MW. [20]

Αυτή η πολλά υποσχόμενη μορφή ενέργειας δεν έχει ακόμη εκμεταλλευτεί σε εμπορική κλίμακα αλλά μετά από αρκετές δεκαετίες έρευνας στο εργαστήριο και μετά την κατασκευή του πρώτου πιλοτικού εργοστασίου των 4kW, που ξεκίνησε το 2009, ήταν οι λόγοι που τελικά θεωρήθηκε μια αξιόπιστη και ανταγωνιστική μορφή ενέργειας.



Εικόνα 8: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξιοποίηση του φαινομένου της ώσμωσης [18]

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο μπορούμε να αναφέρουμε ο Παγκόσμιος Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) [21] εκτιμά ότι το ενεργειακό δυναμικό των θαλασσών σε κάθε περίπτωση είναι αυτό του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1 : Το δυναμικό των διαφόρων θαλάσσιων Α.Π.Ε από την θάλασσα

Κύματα	37.000 TWh/yr
Θερμική ενέργεια	10.000 TWh/yr
Οσμωτική Ενέργεια	2.000 TWh/yr
Παλίρροιες και Ρεύματα	1.100 TWh/yr

Παράλληλα το πρόγραμμα Συνεργασίας Συστημάτων Θαλάσσιας Ενέργειας (OES Technology Collaboration Programme) που αποτελεί έναν οργανισμό από πολλές χώρες-μέλη και εστιάζει στην ανάπτυξη και την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας, έχει θέσει ως στόχο την ανάπτυξη των συστημάτων θαλάσσιας ενέργειας σε τέτοιο βαθμό που να είναι ικανά να καλύψουν το 25% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών έως το έτος 2050. [22]

2. Η ενέργεια των κυματισμών

Υπάρχει μια ακόμη βασική μορφή ενέργειας από την θάλασσα η οποία δεν αναφέρθηκε στην §1.4 του προηγούμενου κεφαλαίου και η οποία θα αναλυθεί διεξοδικά στο παρόν κεφάλαιο. Αυτή η μορφή ενέργειας δεν είναι άλλη από την κινητική και δυναμική ενέργεια που μεταφέρουν οι θαλάσσιοι κυματισμοί και την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε προκειμένου να παράγουμε ωφέλιμο έργο.

Τις περασμένες δεκαετίες έγιναν πολλές προσπάθειες για την δημιουργία Α.Π.Ε οι οποίες αφορούσαν κυρίως την αξιοποίηση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο στον τομέα της κυματικής ενέργειας δεν έχει γίνει τόσο μεγάλη πρόοδος, παρά το γεγονός πως αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη πηγή ενέργειας. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ότι μόλις το 1% του παγκόσμιου κυματικού δυναμικού θα έφθανε για να καλυφθούν στο τετραπλάσιο οι ανάγκες μας σε ενέργεια.

Η ενέργεια που μεταφέρουν οι θαλάσσιοι κυματισμοί είναι τεράστια και πιο πολύ ανανεώσιμη από όλες τις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε πως η μέση μεταφορά Ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της κυματικής ενέργειας είναι 2-3 kW/m² , την στιγμή που οι ανάλογες τιμές για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια είναι 0,1-0,2 kW/m² και 0,4-0,6 kW/m² αντίστοιχα. [23]

2.1 Βασικά είδη Κυματισμών

Θαλάσσιος κυματισμός ονομάζεται κάθε περιοδική (ή και μη περιοδική) διαταραχή της επιφάνειας (ή των χαμηλότερων στρωμάτων) της θάλασσας. Μέσω αυτής της διαταραχής διαδίδεται ενέργεια προς μια οριζόντια διεύθυνση (τα κύματα στην θάλασσα είναι κατά βάση εγκάρσια).

Με βάση διάφορα φαινομενολογικά κριτήρια μπορούμε να χωρίσουμε τα κυματικά φαινόμενα στην θάλασσα, στις εξείς έξι κατηγορίες [24]:

1. **Επιφανειακά κύματα (surface waves):** Είναι οι κυματισμοί που διαδίδονται στην επιφάνεια της θάλασσας. Χωρίζονται σε αρκετές υποκατηγορίες οι οποίες αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.
2. **Εσωτερικά κύματα (internal waves):** Πρόκειται για υποεπιφανειακές κατακόρυφες ταλαντώσεις της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των στρωμάτων² θαλασσινού νερού.

² **Η διαστρωμάτωση του Ωκεανού:** Ο ωκεανός δεν είναι ομοιογενής ως προς την πυκνότητα, την θερμοκρασία, την περιεκτικότητα του σε οξυγόνο, την υγρασία και την αλατότητα των υδάτων του· αντίθετα είναι διαστρωματωμένος. Αυτό σημαίνει ότι σχηματίζει **επίπεδα**, ή αλλιώς, **στρώματα (layers)** νερού με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα επίπεδα - χονδρικά - είναι τα εξής: **Το μικτό στρώμα (mixed layer)** : Είναι το ανώτερο στρώμα του ωκεανού και το πάχος του ποικίλει: 10 - 500 m. Σε αυτό υπάρχει μια

3. **Γυροσκοπικά κύματα ή κυματισμοί Poincare (gyroscopic or Poincare waves):** Ταλαντώσεις της επιφάνειας της θάλασσας πολύ μεγάλης περιόδου (αλλά όχι πλανητικής κλίμακας) οι οποίες οφείλονται τόσο στην επίδραση της βαρύτητας, όσο και στην γεωστροφία (δηλαδή στην επίδραση της δύναμης Coriolis)³.
4. **Πλανητικά κύματα ή κυματισμοί Rossby (Planetary or g Rossby waves):** Είναι μια κατηγορία κυματισμών οι οποίες εντοπίζονται σε τόσο μεγάλες κλίμακες και κινούνται τόσο αργά που επηρεάζονται αποκλειστικά από την γεωστροφία. Μάλιστα σχετίζονται και με την μεταβολή της παραμέτρου β – beta⁴. [25]
5. **Υδρο-ακουστικά Κύματα (acoustic waves):** Καταλαμβάνουν την περιοχή των πολύ μικρών περιόδων του φάσματος κυματισμών. Είναι κύματα πίεσης που διαδίδονται στο εσωτερικό της θαλάσσιας μάζας και σε αντίθεση με τους επιφανειακούς κυματισμούς μεταφέρουν ελάχιστη ενέργεια και ως εκ τούτου η επίδραση τους στις κατασκευές και στο παράκτιο περιβάλλον είναι αμελητέα. Ωστόσο τα ακουστικά κύματα έχουν την ιδιότητα να διαδίδονται σε μεγάλα βάθη και οριζόντιες αποστάσεις καθώς και να διαπερνούν τον πυθμένα – σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά. Έτσι στη θάλασσα αναλαμβάνουν το ρόλο του μεταδότη των πληροφοριών και της επικοινωνίας, ενώ βοηθούν στην διερεύνηση του θαλασσίου και υποθαλασσίου περιβάλλοντος.

σχετική ομοιομορφία των φυσικών ιδιοτήτων του νερού: Η θερμοκρασία, η αλατότητα και το διαλυμένο οξυγόνο παραμένουν σταθερά επειδή τα επιφανειακά νερά αναμιγνύονται λόγω του ενεργού και διαρκούς στροβιλισμού. Η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει την θερμοκρασία του νερού, οδηγεί σε μεγάλα ποσοστά εξάτμισης και κατ'επέκταση η αλατότητα είναι αυξημένη. Το **ανώτερο στρώμα του Ωκεανού (upper ocean)** : Βρίσκεται κάτω από το *mixed layer*, χαρακτηρίζεται από υδροστατικές - γεωστροφικές κινήσεις των υδάτων, από μεγάλες θερμοκρασίες και αρκετή υδροδυναμική κίνηση. Το βάθος του ποικίλει: 100 m (στους τροπικούς - ανατολικούς ωκεανούς) - 800 m (στους δυτικούς υποτροπικούς). Αυτό το στρώμα νερού ανταλλάσει θερμότητα και γλυκό νερό με την ατμόσφαιρα και εντός του γίνονται οι σημαντικότερες διαδικασίες θαλάσσιας οργανικής ζωής. Το **Θερμοκλινές (Thermocline)** : Το φώς του Ήλιου απορροφάται από το ανώτερο στρώμα του Ωκεανού αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του και μειώνοντας αντίστοιχα την πυκνότητα του. Έτσι η θερμότητα που απορροφήθηκε κάνει το ανώτερο τμήμα της θάλασσας πιο «ελαφρύ» από το βαθύτερο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα ανάμιξης τους. Το αποτέλεσμα αυτού του «διαχωρισμού» των υδάτων είναι το να υπάρχει ένα «λεπτό» στρώμα στο οποίο ελαττώνεται κατακόρυφα η θερμοκρασία. Αυτή η μικρή περιοχή ονομάζεται **θερμοκλινές. Ο βαθύς ωκεανός (deep ocean)** : Βρίσκεται κάτω από το Θερμοκλινές και χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, σκοτάδι και σχετικά μικρές ταχύτητες ρευμάτων. Έχει πολύ πυκνότερα νερά από τα ανώτερα επίπεδα λόγω χαμηλής θερμοκρασίας και έτσι δεν αναμιγνύεται μαζί τους. Τροφοδοτείται όμως από τα ανώτερα στρώματα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όπως είναι ο Υποπολικός Βόρειος Ατλαντικός και αρκετές άλλες περιοχές καταβύθισης (downwelling) γύρω από την Ανταρκτική.

³ Αποτελεί μια «φανταστική» δύναμη, η οποία αναπτύσσεται μόνο όταν μία μάζα νερού βρίσκεται σε κίνηση η οποία οφείλεται στη περιστροφή της Γης. Προκαλεί απόκλιση κινούμενων σωμάτων κατά τη κίνησή τους με κατεύθυνση από τους Πόλους προς τον Ισημερινό. Η δύναμη **Coriolis** είναι ίση με [25, 26]:

$$2\vec{\Omega} \times \vec{u} = 2\Omega u \sin\varphi = f \cdot u.$$

Όπου: $f = 2\Omega \sin\varphi$ ονομάζεται **παράμετρος Coriolis** , φ είναι το **γεωγραφικό πλάτος** της Γής , Ω είναι η γωνιακή περιστροφή της Γής, u είναι η ταχύτητα μιας μάζας νερού ως προς την Γή

⁴ Η μεταβολή της παραμέτρου Coriolis με βάση το γεωγραφικό πλάτος ονομάζεται **όρος Beta** και είναι ίση με: $\beta = \partial f / \partial y = \partial f / R_{γης} \cdot \partial \varphi \Rightarrow \dots \Rightarrow \beta = 2\Omega \cos\varphi / R_{γης} \Rightarrow \dots \Rightarrow \beta \approx 2.29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ στον Ισημερινό.

2.1.1 Επιφανειακοί κυματισμοί

Βάση της παρακάτω εικόνας (17) παρατηρούμε πως οι **επιφανειακοί θαλάσσιοι κυματισμοί**,⁵ αφ' ενός μεν καταλαμβάνουν πολύ σημαντικό τμήμα του φάσματος θαλάσσιων κυματισμών (Capillary Waves – Tsunami Waves) από σκοπιάς ενεργειακής πυκνότητας και αφετέρου δε αντιστοιχούν σε περιόδους πολύ σχετικές με την πλειονότητα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον. Είναι εύκολο λοιπόν να αντιληφθούμε ότι αποτελούν τους πιο ενδιαφέροντες κυματισμούς. Οι επιφανειακοί κυματισμοί με την σειρά τους διακρίνονται (με βάση το φυσικό μηχανισμό δημιουργίας τους) στις παρακάτω κατηγορίες [24]:

- i. **Ανεμογενείς** κυματισμοί: αποτελούν τους κυματισμούς οι οποίοι δημιουργούνται από την άσκηση της διατμητικής τάσης του ανέμου, συντηρούνται και διαδίδονται με την βοήθεια της βαρύτητας και χωρίζονται σε δύο επί πλέον κατηγορίες τις *θάλασσες* ή *κυματισμούς ανέμου* (seas or wind waves) και τις *αποθάλασσες* (swells). Αντιστοιχούν σε περιόδους: $T = 1-25 \text{ sec}$.
- ii. **Σωματογενείς** κυματισμοί: δηλαδή κυματισμοί παραγόμενοι από κινήσεις επιπλεόντων ή βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves) οι οποίοι αντιστοιχούν στις ίδιες περιόδους ταλαντώσεων με αυτές των ανεμογενών κυματισμών.
- iii. Κυματισμοί **ιδιοταλαντώσεων** ή **υφαλοκρηπίδας**: Δημιουργούνται λόγω των μεταβολών του ανέμου και αναπτύσσονται μέσα σε κλειστές λεκάνες. Αντιστοιχούν σε περιόδους $T=2-40 \text{ min}$.
- iv. **Tsunamis** ή **σεισμογενείς** κυματισμοί: Παράγονται από σεισμούς στον πυθμένα της θάλασσας και καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του φάσματος των κυματισμών σε περιόδους: $T = 5 \text{ min} - 2 \text{ h}$
- v. **Παλιρροιογενείς** κυματισμοί: Παραπάνω στην παράγραφο 1.4.3 περιγράψαμε το φαινόμενο των παλιρροιών ως την άνοδο και την κάθοδο της στάθμης της θάλασσας λόγω των ελκτικών δυνάμεων του συστήματος Γης-Σελήνης-Ηλίου. Οι παλίρροιες λοιπόν δεν είναι τίποτε παραπάνω από «αργούς» κυματισμούς πολύ μεγάλου μήκους κύματος. Όταν η παλίρροια βρίσκεται στην φάση της πλημμυρίδας τότε κοντά στην ακτή φτάνει η «κορυφή» του κυματισμού, ενώ όταν βρίσκεται στην φάση της άμπωτης τότε κοντά στην ακτή βρίσκεται η «κοιλία» του.⁶
- vi. **Φουσκοθαλασιές**: Ο βος αλλά και λιγότερο σημαντικός τύπος επιφανειακού κυματισμού οφείλεται στην πίεση του αέρα πάνω από την επιφάνεια του νερού. Δηλαδή το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας αυξάνεται ή μειώνεται ελαφρώς ανάλογα με αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης (βαρομετρικές μεταβολές) και τις αντίστοιχες τάσεις που ασκούνται από τον άνεμο. Με απλά λόγια: η θάλασσα «βρίσκει» μικρότερη αντίσταση του αέρα λόγω του βαρομετρικού χαμηλού (μείωση ατμοσφαιρικής πίεσης)

⁵ Οι επιφανειακοί κυματισμοί μικρού μήκους κύματος ονομάζονται και **κυματισμοί βαρύτητας**, καθώς το αίτιο διατήρησης και διάδοσης τους μακριά από την περιοχή διέγερσης, είναι μόνο η επίδραση της βαρύτητας της Γής και όχι η Γεωστροφία.

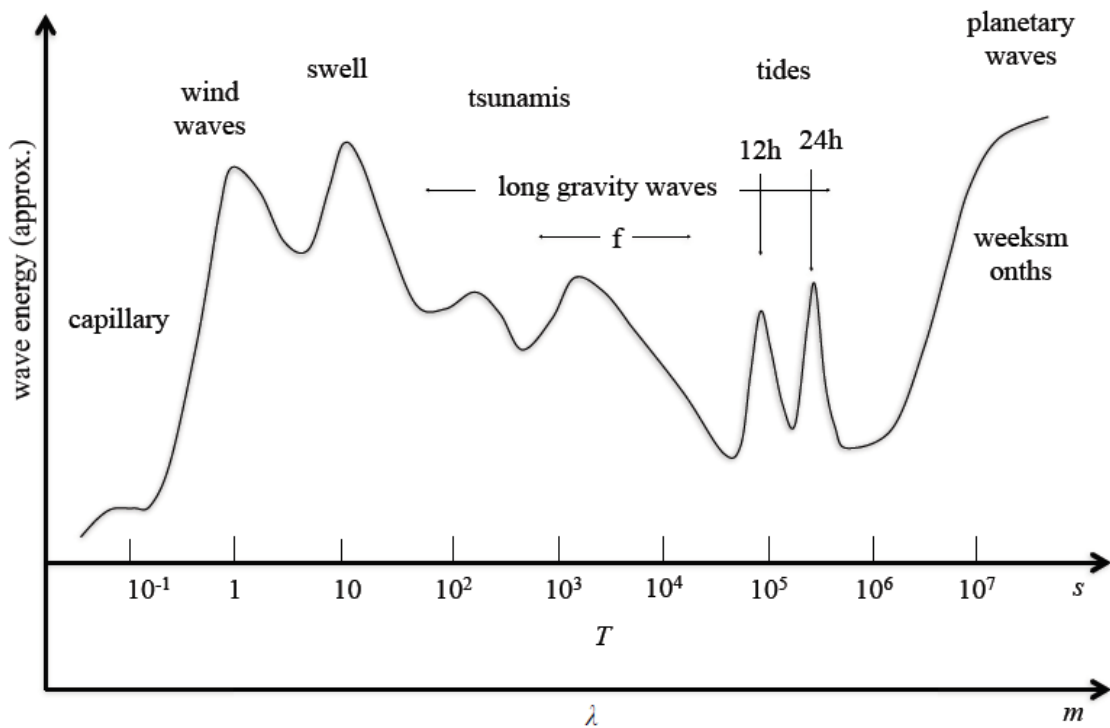
⁶ **Κορυφή** λέγεται το ανώτερο τμήμα του κύματος, ενώ **κοιλία** το κατώτερο. Θα αναφερθούμε αναλυτικά παρακάτω.

και επεκτείνεται προς τα πάνω. Χαμηλή πίεση αέρα μέσα σε μια ισχυρή καταιγίδα μπορεί να ανυψώσει την επιφάνεια των ωκεανών έως 0,5 m. [26] Αντιστοιχούν σε περιόδους $T=1-3$ days.

Βάση των παραπάνω παρατηρήσεων διαπιστώνουμε πως:

- Τα **αίτια δημιουργίας** κυματισμών είναι πολλά: η επίδραση του ανέμου, οι σεισμικές δονήσεις, η κίνηση των επιπλεόντων σωμάτων, η άσκηση επιφανειακών τάσεων ανάμεσα στα μόρια του ρευστού, οι ατμοσφαιρικές διεργασίες (βαρομετρικό χαμηλό), καθώς και οι πλανητικές επήρειες.
- Τα **αίτια συντήρησης** της κίνησης των κυματισμών είναι ουσιαστικά δύο: Οι δυνάμεις βαρύτητας και οι δυνάμεις επιφανειακής τάσεως.

The oceanic wave spectrum



Διάγραμμα 8: Το γενικό φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών, βάση του μήκους κύματος τους ή/και της περιόδου τους, το οποίο δίνει μια γενική εικόνα όλων των ανωτέρω φαινομένων. [25]

2.1.2 Ανεμογενείς κυματισμοί

Οι ανεμογενείς κυματισμοί μικρής περιόδου ($T < 30$ sec) οφείλονται στην επίδραση της διατμητικής τάσεως του ανέμου όταν η ταχύτητα του τελευταίου υπερβεί το 1 m/sec. Αυτό που συμβαίνει δηλαδή είναι ότι τα κατώτερα κινούμενα ατμοσφαιρικά στρώματα μεταφέρουν την ενέργεια τους στις επιφανειακές θαλάσσιες μάζες. Γενικώς η διαμόρφωση των ανεμογενών κυματισμών εξαρτάται από:

- (a) Το μέτρο και την διεύθυνση της ταχύτητας του διεγείροντος ανέμου.
- (b) Το ελεύθερο μήκος πνοής του ανέμου (**Fetch Length**), δηλαδή την οριζόντια επιφάνεια στην οποία μπορεί να ταξιδέψει ο άνεμος χωρίς εμπόδια (όπως είναι για παράδειγμα τα νησιά).
- (c) Το πλάτος πνοής του ανέμου. (**Fetch width**)
- (d) Η διάρκεια πνοής του ανέμου. (**Fetch duration**)
- (e) Η μορφολογία του πυθμένα.
- (f) Το βάθος του νερού στην συγκεκριμένη περιοχή.
- (g) Τη θερμοκρασιακή διαφορά αέρα και θάλασσας.
- (h) Τις μεταβολές του πεδίου ροής του ανέμου στον χώρο και τον χρόνο.

Γενικώς όσο πιο σταθερό είναι το μέτρο και η διεύθυνση, όσο πιο μεγάλο είναι το Fetch Length – width – duration και όσο πιο στρωτή είναι η ροή του ανέμου, τόσο «ισχυρότερα» κύματα μπορούν να δημιουργηθούν. [27]

Οι ανεμογενείς κυματισμοί που παρατηρούνται σε μια θαλάσσια περιοχή διακρίνονται, βάση της περιόδους-συχνότητας και του μήκους ανάμεσα στις κορυφές, σε [24]:

1. **Κυματισμούς ανέμου** (wind waves) ή **Θάλασσες** (seas) οι οποίοι αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=0.5$ sec έως $T=15$ sec, περίπου. Οι κυματισμοί ανέμου διεγείρονται από το υπερκείμενο τυρβώδες πεδίο ροής του ανέμου, όπως ακριβώς περιγράφηκε παραπάνω. Οι κυματισμοί είναι έντονα “ανακατεμένοι” (confused) ως προς τις συχνότητες τους (αποτελούνται από πολλές διαφορετικές γωνιακές συχνότητες ταλάντωσης), διαδίδονται προς πολλές διάφορες κατευθύνσεις (short-crested) (αν υπάρχει κύρια κατεύθυνση, αυτή μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά), ο λόγος ύψους προς μήκος κύματος είναι σχετικά μεγάλος και συχνά συμβαίνει θραύση των κυματισμών και εμφάνιση αφρού (whitcaps and spray). Ακόμη η ροή κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού είναι ισχυρά στροβιλώδης λόγω της επίδρασης των διατμητικών τάσεων του τυρβώδους πεδίου του υπερκείμενου ανέμου. Γενικώς αυτοί οι κυματισμοί παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά.
2. **Αποθάλασσες** (swells), οι οποίες αντιστοιχούν σε περιόδους από $T=10$ sec έως $T=30$ sec, περίπου. Οι αποθάλασσες είναι το αποτέλεσμα της διάδοσης των κυματισμών ανέμου που περιγράφηκαν πριν, σε περιοχές πολύ μακριά από το σημείο διέγερσης. Οι κυματισμοί αυτοί έχουν συντηρηθεί λόγω της άσκησης της δυνάμεως της βαρύτητας και είναι περισσότερο ομαλοί και «λείοι» (είναι σχεδόν μονοχρωματικοί κυματισμοί διότι

έχει διατηρηθεί μια βασική γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης του αρχικού κυματοσυρμού), έχουν σαφή κύρια κατεύθυνση διάδοσης (long-crested), και είναι περισσότερο επιμήκεις (μικρότερος λόγος ύψους προς μήκος κύματος). Ακόμη, εάν οι κυματισμοί δεν βρίσκονται κάτω από την επίδραση άλλου τοπικού πεδίου ανέμου ή άλλου αιτίου διέγερσης τύρβης, η ροή στο νερό μπορεί να θεωρηθεί μη τυρβώδης και αστρόβιλη, και συνήθως δεν συμβαίνει θραύση των κυματισμών πριν την πρόσκρουση με την ακτογραμμή.⁷ Μια άλλη ιδιότητα των αποθαλασσών είναι ότι δεν επηρεάζονται σημαντικά από τους τοπικούς ανέμους των περιοχών από όπου περνούν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική φασματική σύσταση των κυματισμών ανέμου και των αποθαλασσών. Γενικώς αυτοί οι κυματισμοί παρουσιάζουν *γραμμική* συμπεριφορά.

Η φάση της γένεσης και ανάπτυξης των κυματισμών ανέμου (**generation of wind waves**) είναι ένα εξαιρετικά περίπλοκο φυσικό φαινόμενο το οποίο δεν έχει κατανοηθεί πλήρως· σε γενικές γραμμές όμως σχετικά με τα *στάδια ανάπτυξης* (ή *ζωής*) των ανεμογενών κυματισμών διακρίνονται σε [5]:

- **Αναπτυσσόμενους** (developing seas/waves) κυματισμούς – Στη διάρκεια αυτής της φάσης, μέσω των διατμητικών και των ορθών τάσεων που εξασκεί το τυρβώδες πεδίο του ανέμου πάνω στην επιφάνεια του νερού μεταφέρεται ορμή και ενέργεια από τον άνεμο στο νερό και έτσι σχηματίζονται οι κυματισμοί **επιφανειακής τάσης** ή **τριχοειδής** κυματισμοί (δηλαδή «ρυτιδώσεις» στην θάλασσα).⁸ Το μήκος κύματος των τριχοειδών κυμάτων στο νερό είναι τυπικά μικρότερο από μερικά εκατοστά, με ταχύτητα μεγαλύτερη από 0,2-0,3 m/s.⁹ Σταδιακά οι ρυτιδώσεις αυτές αυξάνουν το πλάτος ταλάντωσης τους, συνενώνονται μεταξύ τους, μετατρέπονται σε θάλασσες και φτάνουν στην πλήρως ανεπτυγμένη κατάσταση τους, δηλαδή την *κατάσταση του ενεργειακού κορεσμού*.
- **Πλήρως ανεπτυγμένους** (fully developed or fully arisen seas) κυματισμούς – Εδώ οι ενεργειακά κορεσμένοι κυματισμοί διαδίδονται (propagation) σε μικρές (θάλασσες) ή τεράστιες αποστάσεις (αποθάλασσες).
- **Αποσβενύμενους** (decaying seas) κυματισμούς – Εδώ οι κυματισμοί ταυτίζονται κατά βάση με τις αποθάλασσες οι οποίες δημιουργούνται από τις θάλασσες που, καθώς

⁷ Ας σημειωθεί ότι, σε μια συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή, μπορεί να έχουμε είτε μόνο (τοπικούς) κυματισμούς ανέμου, είτε μόνο αποθάλασσες (αν δεν φυσά άνεμος), είτε ταυτόχρονη παρουσία κυματισμών ανέμου και αποθαλασσών. Επίσης, είναι δυνατόν να συνυπάρχουν περισσότερα από ένα συστήματα αποθαλασσών.

⁸ **Τριχοειδές κύμα** (*Capillary wave*) είναι ένα κύμα που κινείται κατά μήκος του ορίου φάσης ενός υγρού, του οποίου η δυναμική και η ταχύτητα καθορίζονται μόνο από την ασκούμενη σε αυτό επιφανειακή τάση. Τα τριχοειδή κύματα συναντούνται συχνά στη φύση και αναφέρονται ως «**ρυτίδες**» (*ripples*).

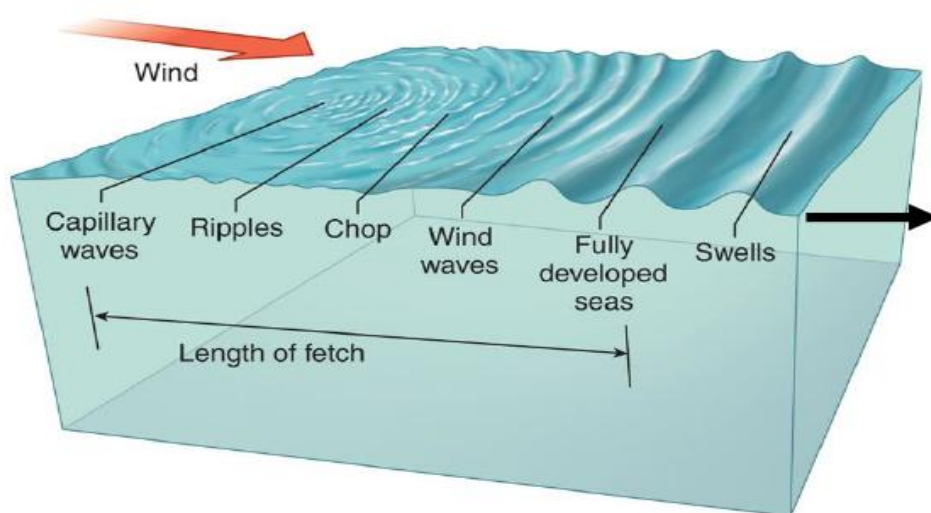
⁹ Ένα κύμα με λίγο μεγαλύτερο μήκος κύματος ονομάζεται **κύμα τριχοειδές – βαρύτητας** και επηρεάζεται τόσο από τις επιδράσεις της επιφανειακής τάσης, όσο και της βαρύτητας, καθώς και από την αδράνεια του ρευστού. Τα κανονικά **κύματα βαρύτητας** (ή αλλιώς τα κύματα ανέμου, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω) έχουν ακόμη μεγαλύτερο μήκος κύματος.

απομακρύνονται από την περιοχή δημιουργίας τους, εξομαλύνονται και αρχίζει η φάση της απόσβεσης τους. Συνήθως αυτοί οι κυματισμοί, όταν κάποια στιγμή πλησιάζουν τις ακτές, αυξάνουν το ύψος κύματος τους, ενώ το μήκος και η ταχύτητα τους μειώνονται. Η κυματομορφή γίνεται λιγότερο συμμετρική (οι κοιλίες είναι πιο επίπεδες) και η συχνότητα παραμένει σταθερή. Κάποια στιγμή επέρχεται η *κυματική θραύση* (wave breaking) δηλαδή η κατάρρευση του κύματος. Αυτό πρακτικά συμβαίνει όταν ισχύει: ύψος κύματος/ μήκος κύματος = $1/7 \approx 0,14$. Τότε το κύμα «αποσβήνει» στις ακτές (surf – απόσβεση) και απελευθερώνει την ενέργεια του. [25]

Στη διαμόρφωση και την απόσβεση των αποθαλασμών συμβάλλουν [24]:

- (a) Το φαινόμενο διασποράς (dispersion), που οφείλεται στην επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας
- (b) Η γεωμετρική διασπορά της ενέργειας λόγω της διδιάστατης διάδοσης (geometric spreading)
- (c) Η βαθμιαία κατανάλωση της ενέργειας από τις συνεκτικές τάσεις (viscous dissipation)
- (d) Στις ρηχές θάλασσες η απόσβεση των κυματισμών οφείλεται στην επίδραση του πυθμένα.
- (e) Στις βαθιές θαλάσσιες περιοχές οι αποθάλασσες διαδίδονται κατά μήκος των μέγιστων κύκλων της υδρογείου και μπορεί να διασχίσουν τεράστιες αποστάσεις πριν αποσβεθούν σημαντικά. Την φυσική εξήγηση αυτής της ιδιότητας τους θα την αναλύσουμε διεξοδικά στο επόμενο εδάφιο.

Ανάπτυξη κυματισμών



Εικόνα 9: Η φάση δημιουργίας, ανάπτυξης και απόσβεσης των ανεμογενών κυματισμών βαρύτητας.

2.2 Οι μέθοδοι φυσικής μελέτης των θαλάσσιων Κυματισμών

Η μελέτη των θαλάσσιων κυματισμών γίνεται με δύο μεθόδους:

1. Μέσω της **Ντετερμινιστικής – Αιτιοκρατικής** προσέγγισης: Πρόκειται για τα μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται στις εξισώσεις που προκύπτουν από την *νευτώνεια ρευστομηχανική*. Σε αυτήν την θεώρηση:
 - a. Απουσιάζει το αίτιο διέγερσης του κυματισμού.
 - b. Το κυματικό φαινόμενο θεωρείται *ντετερμινιστικό*: Ο κυματισμός παρουσιάζει απολύτως γνωστή συμπεριφορά η οποία μπορεί να μελετηθεί ποσοτικά μέσω αναλυτικών συναρτήσεων.
 - c. Η λύση που παίρνουμε είναι για το δυναμικό ταχύτητας του πεδίου ροής και από αυτό υπολογίζονται:
 - i. Η ανύψωση της Ελεύθερης Επιφάνειας.
 - ii. Οι ταχύτητες και οι τροχιές των κινούμενων μορίων του νερού.
 - iii. Το πεδίο πιέσεων του νερού.
 - iv. Η δυναμική και η κινητική ενέργεια που μεταφέρει ο κυματισμός.

Στο εδάφιο 2.3 θα κάνουμε μια παρουσίαση αυτής της μεθόδου περιγραφής των θαλάσσιων κυματισμών προκειμένου να δούμε ποιες είναι οι εξισώσεις που τους περιγράφουν, καθώς και την ενέργεια που αυτοί μεταφέρουν. Επιπλέον θα κάνουμε χρήση του μιγαδικού δυναμικού και κατ'επέκταση ενός διαφορετικού μαθηματικού φορμαλισμού έτσι ώστε να εξάγουμε εν τάχει τα ίδια αποτελέσματα με κάπως διαφορετική μορφή. Αυτός ο φορμαλισμός θα μας φανεί χρήσιμος όταν θα εξηγήσουμε με φυσικούς όρους και περιγράψουμε την μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος της Παλλόμενης Στήλης Ύδατος στο κεφάλαιο 6.

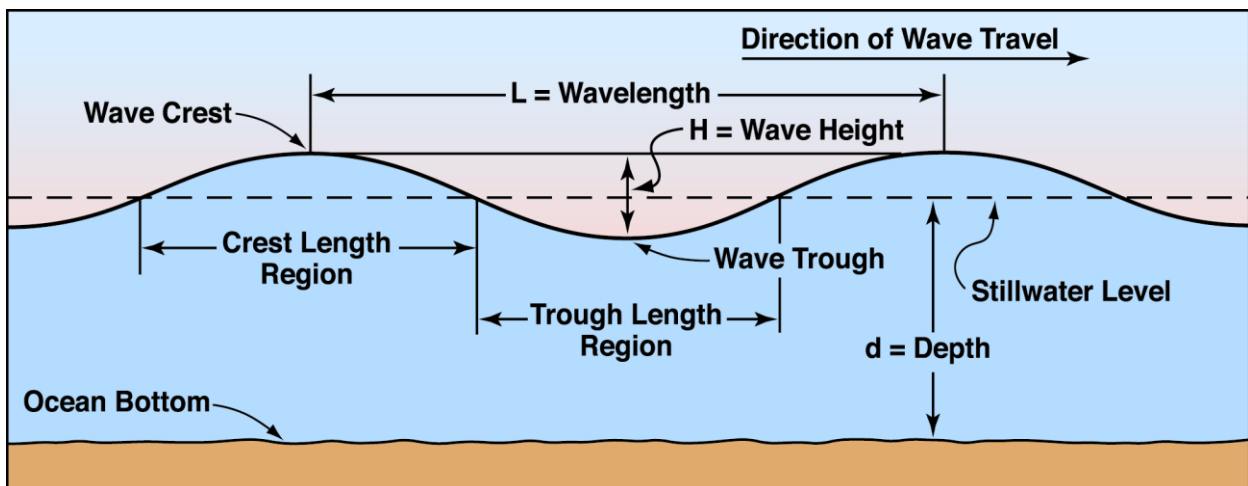
2. Μέσω της **Στοχαστικής – Πιθανοθεωρητικής** προσέγγισης: Πρόκειται για μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται στην *θεωρία πιθανοτήτων* (μόνο ενδεχόμενα) ή και στην *θεωρία στοχαστικών διαδικασιών* (που πέρα από τα ενδεχόμενα, λαμβάνει υπόψιν της και τον παράγοντα του χρόνου). Το κυματικό φαινόμενο εδώ θεωρείται στοχαστικό και η φυσική απουσιάζει με άμεσο τρόπο.

Στο εδάφιο 2.4 θα δούμε πως οι σχέσεις για την ενέργεια των κυματισμών που αποδείξαμε, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στοχαστικές και στατιστικές προσεγγίσεις για την περιγραφή των κυματικών φαινομένων.

2.3 Γραμμική Αρμονική θεώρηση κυματισμών – Θεωρία Airy

Τα βασικά μεγέθη του θαλάσσιου κυματισμού είναι τα εξής:

- Την **κορυφή** (ή όρος) του κύματος: Το υψηλότερο σημείο του κύματος.
- Την **κοιλία** (ή κοιλάδα) του κύματος: Το χαμηλότερο σημείο του κύματος.
- Το **μήκος** κύματος λ : Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών του κυματισμού.
- Το **ύψος** κύματος H : Η κάθετη απόσταση ανάμεσα στην κορυφή και την κοιλία του κυματισμού.
- **Στάθμη ηρεμίας**: Η επίπεδη επιφάνεια του νερού εάν αυτό δεν είχε διαταραχθεί καθόλου από εξωτερικές δυνάμεις.
- Το **πλάτος** κύματος A : Η απόσταση ανάμεσα στην κορυφή του κύματος και στην στάθμη ηρεμίας του νερού. Ισχύει: $H=2A$
- Η **περίοδος** του κυματισμού T : Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι να περάσουν από το ίδιο σημείο του χώρου δυο διαδοχικές κορυφές (ή δύο διαδοχικές κοιλίες) του κυματισμού.
- Η **συχνότητα** του κυματισμού f : Ο αριθμός των μηκών κύματος που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο στην μονάδα του χρόνου. Ισχύει: $F=1/T$
- Η **κυκλική συχνότητα** του κυματισμού ω : Ισούται με $\omega=2\pi f$
- Η **κλίση** του κύματος S : Ο λόγος του ύψους προς το μήκος κύματος : H/λ
- Το **βάθος** του νερού d : Η κατακόρυφη απόσταση ανάμεσα στην επιφάνεια ηρεμίας και τον πυθμένα της θάλασσας.
- Η **ταχύτητα** του κύματος c : Ο λόγος της απόστασης που διανύει το κύμα, προς τον χρόνο που διέρρευσε κατά την απόσταση αυτήν.



Εικόνα 10: Τα βασικά μεγέθη ενός θαλάσσιου κυματισμού

Οι βασικές θεωρητικές παραδοχές που κάνουμε σε αυτήν την θεώρηση είναι οι εξείς:

- Το ρευστό που μελετάμε (δηλαδή το θαλασσινό νερό) είναι **υγρό**: Μπορεί να έχει ελεύθερη διαχωριστική επιφάνεια με τον ατμοσφαιρικό αέρα η οποία πάλλεται ελεύθερα.
- Το ρευστό είναι **ομογενές** και **ασυμπίεστο**: Δεν δημιουργούνται μεταβολές στην πυκνότητα του:
$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + (\vec{u}\cdot\vec{\nabla})\rho = 0$$
, που σημαίνει ότι η πυκνότητα είναι σταθερή: $\rho = \rho(x,y,z;t) = \text{const}$
- Το ρευστό είναι **ιδανικό**, δηλαδή **μη-συνεκτικό**: Οι εσωτερικές δυνάμεις ανάμεσα στα μόρια του οφείλονται μόνο σε ορθές και όχι διατμητικές τάσεις, πράγμα που με την σειρά του σημαίνει ότι:
 $\mu = \text{ιξώδες (ή αλλιώς, συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας)} = 0$
- Η ροή του ρευστού είναι **αστρόβιλη**: Μπορεί να αναπαρασταθεί ως κλίση ενός βαθμωτού πεδίου, του δυναμικού Φ :
 \exists συνάρτηση Φ , τέτοια ώστε $\vec{u} = \vec{\nabla}\Phi$, όπου $\Phi = \Phi(x,y,z;t)$. Επίσης ισχύει: $\vec{\nabla}\times\vec{u} = 0$
- Ο πυθμένας θεωρείται **αδιαπέραστος** και **μη-πορώδης**.
- Το ύψος κύματος H θεωρείται **πολύ μικρό** και ως εκ τούτου η κλίση του κύματος S θεωρείται πολύ μικρή.
- Το πρόβλημα έχει θεωρηθεί ως **δισδιάστατο**.

Ως συνέπεια των παραπάνω ισχύουν τα εξείς:

- Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού (θερμοκρασία, εντροπία) **αποσυζεύγγονται** από τις μηχανικές ιδιότητες του και δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Οι κυματισμοί αποτελούν απλές αρμονικές ταλαντώσεις: **Αρμονικοί υδάτινοι κυματισμοί**

2.3.1 Οι εξισώσεις Κίνησης και οι οριακές συνθήκες

Η εξίσωση κίνησης προκύπτει από τον ρυθμό μεταβολής της ορμής (2^ο νόμο του Newton) και συνοδεύεται από τον περιορισμό που επιβάλλει η αρχή διατήρησης της μάζας:

2^{ος} νόμος Newton \Rightarrow **Εξισώσεις Navier-Stokes:**

$$\sum F = F_v + F_m = \frac{DP_o}{Dt} \Rightarrow \boxed{\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \vec{T}} \quad (2.1)$$

όπου:

F_v : επιφανειακές δυνάμεις

F_m : δυνάμεις μάζας

P_o : Ορμή

Επίσης:

$$\frac{D(*)}{D} = (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})(*) + \frac{\partial(*)}{\partial t}$$

όπου:

ρ : πυκνότητα ρευστού

\vec{u} : πεδίο ταχυτήτων ρευστού

\vec{g} : πυκνότητα δυνάμεων μάζας (στην περίπτωση μας όμως είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας)

\vec{T} : Τανυστής της τάσεως

Αρχή διατήρησης μάζας \Rightarrow **Εξίσωση Συνέχειας:**

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{u}) = 0} \quad (2.2)$$

Όπου: m η μάζα του ρευστού

Οι δύο παραδοχές που επιβάλλουν το ρευστό να είναι *ιδανικό, ομογενές και ασυμπίεστο*, μετατρέπουν τις εξισώσεις *Navier-Stokes* στις εξισώσεις *Euler* και την εξίσωση *συνέχειας* σε μια επίσης πιο απλή μορφή:

$$\text{Navier-Stokes: } \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \vec{T} \Rightarrow \text{Euler: } \boxed{\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} P} \quad (2.3)$$

$$\text{Εξ. Συνέχειας: } \frac{D\rho}{Dt} + \rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0 \Rightarrow \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0} \quad (2.4)$$

Όπου: P : Η υδροστατική πίεση του ρευστού

Η παραδοχή που επιβάλλει πως η ροή είναι *δυναμική* απλοποιεί ακόμη περισσότερο τις εξισώσεις *Euler* και τις μετατρέπει στην εξίσωση του *Bernoulli* και μετατρέπει την ήδη απλοποιημένη εξίσωση *συνέχειας*, στην εξίσωση *Laplace*:

$$\text{Euler: } \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} P \Rightarrow \text{Bernoulli: } \boxed{\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\vec{\nabla}\Phi)^2 + gz + \frac{P}{\rho} = 0} \quad (2.5)$$

$$\text{Εξ. Συνέχειας: } \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \Rightarrow \text{Εξ. Laplace: } \boxed{\nabla^2\Phi = 0} \quad (2.6)$$

Το πρόβλημα μας διακρίνεται και από κάποιες **οριακές (ή συνοριακές) συνθήκες**.

- Θεωρούμε τον πυθμένα προσεγγιστικά επίπεδο: $z = -h(x, y) = \text{const}$.
- Επίσης θεωρούμε την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού: $\eta = z(x, y; t)$.
- Θεωρούμε ακόμη την στάθμη ηρεμίας του ρευστού η οποία είναι η ελεύθερη επιφάνεια του, εάν αυτό ισορροπούσε και είναι επίπεδη: $z(x, y) = z_0 = 0$.

1. Θεωρούμε πως στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-θάλασσας, η πίεση του νερού είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική: $P = P_{\text{atm}} = \text{const}$. Οπότε η σχέση (2.5) στην επιφάνειας της θάλασσας μας δίνει:

Δυναμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας (Δ.Σ.Ε.Ε): $P - P_{\text{atm}} = P_{\text{total}} = 0$ (2.7)

$$(2.5), (2.7) \Rightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + g\eta + \frac{P_{\text{total}}}{\rho} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + g\eta = 0}$$
 (2.8)

2. Εάν θεωρήσουμε πως το βάθος της θάλασσας από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα μέχρι την στάθμη ηρεμίας είναι $z = h(x, y)$ και πως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας πάνω από την στάθμη ηρεμίας της θάλασσας είναι $\eta(x, y; t) - z(x, y)$, τότε η παραπάνω σχέση συνεπάγεται πως η ολική παράγωγος της ποσότητας $\eta - z$, ως προς τον χρόνο t , στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι ίση με το μηδέν:

Κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας (Κ.Σ.Ε.Ε): $D(\eta - z)/Dt = 0$ (2.9)

$$(2.9) + \text{υλική παράγωγος} \Rightarrow \frac{D(\eta - z)}{Dt} = 0 \Rightarrow \frac{\partial(\eta - z)}{\partial t} + \nabla \Phi \cdot \nabla(\eta - z)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0}$$
 (2.10)

3. Εφόσον το νερό δεν διαπερνάει τον πυθμένα, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού είναι ίση με 0. Επίσης ισούται με το κάθετο διάνυσμα στον πυθμένα, επί το πεδίο ροής που παράγεται από το δυναμικό Φ , δηλαδή: $\vec{u}_{\perp} = \nabla \Phi \cdot \vec{\eta}$. Αυτό το εσωτερικό γινόμενο ισούται με την κατευθύνουσα παράγωγο: $\nabla \Phi \cdot \vec{\eta} = \partial \Phi / \partial \vec{\eta}$. Στον πυθμένα λοιπόν ισχύει:

Οριακή Συνθήκη Πυθμένα (ΟΣΠ): $\nabla \Phi \cdot \vec{\eta} \Big|_{z=-h} = \partial \Phi / \partial \vec{\eta} \Big|_{z=-h} = 0 \xrightarrow{\text{πυθμένας επίπεδος}}$

$$\boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0} \quad \text{όπου: } z = -h(x, y) \text{ η επίπεδη επιφάνεια του πυθμένα}$$
 (2.11)

2.3.2 Γραμμικοποίηση του κυματικού προβλήματος

Το πρόβλημα μας τίθεται ως εξής:

$$\text{Εξισώσεις: Bernoulli: } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\bar{\nabla} \Phi)^2 + gz + \frac{P}{\rho} = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Laplace: } \nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{Δ.Σ.Ε.Ε: } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\bar{\nabla} \Phi)^2 + g\eta = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{Ορ. Συνθήκες: Κ.Σ.Ε.Ε: } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{Ο.Σ.Π: } \left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (2.11)$$

Τα ζητούμενα είναι:

- η συνάρτηση του δυναμικού του πεδίου ταχυτήτων: $\Phi = \Phi(x, y, z; t)$
- η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού: $\eta = z(x, y; t)$.

Οι οριακές συνθήκες (2.8), (2.10) και (2.11) δεν είναι γραμμικές, ενώ η ελεύθερη επιφάνεια στην οποία πρέπει να ικανοποιούνται δεν είναι γνωστή. Η αναλυτική επίλυση λοιπόν μπορεί να γίνει μόνο με προσεγγιστικές μεθόδους μέσω της γραμμικοποίησης των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια. Για να γραμμικοποιήσουμε το βαθμωτό πεδίο ταχυτήτων $\Phi = \Phi(x, y, z; t)$ και την ελεύθερη επιφάνεια $\eta = z(x, y; t)$ πρώτα αναλύουμε τα παραπάνω μεγέθη σε σειρά διαταραχών και στην συνέχεια κάθε όρο της σειράς διαταραχών, σε σειρά Taylor αναπτυγμένη γύρω από την ελεύθερη αδιατάρακτη επιφάνεια όπου: $z = 0$, με z τον κατακόρυφο άξονα. [28]

Ανάπτυξη σε σειρά διαταραχών:

$$\Phi = \Phi(x, y, z; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m \Phi^{(m)} = \varepsilon^1 \Phi^{(1)} + \varepsilon^2 \Phi^{(2)} + \varepsilon^3 \Phi^{(3)} + \dots \quad (2.12)$$

$$\eta = z(x, y; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m \eta^{(m)} = \varepsilon^1 \eta^{(1)} + \varepsilon^2 \eta^{(2)} + \varepsilon^3 \eta^{(3)} + \dots \quad (2.13)$$

Ανάπτυξη σε σειρά Taylor:

$$\Phi^{(1)}(x, y, \eta + z_0; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \Phi^{(1)}(z_0)}{\partial z^m} [z^{(1)} - z_0]^m \xrightarrow{z_0=0} \Phi^{(1)}(x, y, \eta + 0; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \Phi^{(1)}(0)}{\partial z^m} [\eta^{(1)}]^m$$

$$\Phi^{(1)}(x, y, \eta; t) = \Phi^{(1)}(0) + \eta^{(1)} \frac{\partial \Phi^{(1)}(0)}{\partial z} + \frac{1}{2} (\eta^{(1)})^2 \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}(0)}{\partial z^2} + \dots = \Phi^{(1)} + \eta^{(1)} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} + \frac{1}{2} (\eta^{(1)})^2 \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \dots$$

$$\Phi^{(1)}(x, y, \eta; t) = \Phi^{(1)} + \eta^{(1)} \Phi_z^{(1)} + (1/2) (\eta^{(1)})^2 \Phi_{zz}^{(1)} + \dots, \quad z_0 = 0 \quad (2.14)$$

Ανάλογα προκύπτει και για τις παραγώγους του δυναμικού $\Phi^{(1)}$:

$$\begin{aligned}\Phi_x^{(1)}(x,y,\eta;t) &= \Phi_x^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{xz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zz}^{(1)} + \dots, \quad z_o = 0 \\ \Phi_y^{(1)}(x,y,\eta;t) &= \Phi_y^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{yz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zz}^{(1)} + \dots, \quad z_o = 0 \\ \Phi_z^{(1)}(x,y,\eta;t) &= \Phi_z^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{zz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zzz}^{(1)} + \dots, \quad z_o = 0 \\ \Phi_t^{(1)}(x,y,\eta;t) &= \Phi_t^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{tz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{tzz}^{(1)} + \dots, \quad z_o = 0\end{aligned}$$

Τα ίδια ακριβώς αναπτύγματα μπορούν να προκύψουν και για τα δυναμικά μεγαλύτερης τάξεως: $\Phi^{(2)}, \Phi^{(3)}, \dots$. Εάν λοιπόν πάρουμε το ανάπτυγμα διαταραχών (2.12) και τοποθετήσουμε αντί για κάθε δυναμικό $\Phi^{(i)}$ το αντίστοιχο ανάπτυγμα (2.14), παράγονται οι παρακάτω σχέσεις για το δυναμικό Φ και τις παραγώγους του:

$$\begin{aligned}\Phi &= \varepsilon^1 \left(\Phi^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_z^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zz}^{(1)} + \dots \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi^{(2)} + \eta^{(2)}\Phi_z^{(2)} + (1/2)(\eta^{(2)})^2\Phi_{zz}^{(2)} + \dots \right) + \dots \\ \Phi_x &= \varepsilon^1 \left(\Phi_x^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{xz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zzz}^{(1)} + \dots \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi_x^{(2)} + \eta^{(2)}\Phi_{xz}^{(2)} + (1/2)(\eta^{(2)})^2\Phi_{zzz}^{(2)} + \dots \right) + \dots \\ \Phi_y &= \varepsilon^1 \left(\Phi_y^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{yz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zzz}^{(1)} + \dots \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi_y^{(2)} + \eta^{(2)}\Phi_{yz}^{(2)} + (1/2)(\eta^{(2)})^2\Phi_{zzz}^{(2)} + \dots \right) + \dots \\ \Phi_z &= \varepsilon^1 \left(\Phi_z^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{zz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{zzz}^{(1)} + \dots \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi_z^{(2)} + \eta^{(2)}\Phi_{zz}^{(2)} + (1/2)(\eta^{(2)})^2\Phi_{zzz}^{(2)} + \dots \right) + \dots \\ \Phi_t &= \varepsilon^1 \left(\Phi_t^{(1)} + \eta^{(1)}\Phi_{tz}^{(1)} + (1/2)(\eta^{(1)})^2\Phi_{tzz}^{(1)} + \dots \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi_t^{(2)} + \eta^{(2)}\Phi_{tz}^{(2)} + (1/2)(\eta^{(2)})^2\Phi_{tzz}^{(2)} + \dots \right) + \dots\end{aligned}$$

Εάν εφαρμόσουμε τις παραπάνω σχέσεις στις οριακές συνθήκες (2.8) και (2.10), τότε θα παραχθούν οι αντίστοιχες μη-γραμμικοποιημένες συνοριακές συνθήκες:

Μη-Γραμμικοποιημένη Δ.Σ.Ε.Ε: (2.8β)

$$\varepsilon \left(\Phi_t^{(1)} + g\eta^{(1)} \right) + \varepsilon^2 \left\{ g\eta^{(2)} + \Phi_t^{(2)} + \eta^{(1)}\Phi_{tz}^{(1)} + 1/2 \left[\left(\Phi_x^{(1)} \right)^2 + \left(\Phi_y^{(1)} \right)^2 + \left(\Phi_z^{(1)} \right)^2 \right] \right\} + \varepsilon^3 \{ \dots \} + \dots = 0, \quad z_o = 0$$

Μη-Γραμμικοποιημένη Κ.Σ.Ε.Ε: (2.10β)

$$\varepsilon \left(\Phi_z^{(1)} - \eta_t^{(1)} \right) + \varepsilon^2 \left(\Phi_z^{(2)} + \eta_t^{(2)} + \eta^{(1)}\Phi_{zz}^{(1)} - \Phi_x^{(1)}\eta_x^{(1)} - \Phi_y^{(1)}\eta_y^{(1)} \right) + \varepsilon^3 \{ \dots \} + \dots = 0, \quad z_o = 0$$

Επειδή οι εξισώσεις (2.8β) και (2.10β) θα πρέπει να ισχύουν για όλα τα ε , πρέπει και όλοι οι συντελεστές των δυνάμεων του ε να ισούνται με μηδέν. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να διαχωρίσουμε τις οριακές συνθήκες της m - τάξης τις οποίες θα ικανοποιούν οι m - οστώοι όροι των σχέσεων (2.12) και (2.13), ως εξής:

1^ο - τάξιο πρόβλημα: ($m=1, \varepsilon^m = \varepsilon^1$):

$$\Delta.Σ.Ε.Ε \ 1^{\eta\varsigma} \ \text{τάξεως:} \ \Phi_t^{(1)} + g\eta^{(1)} = 0, \quad z_o = 0 \quad (2.8\gamma)$$

$$\text{Κ.Σ.Ε.Ε} \ 1^{\eta\varsigma} \ \text{τάξεως:} \ \Phi_z^{(1)} - \eta_t^{(1)} = 0, \quad z_o = 0 \quad (2.10\gamma)$$

2^ο – τάξιο πρόβλημα: (m=2, ε^m=ε²):

$$\Delta.S.E.E \text{ 2}^{\eta\varsigma} \text{ τάξεως: } g\eta^{(2)} + \Phi_t^{(2)} = -\eta^{(1)}\Phi_{tz}^{(1)} - 1/2 \left[(\Phi_x^{(1)})^2 + (\Phi_y^{(1)})^2 + (\Phi_z^{(1)})^2 \right], \quad z_o = 0$$

$$K.S.E.E \text{ 2}^{\eta\varsigma} \text{ τάξεως: } \Phi_z^{(2)} - \eta_t^{(2)} = -\eta^{(1)}\Phi_{zz}^{(1)} + \Phi_x^{(1)}\eta_x^{(1)} + \Phi_y^{(1)}\eta_y^{(1)}, \quad z_o = 0$$

Πρόβλημα m-οστής τάξεως:

$$\Delta.S.E.E \text{ m}^{\eta\varsigma} \text{ τάξεως: } g\eta^{(m)} + \Phi_t^{(m)} = F^{(m-1)}, \quad z_o = 0$$

$$K.S.E.E \text{ m}^{\eta\varsigma} \text{ τάξεως: } \Phi_z^{(m)} - \eta_t^{(m)} = G^{(m-1)}, \quad z_o = 0$$

Αξίζει να σημειωθεί πως οι συναρτήσεις του δυναμικού $\Phi^{(m)}$ οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως προσέγγιση για το ζητούμενο δυναμικό ροής Φ με σειρά διαταραχών, ικανοποιούν, πέρα από τις παραπάνω οριακές συνθήκες και τις σχέσεις (2.5), (2.6) και (2.11) της αντίστοιχης τάξεως m:

Μη-Γραμμικοποιημένο πρόβλημα m – στής τάξεως

$$\text{Bernoulli: } \frac{\partial \Phi^{(m)}}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi^{(m)})^2 + gz + \frac{P}{\rho} = 0$$

$$\text{Laplace: } \nabla^2 \Phi^{(m)} = 0$$

$$\text{O.S.Π: } \partial \Phi^{(m)} / \partial z = 0, \quad z = -h$$

$$\Delta.S.E.E: g\eta^{(m)} + \Phi_t^{(m)} = F^{(m-1)}, \quad z_o = 0$$

$$K.S.E.E: \Phi_z^{(m)} - \eta_t^{(m)} = G^{(m-1)}, \quad z_o = 0$$

Εάν χρησιμοποιήσουμε κυματισμούς μεγαλύτερων τάξεων από την 1^η, τότε βρίσκουμε λύσεις του μη-γραμμικού προβλήματος κατά **Stokes**. Στην αρχή του εδαφίου όμως είπαμε πως θέλουμε να βρούμε τις γραμμικοποιημένες αναλυτικές λύσεις του προβλήματος. Οπότε θα κάνουμε χρήση μόνο των πρωτοτάξιων όρων $\Phi^{(1)}, \eta^{(1)}$.

Το γραμμικοποιημένο 1^ο τάξιο πρόβλημα λοιπόν γίνεται:

$$\text{Bernoulli: } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz + \frac{P}{\rho} = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Laplace: } \nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{O.S.Π: } \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h \quad (2.11)$$

$$\Delta.S.E.E: \frac{\partial \Phi}{\partial t} + gn = 0, \quad z=0 \quad (2.8\gamma)$$

$$K.S.E.E: \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z=0 \quad (2.10\gamma)$$

2.3.3 Οι σχέσεις του δυναμικού και της ελεύθερης επιφάνειας

Επειδή το παραπάνω σύστημα είναι γραμμικό μπορούμε να επιλύσουμε την εξ. Laplace με χρήση της μεθόδου των χωριζόμενων μεταβλητών (βλ [28], [29], [24] και [30]). Επίσης στο §2.3.1 αναφέραμε πως θεωρούμε για λόγους απλότητας ότι το πρόβλημα μας εξετάζεται σε δύο διαστάσεις: $\Phi = \Phi(x, z; t)$ και $\eta = z(x; t)$. Η λύση του προβλήματος λοιπόν θα είναι της μορφής: $\Phi(x, z; t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot T(t)$ (2.15)

Ας ξεκινήσουμε κάνοντας κάποιες παραδοχές:

Παραδοχή 1^η: Το δυναμικό θεωρείται πως είναι μια περιοδική συνάρτηση ως προς την χωρική μεταβλητή x , καθώς και τον χρόνο t : $\Phi(x; t) = \Phi(x + \lambda; t)$, $\Phi(x; t) = \Phi(x; t + T)$

Παραδοχή 2^η: Ο χρόνος έχει ημιτονοειδή μορφή: $T(t) = \sin(\omega t)$. Κάνοντας χρήση της 2^{ης} παραδοχής λαμβάνουμε μια νέα μορφή του δυναμικού:

$$\Phi(x, z; t) = X(x) \cdot Z(z) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.15\beta)$$

Τοποθετώντας το δυναμικό (2.15β) στην εξίσωση Laplace έχουμε:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi = 0 &\Rightarrow \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 X(x)}{dx^2} Z(z) \sin(\omega t) + X(x) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \sin(\omega t) = 0 \\ \xrightarrow{\sin(\omega t) \neq 0} &\frac{d^2 X(x)}{dx^2} Z(z) + X(x) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0 \Rightarrow \frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0 \\ &\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = - \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \end{aligned}$$

Το πρώτο μέλος της παραπάνω σχέσης είναι μια συνάρτηση του x , ενώ το δεύτερο μια συνάρτηση του z και επειδή αυτές οι δύο μεταβλητές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, προκύπτει πως τα δύο μέλη της παραπάνω σχέσης, εφόσον είναι ίσα μεταξύ τους, τότε δεν μπορεί παρά να είναι και ίσα με μια σταθερά: $-k^2$:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = - \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = -k^2$$

Δημιουργούμε λοιπόν δύο νέες και ανεξάρτητες μεταξύ τους σχέσεις:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} = -k^2 \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = k^2 \quad (2.17)$$

Παραδοχή 3^η : Θεωρούμε πως η σταθερά k είναι ένας πραγματικός αριθμός.

Με βάση την θεωρία των συνήθων διαφορικών εξισώσεων, [29] [31] οι λύσεις των δύο παραπάνω διαφορικών εξισώσεων θα είναι:

$$X(x) = A\cos(kx) + B\sin(kx) \quad (2.16\beta)$$

$$Z(z) = Ce^{kz} + De^{-kz} \quad (2.17\beta)$$

Η μορφή λοιπόν του δυναμικού (2.15β), με την βοήθεια των (2.16β) και (2.17β) γίνεται:

$$\Phi(x, z; t) = (A\cos(kx) + B\sin(kx)) \cdot (Ce^{kz} + De^{-kz}) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.15\gamma)$$

Ας αξιοποιήσουμε τώρα την 1^η παραδοχή σχετικά με την περιοδικότητα του δυναμικού:

$$\Phi(x; t) = \Phi(x + \lambda; t) \Rightarrow X(x) = X(x + \lambda) \quad \xrightarrow{(2.16\beta)}$$

$$A\cos(kx) + B\sin(kx) = A\cos(k(x + \lambda)) + B\sin(k(x + \lambda))$$

$$A\cos(kx) + B\sin(kx) = A[\cos(kx)\cos(k\lambda) - \sin(kx)\sin(k\lambda)] + B[\sin(kx)\cos(k\lambda) + \cos(kx)\sin(k\lambda)]$$

Η παραπάνω σχέση ικανοποιείται για: $\cos(k\lambda) = 1$, $\sin(k\lambda) = 0$, οπότε με βάση τους νόμους της τριγωνομετρίας εύκολα μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα πως:

$$k\lambda = 2\pi \Rightarrow \boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}} : \text{Αριθμός κύματος} \quad (2.18)$$

Χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης των κυματισμών μπορούμε να φτιάξουμε δύο συνιστώσες του δυναμικού:

$$\Phi_i = A\cos(kx) \cdot (Ce^{kz} + De^{-kz}) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

$$\Phi_{ii} = B\sin(kx) \cdot (Ce^{kz} + De^{-kz}) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.19\beta)$$

Τώρα έφτασε η στιγμή να κάνουμε χρήση των γραμμικοποιημένων οριακών συνθηκών που βρήκαμε στην παράγραφο (2.3.2). Αρχικά αντικαθιστούμε την σχέση (2.19) στην *οριακή συνθήκη του πυθμένα (Ο.Σ.Π)* – (2.11):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \Big|_{z=-d} \Rightarrow Ak\cos(kx) \cdot (Ce^{-kh} - De^{kh}) \cdot \sin(\omega t) = 0 \Rightarrow Ce^{-kh} - De^{kh} = 0 \Rightarrow C = De^{2kh}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση, στην (2.19) προκύπτει:

$$\Phi_i = A\cos(kx) \cdot (De^{2kh}e^{kz} + De^{-kz}) \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow \Phi_i = ADe^{kh} \cos(kx) \cdot (e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}) \cdot \sin(\omega t)$$

Με την βοήθεια της τριγωνομετρικής ταυτότητας: $2 \cosh[k(z+h)] = e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}$ η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_i &= 2ADe^{kh} \cos(kx) \cdot \cosh[k(z+h)] \cdot \sin(\omega t) \\ \text{Θέτω: } G &= 2ADe^{kh} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Phi_i = G \cos(kx) \cdot \cosh[k(z+h)] \cdot \sin(\omega t)$$

Η επόμενη οριακή συνθήκη που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η *δυναμική συνθήκη στην επιφάνεια (Δ.Σ.Ε.Ε) – (2.8γ)*, η οποία με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης για το δυναμικό θα μας δώσει:

$$\eta_i = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} \Rightarrow \eta_i = -\frac{1}{g} G \cos(kx) \cdot \cosh[k(z+h)] \cdot \omega \cos(\omega t) \Rightarrow$$

$$\eta_i = -\frac{G \omega \cosh[k(z+h)]}{g} \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad , \quad \text{Θέτω: } \frac{H}{2} = \frac{G \omega \cosh(kh)}{g}$$

$$\text{και έχω τελικά: } \eta_i = -\frac{H}{2} \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (2.20)$$

$$\text{Επίσης το δυναμικό γίνεται: } \Phi_i = \frac{H g \cosh[k(z+h)]}{2 \omega \cosh(kd)} \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

Με εντελώς ανάλογο τρόπο, αλλά κάνοντας αυτήν την φορά χρήση της σχέσης (2.19β) προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\eta_{ii} = -\frac{H}{2} \sin(kx) \cdot \sin(\omega t) \quad (2.20\beta)$$

$$\Phi_{ii} = \frac{H g \cosh[k(z+h)]}{2 \omega \cosh(kh)} \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (2.21\beta)$$

Τα δύο δυναμικά που βρήκαμε, τα οποία δίνονται από τις σχέσεις (2.21) και (2.21β) αντίστοιχα, ικανοποιούν την εξίσωση του Laplace και τις οριακές συνθήκες και αποτελούν επί μέρους λύσεις του γραμμικοποιημένου προβλήματος. Με βάση και πάλι την αρχή της υπέρθεσης των κυματισμών, εάν αφαιρέσουμε τα δύο δυναμικά, θα βρούμε την συνολική λύση του προβλήματος μας η οποία είναι:

$$\Phi(x, z; t) = \Phi_i - \Phi_{ii} = \frac{H g \cosh[k(z+h)]}{2 \omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.22)$$

Εάν αντίστοιχα αφαιρέσουμε και τις δύο ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας, οι οποίες αντιστοιχούν στα δύο δυναμικά μας, θα προκύψει:

$$\eta = \eta_i - \eta_{ii} = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.23)$$

Η λύση λοιπόν του γραμμικοποιημένου 1^ο – τάξιου προβλήματος είναι η εξής:

$$\text{Δυναμικό ροής: } \Phi = \Phi(x, z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.22)$$

$$\text{Ελεύθερη επιφάνεια: } \eta = z(x; t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.23)$$

Επίσης προκύπτουν οι φυσικές ποσότητες:

- Πλάτος ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας του κύματος: $A = H/2$ (2.24)

- Αριθμός κύματος: $k = 2\pi/\lambda$ (2.18)

- Συχνότητα κύματος: $T = 1/f$ (2.25)

- Κυκλική συχνότητα κύματος: $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ (2.26)

- Ταχύτητα κύματος: $c = \lambda/T = \omega/k$ (2.27)

2.3.4 Μιγαδικό δυναμικό και μιγαδική ελεύθερη επιφάνεια

Το κυματικό πρόβλημα, καθώς και τα διάφορα προβλήματα που αφορούν συστήματα ανάκτησης θαλάσσιας ενέργειας, όταν μοντελοποιηθούν μαθηματικώς, μπορούν να θεωρηθούν ως ημιτονοειδή γραμμικά ταλαντωτικά συστήματα και για πρακτικούς λόγους, να παρουσιασθούν με την βοήθεια μιγαδικών συναρτήσεων. Έτσι λοιπόν και η λύση του κυματικού προβλήματος, δηλαδή οι σχέσεις (2.22) και (2.23), μπορούν να παρασταθούν και ως μιγαδικές συναρτήσεις. Αυτό μπορεί να γίνει με την βοήθεια των σχέσεων του Euler:

$$e^{\pm i\varphi} = \cos \varphi \pm i \sin \varphi \quad (2.28) \quad \cos \varphi = \frac{e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}}{2} \quad (2.29) \quad \sin \varphi = \frac{e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}}{2i} \quad (2.30)$$

Σε αυτήν την περίπτωση το δυναμικό του πεδίου ροής που δίνεται από την σχέση (2.22):

$$\Phi = \Phi(x, z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) = \Phi_0 \sin(kx - \omega t) \quad (2.31)$$

$$\text{Όπου θέσαμε: } \Phi_0 = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \quad (2.32)$$

Με την βοήθεια της (2.67) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \frac{e^{i(kx - \omega t)} - e^{-i(kx - \omega t)}}{2i} = -i \frac{\Phi_0}{2} e^{i(kx - \omega t)} + i \frac{\Phi_0}{2} e^{-i(kx - \omega t)} = i \frac{\Phi_0}{2} e^{-ikx} e^{i\omega t} - i \frac{\Phi_0}{2} e^{ikx} e^{-i\omega t} \quad (2.31\beta)$$

$$\text{Εισάγουμε το μιγαδικό πλάτος δυναμικού: } \Phi = \Phi(x, z) = i \Phi_0 e^{-ikx} \quad (2.33)$$

Και το συζυγές μιγαδικό πλάτος δυναμικού: $\Phi^* = \Phi^*(x, z) = -i\Phi_0 e^{ikx}$ (2.34)

Οπότε ισχύουν:

$$\Phi = i\Phi_0 e^{-ikx} = i\Phi_0 [\cos(kx) - i\sin(kx)] = \Phi_0 \sin(kx) + i\Phi_0 \cos(kx) \quad (2.33\beta)$$

$$\Phi^* = -i\Phi_0 e^{ikx} = -i\Phi_0 [\cos(kx) + i\sin(kx)] = \Phi_0 \sin(kx) - i\Phi_0 \cos(kx) \quad (2.34\beta)$$

Οπότε η (2.31β) γίνεται: $2\Phi(x, z; t) = \Phi(x, z)e^{i\omega t} + \Phi^*(x, z)e^{-i\omega t}$ (2.31γ)

Και τέλος η (2.31γ) γίνεται: $\Phi(x, z; t) = \frac{\Phi(x, z)}{2} e^{i\omega t} + \frac{\Phi^*(x, z)}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re}\{\Phi(x, z)e^{i\omega t}\}$ (2.31δ)

Το τελευταίο μέρος της σχέσης (2.31δ) αποδεικνύεται ως εξής:

$$\Phi(x, z; t) = \text{Re}\{\Phi(x, z)e^{i\omega t}\} = \text{Re}\{i\Phi_0 e^{-ikx} e^{i\omega t}\}$$

$$\Phi(x, z; t) = \text{Re}\{i\Phi_0 e^{-i(kx - \omega t)}\} = \text{Re}\{i\Phi_0 [\cos(kx - \omega t) - i\sin(kx - \omega t)]\}$$

$$\Phi(x, z; t) = \text{Re}\{\Phi_0 \sin(kx - \omega t) + i\Phi_0 \cos(kx - \omega t)\} \Rightarrow \Phi(x, z; t) = \Phi_0 \sin(kx - \omega t) : \text{Δηλαδή η σχ. (2.31)}$$

$$(2.31\delta) \Rightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \frac{\Phi}{2} e^{i\omega t} + (i\omega)^* \frac{\Phi^*}{2} e^{-i\omega t} \Rightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \Phi \quad \text{και} \quad \frac{\partial \Phi^*}{\partial t} = (i\omega)^* \Phi^* \quad (2.35)$$

$$(2.31\delta) \Rightarrow \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\omega^2 \frac{\Phi}{2} e^{i\omega t} - \omega^2 \frac{\Phi^*}{2} e^{-i\omega t} \Rightarrow \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\omega^2 \Phi \quad \text{και} \quad \frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial t^2} = -\omega^2 \Phi^* \quad (2.36)$$

Στην παράγραφο 2.3.2 ορίσαμε το γραμμικοποιημένο 1^ο - τάξιο κυματικό πρόβλημα που αποτελεί τις σχέσεις (2.5), (2.6), (2.11), (2.8γ) και (2.10γ). Με χρήση του μιγαδικού δυναμικού (2.33) το πρόβλημα τίθεται πλέον ως εξής:

Bernoulli (2.5): $\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz + \frac{p}{\rho} = i\omega \Phi + gz + \frac{p}{\rho} = 0$ (2.37)

Laplace (2.6): $\nabla^2 \Phi = 0$ (2.38)

Ο.Σ.Π (2.11): $\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$, $z = -h$ (2.39)

Δ.Σ.Ε.Ε (2.8γ): $\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta = i\omega \Phi + g\eta = 0$, $z = 0$ (2.40)

Κ.Σ.Ε.Ε (2.10γ): $\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$, $z = 0$ (2.41)

Λύνοντας την σχέση (2.40) ως προς $\eta(x)$ και εισάγοντας την στην σχέση (2.41), προκύπτει η **ενοποιημένη οριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας** (Ο.Σ.Ε.Ε) την οποία δεν αναφέραμε προηγουμένως αλλά θα χρειαστεί παρακάτω:

$$\text{Ο.Σ.Ε.Ε: } \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = \left(-\omega^2 \Phi + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0, \quad z=0 \quad (2.42)$$

Ακόμη προκύπτουν:

$$\text{Το μιγαδικό πεδίο ταχυτήτων:} \quad \vec{u} = \vec{\nabla} \Phi \quad (2.43)$$

$$\text{Το μιγαδικό πεδίο πίεσης (2.74), (2.72):} \quad P = -\rho g z - i\omega \rho \Phi \quad (2.44)$$

$$\text{Το μιγαδικό δυναμικό πεδίο πίεσης λόγω ύπαρξης κυματισμών:} \quad P = -i\omega \rho \Phi \quad (2.45)$$

$$\text{Η μιγαδική ελεύθερη επιφάνεια (2.77), (2.72):} \quad \eta = \eta(x) = -\frac{i\omega}{g} \Phi, \quad z=0 \quad (2.46)$$

Από τις σχέσεις (2.43 – 2.46) αντιλαμβανόμαστε πως για να λυθεί το πρόβλημα θα πρέπει να βρεθεί το μιγαδικό δυναμικό $\Phi = \Phi(x, z)$ λύνοντας την εξίσωση Laplace (2.38), με την βοήθεια των σχέσεων (2.39 – 2.41) και την μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών, όπως ακριβώς έγινε και στην §2.3.3. Προκύπτουν λοιπόν και πάλι οι σχέσεις (2.16) και (2.17). Λύνοντας αυτές τις διαφορικές εξισώσεις, θεωρώντας πως η σταθερά k είναι ένας πραγματικός θετικός αριθμός, προκύπτει η μερική λύση για το μιγαδικό δυναμικό της ροής [29] [31]:

$$\Phi(x, z) = X(x)Z(z) = (ae^{-ikx} + be^{ikx})(c_+ e^{kz} + c_- e^{-kz}) \quad (2.47)$$

Κάνοντας χρήση της Ο.Σ.Π (2.39) μπορεί να προκύψει η σχέση που ονομάζεται και **κατακόρυφη ιδιοσυνάρτηση** [32]:

$$\boxed{Z(z) = e(kz) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} = \frac{e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}}{e^{kh} + e^{-kh}} = \frac{1 + e^{-2k(z+h)}}{1 + e^{-2kh}} e^{kz}} \quad (2.48)$$

Ισχύουν επίσης:

$$Z(z=0) = e(kz=0) = \frac{\cosh[k(0+h)]}{\cosh(kh)} = \frac{\cosh(kh)}{\cosh(kh)} = 1 \quad (2.48\beta)$$

$$\frac{dZ(z)}{dz} = \frac{de(kz)}{dz} = k \cdot \frac{\sinh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} = k \cdot e(kz) \cdot \tanh[k(z+h)] \quad (2.48\gamma)$$

$$\left. \frac{dZ(z)}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{de(kz)}{dz} \right|_{z=0} = k \cdot e(0) \cdot \tanh(kh) = k \cdot \tanh(kh) \quad (2.48\delta)$$

Οπότε η (2.47) γίνεται:

$$\Phi(x, z) = (ae^{-ikx} + be^{ikx})e(kz) \quad (2.47\beta)$$

Η σχέση (2.46), με την βοήθεια της σχέσεως (2.47β) μας δίνει την συνάρτηση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας:

$$\eta(x) = -\frac{i\omega}{g}(ae^{-ikx} + be^{ikx})e(kz) \quad , \quad z=0 \xrightarrow{(2.48\beta)} \eta(x) = -\frac{i\omega}{g}ae^{-ikx} - \frac{i\omega}{g}\alpha \cdot \frac{b}{\alpha}e^{ikx}$$

$$\text{Θέτω το μιγαδικό πλάτος ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας: } A = -(i\omega/g)a \quad (2.49)$$

$$\text{Θέτω το μιγαδικό συντελεστή ανάκλασης: } \Gamma = b/\alpha \quad (2.50)$$

$$\text{Θέτω το γινόμενο τους: } B = \Gamma \cdot A = -i\omega/g b \quad (2.51)$$

Η μιγαδική ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας λοιπόν λαμβάνει την μορφή:

$$\boxed{\eta(x) = A(e^{-ikx} + \Gamma e^{ikx}) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} = \eta_f + \eta_b} \quad (2.46\beta)$$

$$\text{Όπου: } \quad \eta_f = Ae^{-ikx} \quad (2.52\alpha) \quad \quad \eta_b = A\Gamma e^{ikx} = Be^{ikx} \quad (2.52\beta)$$

Ο όρος η_f αναφέρεται σε έναν προοδευόντα κυματισμό ο οποίος διαδίδεται κατά την θετική διεύθυνση του άξονα x (προς τα δεξιά), ενώ ο όρος η_b αναφέρεται σε έναν προοδευόντα κυματισμό που διαδίδεται κατά τα αρνητικά x (προς τα αριστερά). Η σχέση (2.52α) αντιστοιχεί στην σχέση (2.23) που υπολογίστηκε παραπάνω, εάν πολλαπλασιαστεί με τον όρο $e^{i\omega t}$ που αφαιρέθηκε παραπάνω.

Για έναν προοδευόντα κυματισμό, ο οποίος δεν διαδίδεται παράλληλα στον άξονα x αλλά σχηματίζοντας μια σταθερή γωνία β μαζί του και προς την θετική διεύθυνση του επιπέδου x - y , η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\boxed{\eta(x, y) = Ae^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)}} \quad (2.46\gamma)$$

Το μιγαδικό δυναμικό ροής λοιπόν μπορεί πλέον να γραφτεί υπό την μορφή:

$$\boxed{\Phi(x, z) = -\frac{g}{i\omega} \cdot \eta(x) \cdot e(kz)} \quad (2.47\gamma)$$

2.3.5 Η εξίσωση Διασποράς

Μένει τώρα μια τελευταία οριακή συνθήκη να εφαρμόσουμε και αυτή δεν είναι άλλη από την *κινηματική συνθήκη στην επιφάνεια (Κ.Σ.Ε.Ε) – (2.10γ)*, στην οποία θα τοποθετήσουμε τις σχέσεις (2.22) και (2.23) που βρήκαμε για το δυναμικό και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας αντίστοιχα, στην §2.3.3. Η σχέση που θα προκύψει μας προσδιορίζει την σύνδεση των φυσικών ποσοτήτων ω και k και είναι:

$$\boxed{\omega^2 = kg \tanh(kh)} \quad (2.53)$$

Η ίδια ακριβώς σχέση μπορεί να προκύψει και με την βοήθεια των μιγαδικών συναρτήσεων που υπολογίσαμε στην §2.3.4. Κάνοντας λοιπόν χρήση της Ο.Σ.Ε.Ε (2.47γ) και με την βοήθεια της σχέση (2.47γ) έχουμε:

$$\eta(x) \left(\omega \frac{g}{i} \cdot e(kz) \Big|_{z=0} - \frac{g^2}{i\omega} \cdot \frac{\partial e(kz)}{\partial z} \Big|_{z=0} \right) = 0$$

Η παραπάνω σχέση με την βοήθεια των σχέσεων (2.48β), (2.48δ) και θεωρώντας πως ισχύει $\eta(x) \neq 0$, γίνεται:

$$\omega \frac{g}{i} - \frac{g^2}{i\omega} k \cdot \tanh(kh) = 0 \Rightarrow \omega \frac{g}{i} = \frac{g^2}{i\omega} k \cdot \tanh(kh) \Rightarrow \boxed{\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh)} \quad (2.53)$$

Η φυσική ερμηνεία της παραπάνω σχέσης έχει μεγάλη σημασία και αφορά το γεγονός πως κάθε κυματισμός που λαμβάνει χώρα στην θάλασσα (ειδικά οι θάλασσες) δεν αποτελείται από μια μόνο γωνιακή συχνότητα ω με ένα μήκος κύματος λ , αλλά αποτελεί ένα **πεδίο προοδευτικών κυματισμών** (έναν **κυματοσυρμό** δηλαδή) που συνίσταται από πολλές διαφορετικές συχνότητες ω οι οποίες καθορίζουν και τις αντίστοιχες επί μέρους συνιστώσες του κυματοσυρμού. Οι εξισώσεις (2.22), (2.23) - καθώς και οι (2.46γ), (2.47γ) - περιγράφουν τα χαρακτηριστικά μόνο ενός απλού αρμονικού μονοχρωματικού (δηλαδή μιας συχνότητας ω) κυματισμού μέσα στο κυματικό πεδίο.

Η *εξίσωση διασποράς* (2.53) περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το πεδίο των προοδευτικών κυματισμών διαχωρίζεται ή «*διασπείρεται*» στις επί μέρους συνιστώσες του. Οι περισσότερες συχνότητες αποσβαίνουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Μια συχνότητα συνήθως δεν χάνει την ενέργεια της και απομακρύνεται από τις υπόλοιπες. Οι κυματισμοί που προκύπτουν από αυτήν την διασπορά είναι οι *αποθάλασσες* οι οποίες κατά βάση αποτελούνται από μια μόνο συχνότητα ω . Γι αυτόν τον λόγο θεωρούνται γραμμικοί κυματισμοί ενώ φαίνονται οπτικά πιο καλοσηματισμένοι και «*λείοι*».

Τώρα λοιπόν ήμαστε σε θέση να αναλύσουμε την *φυσική εξήγηση της συντήρησης και κατ επέκταση των μεγάλων αποστάσεων που μπορούν να διανύουν οι αποθάλασσες*. Επειδή η συχνότητα των αποθαλασσών δεν αλληλεπιδρά με άλλες συχνότητες του κυματοσυρμού,

δεν χάνει την ενέργεια της και γι αυτό οι κυματισμοί αυτού του είδους μπορούν να ταξιδεύουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τα κύματα που δημιουργούνται στην Νέα Ζηλανδία, ταξιδεύουν μέχρι την Καλιφόρνια χωρίς ουσιαστικά να έχει χαθεί ενέργεια κατά την διάρκεια που διασχίζουν τον Ειρηνικό Ωκεανό. Με παρόμοιο τρόπο, ανεμογενείς κυματισμοί οι οποίοι δημιουργούνται στις αμερικανικές ακτές του Ατλαντικού, φτάνουν μέχρι και τις δυτικές ακτές της Ευρώπης. [27]

2.3.6 Η φασική ταχύτητα και η ταχύτητα διάδοσης του κυματοσυρμού

Παραπάνω, στο §2.3.3 αναφέραμε πως η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος συχνότητας ω , η οποία ονομάζεται και **φασική ταχύτητα**, είναι η εξής (2.27): $c_p = \lambda/T = \omega/k$. Αυτή η σχέση με την βοήθεια της εξίσωσης διασποράς (2.53) γίνεται:

$$c_p = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.54)$$

Όστόσο στην §2.3.5 είπαμε πως ένας κυματισμός ποτέ δεν αποτελείται από έναν μονοχρωματικό κυματισμό κυκλικής συχνότητας ω και αριθμού κύματος k αλλά από πολλούς επί μέρους προοδεύοντες κυματισμούς διαφορετικών συχνοτήτων, από έναν **κυματοσυρμό**. Η **ταχύτητα ολόκληρου του κυματοσυρμού** είναι:

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.55)$$

Για να βρούμε την σχέση μεταξύ της φασικής ταχύτητας ενός μονοχρωματικού κυματισμού c , σε σχέση με την ταχύτητα ολόκληρου του κυματοσυρμού c_g , διαφορίζουμε την εξίσωση διασποράς (2.53):

$$2\omega d\omega = g \tanh(kh) dk + \frac{gkh}{\cos^2(kh)} dk \Rightarrow \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \xrightarrow[(30)]{(29)} c_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) c_p$$

$$\text{Δηλαδή ισχύει: } c_g = n(kh) \cdot c_p, \text{ όπου: } n = n(kh) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.56)$$

Η (2.56) συνδέει την φασική και την ομαδική ταχύτητα του κυματοσυρμού. Επιπλέον μπορεί να πάρει και μια ακόμη μορφή. Εισάγουμε την **συνάρτηση βάρους**:

$$D(kh) = \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh) \quad (2.57)$$

Όπότε η σχέση (2.56), μέσω της (2.57) και της (2.54) μπορεί να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$c_g = \frac{D(kh)}{2 \tanh(kh)} \cdot c_p = \frac{g}{2\omega} \cdot D(kh) \quad (2.58)$$

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η κατακόρυφη ιδιοσυνάρτηση (2.48) και η συνάρτηση βάρους συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης [32]:

$$2k \int_{-h}^0 e^2(kh) dz = D(kh) \quad (2.59)$$

2.3.7 Περιπτώσεις βάθους του νερού

Οι σχέσεις για το δυναμικό και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας: (2.22) και (2.23), οι αντίστοιχες μιγαδικές σχέσεις: (2.52α) και (2.47γ), η εξίσωση διασποράς: (2.53), η ταχύτητα κυματοομάδας: (2.54), καθώς και οι σχέσεις: (2.56) και (2.58), που σχετίζουν την φασική με την ομαδική ταχύτητα, αφορούν το (σχετικό) ενδιάμεσο βάθος νερού, το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από την σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος λ και το βάθος το νερού h .

Συμβατικά η επιστήμη των θαλάσσιων κυματισμών διακρίνει τρεις περιπτώσεις βάθους:

$$\text{Ρηχό νερό: } h < \frac{\lambda}{20} \xrightarrow{(19)} kh < \frac{\pi}{10} \quad (2.60)$$

$$\text{Ενδιάμεσο βάθος νερού: } \frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2} \xrightarrow{(19)} \frac{\pi}{10} < kh < \pi \quad (2.61)$$

$$\text{Βαθύ νερό: } h > \frac{\lambda}{2} \xrightarrow{(19)} kh > \pi \quad (2.62)$$

Ο λόγος για τον οποίο προσθέσαμε μέσα στην παρένθεση το επίθετο «σχετικό» βάθος νερού είναι επειδή το αν ένα συγκεκριμένο σημείο της θάλασσας θεωρηθεί ως «βαθύ» ή «ρηχό», δεν έχει να κάνει μόνο με το απόλυτο βάθος του d , αλλά και με το πόσο «μεγάλος» (για την ακρίβεια το μήκος κύματος) είναι ο κυματισμός που διέρχεται από αυτό. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την αδιάσπαστη αυτή αναπαράσταση, ένας κυματισμός μήκους 200 m που κινείται σε βάθος 2000 m έχει το ίδιο σχετικό βάθος με έναν κυματισμό μήκους 0,2 m που κινείται σε ένα βάθος μόλις 1 m. [28]

Οι υπερβολικές τριγωνομετρικές εξισώσεις που παρατηρούμε στις σχέσεις (2.22) και (2.53) έχουν ασυμπτωτικές τιμές για τις περιπτώσεις όπου εξετάζουμε την κίνηση των κυματισμών σε ρηχό ή βαθύ νερό. Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για να απλοποιήσουμε τις σχέσεις για το δυναμικό: (2.22), (2.47γ), την εξίσωση διασποράς: (2.53), την φασική ταχύτητα: (2.54), καθώς και τις σχέσεις: (2.56), (2.58) που σχετίζουν την φασική με την ομαδική ταχύτητα, για αυτές τις περιπτώσεις βάθους. Ο παρακάτω πίνακας θα μας βοηθήσει να καταλάβουμε καλύτερα:

Πίνακας 2 : Ασυμπτωτικές μορφές των υπερβολικών συναρτήσεων [30]

Ενδιάμεσο βάθος	Μεγάλο βάθος	Ρηχό βάθος
$\pi/10 < kh < \pi$	$kh > \pi \Rightarrow kh \rightarrow \infty$	$kh < \pi/10 \Rightarrow kh \rightarrow 0$
$\cosh(kh)$	$e^{kh}/2$	1
$\sinh(kh)$	$e^{kh}/2$	kh
$\tanh(kh)$	1	kh
$e(kz)$	e^{kz}	1
$D(kh)$	1	2kh

Εφαρμόζοντας λοιπόν τα δεδομένα του πίνακα 2 στις σχέσεις (2.22), (2.47γ), (2.53), (2.54), (2.56), (2.58) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

1. **Ενδιάμεσο βάθος :**

$$\text{Δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.22)$$

$$\text{Μιγαδικό δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z) = -\frac{g}{i\omega} \cdot \eta(x) \cdot e(kz) \quad (2.47\gamma)$$

$$\text{Εξίσωση διασποράς:} \quad \omega^2 = kg \tanh(kh) \quad (2.53)$$

$$\text{Φασική ταχύτητα:} \quad c_p = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.54)$$

$$\text{Ομαδική ταχύτητα:} \quad c_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) c_p = n(kh) c_p = \frac{D(kh)}{2 \tanh(kh)} \cdot c_p \quad (2.56-8)$$

2. **Μεγάλο βάθος :**

$$\text{Δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z; t) = \frac{H g}{2 \omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) = \frac{g}{\omega} \eta(x; t) e^{kz} \quad (2.63)$$

$$\text{Μιγαδικό δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z) = -\frac{g}{i\omega} \eta(x) e^{kz} \quad (2.64)$$

$$\text{Εξίσωση διασποράς:} \quad \omega^2 = kg \quad (2.65)$$

$$\text{Φασική ταχύτητα:} \quad c_p = \sqrt{g/k} \quad (2.66)$$

$$\text{Ομαδική ταχύτητα:} \quad c_g = \frac{1}{2} c_p \quad (2.67)$$

3. Ρηχό βάθος :

$$\text{Δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \sin(kx - \omega t) = \frac{g}{\omega} \eta(x; t) \quad (2.68)$$

$$\text{Μιγαδικό δυναμικό ροής:} \quad \Phi(x, z) = -\frac{g}{i\omega} \eta(x) \quad (2.69)$$

$$\text{Εξίσωση διασποράς:} \quad \omega^2 = k^2 g h \quad (2.70)$$

$$\text{Φασική ταχύτητα:} \quad c_p = \sqrt{gh} \quad (2.71)$$

$$\text{Ομαδική ταχύτητα:} \quad c_g = c_p \quad (2.72)$$

Παρατηρούμε πως στο ρηχό βάθος νερού η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εξαρτάται μόνο από το βάθος d και γι αυτόν τον λόγο όταν το κύμα προσεγγίζει την ακτή μειώνει σταδιακά την ταχύτητα του. Αντίθετα στο μεγάλο βάθος νερού η ταχύτητα διάδοσης αυξάνεται ανάλογα με το μήκος λ του κυματισμού. Οι ταχύτητες κυματοσομάδας για το βαθύ (2.67) και το ρηχό νερό (2.72) υπολογίζονται διαφορίζοντας τις σχέσεις (2.66) και (2.71) αντίστοιχα. Παρατηρούμε επίσης πως στην περίπτωση του ρηχού νερού η φασική ταχύτητα και η ταχύτητα κυματοσομάδας ταυτίζονται, άρα δεν υπάρχει διασπορά των κυματισμών σε αυτήν την περίπτωση διότι κάθε επί μέρους κύμα, οδεύει με την ταχύτητα του κυματοσυρμού.

2.3.8 Κινηματική του πεδίου ροής των απλών αρμονικών κυματισμών

Όταν λέμε «πεδίο ροής» του κυματισμού στην ουσία αναφερόμαστε στις ταχύτητες των σωματιδίων του ρευστού κατά την διάρκεια όδευσης του κύματος. **Πεδίο** ονομάζεται ο χώρος σε κάθε σημείο του οποίου ένα μέγεθος λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή. Σε ένα **βαθμωτό πεδίο** η τιμή αυτή του φυσικού μεγέθους σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μεταβάλλεται μόνο με βάση την θέση του στον χώρο. Σε ένα **διανυσματικό πεδίο** η τιμή του φυσικού μεγέθους δεν εξαρτάται μόνο από τη θέση αλλά και από την διεύθυνση του στον χώρο. Σε γενικότερο επίπεδο το φυσικό μέγεθος εξαρτάται και από την ροή του χρόνου. [33]

Πεδίο ταχυτήτων ή **πεδίο ροής** ενός ρευστού λοιπόν, ονομάζουμε το χώρο σε κάθε σημείο του οποίου η ταχύτητα του ρευστού παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή ανάλογα με την θέση, την διεύθυνση και τον χρόνο και είναι ένα διανυσματικό πεδίο τιμών. Κάθε σημείο αναπαριστά ένα ρευστό σωματίδιο του νερού το οποίο έχει διαγράψει την δική του τροχιά και έχει συγκεκριμένη ταχύτητα και επιτάχυνση. [24]

Στην παράγραφο 2.2.1 θεωρήσαμε πως η ροή του πεδίου ταχυτήτων του νερού δεν παρουσιάζει στροβιλισμούς $\vec{\nabla} \times \vec{u} = 0$ το οποίο σημαίνει με την σειρά του ότι μπορεί να

αναπαρασταθεί μέσω ενός βαθμωτού πεδίου $\Phi = \Phi(x, y, z; t)$ τέτοιου ώστε να ισχύει η σχέση (2.43):

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \Phi \Rightarrow \vec{u} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \hat{j} \quad \text{ή} \quad \hat{u} = \vec{\nabla} \cdot \Phi \Rightarrow \hat{u} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \hat{j}$$

Το **πεδίο ταχυτήτων** του ρευστού δηλαδή έχει δύο συνιστώσες, μια οριζόντια και μια κατακόρυφη, οι οποίες προκύπτουν διαφορίζοντας την σχέση (2.22) κατά x και z αντίστοιχα:

Οριζόντια συνιστώσα:
$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.73)$$

Κατακόρυφη συνιστώσα:
$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\sinh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.74)$$

Το **μιαδικό πεδίο ταχυτήτων** του ρευστού δίνεται διαφορίζοντας την (2.47γ) αντίστοιχα:

$$\hat{u}_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = g \frac{k}{\omega} e(kz)(\eta_f - \eta_b) = \omega \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} (\eta_f - \eta_b) \quad (2.75)$$

$$\hat{u}_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = i g \frac{k}{\omega} \cdot e(kz) \cdot (\eta_f + \eta_b) = i \omega \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} (\eta_f + \eta_b) \quad (2.76)$$

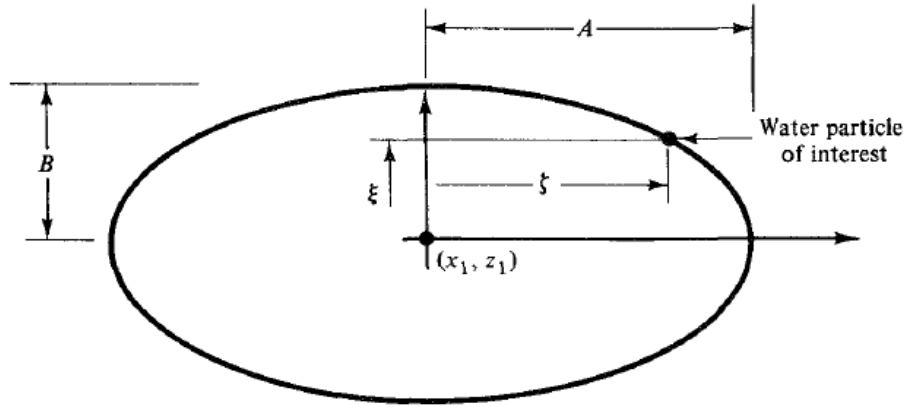
Κάτι ανάλογο ισχύει και για το **πεδίο επιταχύνσεων** του ρευστού. Δηλαδή διαφορίζουμε τις σχέσεις (2.73) και (2.74) ως προς τον χρόνο t :

Οριζόντια συνιστώσα:
$$\alpha_x = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial x} = \frac{H}{2} g k \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.77)$$

Κατακόρυφη συνιστώσα:
$$\alpha_z = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial z} = -\frac{H}{2} g k \frac{\sinh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.78)$$

2.3.9 Οι τροχιές των σωματιδίων του ρευστού

Θεωρούμε πως η αρχική μέση θέση ενός σωματιδίου του ρευστού είναι (x_1, z_1) . Υπό την επίδραση του πεδίου πιέσεων του κυματισμού, το ρευστό σωματίδιο μετατοπίζεται από την αρχική του θέση και καταλαμβάνει μια νέα θέση, την $(x_1 + \zeta, z_1 + \xi)$. Τόσο η αρχική, όσο και η τελική θέση του σωματιδίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 11: Η μορφή των τριγώνων των ρευστών σωματιδίων του νερού κατά την διάρκεια του κυματισμού

Ο σκοπός τώρα είναι να βρεθούν οι συνιστώσες (ζ, ξ) της μετατόπισης του σωματιδίου και αυτό θα γίνει ολοκληρώνοντας ως προς τον χρόνο την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου ταχυτήτων του ρευστού:

$$\zeta(x_1, z_1; t) = \int u(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) dt \quad \xi(x_1, z_1; t) = \int w(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) dt \quad (2.79)$$

Στην συνέχεια αναπτύσσουμε τις σχέσεις κατά σειρές Taylor ως προς την μέση θέση ισορροπίας τους (x_1, z_1) :

$$w(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \frac{\partial^m w(x_1, z_1)}{\partial z_1^m} (\xi - z_1)^m = w(x_1, z_1) + \left. \frac{\partial w(x_1, z_1)}{\partial z_1} \right|_{z_1} (\xi - z_1) + \dots$$

Επειδή εξετάζουμε την γραμμική εκδοχή του προβλήματος των προοδευόντων κυματισμών και επειδή οι κυματισμοί θεωρούνται μικρού πλάτους μπορούμε να κρατήσουμε στις παραπάνω αναπτύξεις μόνο τους πρώτους όρους και τους υπόλοιπους να τους θεωρήσουμε αμελητέους. Έτσι έχουμε :

$$u(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) \approx u(x_1, z_1) \quad w(x_1 + \zeta, z_1 + \xi) \approx w(x_1, z_1) \quad (2.80)$$

Τοποθετώντας τις σχέσεις (2.80) στα ολοκληρώματα των σχέσεων (2.79) και εν συνεχεία αντικαθιστώντας τις $u(x_1, z_1)$ και $w(x_1, z_1)$ με τις σχέσεις (2.73) και (2.74), θα προκύψει η οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της μετατόπισης των σωματιδίων του νερού:

$$\text{Οριζόντια συνιστώσα μετατόπισης: } \zeta = -\frac{H g k}{2 \omega^2} \frac{\cosh[k(z_1 + h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx_1 - \omega t) \quad (2.81)$$

$$\text{Κατακόρυφη συνιστώσα μετατόπισης: } \xi = \frac{H g k}{2 \omega^2} \frac{\sinh[k(z_1 + h)]}{\sinh(kh)} \sin(kx_1 - \omega t) \quad (2.82)$$

$$\text{Θέτοντας: } A = \frac{H g k \cosh[k(z_1 + h)]}{2 \omega^2 \cosh(kh)} \quad (2.83) \quad \text{Και: } B = \frac{H g k \sinh[k(z_1 + h)]}{2 \omega^2 \sinh(kh)} \quad (2.84)$$

Οι παραπάνω σχέσεις γίνονται:

$$\text{Οριζόντια συνιστώσα: } \zeta = -A \cos(kx_1 - \omega t) \quad (2.81\beta)$$

$$\text{Κατακόρυφη συνιστώσα: } \xi = B \sin(kx_1 - \omega t) \quad (2.82\beta)$$

Υψώνοντας τις παραπάνω σχέσεις στο τετράγωνο και προσθέτοντας κατά μέλη προκύπτει η μαθηματική έκφραση της τροχιάς των μορίων του ρευστού:

$$\boxed{\left(\frac{\zeta}{A}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{B}\right)^2 = 1} \quad (2.85)$$

Βάση της αναλυτικής γεωμετρίας [33] γνωρίζουμε πως η παραπάνω σχέση παριστάνει μια έλλειψη με μεγάλο ημιάξονα τον A στην διεύθυνση x και μικρό ημιάξονα τον B στην διεύθυνση y αντίστοιχα (βλ. εικόνα 20). Καθώς παρατηρούμε τις τροχιές των σωματιδίων που δεν είναι στην επιφάνεια, αλλά σε μεγαλύτερα βάθη θα παρατηρήσουμε πως και αυτά διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές αλλά με μικρότερους ημιάξονες A και B καθώς αυτοί μειώνονται όσο μειώνεται και το βάθος d.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν το ενδιαμέσο σχετικό βάθος νερού στην περίπτωση του οποίου ισχύει η σχέση: $\lambda/20 < h < \lambda/2$ ή $\pi/10 < kh < \pi$

Ας δούμε τώρα τι ακριβώς συμβαίνει και στις υπόλοιπες περιπτώσεις σχετικού βάθους βάση των δεδομένων του πίνακα 1:

$$(a) \text{ Ρηχό νερό: } h < \frac{\lambda}{20} \text{ ή } kh < \frac{\pi}{10}. \text{ Προκύπτουν: } A = \frac{H g k}{2 \omega^2} \text{ και } B = \frac{H g k}{2 \omega^2} \left(\frac{z_1}{h} + 1 \right)$$

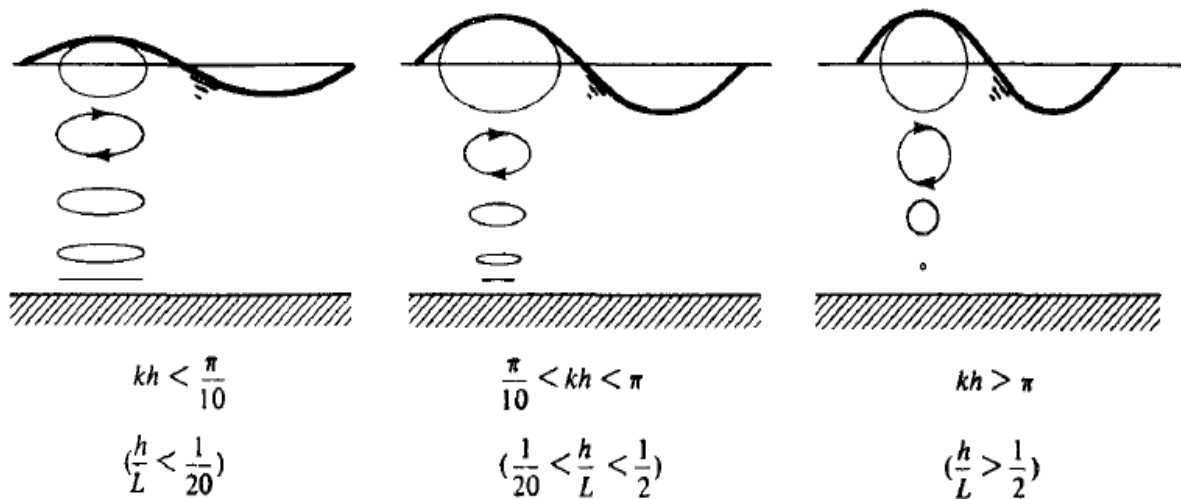
Από τις τελευταίες σχέσεις παρατηρούμε πως ο ημιάξονας A δεν μειώνεται με το βάθος d και αυτό σημαίνει ότι η οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης ενός σωματιδίου είναι σταθερή καθώς ωδεύουμε από την επιφάνεια και προσεγγίζουμε τον πυθμένα. Αντίθετα η κατακόρυφος ημιάξονας B μειώνεται γραμμικά καθώς μειώνεται το βάθος d. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως στην περίπτωση του ρηχού νερού *οι τροχιές των σωματιδίων του νερού αποτελούν ελλείψεις* οι οποίες καθώς προσεγγίζουμε τον πυθμένα *μειώνουν την εκκεντρότητα τους*. Στον πάτο της θάλασσας η έλλειψη εκφυλίζεται σε ένα **ευθύγραμμο τμήμα μήκους 2A**.

$$(b) \text{ Βαθύ νερό: } h > \frac{\lambda}{2} \text{ ή } kh > \pi. \text{ Προκύπτουν: } A = \frac{H g k}{2 \omega^2} e^{kz_1} \text{ και } B = \frac{H g k}{2 \omega^2} e^{kz_1}$$

Από τις σχέσεις αυτές παρατηρούμε πως οι ημιάξονες A και B είναι ίδιοι και πως μειώνονται εκθετικά καθώς προσεγγίζουμε τον πυθμένα της θάλασσας. Αυτό σημαίνει πως στην

περίπτωση του μεγάλου βάθους νερού οι ελλειπτικές τροχιές εκφυλίζονται σε **κυκλικές τροχιές** ακτίνας A ή B . Στον πάτο της θάλασσας ο κύκλος εκφυλίζεται σε **σημείο** πράγμα που σημαίνει πως τα σωματίδια στον πάτο της θάλασσας είναι ακίνητα, δηλαδή δεν επηρεάζονται από το πεδίο των πιέσεων που αναπτύσσεται λόγω του οδεύοντος κυματισμού. Όλα τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται και σχηματικά στην εικόνα 12

Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παράγραφο αυτή είναι το γεγονός πως οι γραμμικοί αρμονικοί κυματισμοί μικρού πλάτους *δεν μεταφέρουν μάζα ενώ μεταδίδονται στο νερό, καθώς οι τροχιές των σωματιδίων τους είναι κλειστές*. Αυτού του είδους οι κυματισμοί μεταφέρουν μόνο ενέργεια, όπως θα δούμε παρακάτω. Αντίθετα οι πιο ρεαλιστικοί μη γραμμικοί κυματισμοί πεπερασμένου πλάτους μεταφέρουν και μάζα καθώς διαδίδονται. Αυτό όμως είναι κάτι που δεν θα αναλυθεί εδώ καθώς ο σκοπός της εργασίας είναι μόνο μια στοιχειώδης περιγραφή της φυσικής των γραμμικών κυματισμών.



Εικόνα 12: Οι τροχιές των σωματιδίων του ρευστού στην περίπτωση των προοδευόντων κυματισμών για διαφορετικά σχετικά βάθη του νερού

2.3.10 Πεδίο πιέσεων των προοδευτικών κυματισμών

Στην παράγραφο 2.3.1 είχαμε καταλήξει στην εξ. Bernoulli (2.5):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + gz + \frac{P}{\rho} = 0$$

Από αυτήν την σχέση μπορούμε εύκολα να εξάγουμε το πεδίο πιέσεων που αναπτύσσεται λόγω του προοδευόντος κυματισμού. Θεωρούμε την παραπάνω σχέση αρχικά στην ελεύθερη επιφάνεια $n=z(x;t)$ και στην συνέχεια σε ένα οποιοδήποτε βάθος $z_1=z(x;t)$ και εφόσον και οι δύο ισούνται με μηδέν, μπορούμε να γράψουμε:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + gz_1(x,t) + \frac{P}{\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + g\eta(x,t) + \frac{P}{\rho} = 0$$

Στην ελεύθερη επιφάνεια ως γνωστών η πίεση του νερού ισούται με την ατμοσφαιρική και μπορεί να θεωρηθεί για λόγους ευκολίας ως μηδενική: $P = P_{atm} = 0$, οπότε η παραπάνω σχέση γράφεται ως:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + gz + \frac{P}{\rho} \right|_{z_1} = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + g\eta \right|_{\eta}$$

Γραμμικοποιώντας στην §2.3.2 είδαμε πως μπορούμε να απαλείψουμε τις παραγώγους δεύτερης τάξεως:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz + \frac{P}{\rho} \right|_{z_1} = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta \right|_{\eta}$$

Κάνοντας χρήση και της Δ.Σ.Ε.Ε (2.8γ) που βρήκαμε παραπάνω, συμπαιρνούμε πως το δεύτερο μέλος της σχέσης μας ισούται με μηδέν, οπότε αυτή γίνεται:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz + \frac{P}{\rho} \right|_{z_1} = 0$$

Επιπλέον λύνοντας ως προς την πίεση P του πεδίου ροής λαμβάνουμε την τελική μας σχέση:

$$P = -\rho g z_1 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{ή καλύτερα:} \quad P = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.86)$$

Τέλος, κάνοντας εισάγοντας την σχέση (2.22) που μας δίνει το δυναμικό του πεδίου ροής, στη σχέση (2.46), προκύπτει η αναλυτική μορφή του πεδίου πιέσεων του ρευστού:

$$P = -\rho g z + \rho g \frac{H \cosh[k(z+h)]}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.87)$$

Η σχέση (2.87), με την βοήθεια της σχέσης: $\eta = z(x;t) = H/2 \cos(kx - \omega t)$ που δίνει την εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας και θέτωντας:

$$K_p(z) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \quad (2.88)$$

Όπου: $K_p(z)$ ονομάζεται **συντελεστής απόκρισης της πίεσης** (*pressure response factor*) λαμβάνει την μορφή:

$$P = -\rho g z + \rho g \eta K_p(z) \quad (2.87\beta)$$

Ο πρώτος όρος στην σχέση (2.87β) αντιπροσωπεύει την **υδροστατική πίεση** P_{stat} , χωρίς την παρουσία κυματισμών, ενώ ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την **υδροδυναμική πίεση** P_{dyn} η οποία οφείλεται στην αύξηση της πίεσης λόγω της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και της κατακόρυφης επιτάχυνσης του πεδίου ροής.

Άρα το **δυναμικό πεδίο πιέσεων** είναι:
$$P_{dyn} = \rho g \eta K_p(z) \quad (2.88)$$

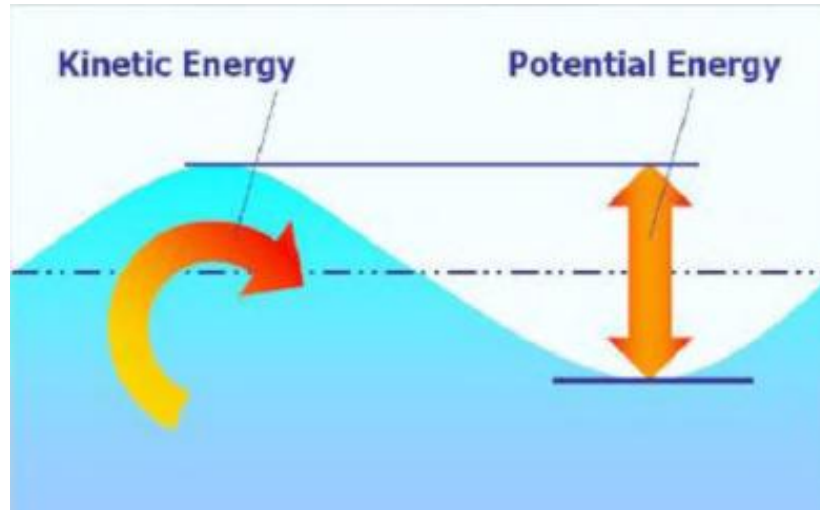
Αντίστοιχα το **μικροδυναμικό πεδίο πιέσεων** δίνεται από την σχέση (2.45), με την βοήθεια της σχέσης (2.47γ):

$$P_{dyn} = \rho g \eta e(kz) \quad (2.45\beta)$$

2.3.11 Η Ενέργεια των Κυματισμών

Η ενέργεια που μεταφέρει ένας απλός μονοχρωματικός αρμονικός κυματισμός προέρχεται από τις δύο εναλλασσόμενες κινήσεις του νερού, δηλαδή είναι δύο ειδών:

1. Η **δυναμική ενέργεια** η οποία είναι αποτέλεσμα της κατακόρυφης μετάθεσης των στοιχειωδών ρευστών σωματιδίων του νερού από την θέση ισορροπίας τους.
2. Η **κινητική ενέργεια** η οποία οφείλεται στην (κατά βάση οριζόντια) κίνηση των ρευστών σωματιδίων του ρευστού.



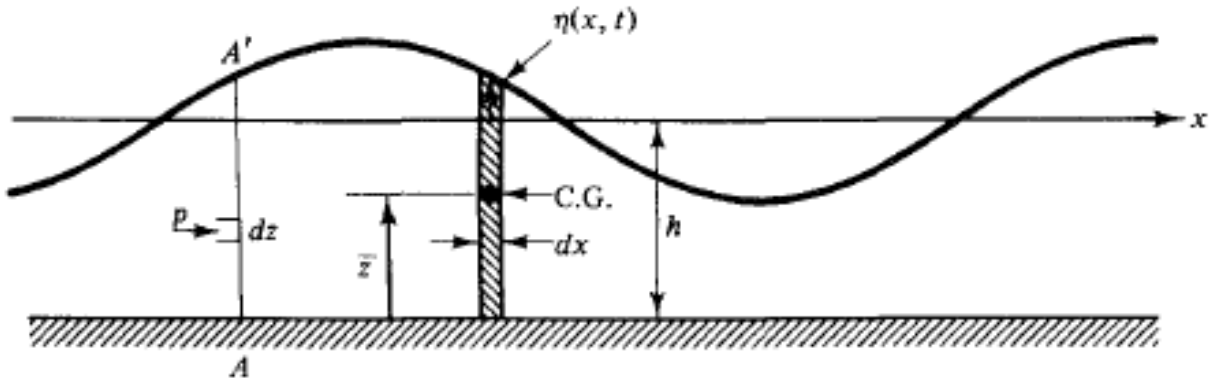
Εικόνα 13: Η σχηματική απεικόνιση της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας των κυματισμών [27]

Ας υπολογίσουμε πρώτα την **δυναμική ενέργεια** του κυματισμού:

Η δυναμική ενέργεια μιας στήλης του νερού η οποία έχει ύψος z από τον πυθμένα μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια και στοιχειώδες πλάτος dx , είναι: $d(PE) = dm \cdot g \cdot z$. Όπου: dm είναι η στοιχειώδης μάζα της στήλης του ρευστού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και z είναι η απόσταση του κέντρου βάρους (C.G – βλέπε εικόνα 14) της στήλης από τον πυθμένα, η οποία εάν υποθέσουμε ότι βρίσκεται περίπου στην μέση απόσταση ανάμεσα σε

πυθμένα και επιφάνεια, θα είναι ίση με: $z = \eta(x;t) + h/2$. Η στοιχειώδης μάζα της στήλης του ρευστού είναι ίση με: $dm = \rho(\eta(x;t) + h)dx$, όπου h είναι το βάθος του νερού από τον πυθμένα μέχρι την επιφάνεια ηρεμίας και $\eta = \eta(x;t)$ είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας που δίνεται από την σχέση (2.23). Οπότε η δυναμική ενέργεια της στήλης γίνεται:

$$d(PE) = (\rho g(\eta + h)^2 / 2) dx$$



Εικόνα 14: Το σχήμα που περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού της δυναμικής ενέργειας του αρμονικού οδεύοντος κυματισμού

Η μέση δυναμική ενέργεια [34] σε ένα ολόκληρο μήκος κύματος λ (και όχι μόνο σε μια στήλη στοιχειώδους πάχους dx) δίνεται από την σχέση:

$$\left(\overline{PE}\right)_T = \frac{1}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} d(PE) = \frac{1}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} \left(\rho g \frac{(\eta + h)^2}{2} \right) dx = \frac{\rho g}{2\lambda} \left(\int_x^{x+\lambda} \eta^2 dx + 2h \int_x^{x+\lambda} \eta dx + \int_x^{x+\lambda} h^2 dx \right)$$

Ο δείκτης T υποδηλώνει πως υπολογίζεται η ενέργεια για όλο τον όγκο του νερού, παρά το γεγονός πως δουλεύουμε στις δύο διαστάσεις. Εκτελώντας την παραπάνω ολοκλήρωση, γνωρίζοντας πως ο δεύτερος όρος για την μέση τιμή της δυναμικής ενέργειας μηδενίζεται και κάνοντας χρήση της σχέσης (2.23), προκύπτει [30]:

$$\left(\overline{PE}\right)_T = \rho g \frac{H^2}{16} + \rho g \frac{h^2}{2}$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης είναι η μέση δυναμική ενέργεια των κυματισμών, ενώ ο δεύτερος όρος είναι η μέση δυναμική ενέργεια του ρευστού σε ηρεμία. Οι δύο όροι μαζί είναι η μέση δυναμική ενέργεια που περικλείεται συνολικά στο νερό. Εμάς όμως μας ενδιαφέρει μόνο ο πρώτος όρος.

Άρα η μέση δυναμική ενέργεια των κυμάτων ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$\boxed{\left(\overline{PE}\right) = \rho g \frac{H^2}{16} = \rho g \frac{A^2}{4}} \quad (2.89)$$

- Ας υπολογίσουμε τώρα την δυναμική ενέργεια με την βοήθεια του μιγαδικού φορμαλισμού:

Παραπάνω αναφέραμε πως μια στοιχειώδης μάζα στήλης του ρευστού είναι ίση με: $dm = \rho(\eta(x;t) + h)dx$ και περιέχει δυναμική ενέργεια:

$$d(PE) = \left(\rho g \frac{(\eta + h)^2}{2} \right) dx = \frac{\rho g}{2} \eta^2 dx + \rho g \eta h dx + \frac{\rho g}{2} h^2 dx$$

Ο δεύτερος όρος για την μέση τιμή της δυναμικής ενέργειας μηδενίζεται, ενώ ο τρίτος όρος αφορά την δυναμική ενέργεια του νερού σε κατάσταση ηρεμίας. Εμάς λοιπόν μας ενδιαφέρει μόνο ο πρώτος όρος που αφορά την μέση δυναμική ενέργεια λόγω ύπαρξης κυματισμών.

$$\overline{PE(x)} = \frac{\rho g}{2} \overline{\eta^2(x;t)} \quad (2.90)$$

Στην περίπτωση ενός αρμονικού κύματος όπου η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί με την βοήθεια της μιγαδικής της μορφής:

$$\eta(x;t) = \frac{\eta(x)}{2} e^{i\omega t} + \frac{\eta^*(x)}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re} \left\{ \eta(x) e^{i\omega t} \right\} \quad (2.91)$$

$$\overline{\eta^2(x,t)} = \left(\frac{\eta(x)}{2} e^{i\omega t} + \frac{\eta^*(x)}{2} e^{-i\omega t} \right)^2 = \frac{\eta^2}{4} e^{2i\omega t} + \frac{\eta^{*2}}{4} e^{-2i\omega t} + 2 \frac{\eta \eta^*}{4} e^{i\omega t} e^{-i\omega t} \Rightarrow$$

$$\overline{\eta^2(x,t)} = \frac{|\eta(x)|^2}{2} \quad (2.92)$$

Η μέση τιμή των δύο πρώτων όρων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, λόγω της ημιτονοειδούς της μεταβολής τους είναι μηδενική. Έτσι παραμένει μόνο ο τρίτος όρος και προκύπτει η σχέση (2.92). Με την βοήθεια αυτής της σχέσης και της (2.90), αποδεικνύεται πως η μέση δυναμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\overline{PE(x)} = \frac{\rho g}{4} |\eta(x)|^2 \quad (2.90\beta)$$

Με την βοήθεια της σχέσης (2.46β), η (2.90β) γίνεται:

$$\overline{PE(x)} = \frac{\rho g}{4} |\eta_f + \eta_b|^2 = \frac{\rho g}{4} \left(|\eta_f|^2 + |\eta_b|^2 + \eta_f \eta_b^* + \eta_f^* \eta_b \right) = \frac{\rho g}{4} \left(|A|^2 + |B|^2 + AB^* e^{-i2kx} + A^* B e^{i2kx} \right)$$

Εάν $AB \neq 0$ τότε οι δύο τελευταίοι όροι έχουν ημιτονοειδή μορφή ως προς τον άξονα x κατά μήκος ενός μήκους κύματος $\lambda/2$. Αυτή η ημιτονοειδής μεταβολή δεν συμβάλει στην μέση

τιμή της δυναμικής ενέργειας για ένα διάστημα κατά μήκος του άξονα x που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$. Συνεπώς η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\boxed{\overline{PE} = \frac{\rho g}{4} (|A|^2 + |B|^2)} \quad (2.90\gamma)$$

Για έναν προσδεύον κυματισμό κατά τα θετικά x (B=0), η (2.94γ) γίνεται η (2.89) που υπολογίσαμε παραπάνω.

Ας υπολογίσουμε τώρα την **κινητική ενέργεια** του κυματισμού:

Η κινητική ενέργεια μιας στοιχειώδους μάζας νερού είναι ίση με:

$$d(KE) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2}$$

Η μέση κινητική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του κυματισμού είναι ίση με:

$$(\overline{KE}) = \frac{1}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} \int_{-h}^n d(KE) = \frac{1}{\lambda} \int_x^{x+\lambda} \int_{-h}^n \left(\rho \frac{u^2 + w^2}{2} \right) dz dx$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων (2.73) και (2.74) για το πεδίο των ταχυτήτων του νερού καταλήγουμε στην σχέση για την κινητική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας [30]:

$$\boxed{(\overline{KE}) = \rho g \frac{H^2}{16} = \rho g \frac{A^2}{4}} \quad (2.93)$$

Παρατηρούμε πως η κινητική ενέργεια που δίνεται από την σχέση (2.93) που μόλις υπολογίσαμε είναι ίση με την δυναμική ενέργεια που δίνεται από την σχέση (2.89) παραπάνω. Αυτό είναι λογικό καθώς αυτή είναι μια χαρακτηριστική γενική ιδιότητα των «**συντηρητικών**» μηχανικών συστημάτων, δηλαδή αυτών που *δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας*.

- Ας υπολογίσουμε τώρα την κινητική ενέργεια με την βοήθεια του μιγαδικού φορμαλισμού, εκκινώντας πάλι από την σχέση:

$$d(KE) = [(u^2 + w^2)/2] dm = 1/2 \rho (u^2 + w^2) dx dz .$$

Στην περίπτωση ενός αρμονικού κύματος όπου οι συνιστώσες της ταχύτητας μπορούν να εκφραστούν με την βοήθεια της μιγαδικής τους μορφής, η παραπάνω σχέση για την **μέση κινητική ενέργεια** ανά μονάδα επιφάνειας γίνεται:

$$\overline{KE}(x) = \frac{1}{4} \rho \left(|\hat{u}_x|^2 + |\hat{u}_z|^2 \right) \quad (2.94)$$

Κάνοντας χρήση των σχέσεων (2.75) - (2.76) και τροποποιώντας τις κατάλληλα για μεγάλα βάθη νερού (βλ. [32], πρόβλημα 4.8), η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή:

$$\overline{KE} = \frac{\rho g}{4} (|A|^2 + |B|^2) \quad (2.94\beta)$$

Για έναν προοδεύον κυματισμό κατά τα θετικά x ($B=0$), η (2.94β) γίνεται η (2.93) που υπολογίσαμε παραπάνω.

Η **μέση ολική (μηχανική) ενέργεια** του κυματισμού, ανά μονάδα επιφάνειας (με μονάδα μέτρησης J/m^2 - τζάουλ ανά μέτρο στο τετράγωνο - ή Wh/m^2 - βατώρα ανά μέτρο στο τετράγωνο - , όπου $1 J = 1/3600 Wh$) είναι ίση με το άθροισμα της δυναμικής συν την κινητική ενέργεια. Άρα, από τις (2.89) και (2.93) προκύπτει ότι η μηχανική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας για έναν προοδεύον κυματισμό κατά τα θετικά x είναι:

$$\overline{E} = \overline{KE} + \overline{PE} = \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad (2.95)$$

Άρα η **συνολική ενέργεια που φέρει ο κυματισμός ανά μήκος μετώπου κύματος**, από την επιφάνεια της θάλασσας έως τον πυθμένα (με μονάδα μέτρησης: J/m - τζάουλ ανά μέτρο - ή Wh/m - βατώρα ανά μέτρο) είναι:

$$\overline{E}_\lambda = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda = \frac{1}{2} \rho g A^2 \lambda \quad (2.96)$$

2.3.12 Η ροή ενέργειας (Ισχύς) των κυματισμών

Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται ενέργεια στην διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού ονομάζεται **ροή ενέργειας J (energy flux)** και αποτελεί ουσιαστικά την **ισχύ** του προοδεύοντος κυματισμού (*wave power*). Στην γενική του μορφή η σχέση μεταξύ της μέσης έντασης και της **ακτινοβολούμενης ισχύος** (ή **ροής ενέργειας**) των κυματισμών, γύρω από μια κλειστή επιφάνεια S είναι το επιφανειακό ολοκλήρωμα:

$$J \text{ ή } P_R = \oiint \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad (2.97)$$

Η **ένταση \vec{I}** των κυματισμών ορίζεται ως η μέση τιμή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου (ή η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας) και έχει μονάδα μέτρησης $J/(s \cdot m^2)$ ή W/m^2 .

$$\text{Ισχύει: } \vec{I} = P_{tot} \vec{u} = (P_{stat} + P_{dyn}) \vec{u} = P_{stat} \vec{u} + P_{dyn} \vec{u} = P_{dyn} \vec{u} \quad (2.98)$$

Όπου: ο πρώτος όρος της ολικής πίεσης P_{tot} είναι η στατική πίεση, ενώ ο δεύτερος η δυναμική πίεση P_{dyn} , όπως περιγράφηκαν στην σχέση (2.87β) στο §2.3.10. Στην συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν, η ροή ενέργειας ίση με τον στιγμιαίο ρυθμό με τον οποίο παράγεται έργο από την δυναμική πίεση του ρευστού σε μια κατακόρυφη στήλη του νερού, από τον πυθμένα μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια:

$$J = \int_{-h}^{\eta} P_{dyn} u dz \quad (2.97\beta)$$

Η μέση ροή ενέργειας υπολογίζεται αντίστοιχα αν υπολογίσουμε το έργο αυτό που παράγεται στην διάρκεια μιας περιόδου:

$$\bar{J} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} P_{dyn} u dz dt \quad (2.97\gamma)$$

Η οριζόντια ταχύτητα u των σωματιδίων του νερού δίνεται από την σχέση (2.73) της §2.3.8 και η δυναμική πίεση του νερού P_{dyn} δίνεται από την (2.88), οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\bar{J} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} \left(\rho g \frac{H \cosh[k(z+h)]}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \right) \left(\frac{H g k \cosh[k(z+h)]}{2 \omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \right) dz dt$$

Προκειμένου να κρατήσουμε τους όρους μέχρι την δεύτερη τάξη σε σχέση με το ύψος κύματος, πρέπει να ολοκληρώσουμε μέχρι την μέση ελεύθερη επιφάνεια ή αλλιώς την επιφάνεια ηρεμίας, οπότε το ολοκλήρωμα μας γίνεται:

$$\bar{J} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \left(\rho g^2 \frac{H^2 k \cosh^2[k(z+h)]}{4 \omega \cosh^2(kh)} \cos^2(kx - \omega t) \right) dz dt$$

Λύνοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα λαμβάνουμε την **μέση ροή ενέργειας στην διάρκεια μιας περιόδου T** :

$$\bar{J} = \frac{\rho g \omega H^2}{16k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \Rightarrow \bar{J} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \cdot \frac{\omega}{k} \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.99)$$

Με την βοήθεια των σχέσεων (2.95) και (2.56) έχουμε:

$$\boxed{\bar{J} = (\bar{E}) \cdot n(kd) \cdot c = (\bar{E}) c_g} \quad (2.99\beta)$$

Δηλαδή η ροή ενέργειας του κυματισμού (σε περίπτωση ενός ολόκληρου κυματοσυρμού και όχι μόνο ενός απλού μονοχρωματικού κυματισμού) είναι το γινόμενο της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας \bar{E} , επί την ταχύτητα της κυματοομάδας c_g . Αν αναλύσουμε την παραπάνω σχέση διαστατικά, θα προκύψει πως η μονάδα μέτρησης της είναι

$J/s \cdot m = \text{Watt}/m$, δηλαδή η ισχύς που μεταδίδεται ανά μήκος μετώπου κύματος του κυματισμού, από την επιφάνεια της θάλασσας έως τον πυθμένα.

Είναι γνωστό ότι η ροή ενέργειας μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Συγκεκριμένα το 95% της ποσότητας ενέργειας περιέχεται σε βάθος ίσο με το 1/4 του μέσου μήκους κύματος των ανεμογενών κυματισμών. Αυτό σημαίνει πως η ενέργεια των κυματισμών συγκεντρώνεται ουσιαστικά στην επιφάνεια της θάλασσας. Επομένως η ροή ενέργειας ανά μέτρο μετώπου κύματος (KW/m) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα καλό αντιπροσωπευτικό μέτρο της ροής ενέργειας και οι τιμές της μπορούν να συγκριθούν άμεσα με την αντίστοιχη ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας του μετώπου κύματος (KW/m^2). Με αυτόν τον τρόπο μάλιστα, οι τιμές της ροής ενέργειας ανά μέτρο (KW/m) των θαλάσσιων κυματισμών, μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις αντίστοιχες τιμές της ροής ενέργειας της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας οι οποίες δίνονται σε KW/m^2 . [35]

Στην περίπτωση *μεγάλου βάθους του νερού* η σχέση (2.99), με την βοήθεια των (2.67) και (2.27) γίνεται:

$$\bar{J} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot (\bar{E}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{T} \cdot \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{16} \frac{\lambda \rho g H^2}{T} = \frac{1}{4} \frac{\lambda \rho g A^2}{T} \quad \text{ή} \quad \boxed{\bar{J} = \frac{1}{16} \frac{\lambda \rho g H^2}{T} = \frac{1}{4} \frac{\lambda \rho g A^2}{T}} \quad (2.99\gamma)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα – κάνοντας χρήση της (2.27), στην συνέχεια της (2.66), μετά ξανά της (2.27) και τέλος της σχέσης (2.26) – και να λάβει την μορφή [36]:

$$\boxed{\bar{J} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T} \quad (2.99\delta)$$

Η σχέση (2.99δ) δίνει την ισχύ που φέρει ο κυματισμός ανά μήκος μετώπου κύματος για την περίπτωση *μεγάλου βάθους νερού*. Παρατηρούμε πως παραγόμενη ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους κύματος H και της περιόδου του κυματισμού T , ενώ είναι ανεξάρτητη του βάθους του νερού d .

Στην περίπτωση *μικρού βάθους του νερού* η σχέση (2.52), με την βοήθεια των (2.28) και (2.31γ) γίνεται:

$$\bar{J} = c \cdot (\bar{E}) = \frac{\lambda}{T} \cdot \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \frac{\lambda \rho g H^2}{T} = \frac{1}{2} \frac{\lambda \rho g A^2}{T} \quad \text{ή} \quad \boxed{\bar{J} = \frac{1}{8} \frac{\lambda \rho g H^2}{T} = \frac{1}{2} \frac{\lambda \rho g A^2}{T}} \quad (2.99\epsilon)$$

- Τώρα θα υπολογίσουμε την ροή ενέργειας των κυματισμών χρησιμοποιώντας τον μιγαδικό φορμαλισμό:

Για επιφανειακούς κυματισμούς είδαμε και παραπάνω πως η μέση τιμή της έντασης δίνεται από την σχέση:

$$\bar{\bar{I}} = \overline{P_{tot} \cdot \vec{u}} = \overline{(P_{stat} + P_{dyn}) \cdot \vec{u}} = P_{stat} \cdot \vec{u} + P_{dyn} \cdot \vec{u} = P_{dyn} \cdot \vec{u} \quad (2.98\beta)$$

Κατ αναλογία με τις σχέσεις (2.31δ) και (2.91), ισχύουν και οι σχέσεις:

$$\vec{u}(x, z; t) = \frac{\hat{u}(x, z)}{2} e^{i\omega t} + \frac{\hat{u}^*(x, z)}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re} \left\{ \hat{u}(x, z) e^{i\omega t} \right\} \quad (2.100)$$

$$P_{dyn}(x, z; t) = \frac{P(x, z)}{2} e^{i\omega t} + \frac{P^*(x, z)}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re} \left\{ P(x, z) e^{i\omega t} \right\} \quad (2.101)$$

Όπου το μιγαδικό δυναμικό πεδίο πιέσεων $P(x, z)$ δίνεται από την σχέση (2.45β). Οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned} \bar{\bar{I}}(x, z; t) &= P_{dyn}(x, z; t) \cdot \vec{u}(x, z; t) = \left(\frac{P(x, z)}{2} e^{i\omega t} + \frac{P^*(x, z)}{2} e^{-i\omega t} \right) \cdot \left(\frac{\hat{u}(x, z)}{2} e^{i\omega t} + \frac{\hat{u}^*(x, z)}{2} e^{-i\omega t} \right) \\ \bar{\bar{I}} &= \frac{1}{4} \left(P\hat{u} + P^*\hat{u} + P\hat{u}e^{2i\omega t} + P^*\hat{u}e^{-2i\omega t} \right) \end{aligned} \quad (2.102)$$

Οι δύο τελευταίοι όροι αναπαριστούν δύο αρμονικές συναρτήσεις που είναι συζυγείς και έχουν μέση τιμή αθροίσματος μηδέν. Οπότε από τις σχέσεις (2.98) και (2.102) λαμβάνουμε την σχέση:

$$\bar{\bar{I}} = \overline{P_{dyn} \cdot \vec{u}} = \frac{1}{4} \left(P\vec{u} + P^*\vec{u} \right) = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ P\vec{u} \right\} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \left(Pu_x \right) \vec{i} + \left(Pu_z \right) \vec{k} \right\} \quad (2.103)$$

Ο τελευταίος όρος προκύπτει εντελώς ανάλογα με τον τελευταίο όρο της σχέσεως (2.31δ).

Για την περίπτωση ενός προοδευόντος κυματισμού και παρατηρώντας τις σχέσεις (2.45β) και (2.76), παρατηρούμε πως ο όρος Pu_z^* στην σχέση (2.103) είναι φανταστικός, άρα αυτή μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\bar{\bar{I}} = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \left(Pu_x \right) \vec{i} \right\} \quad \text{ή} \quad \bar{\bar{I}} = \bar{I}_x = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ Pu_x \right\} \quad (2.103\beta)$$

Με την βοήθεια των (2.45β) και (2.75), (2.103β) γίνεται:

$$\bar{\bar{I}} = \frac{k\rho g}{2\omega} \left(|\eta_f|^2 + |\eta_b|^2 \right) e^2(kz) \quad (2.103\gamma)$$

Στην περίπτωση μας όμως η ροή ενέργειας που δίδεται από την (2.97), θα υπολογιστεί από το ορισμένο ολοκλήρωμα:

$$J = \int_{z=-h}^{z=0} \bar{I} dz \xrightarrow{(2.103\gamma)} J = \frac{k\rho g}{2\omega} \left(|\eta_f|^2 + |\eta_b|^2 \right) \int_{-h}^0 e^{2(kz)} dz$$

Με την βοήθεια της (2.59) και στην συνέχεια των (2.52α) και (2.52β), τελικά η ροή ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$J = \frac{\rho g^2}{4\omega} \cdot D(kh) \cdot \left(|\eta_f|^2 + |\eta_b|^2 \right) \Rightarrow \boxed{J = \frac{\rho g^2}{4\omega} \cdot D(kh) \cdot \left(|A|^2 + |B|^2 \right)} \quad (2.104)$$

Για έναν προσδεύον κυματισμό κατά τα θετικά x ($B=0$), η (2.106) γίνεται:

$$J = \frac{\rho g^2}{4\omega} \cdot D(kh) \cdot |\eta_f|^2 \Rightarrow \boxed{J = \frac{\rho g^2}{4\omega} \cdot D(kh) \cdot |A|^2} \quad (2.104\beta)$$

Θεωρώντας το βάθος του νερού μεγάλο: $D(kh) \approx 1$ και κάνοντας χρήση των σχέσεων (2.24) και (2.26) της §2.3.3, η (2.104β) γίνεται η (2.99γ) που υπολογίσαμε παραπάνω:

$$\boxed{J = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T} \quad (2.99\delta)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (2.95) και (2.104β), που δίνουν την μέση τιμή της ενέργειας και της ροής ενέργειας που φέρουν οι κυματισμοί αντίστοιχα, προκύπτει:

$$\frac{J}{E} = \frac{gD(kh)}{2\omega} \quad (2.105)$$

Παρατηρώντας την σχέση (2.58) που εξάγαμε παραπάνω, παρατηρούμε πως ο λόγος που δίνει η (2.105) ισούται με την ομαδική ταχύτητα του για ένα αρμονικό (προσδεύοντα κατά τα θετικά x) κυματοσυρμό:

$$\frac{J}{E} = c_g \quad \text{ή} \quad \boxed{J = c_g E} \quad (2.105\beta)$$

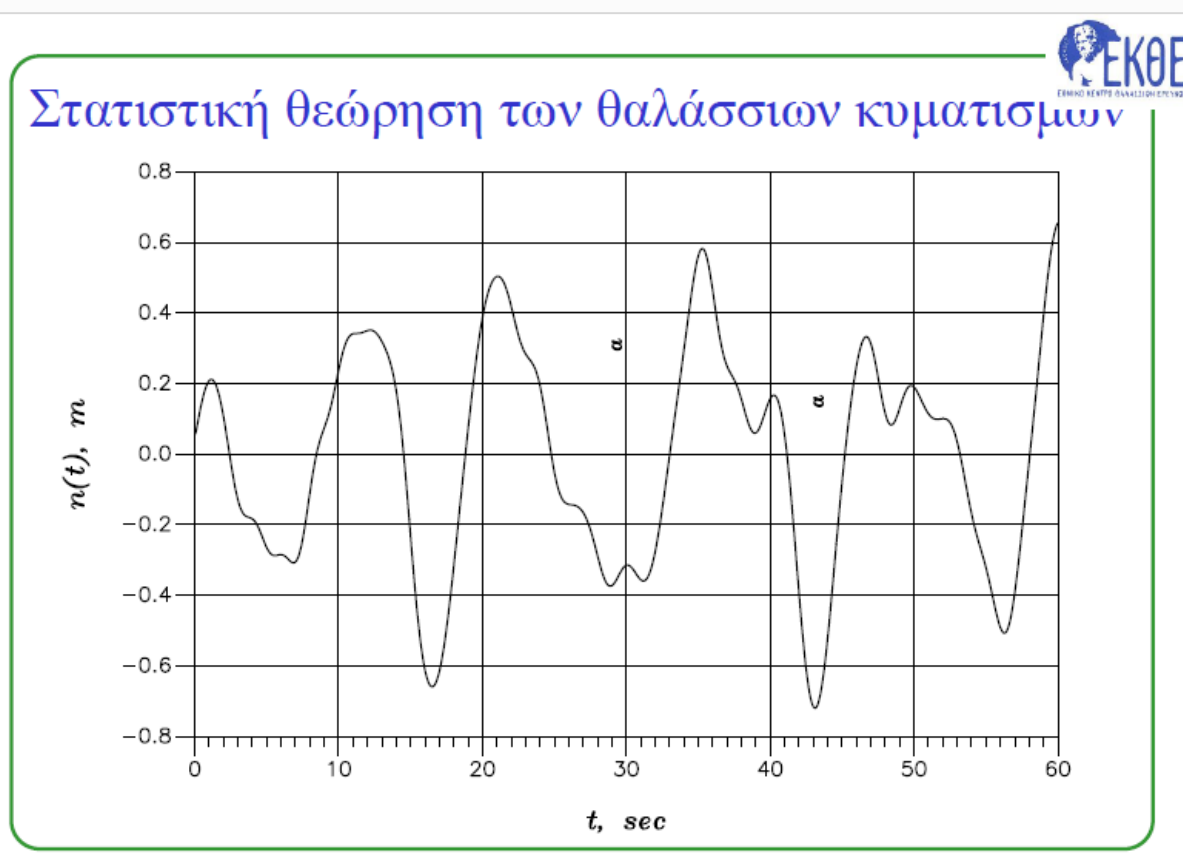
Η σχέση (2.105β) που συνδέει την μέση ενέργεια με την ροή ενέργειας είναι πανομοιότυπη με την (2.99β) που υπολογίσαμε παραπάνω.

2.4 Στατιστική - Στοχαστική θεώρηση Κυματισμών

Αναφέραμε στο §2.2 πως η μελέτη των κυματισμών δεν γίνεται μόνο μέσω της βοήθειας της νευτώνειας υδροδυναμικής, αλλά και μέσω στατιστικών και στοχαστικών προσεγγίσεων, δηλαδή με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων τα οποία βασίζονται στην θεωρία πιθανοτήτων ή στην θεωρίες στοχαστικών διαδικασιών. Σε αυτήν την θεώρηση η φυσική «απουσιάζει» άμεσα και το κύμα θεωρείται ένα στοχαστικό και ακανόνιστο φαινόμενο.

2.4.1 Στατιστική θεώρηση

Ας αναλύσουμε σε πρώτη φάση την στατιστική θεώρηση των κυματισμών. Σε αυτήν το κύμα δεν θεωρείται ένας κυματοσυρμός με πολλές διαφορετικές κυκλικές συχνότητες ω , αλλά μια ακανόνιστη μορφή όπως η παρακάτω:



Διάγραμμα 9 : Η κυματομορφή που δημιουργείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου, με την πάροδο του χρόνου. [5]

Στο παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποιες «μεγάλες» κορυφές και κοιλίες, καθώς και κάποιες πολύ μικρές τις οποίες μπορούμε πρακτικά να τις αγνοήσουμε προς όφελος της απλότητας.

Σε αυτήν την θεώρηση τα βασικά μεγέθη του κυματισμού προσδιορίζονται με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο:

- **Ύψος** κύματος είναι η κατακόρυφη απόσταση ανάμεσα σε μια κορυφή και στην αμέσως επόμενη κοιλία.
- **Περίοδος** Κύματος είναι η οριζόντια απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές ή κοιλίες.
- **Πλάτος** κύματος είναι η απόσταση μιας κοιλίας (*πλάτος κοιλίας*) ή μιας κορυφής (*πλάτος κορυφής*) από το μηδέν (πρακτικά το μηδέν είναι η επιφάνεια ηρεμίας του νερού).

Παρατηρούμε στο σχήμα πως υπάρχουν κορυφές κύματος κάτω από το όριο του μηδενός, καθώς και κοιλίες οι οποίες βρίσκονται πάνω από το μηδέν. Οπότε το πλάτος των κορυφών μπορεί να είναι είτε *θετικό* (εάν η κορυφή βρίσκεται πάνω από το μηδέν), είτε *αρνητικό* (εάν η κορυφή βρίσκεται κάτω από το μηδέν). Συνήθως είναι θετικό.

Το πλάτος των κοιλιών αντίστοιχα μπορεί να είναι είτε *θετικό* (εάν η κορυφή βρίσκεται πάνω από το μηδέν), είτε *αρνητικό* (εάν η κορυφή βρίσκεται κάτω από το μηδέν). Συνήθως είναι αρνητικό.

Οπότε τα μικρά ύψη κύματος μπορούμε να τα αγνοήσουμε, όπως αναφέραμε στην αρχή, τα μικρά πλάτη κύματος όμως δεν μπορούμε να τα αγνοήσουμε!

- Το **κύμα** εδώ ορίζεται ως η περιοχή που ορίζεται από μια κορυφή και μία κοιλία, δηλαδή από ένα ολικό μέγιστο και ένα ολικό ελάχιστο. Έτσι σε κάθε καταγραφή μετράμε τα *individual waves* (ξεχωριστά κύματα με την πάροδο του χρόνου)

Το βασικό συμπέρασμα είναι πως σε αυτήν την περίπτωση η βασική μεταβλητή είναι ο χρόνος και όχι ο χώρος ενώ τα μεγέθη του κυματισμού δεν παραμένουν σταθερά αλλά μεταβάλλονται διαρκώς.

Σε κάθε καταγραφή μετράμε τα εξείς:

Τα βασικά *ανεμολογικά* χαρακτηριστικά που καταγράφονται είναι:

- Η **μέση οριζόντια ταχύτητα**, η οποία οφείλεται στο fetch length που αναφέραμε στο §2.1.2
- Η **μέση κατεύθυνση πνοής** του ανέμου
- Η **μέση διάρκεια πνοής**, η οποία αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του κυματισμού. Οφείλεται στο fetch duration (§2.1.2)
- Το **μέσο μήκος ελεύθερης πνοής** (fetch length)

Τα βασικά κυματολογικά χαρακτηριστικά που καταγράφονται είναι:

- Το **μέσο ύψος** κύματος : Ο μέσος όρος των υψών όλων των κυμάτων
- Η **μέση περίοδος** κύματος : Ο μέσος όρος των περιόδων κύματος
- Το **σημαντικό ύψος κύματος** (*significant wave height*) : Ο μέσος όρος του 1/3 των υψηλότερων τιμών του ύψους κύματος
- **Κύρια κατεύθυνση διάδοσης** των κυματισμών

Οι μέσες περιόδοι κύματος που καταγράφονται είναι:

- Η **μέση περίοδος κορυφών** (*mean wave crest period*) : Δηλαδή ο μέσος όρος των περιόδων των κορυφών
- **Μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης** (*mean zero up-crossing period*) : Η περίοδος μηδενικής υπέρβασης είναι η χρονική περίοδος από την στιγμή όπου ένα σημείο της κυματομορφής βρίσκεται στο 0 με κατεύθυνση προς τα θετικά (δηλαδή προς τα πάνω), μέχρι την επόμενη χρ. στιγμή όπου θα βρίσκεται πάλι στο 0 με κατεύθυνση προς τα θετικά. Αυτά τα σημεία ονομάζονται *σημεία μηδενικής υπέρβασης*. Η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης είναι ο μέσος όρος όλων αυτών των περιόδων.
- **Μέση περίοδος μηδενικής κατάβασης** (*mean zero down-crossing period*) : Η περίοδος μηδενικής κατάβασης είναι η χρονική περίοδος από την στιγμή όπου ένα σημείο της κυματομορφής βρίσκεται στο 0 με κατεύθυνση προς τα αρνητικά (δηλαδή προς τα κάτω), μέχρι την επόμενη χρ. στιγμή όπου θα βρίσκεται πάλι στο 0 με κατεύθυνση προς τα αρνητικά. Αυτά τα σημεία ονομάζονται *σημεία μηδενικής κατάβασης*. Η μέση περίοδος μηδενικής κατάβασης είναι ο μέσος όρος όλων αυτών των περιόδων.

Η στατιστική ανάλυση ενός δείγματος N τιμών του ύψους της θάλασσας (καθώς έχουμε πει πως ένας κυματισμός αποτελείται από πολλούς επί μέρους κυματισμούς διαφορετικών συχνοτήτων, μηκών και υψών κύματος) μας δίνει διάφορες εκφράσεις της περιγραφής του ύψους των κυματισμών. Η σημαντικότερη και πιο συνηθισμένη από αυτές είναι το **σημαντικό ύψος κύματος** που αναφέρθηκε παραπάνω, το οποίο υπολογίζεται μέσω της σχέσεως:

$$H_{1/3} = H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (2.106)$$

Όπου: N είναι όλοι οι καταγεγραμμένοι κυματισμοί και $\sum_{i=1}^{N/3} H_i = H_1 + H_2 + \dots + H_{N/3}$ είναι το

1/3 των υψηλότερων κυματισμών από τους N κυματισμούς που έχουν καταγραφεί.

Ο λόγος για τον οποίο γίνεται χρήση αυτού του μεγέθους είναι επειδή συμπίπτει με το ύψος των κυματισμών που καταγράφει ένας έμπειρος ναυτικός με οπτική παρατήρηση.

Επιπλέον είναι καλό να γνωρίζουμε πως αυτήν την τιμή του ύψους κύματος μας παρέχουν και οι δορυφόροι, την οποία υπολογίζουν από την δειγματοληψία των κυματισμών μέσα στην περιοχή που μπορούν να καταγράψουν τα δεδομένα κύματος.

Με την βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης προκύπτει ότι:

$$\boxed{H_s = \sqrt{2}H_{rms}} \quad (2.107)$$

$$\text{όπου: } H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (2.108)$$

H_{rms} είναι η μέση τετραγωνική τιμή του ύψους κύματος (*root mean square*).

Εάν θεωρηθεί πως ο κυματισμός είναι απλός μονοχρωματικός – αρμονικός, συχνότητας ω , τότε η σχέση (2.55), με την βοήθεια της (2.50) ή και της (2.51), γίνεται:

$$\boxed{H_{rms} = \sqrt{\frac{8}{\rho g} (\bar{E})} = \sqrt{\frac{8}{\rho g \lambda} (\bar{E}_\lambda)}} \quad (2.109)$$

Όπου: $(\bar{E}) = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2$ (2.95), $(\bar{E}_\lambda) = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \lambda$ (2.96) είναι η πυκνότητα ενέργειας που φέρει ο κυματισμός ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα όγκου αντίστοιχα, με χρήση του όρου: H_{rms}

Βάση των παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε τώρα και την ισχύ που φέρει ο κυματισμός ανά μήκος μετώπου κύματος για την περίπτωση μεγάλου βάθους νερού, πάλι με χρήση του όρου: H_{rms} . Μέσω της σχέσεως (2.99γ) έχουμε [36]:

$$\boxed{\bar{J} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_{rms}^2 T} \quad (2.99\delta)$$

Με την βοήθεια της σχέσεως (2.108) η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί μέσω του σημαντικού ύψους κύματος:

$$\boxed{\bar{J} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T} \quad (2.110)$$

2.4.2 Στοχαστική θεώρηση

Η αναπαράσταση της κίνησης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, δίνεται από την σχέση:

$$\eta(t; \beta) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t - \varphi_n(\beta)) \quad (2.111)$$

Η σχέση αυτή μοιάζει αρκετά στην (2.23) (βλ §2.2.4) που δίνει την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού για έναν απλό αρμονικό μονοχρωματικό κυματισμό. Σε αυτήν την περίπτωση όμως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι η συνισταμένη όλων των επί μέρους N κυματισμών με γωνιακές συχνότητες ω_n .

- Η μεταβλητή εδώ είναι πάλι ο χρόνος t
- Η φάση $\varphi_n(\beta)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία παίρνει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα $[0, 2\pi]$ με την ίδια πιθανότητα.

Σε αυτήν την θεώρηση χρειάζεται να εισαχθεί η έννοια του *Randomization* (τυχαιοποίησης) σε κάθε φάση, κάθε επί μέρους κυματικής συνιστώσας του παραπάνω αθροίσματος. Η παραπάνω σχέση λοιπόν εισάγεται σε ένα πρόγραμμα το οποίο επιλέγει τυχαία όλες τις φάσεις $\varphi_n(\beta)$ και υπολογίζει τις αντίστοιχες ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t; \beta)$. Στην συνέχεια εκτελεί το άθροισμα (2.58) και βρίσκει την υπέρθεση τους.

Υπάρχουν τρία είδη στοχαστικών διαδικασιών που περιγράφουν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, αλλά εμείς εδώ θα αναφερθούμε μόνο στο ένα και απλούστερο είδος όπου είναι οι **στάσιμες** στοχαστικές διαδικασίες. Σε αυτήν την περίπτωση κάνουμε την παραδοχή πως τα στατιστικά χαρακτηριστικά του κυματισμού παραμένουν αναλλοίωτα με την πάροδο του χρόνου.

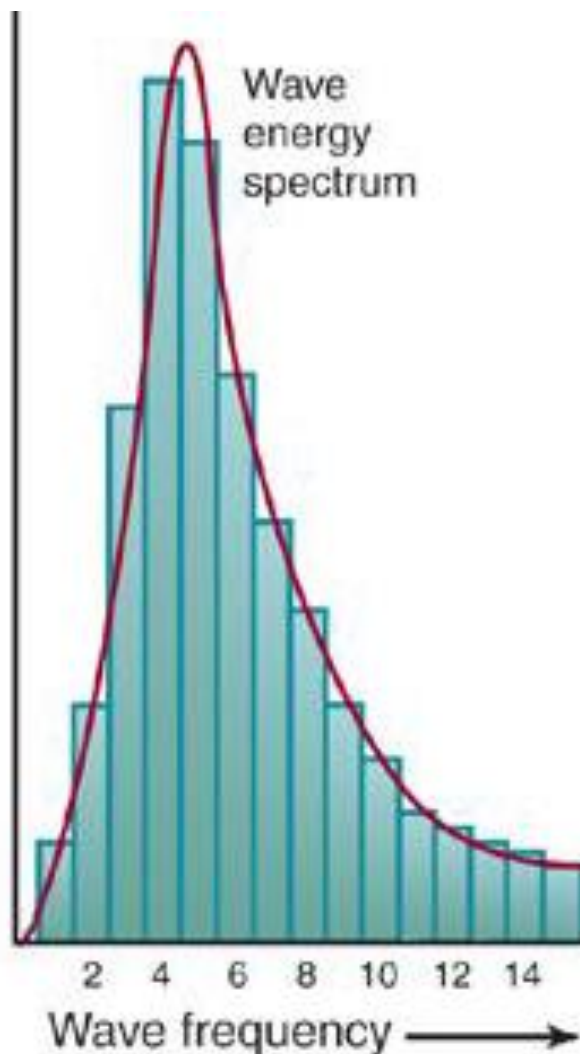
Χάρης αυτήν την απλοποίηση μπορούμε να εξοικονομήσουμε πολλή ενέργεια κατά την διάρκεια των μετρήσεων των ωκεανογραφικών πλωτήρων αφού αυτοί καταγράφουν μόνο για 30 λεπτά της ώρας και στην συνέχεια γίνεται παύση της λειτουργίας τους για 2,5 ώρες. Αυτό το μοτίβο λειτουργίας επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Στις 2,5 ώρες όπου ο πλωτήρας παραμένει ανενεργός, θεωρείται πως τα χαρακτηριστικά του κύματος που κατεγράφησαν κατά το πρώτο μισάωρο των μετρήσεων, παραμένουν σταθερά κατά την πάροδο όλου του 3-ώρου.

2.4.3 Το φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών

Το φάσμα αποτελεί το βασικότερο χαρακτηριστικό των θαλάσσιων κυματισμών και περιγράφει την κατανομή της ενέργειας που φέρουν οι κυματισμοί διαφορετικών συχνοτήτων ω . Ένα τέτοιο παράδειγμα που συναντήσαμε πριν, είναι το γενικό φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών της εικόνας 17, στην §2.1.1. Με την βοήθεια του φάσματος των κυματισμών μπορούμε να καταλάβουμε ποια συχνότητα ω του κυματοσυρμού μεταφέρει την υψηλότερη ποσότητα ενέργειας καθώς και ποιες συχνότητες δεν μεταφέρουν σχεδόν καθόλου ενέργεια. Με αυτήν την μέθοδο μπορούμε να βρούμε κάποια βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των κυματισμών χωρίς όμως την χρήση στατιστικής ανάλυσης, μόνο με εποπτεία και μελέτη του ίδιου του φάσματος.

Για να παραχθεί ένα κυματικό φάσμα, καταγράφονται σε μια περιοχή όλα τα ύψη κύματος στο πεδίο του χρόνου. Στην συνέχεια με την βοήθεια του μετασχηματισμού fourier περνάμε τα δεδομένα που καταγράψαμε στο πεδίο των συχνοτήτων ω και έτσι μπορούμε να παράγουμε το αντίστοιχο φάσμα.



Διάγραμμα 10 : Το φάσμα μιας συγκεκριμένης ενεργειακής κατάστασης της θάλασσας

Προκειμένου να υπολογίσουμε τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το κυματικό φάσμα, θεωρούμε πως σε ένα σημείο του χώρου καταγράφεται ένας κυματοσυρμός που απαρτίζεται από άπειρους μονοχρωματικούς κυματισμούς n-συχνοτήτων και μπορεί να περιγραφθεί από μια σειρά Fourier. Σε μαθηματική μορφή διακριτών μιγαδικών συνιστωσών, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δίνεται από την σχέση [37]:

$$\eta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega_0 t} \quad (2.112)$$

Όπου οι συνιστώσες του πλάτους της ανύψωσης A_n δίνονται με την βοήθεια της σχέσης:

$$A_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} \eta(t) e^{in\omega_0 t} dt \quad (2.113)$$

Η διακύμανση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από την επιφάνεια ηρεμίας $z(x, y) = z_0 = 0$ δίνεται από την σχέση:

$$\overline{\eta^2(t)} = \overline{\eta\eta^*} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega_0 t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^* e^{-in\omega_0 t} = \sum_{n=0}^{\infty} 2A_n A_n^* \quad (2.114)$$

Η οποία αναπαριστά τον μετασχηματισμό από το πεδίο του χρόνου, στο πεδίο των συχνοτήτων. Η συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ή το φάσμα του κυματισμού ορίζεται ως:

$$S(n\omega_0)\omega_0 = 2A_n A_n^* \quad (2.115)$$

Οπότε η διακύμανση της ανύψωσης μπορεί να γραφθεί ως:

$$\text{(Διακριτή μορφή):} \quad \overline{\eta^2(t)} = \sum_{n=0}^{\infty} S(n\omega_0)\omega_0 \quad (2.116\alpha)$$

$$\text{(Συνεχής μορφή):} \quad \overline{\eta^2(t)} = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.116\beta)$$

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά των κυματισμών λοιπόν είναι τα εξής [38] :

- Οι Φασματικές ροπές: $m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_n(\omega) d\omega$ όπου: $n=-1,0,1,2,3\dots$ (2.117)

Όπου ω^n : Φασματική γωνιακή συχνότητα , $S_n(\omega)$: Συνάρτηση του φάσματος

- Από την (2.117) προκύπτει η μηδενική φασματική ροπή:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_0(\omega) d\omega \quad (2.118)$$

Η (2.118) μας δίνει το εμβαδόν της επιφάνειας ανάμεσα στο φάσμα των κυματισμών και στον οριζόντιο άξονα των συχνοτήτων ω . όσο μεγαλύτερο βρεθεί ότι είναι το m_0 , τόσο «εντονότερη» είναι η ενεργειακή κατάσταση της θάλασσας.

- Με την βοήθεια της σχέσεως (2.95), που υπολογίζει την ενέργεια που φέρει ο μονοχρωματικός κυματισμός και της (2.118), έχουμε:

$$\langle \bar{E} \rangle = \frac{1}{2} \rho g A^2 = \rho g \overline{\eta^2(t)} = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \rho g m_0 \quad (2.119)$$

- Με την βοήθεια της μηδενικής φασματικής ροπής μπορούμε να υπολογίσουμε το **φασματικό σημαντικό ύψος κύματος**: $H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}$ (2.120)¹⁰
- Με την βοήθεια των φασματικών ροπών m_0 και m_1 μπορεί να υπολογισθεί η **φασματική μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης**: $T = 2\pi\sqrt{m_0/m_1}$ (2.121)¹¹
- **Εύρος Φάσματος**: ($0 \rightarrow 1$): Δείχνει το πόσο «εκτεταμένο» ή «περιορισμένο» είναι το φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών. Εάν $E \rightarrow 0$ τότε πρόκειται για φάσμα διαδικασίας ιδανικά στενής λωρίδας (η ενέργεια είναι συσσωρευμένη γύρω από μια συχνότητα ω). Εάν αντίθετα $E \rightarrow 1$ τότε πρόκειται για φάσμα ευρείας λωρίδας (η ενέργεια είναι ισοκατανομημένη σε όλες τις τιμές των συχνοτήτων ω).

Με βάση τα στοιχεία που καταγράψαμε παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την **ισχύ** που φέρει μια συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας η οποία αντιστοιχεί στο φάσμα. Η σχέση είναι η ίδια με την σχέση (2.110) που υπολογίσαμε παραπάνω στην §2.4.1:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m_0}^2 T_e \quad (2.122)$$

Όπου: H_{m_0} είναι το φασματικό σημαντικό ύψος κύματος που δίνεται βάση της σχέσης (2.120) και $T_e = m_{-1}/m_0$ (2.123)

είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται **ενεργειακή περίοδος**.

¹⁰ Αυτό το μέγεθος δείχνει την κατάσταση της θάλασσας, το πόσο τρικυμιώδης ή όχι είναι κτλ. Πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε πως δεν ταυτίζεται πλήρως με το στατιστικό ύψος κύματος που αναφέραμε στην παράγραφο 2.3.1, αλλά αποτελεί απλώς μια εκτίμηση αυτού.

¹¹ Και σε αυτήν την περίπτωση η φασματική μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης δεν ταυτίζεται με την στατιστική αλλά αποτελεί απλώς μια εκτίμηση αυτής.

2.5 Η κατανομή του κυματικού δυναμικού ανά την υφήλιο

Προκειμένου να κατασκευαστεί και να διαμορφωθεί η συμβατή τεχνολογία, καθώς και να επιλεγεί η κατάλληλη τοποθεσία για την εγκατάσταση των κυματογεννητριών είναι απαραίτητο το να υπάρχει μια καλή εκτίμηση του κυματικού δυναμικού. Η εκτίμηση αυτή γίνεται συνήθως με χρήση δεδομένων κάποιου μετεωρολογικού μοντέλου ή με χρήση δεδομένων από δορυφόρους, τα οποία επιδιορθώνονται βάση δεδομένων επιτόπιων μετρήσεων (in situ) οι οποίες με την σειρά τους λαμβάνονται από ωκεανογραφικούς πλωτήρες.

Στην εικόνα 15, απεικονίζεται ο παγκόσμιος χάρτης κυματικής ισχύος στον οποίο παρουσιάζεται η μέση κυματική ισχύς ανά μέτρο μετώπου κύματος σε διάφορες περιοχές της υδρογείου. Τα δεδομένα της κατανομής του κυματικού δυναμικού ελήφθησαν από ένα παγκόσμιο αιολικό και κυματικό μοντέλο, το WorldWaves για μια περίοδο 10 χρόνων (1997-2006) ανά χρονικά διαστήματα 6 ωρών ανάμεσα στις μετρήσεις και με χωρική ανάλυση πλέγματος 0.5° lat/lon. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν επιτόπιες μετρήσεις ωκεανογραφικών πλωτήρων ανά τον κόσμο. [39] Από τον παρακάτω χάρτη κυματικού δυναμικού, καθώς και από διάφορες σχετικές εργασίες [38], [39], [40], [41] μπορούν να εξαχθούν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Οι θαλάσσιοι κυματισμοί μεταφέρουν ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας η οποία θα μπορούσε να συμβάλει σημαντικά στις παγκόσμιες ανάγκες. Συγκεκριμένα και σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις, το παγκόσμιο κυματικό δυναμικό είναι περίπου ίσο με 37.000 TWh/yr ή $3,7 \text{ TW}$. Αυτή η ισχύς είναι η διπλάσια από αυτήν που καταναλώνεται σήμερα παγκοσμίως κάθε χρόνο. Ωστόσο οι όποιες εκτιμήσεις δεν λαμβάνουν υπόψιν δευτερεύοντες αλλά σημαντικούς παράγοντες και περιορισμούς, οικονομικής, γεωγραφικής και τεχνικής φύσης. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση λοιπόν θα μπορούσε να θεωρήσει πως το πραγματικά αξιοποιήσιμο δυναμικό είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερο από το παραπάνω.
- Σχετικά με την κατανομή του κυματικού δυναμικού, παρατηρούμε πως οι πιο πλούσιες (ενεργειακά) περιοχές βρίσκονται στα γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 40° και 60° , τόσο στο νότιο, όσο και στο βόρειο ημισφαίριο· πρόκειται για τις περιοχές του Ανατολικού Ατλαντικού και του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού.
- Οι υψηλότερες τιμές δυναμικού σημειώνονται μακριά από τις ακτές (μεγαλύτερες ακόμη και από 120 kW/m), ενώ κοντά στις ακτές οι τιμές μειώνονται αρκετά (οι υψηλότερες κυμαίνονται περίπου στα 70 kW/m).
- Επιπλέον οι υψηλότερες τιμές κοντά στις ακτές, παρατηρούνται κοντά στις νότια Αυστραλία και την Νέα Ζηλανδία, στις νοτιοδυτικές ακτές της Χιλής, καθώς και στις νοτιοδυτικές ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου και της Σκανδιναβίας.



Εικόνα 15 : Μέση ετήσια κατανομή της ροής κυματικής ενέργειας ανά μέτρο μετώπου κύματος (kW/m) [42]

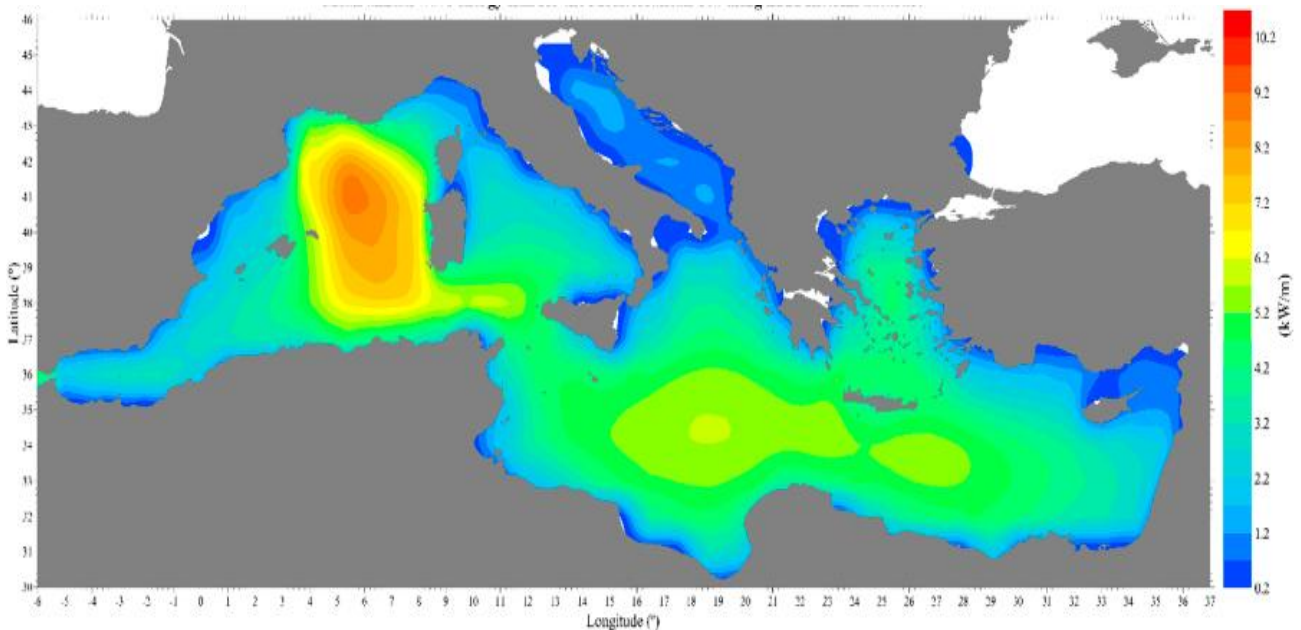
2.5.1 Το κυματικό δυναμικό της Μεσογείου

Τα κύματα της Μεσογείου έχουν χαμηλό ύψος και είναι πολύ μικρότερα από τα κύματα του Ατλαντικού Ωκεανού, καθώς το μήκος πνοής αυτής της ημι-κλειστής θαλάσσιας λεκάνης είναι επίσης πολύ μικρό. Ο μέσος όρος σημαντικού ύψους κύματος είναι τα 5-7m και οι μέγιστες τιμές του φτάνουν τα 10-11m. Οι κυματισμοί εντός της Μεσογείου δεν ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις υπό την μορφή αποθαλασσών, καθώς αυτές δεν προλαβαίνουν να σχηματιστούν. Αποτέλεσμα είναι το να εξαρτώνται οι κυματισμοί άμεσα το ανεμολογικό δυναμικό.

Οι υψηλότερες τιμές σημαντικού ύψους κύματος είναι στενά συνδεδεμένες με την ύπαρξη ισχυρών ανέμων και το μεγάλο μήκος πνοής τους κατά μήκος της θάλασσας. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά συνδυάζονται στον μέγιστο βαθμό στην Δυτική Μεσόγειο και στο Ιόνιο Πέλαγος. Συγκεκριμένα οι υψηλότερες τιμές του κυματικού δυναμικού (~9.4 kW/m) εντοπίζονται σε μια εκτεταμένη περιοχή ανάμεσα στην Σαρδηνία και στις Βαlearίδες Νήσους, νότια της Γαλλίας. Η θάλασσα του Λεβάντε και το Ιόνιο Πέλαγος, η περιοχή ανάμεσα στην Σικελία και την Τυνησία, καθώς και το κεντρικό και Βόρειο Αιγαίο πέλαγος, παρουσιάζουν ένα σταθερό κυματικό δυναμικό. [13]

Η μέση ετήσια υπεράκτια ροή ενέργειας των κυματισμών στην Μεσόγειο Θάλασσα, απεικονίζεται στην εικόνα 16. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν προέρχονται από τις εκτιμήσεις των φασματικών παραμέτρων κύματος για την περίοδο 1979-2013, από την βάση δεδομένων ERA-Interim [43], η οποία λαμβάνεται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο

Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων, ECMWF. Τα δεδομένα αναλύθηκαν από το ωκεανογραφικό Ινστιτούτο ΕΛΚΕΘΕ.



Εικόνα 16 : Η μέση ετήσια ροή ενέργειας των κυματισμών στην Μεσόγειο [13]

Τα παραπάνω συμπεράσματα διεξήχθησαν από τις μελέτες [44] [45] [46] και [46]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στο [47] αποσκοπούν κυρίως στον εντοπισμό συγκεκριμένων πτυχών σχετικές με το σχεδιασμό συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Τέλος, στο [45] γίνεται μια λεπτομερής αξιολόγηση των κυματικών δεδομένων για ολόκληρη τη λεκάνη της Μεσογείου βάση μιας μακροπρόθεσμης (35 χρόνια) χρονικής και χωρικής ανάλυσης αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από κυματικό μοντέλο.

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές της εικόνας 16, με αυτές των βόρειων και των δυτικών ευρωπαϊκών τοποθεσιών, οι οποίες βρίσκονται στην 27 παρατηρούμε πως η ενέργεια των κυμάτων στην Μεσόγειο είναι σημαντικά μικρότερη. Συγκεκριμένα, η κυματική ισχύς στη Βόρεια Θάλασσα κυμαίνεται μεταξύ 10-60 kW/m, ενώ μπροστά από τις γαλλικές και τις πορτογαλικές ακτές, οι ετήσιες διαθέσιμες τιμές κυμαίνονται από 30 έως 50 kW/m. Εστιάζοντας στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα, παρατηρούμε πως οι υψηλότερες τιμές κυματικού δυναμικού εμφανίζονται στις δυτικές και νότιες ακτές της Κύπρου, καθώς και κοντά στις ακτές του Λιβάνου, του Ισραήλ και της Αιγύπτου.

2.5.2 Το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών

Η Ελληνική Χερσόνησος έχει μια μακρά ακτογραμμή μήκους περίπου 16.000 km αλλά, σε σχέση με τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες (κυρίως αυτές που βρέχονται από τον Ατλαντικό), το κυματικό δυναμικό της είναι χαμηλό χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν είναι και αξιόλογο. Το υψηλό αιολικό δυναμικό, κυρίως του Αιγαίου Πελάγους, δημιουργεί μια έντονη κυματική δραστηριότητα η οποία όμως διακόπτεται από το μικρό μήκος πνοής (fetch length), καθώς οι αποστάσεις ανάμεσα στα νησιά είναι σχετικά μικρές. Τεχνικά μιλώντας το εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Ελλάδος εκτιμάται ότι κυμαίνεται περίπου ανάμεσα στα 4 – 11 kW/m . [48] Τα κυματικά δεδομένα για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο προήλθαν από δύο πηγές:

α) **Επιτόπιες μετρήσεις** (*real time or in situ measurements*) του ΠΟΣΕΙΔΩΝ το οποίο είναι ένα σύστημα παρακολούθησης, πρόγνωσης και παροχής πληροφοριών των ελληνικών θαλασσών το οποίο αποτελείται από 10 ωκεανογράφους και 10 πλωτήρες τύπου Sea Watch. Το δίκτυο αυτό ωκεανογραφικών πλωτήρων εγκαταστάθηκε το 1999 σε πολλά σημεία βαθέων υδάτων του ελλαδικού θαλάσσιου χώρου (βλέπε: εικ 30) από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ. Οι πλωτήρες αυτοί μέτρησαν τόσο μετεωρολογικούς (ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία αέρα), όσο και ωκεανογραφικούς (σημαντικό ύψος κύματος, κατεύθυνση και περίοδο κυματισμών) παραμέτρους.

β) **Δεδομένα hindcast**¹² του κυματολογικού δυναμικού του Ελλαδικού χώρου, οι οποίες προέρχονται από το κυματικό μοντέλο WAM-cycle 4 και το μετεωρολογικό μοντέλο SKIRON-Eta και αναφέρονται στην δεκαετία 1995-2004. Τα δεδομένα πάρθηκαν με χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ και ανά χρονικά διαστήματα τριών ωρών, ενώ επιδιορθώθηκαν με βάση τις επιτόπιες μετρήσεις του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ. [47]

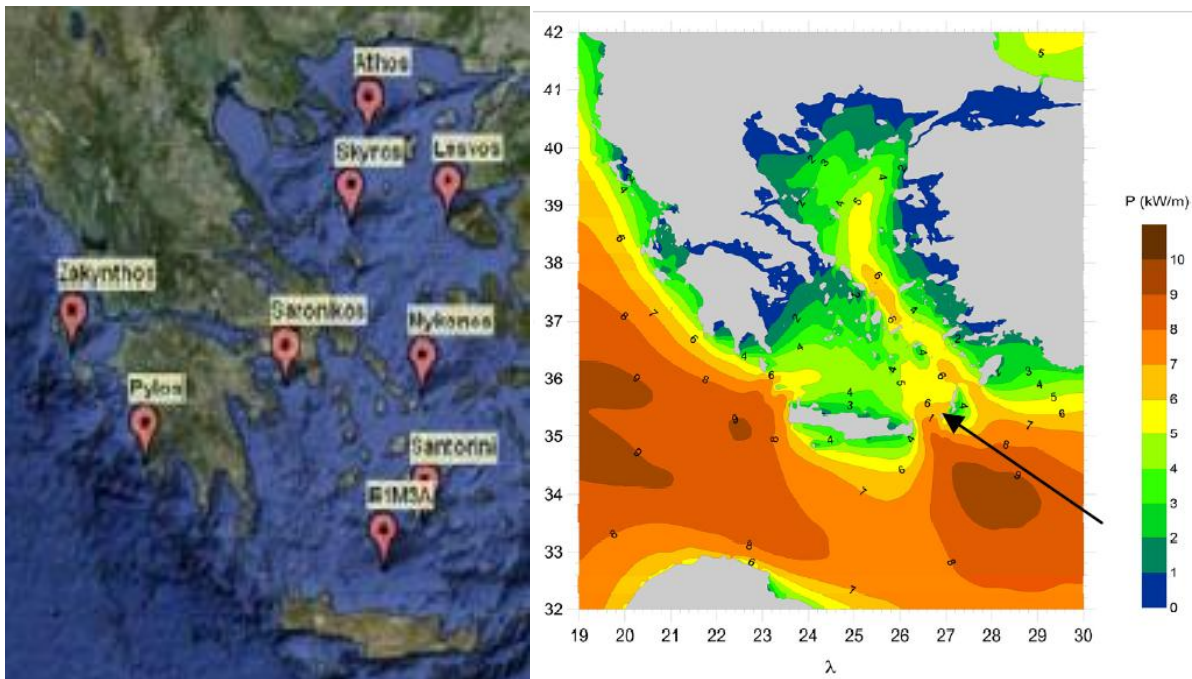
Η μελέτη της χωρικής κατανομής της ισχύος των κυμάτων στις ελληνικές θάλασσες εκπονήθηκε σε εποχιακή (χειμώνας, άνοιξη, καλοκαίρι και φθινόπωρο) και ετήσια βάση. Σε εποχιακή βάση η μέση ισχύς των κυματισμών φτάνει στις μέγιστες τιμές της κατά την περίοδο του Χειμώνα: 8-14 kW/m στο Αιγαίο και 9-15 kW/m στο Ιόνιο Πέλαγος. Τις υπόλοιπες εποχές η κυματική ισχύς κυμαίνεται στα 3-7 kW/m τόσο στο Αιγαίο, όσο και στο Ιόνιο, με το τελευταίο να έχει ελαφρώς πιο υψηλές τιμές δυναμικού.

Σε ετήσια βάση το βόρειο Αιγαίο κυμαίνεται κατά μέσο όρο σε τιμές ισχύος 3-5 kW/m , ενώ στο βόρειο και κεντρικό Αιγαίο (Κυκλάδες) οι αντίστοιχες τιμές φτάνουν και τα 6 kW/m . Στο νοτιοδυτικό Αιγαίο η μέση τιμή της ισχύος είναι 4-5 kW/m . Οι μέγιστες μέσες τιμές

¹² *Hindcast Data*: Πρόκειται για τις τιμές των κυματικών δεδομένων σε διάφορες περιοχές του Ελλαδικού θαλάσσιου χώρου οι οποίες προέρχονται από προγνώσεις κυματικών (ή αιολικών) μοντέλων σε παρελθοντικές περιόδους. Αυτά τα δεδομένα αποτελούν το κυματολογικό ιστορικό των περιοχών στις οποίες αναφέρονται και χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για να εμπλουτιστεί η ήδη υπάρχουσα σχετική πληροφορία.

φτάνουν στα $6-8 \text{ kW/m}$ και παρατηρούνται στα στενά ανάμεσα στις νήσους Κρήτη-Κύθηρα και Κρήτη-Κάσος. Στα στενά ανάμεσα στις Κάσο-Κάρπαθο και Κάρπαθο-Ρόδο η τιμή της κυματικής ισχύος είναι επίσης αρκετά υψηλή (6 kW/m), ενώ στο Ιόνιο Πέλαγος η κυματική ισχύς κυμαίνεται στα $4-8 \text{ kW/m}$.

Το δυναμικό αυτό θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά στην ηλεκτροδότηση των περισσότερων νησιών του Αιγαίου, αρκεί να γίνουν οι κατάλληλες τεχνικές βελτιώσεις προκειμένου να γίνει ανταγωνιστική η κυματική ενέργεια και οι τεχνολογίες που την αφορούν, σε σχέση με άλλες συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ηλεκτροδότησης. Το ιδανικό σημείο για την εγκατάσταση ενός ενεργειακού πάρκου εντοπίζεται ανάμεσα στα στενά Κάσος-Κάρπαθος και φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 30 (δεξιά) με το μαύρο βέλος. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα [48] [49] [50] [51].



Εικόνα 17: Τα σημεία τοποθέτησης των πλωτήρων του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ [50] (Αριστερά) και το κυματικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών (Δεξιά) [48]

2.6 Τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της κυματικής ενέργειας

Στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου αναφέραμε πως η ενέργεια που φέρουν οι κυματισμοί είναι μεγαλύτερη, έως και πολύ μεγαλύτερη από αυτήν άλλων εναλλακτικών πηγών ενέργειας και αυτό είναι αλήθεια καθώς φέρει τα μεγαλύτερα ποσοστά ενεργειακής πυκνότητας, τόσο σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία, όσο και σε σύγκριση με τον άνεμο. Ένα απλό παράδειγμα για να καταλάβουμε την τεράστια υπεροχή της ενέργειας που φέρουν τόσο κυματισμοί, όσο και τα θαλάσσια υπόγεια ρεύματα είναι το εξής: Για να προφυλαχθούμε από την ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να κάνουμε χρήση ενός σκίαστρου, ενώ για να αντιμετωπίσουμε τους ισχυρούς ανέμους δεν έχουμε παρά να παραμείνουμε σε ένα συνηθισμένο κτήριο. Για να αντιμετωπισθεί όμως η ισχύς της θάλασσας χρειάζεται να κατασκευαστούν φράγματα, λιμάνια και κυματοθραύστες πάχους πολλών μέτρων και μάζας πολλών τόνων.

Στην αρχή του κεφαλαίου αναφέραμε πως η μεταφορά Ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της κυματικής ενέργειας είναι $2-3 \text{ kW/m}^2$, την στιγμή που οι ανάλογες τιμές για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια είναι $0,1-0,2 \text{ kW/m}^2$ και $0,4-0,6 \text{ kW/m}^2$ αντίστοιχα. Οι εκτιμήσεις αυτές δεν είναι απόλυτα ακριβείς ποσοτικά ωστόσο εάν τις λάβουμε υπόψιν σε μια γενικής φύσεως εκτίμηση, θα δούμε πως η ροή ενέργειας των κυματισμών ανά μονάδα επιφάνειας είναι κατά μέσω 5 φορές πυκνότερη από την αντίστοιχη του αιολικού δυναμικού και 10-30 φορές πυκνότερη από την αντίστοιχη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Μερικά χαρακτηριστικά προτερήματα της απόληψης ενέργειας από τα κύματα είναι τα εξής:

- Αρχικά έχει όλα τα προτερήματα που έχουν και οι υπόλοιπες Α.Π.Ε, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην §1.2, καθώς και τα προτερήματα της ενέργειας από την θάλασσα όπου αναφέρθηκαν στην §1.3.
- Τα κύματα μπορούν να ταξιδέψουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις χάνοντας ελάχιστη ενέργεια. Έτσι η ενέργεια τους εμφανίζει μεγαλύτερη σταθερότητα και αξιοπιστία σε σχέση με άλλες μορφές Α.Π.Ε
- Οι συσκευές ανάκτησης θαλάσσιας ενέργειας μπορούν να παράγουν ενέργεια περίπου κατά το 90% του χρόνου λειτουργίας τους, την στιγμή που τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια μόλις στο 20-30% του αντίστοιχου χρόνου λειτουργίας
- Η ικανότητα να προβλεφθεί η ποσότητα ισχύος που μεταφέρει το κύμα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για την αιολική ενέργεια.
- Υπάρχει μια καλή δυνατότητα προσφοράς της κυματικής ενέργειας, καθώς αυτή «βρίσκεται» κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα, οπότε και είναι εύκολο να μεταφερθεί σε αυτά (Το 37% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε απόσταση μέχρι και τα 90 km από τις ακτές).

- Η κυματική ενέργεια εξαρτάται πολύ από την ταχύτητα του ανέμου, πράγμα που με την σειρά του σημαίνει πως είναι μεγαλύτερη την περίοδο του Χειμώνα, όπου υπάρχει μεγάλη ενεργειακή ζήτηση.
- Είναι μια πηγή ενέργειας την οποία μπορούμε να την συλλέξουμε σε πολλές διαφορετικές τοποθεσίες (από τα μεγάλα βάθη, μέχρι την ακτογραμμή).
- Έχει μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αρχικά μπορεί να αναφερθεί ότι για την εγκατάσταση σταθμών κυματικής ενέργειας, δεν απαιτείται δέσμευση Γής, ενώ η οπτική όχληση και οι περιβαλλοντικές παρεμβάσεις κατά την διάρκεια εγκατάστασης και λειτουργίας δεν είναι μεγάλες. Μάλιστα οι παράκτιες εγκαταστάσεις (οι οποίες θα αναλυθούν στο 4^ο κεφάλαιο) θα μπορούσαν με κατάλληλο σχεδιασμό να λειτουργήσουν παράλληλα ως κυματοθραύστες για την προστασία λιμανιών και της ακτογραμμής. Τέλος οι υποβρύχιες εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν ευνοϊκά για τα υποθαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς παίζουν τον ρόλο των τεχνητών υφάλων.

Πέρα όμως από τα προτερήματα υπάρχει και μια σειρά από προκλήσεις και τεχνολογικά προβλήματα τα οποία πρέπει να υπερβούμε έτσι ώστε η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα να γίνει ανταγωνιστική στην παγκόσμια αγορά ενέργειας [52]:

- Αρχικά είναι δύσκολη η μετατροπή της, χαμηλούς συχνότητας (περίπου 0,1 Hz), τυχαίας παλινδρομικής κίνησης των κυματισμών, σε μια χρήσιμη μορφή κίνησης, υψηλής συχνότητας (τουλάχιστον 50 Hz), η οποία θα μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας από μια ηλεκτρογεννήτρια. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητα δύο βασικά στάδια: 1^ο η μετατροπή της κινητικής ενέργειας των κυματισμών, σε ηλεκτρική και 2^ο η αύξηση της ενεργειακής τάσης που παράγει η γεννήτρια, έτσι ώστε να μπορεί αυτή να μεταφερθεί στην ακτή.
- Οι θαλάσσιοι κυματισμοί ποικίλουν τόσο σ' ότι αφορά την περίοδο, όσο και σ' ότι αφορά το ύψος κύματος· κατ' επέκταση ποικίλει και η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρουν. Αυτή η ενέργεια πρέπει με κάποιο τρόπο να μετατραπεί σε ομαλό ηλεκτρικό σήμα και ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου κατάλληλου συστήματος προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας πάνω στην κυματογεννήτρια, το οποίο θα εξασφαλίσει την ομαλή παροχή ισχύος προς το δίκτυο.
- Στις υπεράκτιες περιοχές, η διεύθυνση του μετώπου κύματος ποικίλει και έτσι προκειμένου να συλλεχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια, οι κυματογεννήτριες πρέπει να είναι σε θέση να περιστραφούν και να ευθυγραμμιστούν κατάλληλα για κάθε δεδομένη διεύθυνση κύματος που προσπίπτει απάνω τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση τους. Αυτό με την σειρά του απαιτεί και ένα ανάλογο ευέλικτο σύστημα αγκύρωσης, πράγμα που συχνά είναι πολύ δύσκολο. Αυτό φυσικά δεν ισχύει κοντά στις ακτές καθώς εκεί λόγω της ρήξης το μέτωπο κύματος ευθυγραμμίζεται με την ακτή.
- Ένα ακόμη πρόβλημα (το οποίο αφορά κυρίως τις υπεράκτιες συσκευές που δέχονται και τα μεγαλύτερα φορτία) είναι το γεγονός πως η συσκευή θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τις ισχυρότατες δυνάμεις που της ασκούνται από τους θαλάσσιους κυματισμούς.

Αυτό με την σειρά του δημιουργεί πολλές προκλήσεις σχετικά με τον τρόπο κατασκευής τους, αλλά και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Προφανώς οι μετέπειτα εργασίες συντήρησης αυτών των συσκευών είναι επίσης πολύ δύσκολες, αλλά και πολύ δαπανηρές.

- Ένα ακόμη σημαντικό εμπόδιο στην βιομηχανική χρήση αυτών των συσκευών είναι η εύρεση χρηματοδότησης για την έρευνα πάνω στην τεχνολογία τους. Αν και η κυματική ενέργεια είναι πολύ «ελκυστική» ως λύση, λόγω των προαναφερθέντων προτερημάτων, ωστόσο η τεχνολογία των ανάλογων συσκευών είναι σε αρκετά «ανώριμο» στάδιο και δεν είναι σε θέση να ανταγωνισθεί τις ώριμες τεχνολογίες που αφορούν τις υπόλοιπες Α.Π.Ε. Με αυτό σαν δεδομένο, οι επενδυτές θα πρέπει να έχουν ένα πολύ καλό κίνητρο προκειμένου να χρηματοδοτήσουν αυτές τις τεχνολογίες οι οποίες απαιτούν την διάθεση πολλών κεφαλαίων. Αν κανείς συμπεριλάβει στην εξίσωση και την οικονομική κρίση την οποία διανύουμε στο σήμερα, είναι εύκολο να καταλάβει πως η έρευνα πάνω σε αυτές τις τεχνολογίες γίνεται ένα δύσκολο εγχείρημα. Συνεπώς η βασική έρευνα της επιστημονικής κοινότητας πάνω σε αυτόν τον τομέα περιορίζεται κυρίως στην αντιμετώπιση προβλημάτων κυρίως οικονομικής φύσεως· δηλαδή στο πως θα αυξηθεί η αποδοτικότητα αυτών των συσκευών και παράλληλα θα μειωθεί το κόστος κατασκευής και συντήρησης τους.

3. Τεχνολογίες για την απόληψη κυματικής ενέργειας

Για την απόληψη της κυματικής ενέργειας και την μετατροπή της σε ωφέλιμο έργο απαιτείται η χρήση μιας **συσκευής απόληξης κυματικής ενέργειας** (*Wave Energy Converter, WEC*) η οποία θα αλληλεπιδράσει με τους κυματισμούς και με την βοήθεια ενός κατάλληλου μηχανισμού θα αξιοποιήσει την κινητική ή και την δυναμική ενέργεια των κυματισμών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η έντονη δυναμική φύση του φαινομένου των κυματισμών από την μια πλευρά αφήνει πολλά περιθώρια στους κατασκευαστές-ερευνητές να στοχεύσουν σε διαφορετικές συνιστώσες του έτσι ώστε να κατασκευάσουν πολλές διαφορετικές ευρεσιτεχνίες· από την άλλη βέβαια αποτελεί τον πλέον ανασταλτικό παράγοντα ευρείας εφαρμογής τους μέχρι την παρούσα στιγμή. Η απόδοση των πειραματικών μοντέλων σε εργαστηριακές συνθήκες είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική, καθώς η απόκρισή τους και το μαθηματικό μοντέλο βασίζεται σε θεωρητικές προσεγγίσεις της κίνησης του κύματος, άλλοτε απλοποιημένες και άλλοτε ιδιαίτερα σύνθετες. Η πλήρης περιγραφή του είναι αντικείμενο ιδιαίτερα πολύπλοκο και σε αυτή την προσπάθεια επικεντρώνεται αρκετά το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Έτσι λοιπόν μια συσκευή που λειτουργεί ικανοποιητικά σε κλίμακα στο εργαστήριο, μπορεί σε εφαρμογή πλήρους κλίμακας να παρουσιάζει απόκριση πολύ διαφορετική και συχνά μη βιώσιμη.

Όλοι οι σύγχρονοι WEC's παρά τις μηχανολογικές και τεχνολογικές διαφορές τους βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας: Αποτελούνται από κάποιο στερεό-κινούμενο ή κάποιο ελαστικά παραμορφώσιμο σώμα που δέχεται τα θαλάσσια φορτία, μετακινείται-περιστρέφεται-παραμορφώνεται και μεταφέρει την κίνηση του αυτή μέσα από ένα μηχανικό σύστημα και την μετατρέπει σε περιστροφική. Η περιστροφική αυτή κίνηση θέτει σε λειτουργία μια ηλεκτρογεννήτρια η οποία με την σειρά της παράγει ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο αποθηκεύεται σε μπαταρίες πάνω στην κατασκευή ή διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο μέσω υποθαλάσσιων αγωγών.

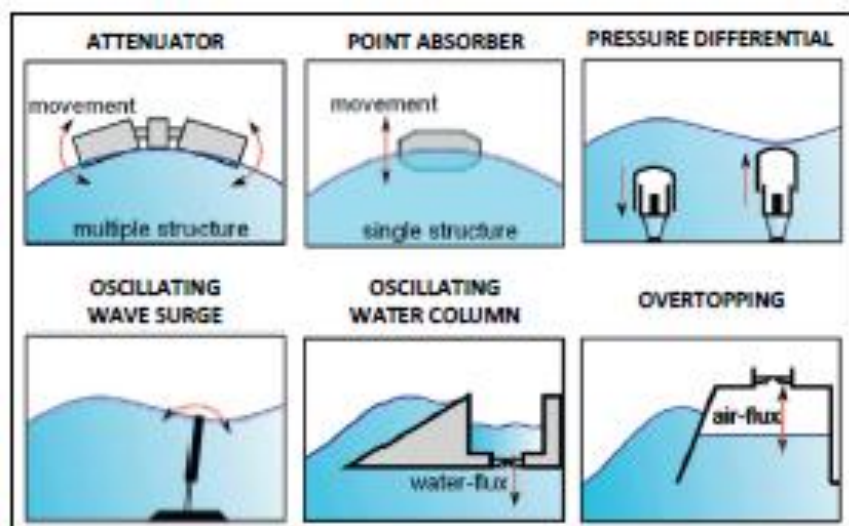
Από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα και έπειτα έχουν καταχωρηθεί πάνω από 1200 ευρεσιτεχνίες WEC's για την παραγωγή ενέργειας από τους θαλάσσιους κυματισμούς, ενώ ένας αρκετά μεγάλος αριθμός από αυτές έχουν ήδη δοκιμαστεί πειραματικά. [52] Η σχετικά μικρή ηλικία της τεχνολογίας εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας και η υφιστάμενη κατάσταση στον ερευνητικό τομέα, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή εκατοντάδων πρωτοτύπων που λειτουργούν επιτυχώς, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Οι WEC's λοιπόν μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με πολλά και διαφορετικά κριτήρια τα οποία αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

Οι WEC's γενικώς διαχωρίζονται ανάλογα με τα εξείς κριτήρια [40]:

1. Την τοποθεσία εγκατάστασης: **Επάκτιες** (On-shore), **Παράκτιες** (Near-shore) και **Υπεράκτιες** Τεχνολογίες (Off-shore)
2. Το μέγεθος της κατασκευής και την διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού: **Σημειακοί απορροφητές** (Point Absorbers), **Εξασθενητές** (Attenuators) και **Τερματικού τύπου** (Terminators).
3. Την αρχή λειτουργίας τους: **Πλωτοί ταλαντευόμενοι συλλέκτες** (Floating-Oscillating Body WEC's Devices - εδώ ανήκουν οι point absorbers και οι attenuators), **Βυθισμένοι μετατροπείς διαφορικής υδροστατική πίεσης** (submerged pressure differential), **Συσκευές υπερχείλισης** (Overtopping Devices), **Συσκευές οριζόντιας Κυματικής Παλινδρόμησης** (Oscillating Wave Surge Converter - OWSC) και **Συσκευές Παλλόμενης στήλης ύδατος** (Oscillating water Column).
4. Τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης που παράγει η συσκευή, στην ηλεκτρογεννήτρια (Power Take-Off System – PTO): **Pneumatic PTO - Turbine Transfer, Hydraulic PTO - Turbine/Motor Transfer, Electrical linear generator**

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια (και κυρίως την αρχή λειτουργίας) παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές οι περισσότερες συσκευές WEC's χωρίζονται σε 6 βασικούς τύπους: **Wave Attenuator, Point Absorber, Oscillating wave surge converter, Overtopping Device, Submerged pressure differential, Oscillating water Column.**

Οι 5 πρώτοι τύποι θα αναφερθούν συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο . Ο 6^{ος} και τελευταίος τύπος θα αναλυθεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο, μιας και βρίσκεται στο επίκεντρο της παρούσας εργασίας. [53]



Εικόνα 18 : Τα 6 βασικά σχέδια για WEC's [54]

3.1 1^ο κριτήριο διαχωρισμού: Τοποθεσία εγκατάστασης

Οι WEC's μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε απόσταση από την ακτή (δηλαδή μακριά, κοντά ή πάνω στις ακτές) και σε οποιοδήποτε βάθος της θάλασσας (δηλαδή από την επιφάνεια, μέχρι τον πυθμένα). Οι φυσικές – υδροδυναμικές συνθήκες οι οποίες σχετίζονται άμεσα με την ανάληψη της ενέργειας των κυματισμών και της μετατροπής τους σε ωφέλιμο έργο, διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με αυτές τις δύο παραμέτρους (δηλαδή το βάθος και την απόσταση από την ακτή). Η πιο κλασική διάκριση λοιπόν των WEC's γίνεται βάση της απόστασης από την ακτή και αποτελείται από 3 βασικές κατηγορίες. [52]

3.1.1 Επάκτιες Τεχνολογίες (*On-Shore*)

Πρόκειται για σταθερά και ενσωματωμένα στην ακτογραμμή συστήματα. Οι κυματισμοί που βρίσκονται κοντά στις ακτές λόγω της τριβής τους με τον πυθμένα χάνουν σημαντική ποσότητα ενέργειας, πράγμα που καθιστά τις θέσεις αυτές λιγότερο ενδιαφέρουσες ενεργειακά. Μέρος αυτής της απώλειας μπορεί να ανακτηθεί με κατάλληλη επιλογή του σημείου εγκατάστασης, όπως είναι για παράδειγμα σημεία στην ακτή όπου λόγω επαλληλίας ενισχύεται η ισχύς των κυματισμών. Ωστόσο αυτές οι τεχνολογίες έχουν και αρκετά πλεονεκτήματα που αφορούν κυρίως την ασφάλεια και το κόστος τους. Κοντά στην ακτή τα φορτία που δέχονται οι διατάξεις είναι μικρότερα, πράγμα που σημαίνει ότι η πιθανότητα βλάβης ή καταστροφής τους είναι μικρότερη· παράλληλα το κόστος και η ευκολία εγκατάστασης και συντήρησης είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τις υπεράκτιες κατασκευές. Επίσης δεν υπάρχει ανάγκη για συστήματα αγκυρώσεων ή πάκτωσης στον πυθμένα, καθώς και για υποθαλάσσιους αγωγούς.

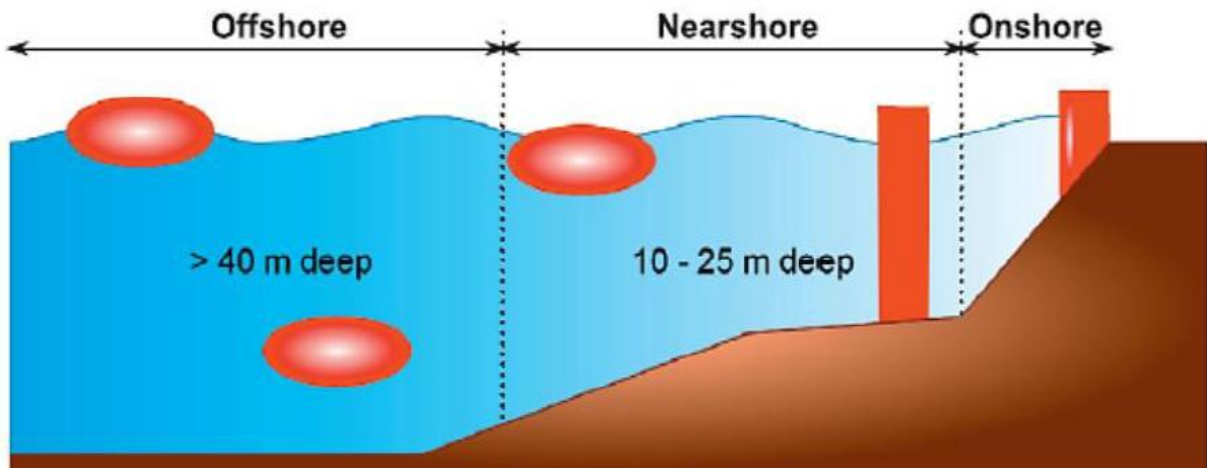
3.1.2 Παράκτιες Τεχνολογίες (*Near-Shore*)

Πρόκειται για αγκυρωμένες ή πακτωμένες κατασκευές οι οποίες βρίσκονται σε μέτριο βάθος (20-30 m) και σε αποστάσεις μέχρι τα 500 m από την ακτογραμμή. Έχουν σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα με αυτά των επάκτιων τεχνολογιών με την διαφορά ότι έχουν το πλεονέκτημα της αξιοποίησης κυματικού δυναμικού μεγαλύτερης ισχύος.

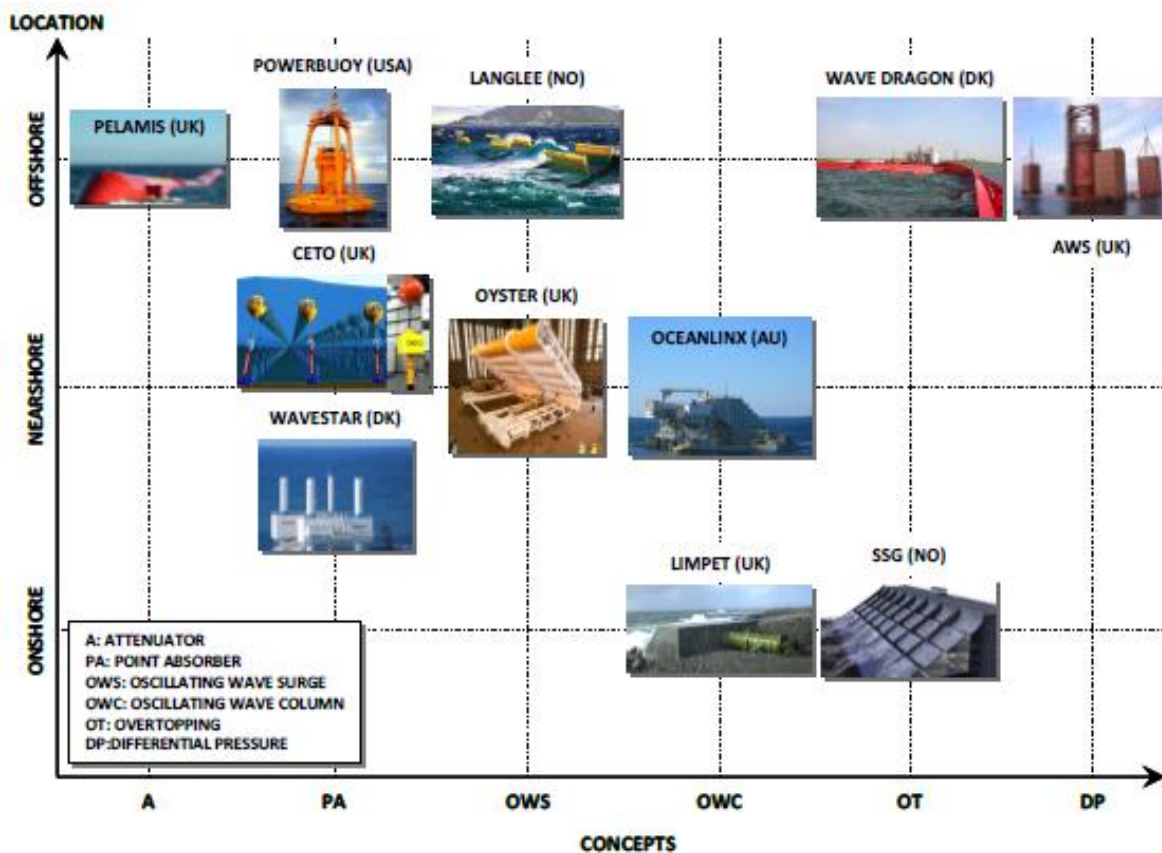
3.1.3 Υπεράκτιες Τεχνολογίες (*Off-shore*)

Πρόκειται για αγκυρωμένες κατασκευές οι οποίες βρίσκονται σε μεγάλα βάθη (πάνω από 40 m). Οι κυματισμοί σε μεγάλες αποστάσεις από την ξηρά, λόγω βάθους δεν χάνουν ενέργεια και γι αυτό οι WEC's που βρίσκονται εκεί δέχονται και το μεγαλύτερο δυναμικό, άρα παράγουν και την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας. Από την άλλη όμως δέχονται και τα ισχυρότερα φορτία με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα φθοράς, βλάβης ή και καταστροφής τους. Επίσης το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και αγκύρωσης είναι

μεγαλύτερο λόγω της δυσπρόσιτης θέσης τους και του μεγάλου βάθους. Οπότε οι υπεράκτιες τεχνολογίες επικεντρώνονται σε μικρές διατάξεις που παρατάσσονται σε μεγάλο αριθμό και επεκτείνονται σε σειρές, παράγοντας έτσι ενέργεια μεγάλης ισχύος.



Εικόνα 19: Ταξινόμηση WEC's ανάλογα με την απόσταση από την ακτή [52]



Εικόνα 20 : Διαφορετικά μοντέλα WEC's ανάλογα με την απόσταση εγκατάστασης τους από την ακτή (Τα μοντέλα που φαίνονται στο σχήμα θα αναλυθούν παρακάτω) [54]

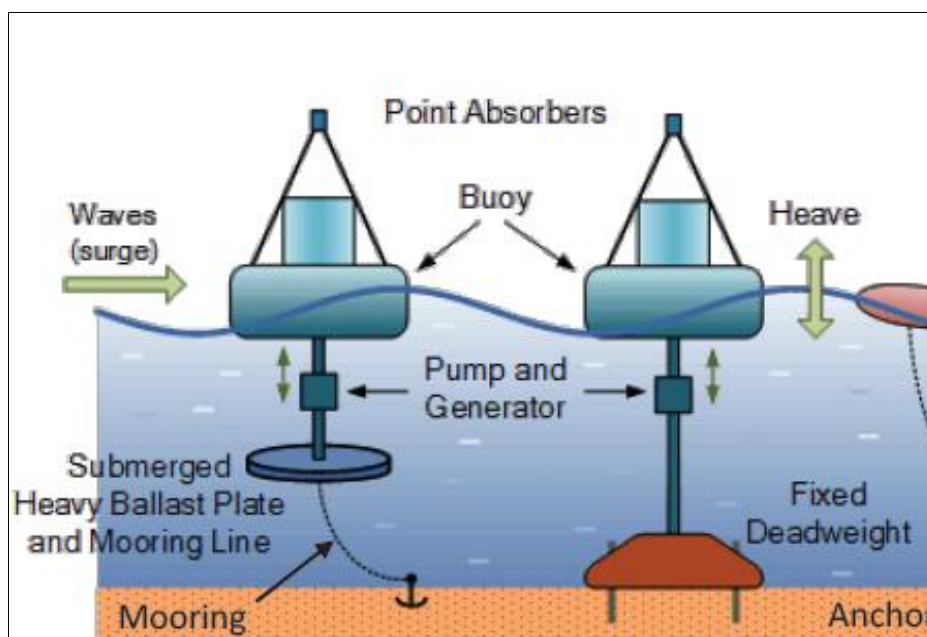
3.2 2^ο κριτήριο διαχωρισμού: Μέγεθος κατασκευής και κατεύθυνση κυματισμού

Βάση του μεγέθους της κατασκευής, καθώς και της κατεύθυνσης προσανατολισμού της σε σχέση με τον προσπίπτοντα κυματισμό, οι WEC's μπορούν να διαχωριστούν σε 3 βασικές κατηγορίες.

3.2.1 Σημειακοί απορροφητές (Point Absorbers)

Πρόκειται για ταλαντευόμενες διατάξεις οι οποίες έχουν την μορφή πλωτήρα με μέγεθος διαμέτρου αρκετά μικρότερη σε σχέση με το μήκος κύματος που προσπίπτει σε αυτές. Λόγω του συμμετρικού σχήματος τους έχουν την ιδιότητα να απορροφούν κυματική ενέργεια για κάθε διαφορετική διεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος. Οι συσκευές αυτές ανυψώνονται και κατέρχονται με το πέρασμα του κυματισμού εκτελώντας έτσι μια παλινδρομική κατακόρυφη κίνηση. Με την βοήθεια υδραυλικών ή μηχανικών συστημάτων μετατρέπουν αυτή την κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα σε γραμμική ή περιστροφική κίνηση η οποία θέτει με την σειρά της σε λειτουργία μια ηλεκτρογεννήτρια.

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους είναι ότι παρουσιάζουν φαινόμενα συντονισμού σε σχετικά στενό εύρος συχνοτήτων απόκρισης και ότι έχουν την ικανότητα της απορρόφησης ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Πρόκειται ουσιαστικά για το ίδιο φαινόμενο που παρουσιάζεται στα ραδιοκύματα, το «φαινόμενο κεραίας». Στις περισσότερες περιπτώσεις τα πλωτά αυτά συστήματα είναι αξονοσυμμετρικά και λόγω αυτού είναι λιγότερο ευπαθή σε ισχυρές ενεργειακές θαλάσσιες καταστάσεις κατά την διάρκεια των οποίων τους ασκούνται ισχυρά φορτία.



Εικόνα 21 : Point Absorbers με αγκυρώσεις ή πακτωμένοι στον πυθμένα [54]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα οι Point Absorbers μπορεί να είναι πακτωμένοι στον πυθμένα ή να σταθεροποιούνται με την βοήθεια συστημάτων αγκυρώσεως. Το μικρό τους μέγεθος κάνει ευκολότερη την λειτουργία πολλών τέτοιων συσκευών υπό κοινό υποθαλάσσιο αγωγό και έτσι είναι αρκετά εύκολο το να δημιουργηθεί ένα πάρκο με πολλούς σημειακούς απορροφητές οι οποίοι να παράγουν επιθυμητή ονομαστική ισχύ. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα τέτοιων σημειακών διατάξεων οι οποίες έφτασαν στο στάδιο του να δοκιμαστούν σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες. Μερικά από αυτά είναι: OPT PowerBuoy (Ocean Power Technologies ΗΠΑ/Ηνωμένο Βασίλειο) [55] [56] , AquaBuoy (Ιρλανδία), Wavebob (Ιρλανδία), SeaREV, FO3 (Fred Olsen Νορβηγία), Wavestar (Δανία) [57], CETO (Carnegie Clean Energy) [58] και Searaser.



Εικόνα 22 : Πάρκο με Point Absorbers τύπου OPT PowerBuoy [52]

3.2.2 Εξασθενητές κυματισμών (Wave Attenuators)

Πρόκειται για μια μακρόστενη πλωτή και αρθρωτή κατασκευή η οποία όμως είναι ευθυγραμμισμένη κάθετα προς το μέτωπο του κύματος και παράλληλα προς το μήκος κύματος (ή την διεύθυνση διάδοσης του κύματος). Η συσκευή αυτή επιπλέει επί των διερχόμενων κυματισμών και με την βοήθεια της παλινδρομικής κίνησης τους, απορροφά την ενέργεια τους καθ' όλο το μήκος της, μέσω υδραυλικών μηχανισμών οι οποίοι βρίσκονται στις αρθρώσεις της. Αυτή η λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με τους σημειακούς απορροφητές. Επίσης η μικρή μετωπική επιφάνεια αυτών των συσκευών σε σχέση με τον προσπίπτοντα κυματισμό, μειώνει κατά πολύ την καταπόνηση τους. Τα βασικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι η διάταξη Pelamis, το Oceantech, το Dexawave, η κυματική αντλία McCabe και η σχεδία Cockerel.



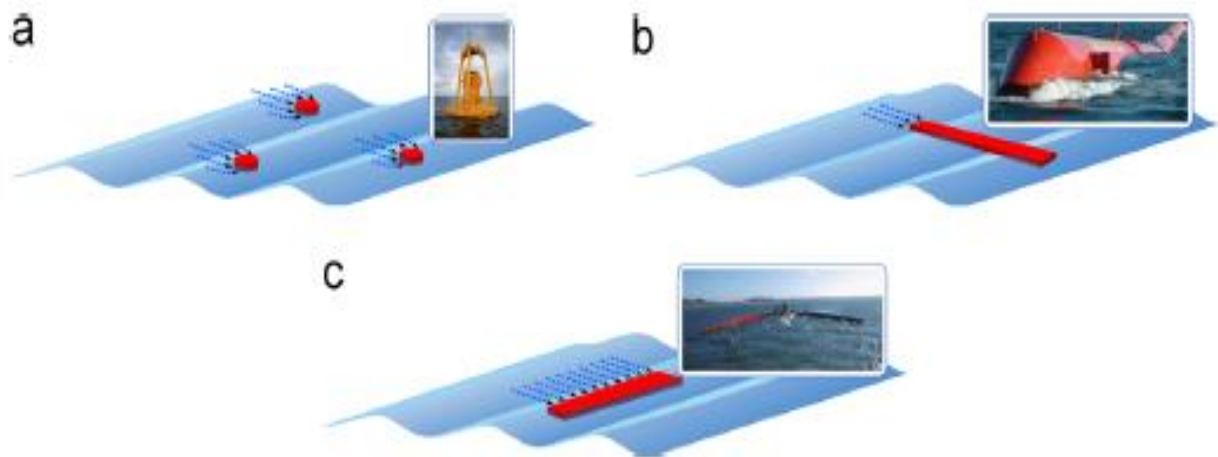
Εικόνα 23: Ο εξασθενητής κυματισμών και η διάταξη Pelamis [36]

Ας αναλύσουμε ένα από αυτά τα παραδείγματα, την διάταξη Pelamis, η οποία φαίνεται και στην εικόνα 23. Την ανέπτυξε η βρετανική εταιρία Ocean Power Delivery Systems με έδρα το Εδιμβούργο. Συγκεκριμένα την επινόησε ο R. Yemm το 1998 και αποτελείται από μια επιμήκη σειρά συνδεδεμένων μεταξύ τους πλωτών δεξαμενών. Μέσα στους κυματισμούς της θάλασσας, το σχήμα της διάταξης λαμβάνει τη μορφή μιας κατά προσέγγιση ημιτονοειδούς καμπύλης, η οποία είναι υπολογισμένη κατάλληλα ώστε να εκμεταλλεύεται τις δημιουργούμενες κυματομορφές. Οι διαδοχικές κορυφές και κοιλίες των κυμάτων προκαλούν τη σχετική κίνηση των πλωτών δεξαμενών της διάταξης. Η σχετική κίνηση κάθε τμήματος της διάταξης ως προς τα γειτονικά του προκαλεί την κίνηση εμβόλων στο εσωτερικό τους. Τα έμβολα ωθούν υδραυλικό υγρό το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει την κίνηση σε ηλεκτρογεννήτριες.

3.2.3 WEC's τερματικού τύπου (Wave Terminators)

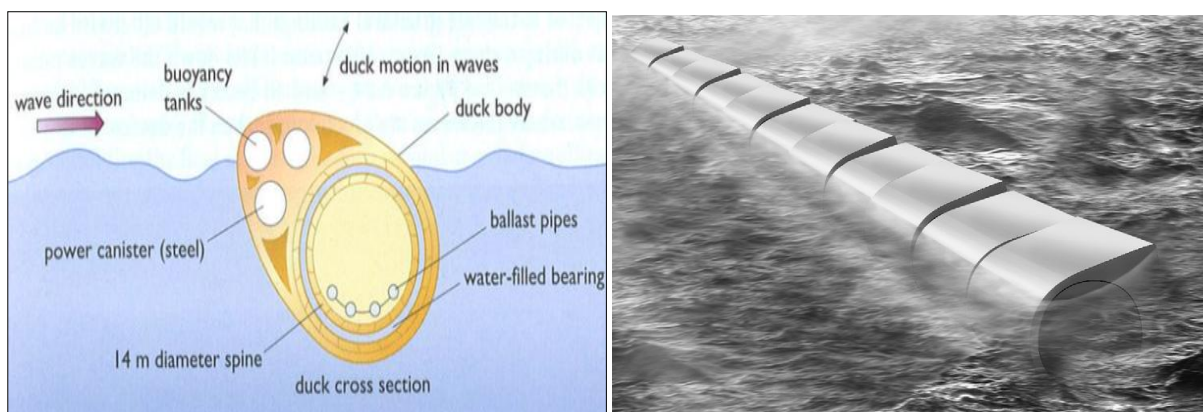
Αυτές οι διατάξεις είναι παρόμοιου μεγέθους και σχήματος με τους εξασθενητές. Είναι μακρόστενες κατασκευές οι οποίες όμως έχουν κύρια διεύθυνση τους παράλληλα στο μέτωπο του προσπίπτοντος κυματισμού. Όταν ο κυματισμός προσπίπτει πάνω σε αυτήν την κατασκευή ουσιαστικά αποσβήνει σχεδόν εντελώς.

Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα κατασκευής είναι η «Πάπια του Salter» η οποία επινοήθηκε από τον Stephen Salter το 1974 στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου. [59] Πρόκειται για ένα πλωτό πτερύγιο με μορφή αχλαδιού το οποίο τοποθετείται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού.



Εικόνα 24 : Ο διαχωρισμός των WEC's ανάλογα με το μέγεθος: (α) OPT point absorber, (b) Pelamis Attenuator (c) Wave Dragon Terminator

Η δράση των κυματισμών επί αυτού του περυγίου περιστρέφει 4 γυροσκόπια¹³ που υπάρχουν στο εσωτερικό του δημιουργώντας υδραυλική ενέργεια η οποία στην συνέχεια διοχετεύεται σε μια γεννήτρια η οποία την μετατρέπει σε ηλεκτρική με συνολική απόδοση περίπου 80% . Η πρώτη τέτοια διάταξη που κατασκευάστηκε έγινε από το Πανεπιστήμιο του Coventry και αποτελείτο από 12 «πάπιες» οι οποίες ενώνονταν με μια κεντρική σωλήνα διαμέτρου 17 εκατοστών και μήκους 6 μέτρων. Κάθε μια από αυτές είχε πλάτος 50 εκατοστών και κινείτο ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Η διάταξη φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. [60] [61]



Εικόνα 25 : Η συσκευή κυματικής ενέργειας «Πάπια του Salter» [62]

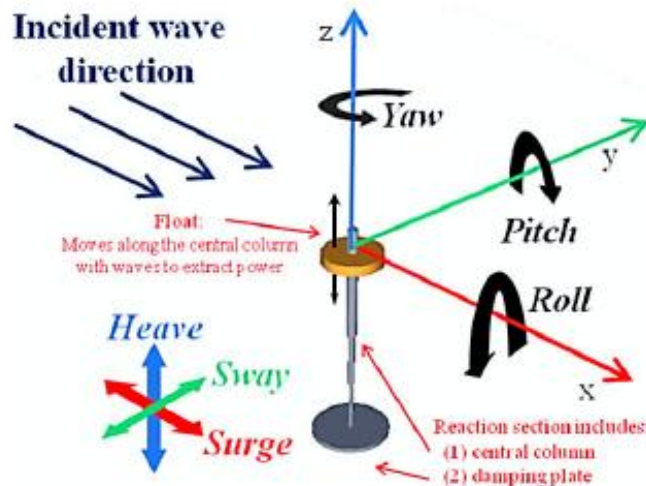
¹³ Το **γυροσκόπιο** είναι για μια διάταξη όμοια με εκείνη που φέρει μια μεταλλική στεφάνη που μπορεί να περιστρέφεται δεξιά ή αριστερά. Αυτή η στεφάνη φέρει δεύτερη εσωτερική που στηρίζεται με συνδέσμους σε οριζόντια διάταξη, ως προς την εξωτερική, δυνάμει έτσι να περιστρέφεται ελεύθερα με φορά πάνω ή κάτω. Στην εσωτερική αυτή στεφάνη συγκρατείται εσωτερικά σε κάθετη διάταξη σε σχέση με τη προηγούμενη ο "σφόνδυλος" που αποτελεί μια μικρή σφαίρα που περιστρέφεται υπό μορφή σβούρας. Τα σημεία έδρασης της κάθε στεφάνης καθώς και του σφονδύλου εξασφαλίζουν την ελεύθερη περιστροφή όλων των τμημάτων της διάταξης, δηλαδή του γυροσκοπίου σαν σύνολο.

3.3 3ο κριτήριο διαχωρισμού: Αρχή λειτουργίας της συσκευής

Βάση του τρόπου λειτουργίας της εκάστωτε συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας μπορούμε να κάνουμε έναν ακόμη διαχωρισμό σε 4 κατηγορίες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω.

3.3.1 Πλωτοί ταλαντευόμενοι συλλέκτες (Floating-Oscillating Body WEC's Devices)

Αυτός ο τύπος WEC αποτελεί μια πλωτή κατασκευή που μετακινείται υπό την επίδραση των κυματισμών. Η παλινδρομική κίνηση που εκτελεί μπορεί να έχει πολλές διευθύνσεις και φορές, δηλαδή μπορεί να είναι κατακόρυφη (heave), οριζόντια (surge), περιστροφική (pitch) ή και κάποιος συνδυασμός από αυτές. Επί πλέον αυτή η ταλαντευόμενη κίνηση μπορεί να προκληθεί είτε από μια απόλυτη κίνηση του σώματος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας, είτε από τις συζευγμένες κινήσεις δύο ή περισσότερων σωμάτων.



Εικόνα 26 : Βαθμοί ελευθερίας ενός πλωτού WEC

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου συσκευών είναι οι σημειακοί απορροφητές ή point absorbers που αναφέρθηκαν στην §3.2.1. Ένα δεύτερο παράδειγμα πλωτών ταλαντευόμενων συλλεκτών με πολλαπλούς όμως point absorbers είναι η τεχνολογία *Wavestar*. [63] [64] [65]

Η εταιρία *Wavestar* κατασκευάζει WEC's μεγάλων μεγεθών από το 2003. Η μεγαλύτερη κατασκευή εγκαταστάθηκε στο *Hanstholm* της Δανίας το 2009 και είναι μια εγκατάσταση που παρέχει αδιαλείπτως ισχύ στο δίκτυο, της τάξεως των 600 kW. Η απόφαση της εγκατάστασης σε βιομηχανικό επίπεδο έγινε έπειτα από επιτυχημένες πειραματικές δοκιμές δύο ετών. Το όραμα σχετικά με αυτού του τύπου την κατασκευή είναι το να χρησιμοποιηθεί και ως πλατφόρμα για την εγκατάσταση πλωτών ανεμογεννητριών, έτσι ώστε να λειτουργήσει ως υβριδική κατασκευή αξιοποίησης τόσο της κυματικής ισχύος, όσο και αιολικού δυναμικού.

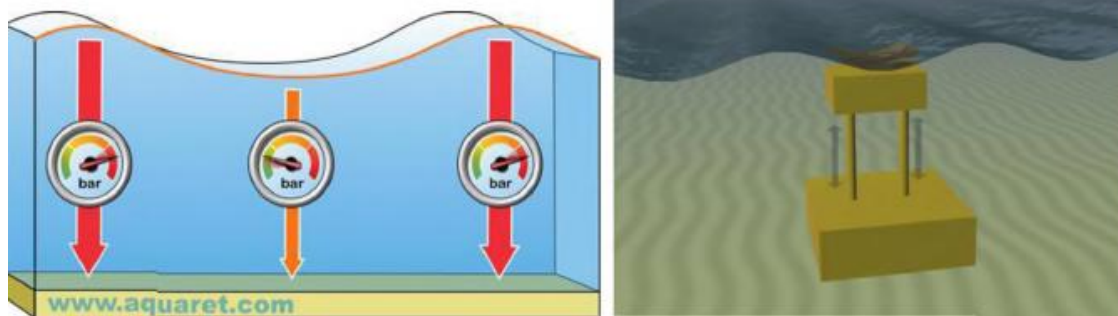
Ο εν λόγω WEC αποτελείται από 20 περίπου πλωτήρες σε σχήμα ημικυκλίου, ο καθένας από τους οποίους έχει διάμετρο 6 μέτρων. Αυτός ο πλωτήρας συνδέεται με την κεντρική πλατφόρμα μέσω ενός αρθρωτού βραχίονα 12 μέτρων. 10 τέτοια συστήματα πλωτήρα – βραχίονα τοποθετούνται σε κάθε πλευρά της κεντρικής πλατφόρμας. Όταν τα κύματα προσπίπτουν πάνω στους πλωτήρες τους αναγκάζουν να κινηθούν παλινδρομικά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτή η ισχύς αυτής της κινήσεως μεταφέρεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος (Power take off) σε μια ηλεκτρογεννήτρια, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ισχύ. Η κεντρική πλατφόρμα περιέχει όλο τον τεχνολογικό εξοπλισμό και τα συστήματα ελέγχου πάνω από την στάθμη της θάλασσας, πράγμα που μειώνει το κόστος της κατασκευής – συντήρησης κατά πολύ και δίνοντας της ταυτόχρονα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο κάθε βραχίονας συνδέεται με δύο συστήματα ανύψωσης τα οποία μπορούν να ανυψώσουν τους επί μέρους ταλαντευόμενους πλωτήρες σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.



Εικόνα 27 : Σχήμα προσομοίωσης της κατασκευής Wavestar σε κατάσταση λειτουργίας (αριστερά) και σε κατάσταση παύσης λόγω καταιγίδας (δεξιά) [63]

3.3.2 Βυθισμένοι μετατροπείς διαφορικής πίεσης (submerged pressure differential)

Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο είναι παρεμφερές με αυτό των Point Absorbers που αναλύθηκαν στην §3.2.1. Η διαφορά τους με αυτούς είναι ότι είναι πλήρως βυθιζόμενη συσκευή και όχι στην επιφάνεια της θάλασσας. Συνήθως εγκαθίσταται κοντά στην ακτή και προσαρτάται στον πυθμένα. Η μεταφορά των κυματισμών προκαλεί άνοδο (όταν διέρχονται οι κορυφές) και πτώση (όταν διέρχονται οι κοιλίες) στο ανώτερο σημείο της συσκευής. Αυτή η διαδικασία προκαλεί διαφορά υδροστατικής πίεσης η οποία με την σειρά της εξαναγκάζει την συσκευή να εκτελέσει μια κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση. Πρόκειται για το Φαινόμενο του Αρχιμήδη.



Εικόνα 28 : Σχηματική αναπαράσταση της πίεσης στον πυθμένα από το κύμα (αριστερά) και η τυπική μορφή μετατροπέα διαφορικής πίεσης (δεξιά) [27]

Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η συσκευή *Archimedes Wave Swing (AWS)*. Αποτελείται από δύο κύρια μέρη: έναν κυλινδρικό θάλαμο που βρίσκεται στον πυθμένα και είναι γεμάτος με αέρα και έναν επί πλέον κύλινδρο που βρίσκεται από πάνω του. Καθώς η κορυφή του κυματισμού διέρχεται πάνω από το συσκευή, η πίεση του σε αυτό το σημείο συμπιέζει τον αέρα μέσα στον κύλινδρο, μετακινώντας το ανώτερο κύλινδρο προς τα κάτω. Καθώς περνάει μια κοιλία του κυματισμού, η πίεση νερού πάνω από την συσκευή μειώνεται και έτσι ο ανώτερος κύλινδρος ανεβαίνει ξανά προς τα πάνω.

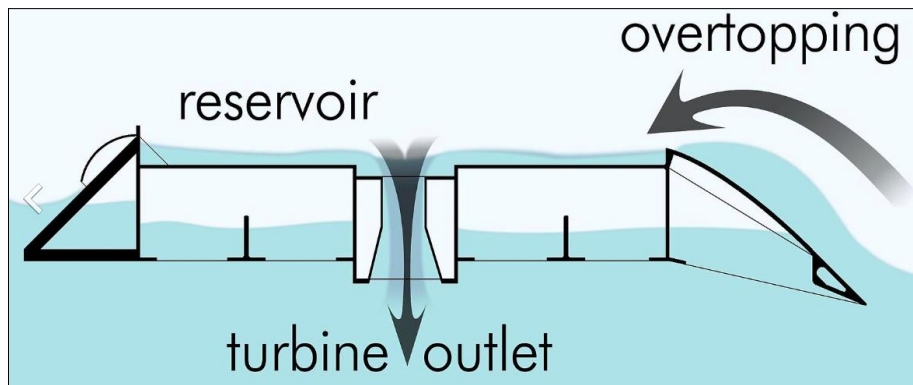
Ένα πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι το γεγονός ότι είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό και έτσι δεν εκτίθεται στα επικίνδυνα φορτία λόγω πτώσης που υφίστανται οι πλωτές συσκευές. Επίσης για τον ίδιο λόγο δεν υπάρχει καμία απολύτως οπτική όχληση. Ωστόσο πρόκειται για μια συσκευή η οποία δεν μπορεί να συντηρηθεί εύκολα. Επίσης λόγω του ότι είναι πακτωμένη στον πυθμένα, βρίσκεται συνήθως κοντά στην ακτή και σε μικρά βάθη νερού.



Εικόνα 29 : Θαλάσσιο πάρκο με WEC's τύπου AWS

3.3.3 Συσκευές υπερχειλίσσης (Overtopping Devices)

Τα συστήματα αυτά είναι πλωτές ή σταθερές στην ακτή δεξαμενές οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυματισμών σε στάθμη υψηλότερη από αυτή της θάλασσας. Η διαφορά της στάθμης αξιοποιείται στην κίνηση του νερού κατακόρυφα προς τα κάτω μόλις αυτό εισέλθει στην δεξαμενή. Το νερό διέρχεται από διέρχεται μέσα από έναν αριθμό στροβίλων, η περιστροφική κίνηση των οποίων αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ας δούμε δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών. [36] [38] [66] [67] [68]



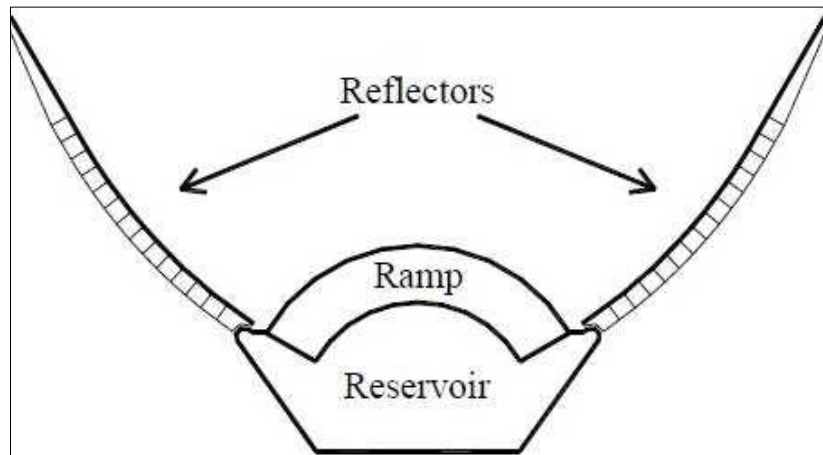
Εικόνα 30 : Η αρχή λειτουργίας μιας συσκευής υπερχειλίσσης

Το πρώτο παράδειγμα είναι η διάταξη *Wave Dragon* [68] είναι ένας WEC, τύπου Terminator και Overtopping, ο οποίος είναι αγκυρωμένος με μη τεντωμένο αλυσσοειδές όπως ακριβώς και ένα πλοίο. Τοποθετείται σε σχετικά μεγάλα βάθη νερού (25 μέτρα και άνω) εξασφαλίζοντας έτσι την παραγωγή ενέργειας από κυματισμούς υψηλού δυναμικού. Η μονάδα περιλαμβάνει μια κεντρική πλατφόρμα, με μια καμπύλη ράμπα η οποία καταλήγει σε μια μεγάλη δεξαμενή νερού εξοπλισμένη με μια σειρά από υδροστροβίλους. Επίσης αποτελείται από δύο πλευρικά καμπύλα «φτερά» τα οποία ανακλούν και συσσωρεύουν τα κύματα, οδηγώντας τα έτσι προς την κεντρική πλατφόρμα.



Εικόνα 31 : Η πιλοτική κατασκευή *Wave Dragon* που βρίσκεται 1,7 km έξω από την ακτή Pembrokeshire στην Ουαλία (Ηνωμένο Βασίλειο)

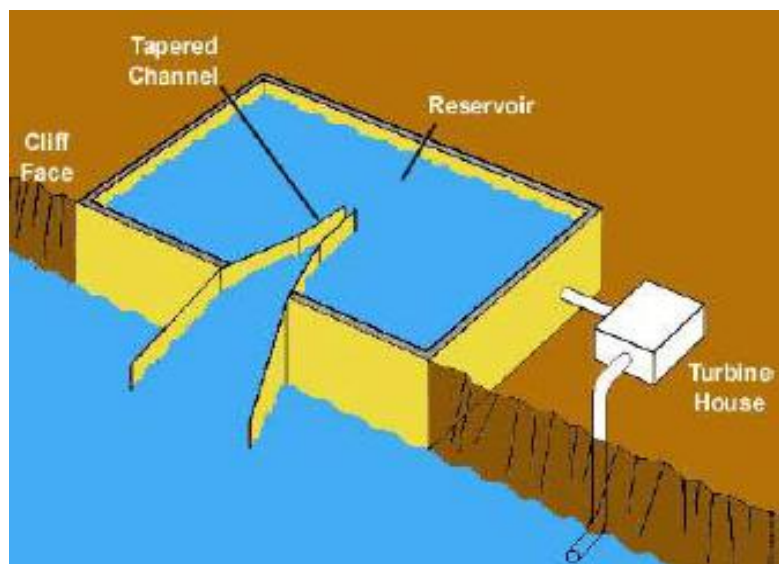
Η συσκευή αυτή επιτρέπει στα προσπίπτοντα κύματα να υπερβούν μια ράμπα, η οποία ανεβάζει το νερό σε μια δεξαμενή η οποία βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Στην συνέχεια το νερό απελευθερώνεται από την δεξαμενή και διέρχεται μέσα από έναν αριθμό στροβίλων, η περιστροφική κίνηση των οποίων αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το νερό που διέρχεται από τους στροβίλους, επιστρέφει στη θάλασσα μέσω σωλήνων βύθισης στη βάση της μονάδας.



Εικόνα 32 : Το σχεδιάγραμμα της κατασκευής Wave Dragon

Η συσκευή Wave Dragon έχει σχεδιαστεί ώστε να παραμένει μέσα σε μια καθορισμένη περιοχή κίνησης όσον αφορά την κατεύθυνση των κυμάτων και τα παλιρροιακά ρεύματα. Είναι στερεωμένο σε έναν πλωτήρα που παραμένει ουσιαστικά ακίνητος (σε κάτοψη). Το σύστημα αγκυρώσεως της συσκευής χαρακτηρίζεται από έξι έως οκτώ κλάδους αγκυρώσεως, κατασκευασμένες από βαρύ σκυρόδεμα και μια σειρά αλυσωτών (χαλύβδινων) γραμμών αγκυρώσεως (χαλύβδινες αλυσίδες) στερεωμένες σε έναν πλωτήρα. Επίσης υπάρχει ένα επί πλέον σύστημα αγκυρώσεως το οποίο εμποδίζει την περιστροφή της κατασκευής.

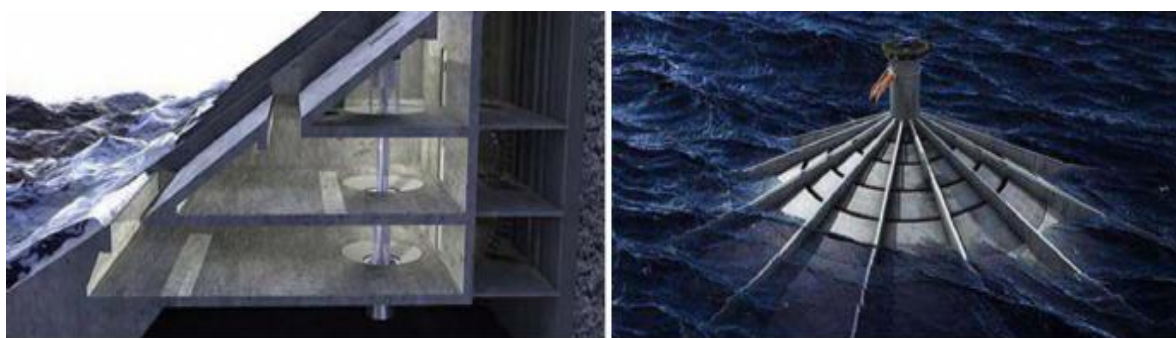
Ένα δεύτερο παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι η διάταξη *Tarchan* («Tapered channel» ή «κωνοειδές κανάλι» στα ελληνικά) [69] η οποία ανήκει και στην κατηγορία των επάκτιων WEC's. Επινοήθηκε από την επιστημονική ομάδα του Even Mehlum στην Νορβηγία και αποτελείται από δύο βασικά μέρη: 1^ο από ένα κλειστό κανάλι το οποίο έχει μεγάλο άνοιγμα στην αρχή και στενεύει προς το τελικό του άκρο, το οποίο συλλέγει το νερό της θάλασσας και 2^ο από μια δεξαμενή συλλογής η οποία περιέχει και ένα υδροηλεκτρικό σύστημα παραγωγής ενέργειας.



Εικόνα 33 : Το σχεδιάγραμμα της συσκευής Tarchan

Η κεντρική ιδέα του συστήματος αυτού δεν διαφέρει πολύ από το παραδοσιακό υδροηλεκτρικό σύστημα καθώς συλλέγει θαλασσινό νερό με την βοήθεια του καναλιού το οποίο ανέρχεται στην δεξαμενή, ενώ το στένεμα του καναλιού, αυξάνει την ταχύτητα εισροής. Η δεξαμενή συλλέγει νερό σε ύψος μέχρι και τα 5 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Με αυτόν τον τρόπο η κινητική ενέργεια των κυματισμών μετασχηματίζεται σε δυναμική ενέργεια στο εσωτερικό της δεξαμενής. Το αποθηκευόμενο νερό διοχετεύεται ξανά στην θάλασσα αφού πρώτα διέλθει μέσα από ένα υδροστρόβιλο τύπου *Karlan*. Ο υδροστρόβιλος περιστρέφεται και η κίνηση του αυτή περνάει σε μια ηλεκτρογεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται ή διοχετεύεται απ' ευθείας στο δίκτυο. Τα συστήματα αυτά έχουν όλα τα προτερήματα που έχουν οι επάκτιες συσκευές απόληψης κυματικής ενέργειας (βλέπε §3.1.1), έχουν λίγα μηχανικά κινούμενα τμήματα, άρα και αντοχή και χαμηλό κόστος συντήρησης και τέλος μεγάλη αξιοπιστία.

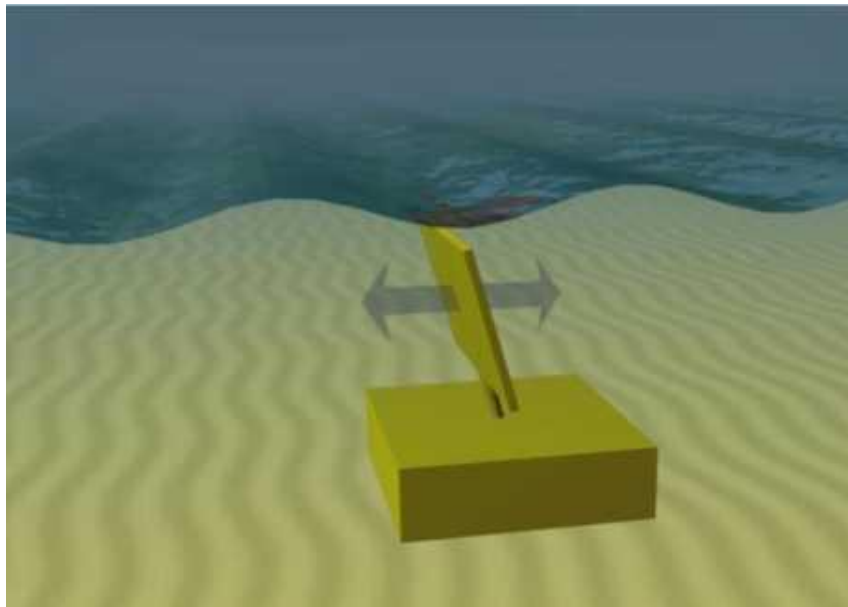
Μια Τρίτη και πιο εξελιγμένη μορφή overtopping WEC είναι η νορβηγική τεχνολογία “Seawave Slot-Cone Generator – SSG” , η οποία εφαρμόζει την ίδια τεχνική υπερχειλίσσης με τις παραπάνω συσκευές, αλλά αποθηκεύει το εισερχόμενο νερό σε πολλούς θαλάμους και σε πολλά διαφορετικά ύψη από την θαλάσσια επιφάνεια. Το νερό λοιπόν διέρχεται από πολλούς στρόβιλους, αυξάνοντας έτσι την απόδοση σε παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 34 : (Αριστερά) επάκτια και (δεξιά) υπεράκτια συσκευή υπερχειλίσσης τύπου SSG [70]

3.3.4 Συσκευές οριζόντιας Παλινδρόμησης - Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα τύπου των WEC, που ανήκει και στις κατηγορίες terminal (§3.2.3) offshore (§3.1.2), είναι οι συσκευές οριζόντιας Κυματικής Παλινδρόμησης - Oscillating Wave Surge Converter (OWSC). Πρόκειται για έναν συλλέκτη κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, ο οποίος εδράζεται πάνω σε περιστρεφόμενο βραχίονα που είναι αγκυρωμένος κοντά στον πυθμένα και εκμεταλλεύεται την οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού των θαλάσσιων κυμάτων. Ο βραχίονας ταλαντεύεται ως ανάστροφο εκκρεμές λόγω της κίνησης των σωματιδίων του νερού των κυμάτων και τοποθετούνται σε βάθη μεγαλύτερα των 20m (πρόκειται δηλαδή για παράκτια ή υπεράκτια τεχνολογία).



Εικόνα 35 : Σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της συσκευής OWSC

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι οι Oyster, bioWave Waveroller (WaveRoller Tehnology, 2007) Poseidon's Organ, OWEL WEC και C-Wave. Ας δούμε ένα από αυτά τα παραδείγματα λίγο πιο αναλυτικά:

Η συσκευή *Oyster* είναι ένας WEC της σκοτσέζικης εταιρίας *Aquamarine Power* ο οποίος εγκαθίσταται στον πυθμένα της θάλασσας και σε απόσταση σχετικά κοντά στην ακτή, καθώς εκεί υπάρχει ευκολότερη πρόσβαση για εγκατάσταση – συντήρηση και επί πλέον δεν εμφανίζονται ισχυρά κύματα ικανά να προκαλέσουν βλάβες ή και καταστροφή της κατασκευής. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αιχμής της κάθε μονάδας *Oyster* είναι μεταξύ 300 και 600kWn ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της. Μια «φάρμα κυμάτων» εμπορικής κλίμακας αποτελούμενη από 10 μονάδες *Oyster* εγκατεστημένες σε σειρά θα παράγει μέχρι και 6MW ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα *Oyster* είναι απλή. Η συσκευή αποτελείται από ένα είδος πτερυγίου ταλάντωσης εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 12 μέτρων. Αυτή η συσκευή αποσπά την ενέργεια των διερχόμενων θαλάσσιων κυμάτων και τη διαβιβάζει ως υδραυλική ισχύ θαλασσινού νερού σε μία υδροηλεκτρική μονάδα

μετατροπής στην ακτή. Αυτό γίνεται με τη κίνηση εμβόλων διπλής δράσης που τροφοδοτούν με συμπιεσμένο θαλασσινό νερό τη μονάδα PTO (Power Take-Off) του Oyster. Όσον αφορά την τοποθεσία εγκατάστασης, τα μοντέλα Oyster έχουν σχεδιαστεί για τοποθέτηση σε βάθος περίπου 10 μέτρων σε θαλάσσιες περιοχές όπου το μέσο κυματικό κλίμα είναι μεγαλύτερο από 15kW/m. [27]



Εικόνα 36 : (Αριστερά) Μεταφορά συσκευής Oyster σε πραγματικό μέγεθος και (Δεξιά) η συσκευή Oyster σε λειτουργία

3.4 4ο κριτήριο διαχωρισμού: Τρόπος μετατροπής της κυματικής ισχύος σε ηλεκτρική (Power Take Off - PTO)

Η μέθοδος απόληψης της κυματικής ενέργειας από την εκάστωτε τεχνολογία WEC ποικίλλει. Η πιο συνηθισμένη πρακτική είναι η παραγωγή ενέργειας από τη σύζευξη ενός περιστροφικού μηχανικού στοιχείου με μια ηλεκτρική γεννήτρια υψηλής ταχύτητας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 37. Το περιστρεφόμενο μηχανικό στοιχείο βρίσκεται σε σύνδεση με κατάλληλα συστήματα μετάδοσης για τη μετατροπή της γραμμικής ταλάντωσης της κατασκευής σε μια περιστροφική κίνηση. Ας δούμε μια σύντομη περιγραφή για τους 3 βασικούς τύπους του τρόπου μετάδοσης της κίνησης (Power Take Off – PTO) [71]:

3.4.1 Μετατροπή μέσω πνοής αέρα – Μεταφορά μέσω Στροβίλου (Pneumatic PTO - Turbine Transfer)

Η ροή του ρευστού (είτε πρόκειται για αέρα, είτε για νερό) περιστρέφει έναν στρόβιλο ο οποίος είναι απευθείας συνδεδεμένος με μια γεννήτρια παραγωγής ρεύματος. Τα ζητήματα και τα προβλήματα που σχετίζονται με την μεταβλητότητα της ταχύτητας αυτών των στρόβιλων είναι παρόμοια με αυτά που σχετίζονται με την τεχνολογία απόληψης αιολικής

ενέργειας. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν παρουσιάζονται περιβαλλοντικοί κίνδυνοι σε περίπτωση διαρροών. Ακόμη, εάν το διερχόμενο ρευστό είναι ατμοσφαιρικός αέρας συνήθως γίνεται χρήση ενός στροβίλου τύπου *Wells* και μπορούν να αξιοποιηθούν ακόμη και οι μικρές τιμές της ταχύτητας του. Από την άλλη όμως, τα σχετικά χαμηλά επίπεδα απόδοσης, η δυσκολία κατά την εκκίνηση του στροβίλου και τα υψηλά επίπεδα θορύβου κατά την διάρκεια της λειτουργίας του είναι μερικά σημαντικά μειονεκτήματα. Εάν αντί για αέρας διέρχεται θαλασσινό νερό δια του στροβίλου, τότε η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς κατά την κίνηση του σε σχέση με τον αέρα, η μόλυνση και η διάβρωση του μηχανικού συστήματος είναι μερικά επί πλέον σοβαρά μειονεκτήματα.

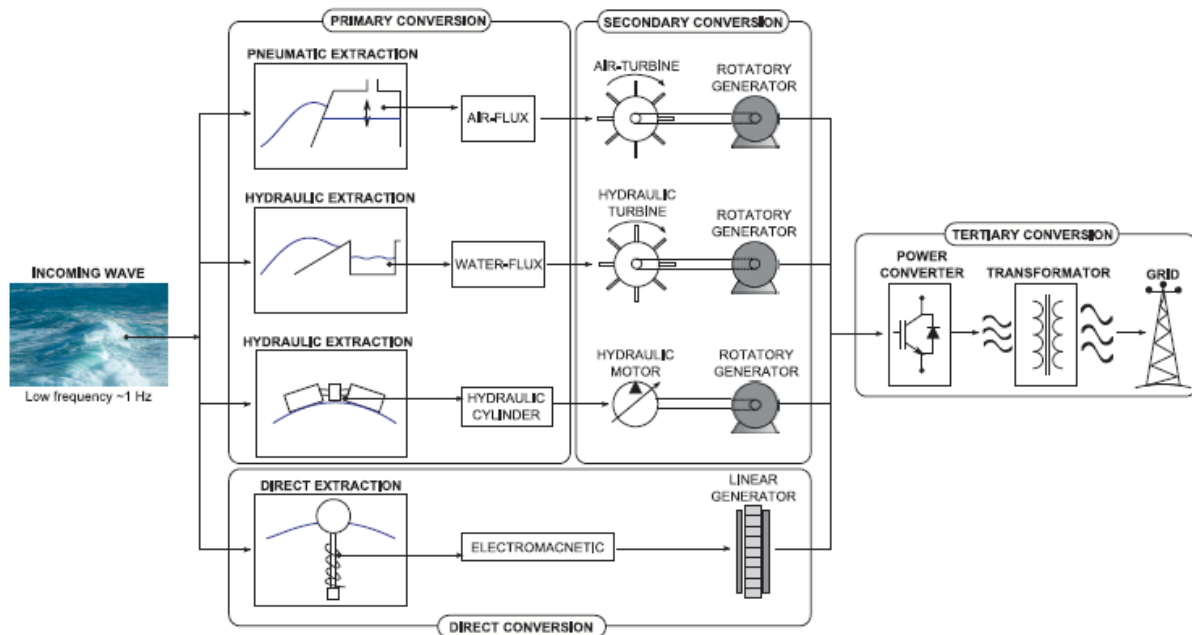
3.4.2 Υδραυλική Μετατροπή - Μεταφορά μέσω στροβίλου/μοτέρ (Hydraulic PTO - Turbine/Motor Transfer)

Μια δεύτερη πιθανότητα είναι η χρήση συσσωρευτών και βαλβίδων ελέγχου σε υδραυλικό κύκλωμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταλάντωση ενός κινούμενου μέρους του κύριου σώματος του WEC (όπως είναι ένα έμβολο στην περίπτωση των *Point Absorbers*) το οποίο ονομάζεται «ενεργοποιητής», μπορεί μέσω της κίνησης του να ωθήσει τη ροή ενός ρευστού στο κύκλωμα και τελικά να θέσει σε λειτουργία έναν υδραυλικό κινητήρα ή έναν σρόβιλο, ο οποίος βρίσκεται σε σύζευξη με την ηλεκτρική γεννήτρια. Οι υψηλές εσωτερικές πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την διαδικασία αυτή, η διαστασιολόγηση του μεγέθους και του βάρους της κατασκευής, οι εξωτερικές δυνάμεις δράσης που ασκούνται στο σύστημα από τους θαλάσσιους κυματισμούς, η συγκράτηση του θαλασσινού νερού, η στεγανοποίηση, οι περιορισμοί στο εύρος της κίνησης της μηχανής, καθώς και η συντήρηση του συστήματος συνολικά, αποτελούν θέματα έντονης θεωρητικής και πειραματικής μελέτης. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι ο τρόπος αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Οι μπαταρίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους εφαρμογές εξακολουθούν να είναι πολύ δαπανηρές, ενώ μια άλλη εναλλακτική λύση υψηλής απόδοσης που είναι η αποθήκευση της ενέργειας ως υδραυλικό δυναμικό σε μια δεξαμενή αποθήκευσης, προκαλεί αρκετά περιβαλλοντικά ζητήματα και επιβαρύνει με επιπλέον κόστος την κατασκευή.

3.4.3 Ηλεκτρική γεννήτρια γραμμικού τύπου (Electrical linear generator)

Αρχικά, αυτές οι τεχνολογίες αποδείχθηκαν πολύ «βαριές», δαπανηρές και αναποτελεσματικές. Με την πρόοδο του χρόνου και την χρήση πιο σύγχρονων υλικών, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί στο σήμερα να είναι μια εφικτή και βιώσιμη εναλλακτική πρόταση για την μετατροπή της κίνησης της μηχανής σε ηλεκτρική ισχύ. Η άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ είναι πολύ απλούστερη από τις προηγούμενες μορφές μετάδοσης της κίνησης. Αυτό το σύστημα αποτελείται από έναν «μεταφραστή», εξοπλισμένο με μόνιμους μαγνήτες, ο οποίος παίζει τον ρόλο του ρότορα και από έναν σταθερό ή μεγάλης αδράνειας «στάτορα» με σπειροειδείς περιελίξεις. Το βασικό εμπόδιο εφαρμογής αυτής της μεθόδου μετάδοσης, είναι η επεξεργασία του

παραγόμενου σήματος και η μετατροπή του σε συμβατή μορφή με αυτήν που μπορεί να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό δίκτυο.



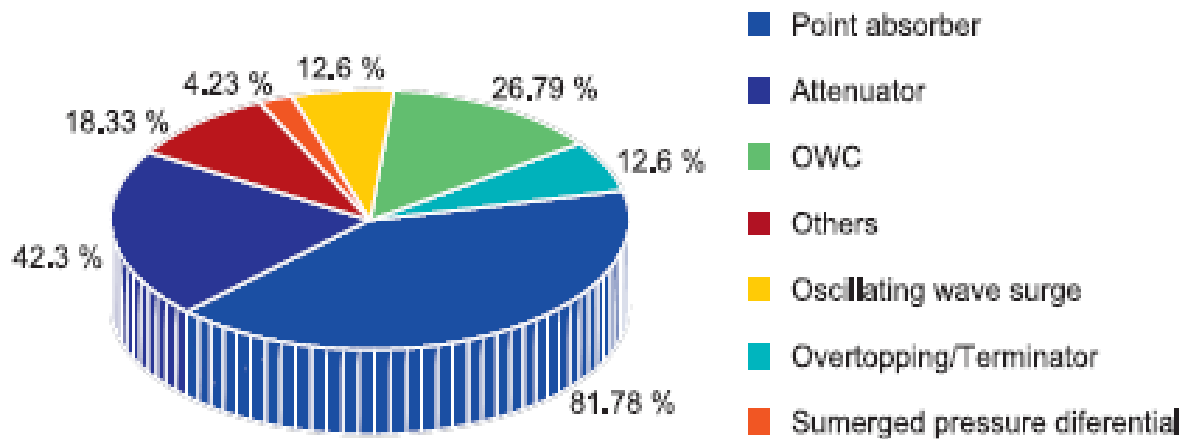
Εικόνα 37 : Τρόποι μετάδοσης της κίνησης του WEC, στην γεννήτρια για την απόληψη της κυματικής ενέργειας [52]

Κλείνοντας το παρόν κεφάλαιο θα μπορούσαμε να επαναλάβουμε αυτό που ειπώθηκε και στην αρχή, έχοντας όμως κάνει μια γενική αναφορά σε αρκετές αναπτυσσόμενες τεχνολογίες και εφαρμογές: Υπάρχει μια τεράστια γκάμα από WEC's οι οποίοι ποικίλουν τόσο σε επίπεδο τεχνοτροπίας, όσο και σε επίπεδο σχεδιασμού.

Υπάρχουν περίπου 157 ευρεσιτεχνίες οι οποίες είναι γνωστές από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Θαλάσσιου Εξοπλισμού (European Marine Equipment Council – EMEC) [72]. Οι μισές περίπου από αυτές τις ευρεσιτεχνίες μελετώνται και αναπτύσσονται σε Πανεπιστήμια και εταιρίες της Ευρώπης και κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ωστόσο, όπως ειπώθηκε και παραπάνω υπάρχουν χιλιάδες άλλες πατέντες οι οποίες «τρέχουν» σε θεωρητικό ή και πειραματικό στάδιο.

Κάποιες από ευρεσιτεχνίες σχετικές με WEC's είναι πιο ανεπτυγμένες από άλλες σε πολυπλοκότητα, σε τεχνολογικό επίπεδο, σε επίπεδο ερευνητικής ανάπτυξης και βελτίωσης. Σε γενικές γραμμές ωστόσο, όπως ειπώθηκε και στην αρχή του 2^{ου} κεφαλαίου, η έρευνα γύρω από την αξιοποίηση της ενέργειας των κυματισμών και των αντίστοιχων τεχνολογιών βρίσκεται σε πολύ πιο πρωτόλειο στάδιο από αυτό στο οποίο βρίσκονται άλλες τεχνολογίες που αφορούν Α.Π.Ε. (όπως είναι για παράδειγμα η ηλιακή και η αιολική ενέργεια), αλλά και από τις τεχνολογίες που αφορούν τα ορυκτά καύσιμα και τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Το πιο σημαντικό όμως είναι πως δεν υπάρχει κάποια ευρεσιτεχνία WEC η οποία να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες

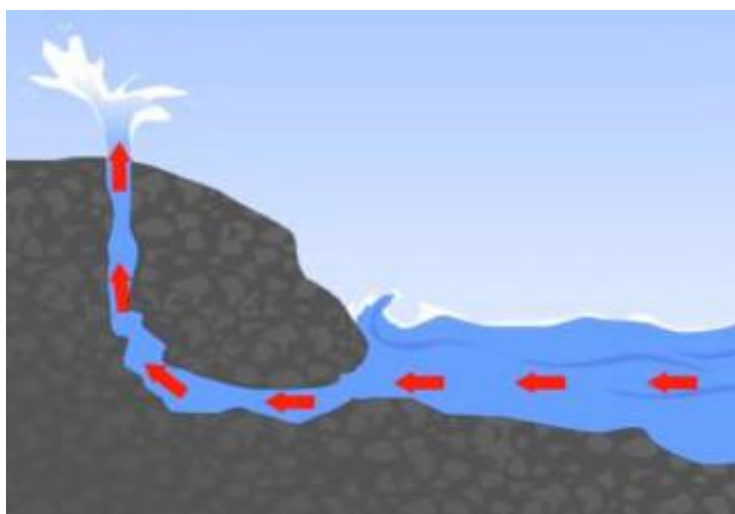
έτσι ώστε να επικρατήσει στην έρευνα και την αγορά. Πολλά σχέδια έχουν κατασκευαστεί σε πλήρη κλίμακα, άλλα έχουν δοκιμασθεί σε πραγματικές συνθήκες ωκεανού, αλλά κανένα από αυτά δεν έχει τελειοποιηθεί. Παρ όλα αυτά οι εταιρίες δείχνουν μια αυξανόμενη τάση για την κατασκευή νέων και την τελειοποίηση των ήδη υπάρχοντων τεχνολογιών, πράγμα που προμηνύει ένα ευνοϊκό μέλλον για την θαλάσσια τεχνολογία των συσκευών ανάκτησης θαλάσσιας ενέργειας.



Διάγραμμα 11 : Η ποσοστιαία τεχνολογική ανάπτυξη WEC's σε παγκόσμιο επίπεδο. [52]

4. Η παλλόμενη στήλη ύδατος και οι επικρατέστερες τεχνολογίες

Η ιδέα της **παλλόμενης στήλης ύδατος (ΠΣΥ)** ή *Oscillating Water Column (OWC)*, αποτελεί μια μοναδική σύλληψη μεταξύ των άλλων τεχνολογιών των WEC's καθώς το βασικό μέρος του συστήματος (δηλαδή ο θάλαμος συλλογής της ενέργειας των κυματισμών που θα δούμε παρακάτω) μπορεί να θεωρηθεί ως μια «φυσική δομή». Ο λόγος είναι επειδή προσομοιώνει τον **γεωλογικό φυσητήρα (blowhole)** ο οποίος είναι ένα θαλάσσιο σπήλαιο το οποίο έχει αναπτυχθεί με τα χρόνια μέσα σε βράχους όπως φαίνεται στην εικόνα 38. Καθώς προσπίπτουν οι κυματισμοί πάνω στον βράχο και το νερό εισέρχεται με πίεση στον φυσητήρα καταλήγει να εκτιναχθεί κατακόρυφα πάνω από την επιφάνεια του βράχου. [73]



Εικόνα 38 : Σχηματική αναπαράσταση του γεωλογικού φυσητήρα [27]

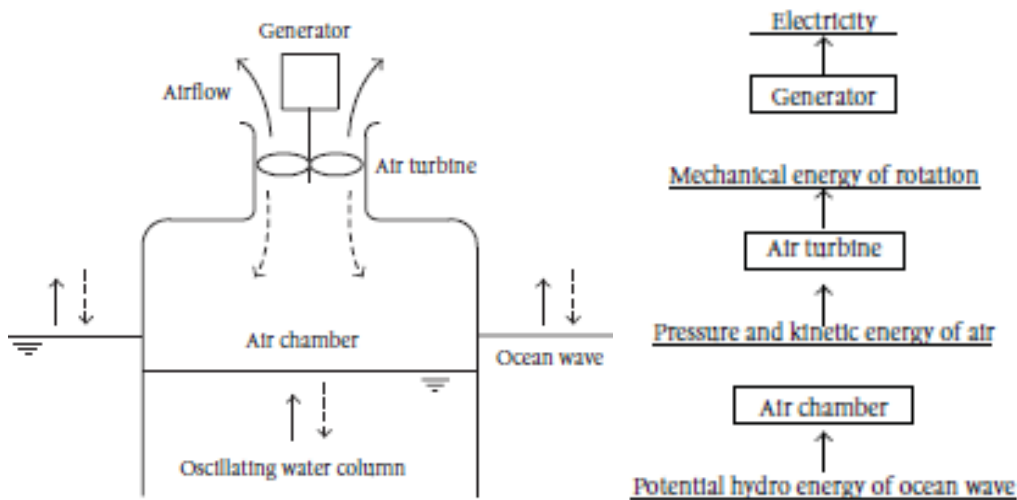
Η τυπική μορφή μιας διάταξης Παλλόμενης Στήλης Ύδατος (ΠΣΥ) αποτελείται από δύο μέρη:

1. Τον **θάλαμο συλλογής** (προσομοιώνει τον γεωλογικό φυσητήρα) που προσλαμβάνει την ενέργεια των κυματισμών και την μεταφέρει υπό την μορφή αυξανόμενης πίεσης στον αέρα εντός του.
2. Το **σύστημα μετατροπής** της προσλαμβάνουσας κυματικής ισχύος σε ωφέλιμη περιστροφική ισχύς (Power Take-Off System – PTO, βλ. εδάφιο 3.4). Το σύστημα αυτό είναι ένας συνδυασμός του αεροστροβίλου και μιας επαγωγικής γεννήτριας η οποία συνδέεται μαζί του μέσω του δρομέα.¹⁴

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης αυτής είναι σχετικά απλή: Ο θάλαμος συλλογής είναι μια δομική κατασκευή, ημιβυθισμένη και εσωτερικά είναι κενός. Έχει ένα άνοιγμα προς την πλευρά της θάλασσας το οποίο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Μέχρι ενός σημείου λοιπόν, ο θάλαμος περιέχει θαλασσινό νερό, η στάθμη του οποίου είναι η ίδια με

¹⁴ **Δρομέας** είναι ο περιστρεφόμενος άξονας που βρίσκεται στο κέντρο του αεροστροβίλου. Μέσω αυτού μεταδίδεται η περιστροφική ισχύς της ανεμογεννήτριας στην ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

αυτήν της θάλασσας όταν αυτή βρίσκεται σε πλήρη ηρεμία. Πάνω από την επιφάνεια του νερού υπάρχει ατμοσφαιρικός αέρας.

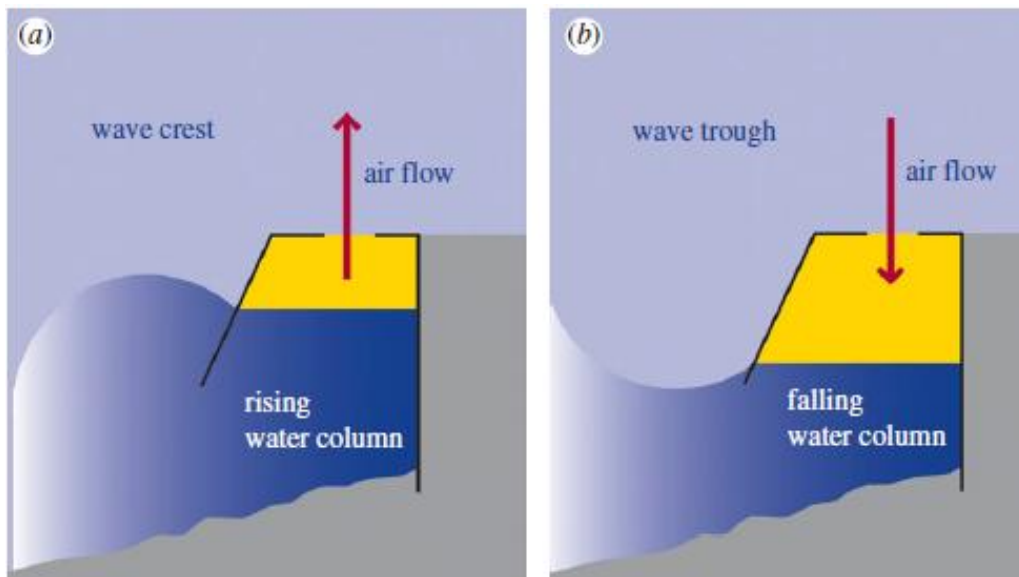


Εικόνα 39 : Σχηματική απεικόνιση της ΠΣΥ (αριστερά) και η αλυσίδα μετατροπής ενέργειας της ΠΣΥ (δεξιά) [74]

Καθώς προσπίπτουν οι διερχόμενοι κυματισμοί πάνω στον θάλαμο, η στήλη του νερού εντός του αρχίζει να εκτελεί μια παλινδρομική κατακόρυφη κίνηση. Η ταλαντευόμενη στήλη του νερού με την σειρά της συμπιέζει (κατά την άνοδο, δηλαδή κατά την διέλευση μιας κορυφής του κυματισμού) και εκτονώνει (κατά την κάθοδο, δηλαδή κατά την διέλευση μιας κοιλίας του κυματισμού) την υπερκείμενη στήλη του αέρα εντός του θαλάμου. Καθώς ο αέρας συμπιέζεται, ανέρχεται και οδηγείται προς τον αεροστρόβιλο ο οποίος περιστρέφεται. Στην συνέχεια καθώς εκτονώνεται, ο αέρας κατέρχεται οδηγούμενος πάλι προς τον αεροστρόβιλο ο οποίος είναι σχεδιασμένος για να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά σε κάθε περίπτωση.¹⁵

Με αυτόν τον τρόπο η παλινδρομική κίνηση του νερού δημιουργεί ρυθμικές διακυμάνσεις στην πίεση του αέρα ο οποίος τίθεται σε κίνηση και περιστρέφει τον αεροστρόβιλο. Η περιστροφική κίνηση του αεροστρόβιλου αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται όταν παρουσιάζεται το φαινόμενο του συντονισμού, δηλαδή όταν η συχνότητα ταλάντωσης του εισερχόμενου κυματισμού είναι η ίδια με την συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος νερού-αέρα εντός του θαλάμου.

¹⁵ Στην πλειονότητα τους οι διατάξεις ΠΣΥ έχουν αυτορυθμιζόμενους αεροστρόβιλους που περιστρέφονται κατά την ίδια φορά, ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης της ροής του αέρα που διέρχεται μέσα από αυτούς. Ο πιο συνηθισμένος αεροστρόβιλος που έχει αυτήν την ιδιότητα είναι ο αεροστρόβιλος *Wells*. Όλοι οι τύποι αεροστρόβιλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν θα περιγραφθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.



Εικόνα 40 : Η αρχή λειτουργίας της παλλόμενης στήλης ύδατος

Τα *πλεονεκτήματα* τους σε σχέση με τους υπόλοιπους WEC's είναι τα παρακάτω [73]:

- Είναι απλές κατασκευές και εύκολα συντηρήσιμες λόγω του ότι είναι (συνήθως) επάκτιες
- Δεν έχουν πολλά κινούμενα μέρη, πράγμα που μειώνει το κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και την πιθανότητα βλαβών.
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη εντός του νερού και αυτό τους δίνει μεγάλη διάρκεια ζωής μειώνοντας το ρίσκο βλάβης ή καταστροφής
- Μπορούν να εφαρμοσθούν σε πολλές διαφορετικές μορφές (πάνω σε βράχια, πάνω σε λιμενοβραχίονες, μέσα στην θάλασσα) παίζοντας ταυτόχρονα και τον ρόλο του κυματοθραύστη.

Τα *μειονεκτήματα* τους από την άλλη, είναι τα εξής:

- Για να εγκατασταθούν πάνω στην ακτή απαιτείται να υπάρχει μεγάλο βάθος στο συγκεκριμένο σημείο
- Λόγω της παρουσίας νερού και αέρα στο εσωτερικό τους, η διάβρωση τους είναι πιο σημαντική από αυτήν των πλήρως βυθισμένων συστημάτων WEC's
- Η απόδοση τους γενικά είναι χαμηλή, καθώς δεν αξιοποιούν άμεσα την κυματική ισχύ.¹⁶
- Ο θόρυβος που παράγει ο αεροστρόβιλος είναι πολύ ισχυρός, πράγμα που απαιτεί την εγκατάσταση του μακριά από κατοικημένες περιοχές ή και την χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών

¹⁶ Ακόμη η απόδοση τους μειώνεται σημαντικά όταν η κατασκευή λειτουργεί εκτός της ζώνης του συντονισμού.

4.1 Οι κατηγορίες της τεχνολογίας Π.Σ.Υ

Οι πρώτες διατάξεις ΠΣΥ σχεδιάστηκαν για να είναι σταθερές και εγκατεστημένες επί της ακτής, σε βράχια ή και σε κυματοθραύστες λιμανιών. Αργότερα και για λόγους βελτιωμένης απόδοσης, δοκιμάστηκαν και τεχνολογίες οι οποίες ήταν πλωτές – πακτωμένες ή και αγκυρωμένες κατασκευές – εγκατεστημένες στην ανοικτή θάλασσα. Οι τεχνολογίες της ΠΣΥ, οι οποίες θα παρουσιασθούν παρακάτω, είναι από τις πιο καλά μελετημένες και οι πιο τεχνολογικά ώριμες σε σχέση με αυτές των υπολοίπων WEC's. Επίσης οι τεχνολογίες αυτές έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες περισσότερο από κάθε άλλη τεχνολογία. Υπάρχουν λοιπόν τρεις βασικές κατηγορίες κυματικών μηχανών τύπου Π.Σ.Υ ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης:

- Οι **επάκτιες** σταθερές κατασκευές οι οποίες είναι εγκατεστημένες στην ακτογραμμή (*shoreline devices*)
- Οι σταθερές κατασκευές οι οποίες είναι εγκατεστημένες πάνω σε **λιμενοβραχίονες** ή κυματοθραύστες (*Breakwater devices*)
- Οι κατασκευές οι οποίες είναι **παράκτιες** και συνήθως αγκυρωμένες (πιο σπάνια πακτωμένες) στον πυθμένα.¹⁷ (*near shore devices*)

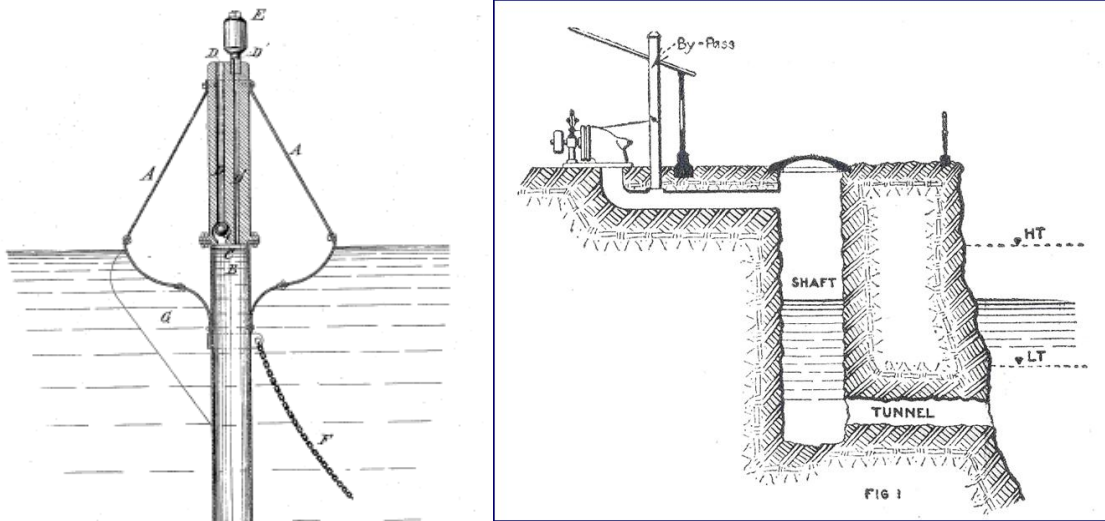
Πολλά από τα επί μέρους δομικά στοιχεία αυτών των κατασκευών και κατ'επέκταση οι μέθοδοι βελτιστοποίησης τους (όπως για παράδειγμα είναι η στροβιλογεννήτρια) είναι πανομοιότυπα. Ωστόσο υπάρχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με την μορφή και την γεωμετρία του θαλάμου εισαγωγής, καθώς και το μέγεθος το οποίο δύναται να έχουν όταν θα παραχθούν σε εμπορική κλίμακα. Οι παράκτιες τεχνολογίες γενικώς έχουν σχετικά μεγάλα μεγέθη καθώς δέχονται κυματισμούς μεγαλύτερης ισχύος, ενώ οι επάκτιες είναι πιο μικρές σε μέγεθος, καθώς με αυτόν τον τρόπο αξιοποιούν βέλτιστα το σχετικά μικρό κυματικό δυναμικό που φτάνει στις ακτές.

4.2 Οι παλαιότερες ευρεσιτεχνίες (1799-1978)

Η πρώτη ευρεσιτεχνία εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας καταγράφηκε το 1799 και αφορούσε ακριβώς αυτήν την τεχνολογία, δηλαδή την παλλόμενη στήλη ύδατος. Κατοχυρώθηκε στον Γάλλο μηχανικό *Pierre-Simon Girard* και στόχευε στην παραγωγή μηχανικής ενέργειας για τη λειτουργία βαρέων μηχανημάτων, όπως είναι οι αντλίες, οι μύλοι κτλ. Ωστόσο αυτή η ευρεσιτεχνία έμεινε στα σχέδια και δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Ακολούθησαν αρκετές άλλες τεχνολογίες κατά την διάρκεια του 19^{ου} αιώνα, όπως η **σημαδούρα-σφικτήρας** (*whistling buoy*), οι οποίες όμως δεν αξιοποιήθηκαν για την παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά κυρίως ως βοηθήματα ναυσιπλοΐας, δηλαδή ως συσκευές ακουστικής προειδοποίησης κτλ. Η πρώτη εφαρμοσμένη τεχνολογία ΠΣΥ για την παραγωγή

¹⁷ Ωστόσο μερικά είδη αυτού του τύπου Π.Σ.Υ όπως οι αξονοσυμμετρικές δομές (βλ. § 4.6.2) είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να λειτουργούν και σε μεγάλα βάθη και θεωρούνται **υπεράκτιες** συσκευές. Τις παράκτιες και υπεράκτιες δομές θα τις εντάξουμε στην αυτή κατηγορία ακολουθώντας την διεθνή βιβλιογραφία γύρω από το θέμα.

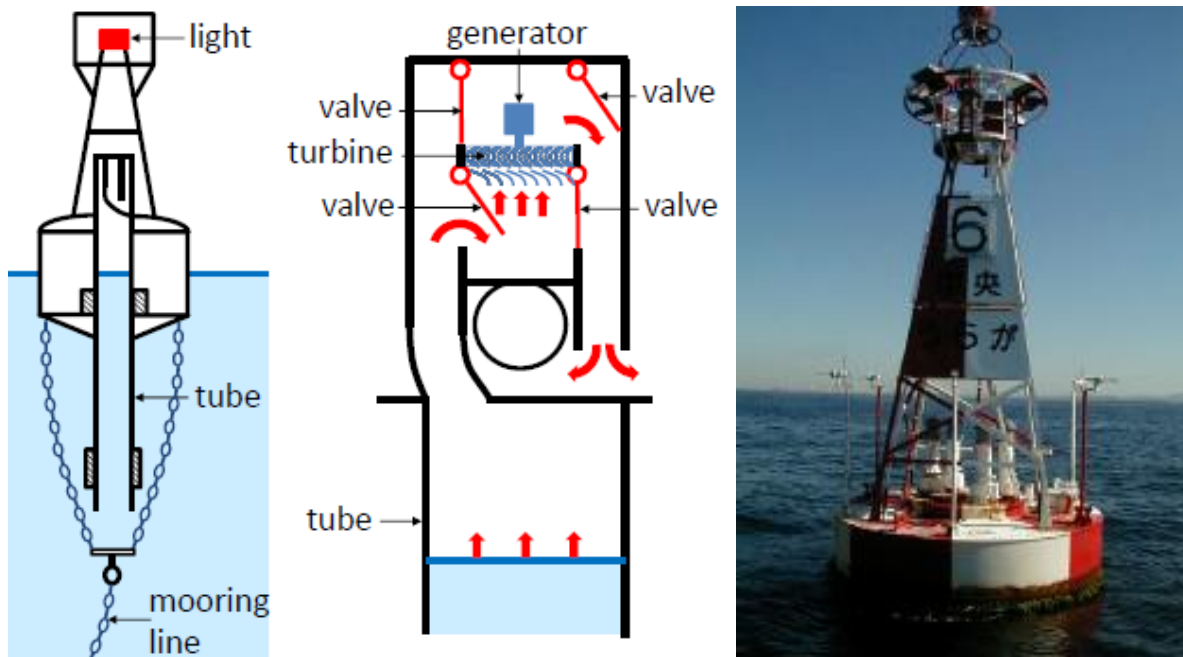
ηλεκτρικού ρεύματος κατασκευάστηκε το 1910 στο *Royan* της Γαλλίας για την ηλεκτροδότηση της οικίας του *Bochaux-Praceique*. [75, 53]



Εικόνα 41 : Σημαδούρα-σφικτήρας (whistling buoy) – αριστερά – και η εφαρμοσμένη τεχνολογία ΠΣΥ για την ηλεκτροδότηση της οικίας του *Bochaux-Praceique* – δεξιά

Η ανέλιξη στην τεχνολογία της παλλόμενης στήλης ύδατος έγινε κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1940 από έναν Ιάπωνα αξιωματικό του ναυτικού, τον **Yoshio Masuda** (1925-2009). Οι πρώτες έρευνες σχετικές με την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας είχαν να αντιμετωπίσουν ένα βασικό πρόβλημα: Το πώς θα μπορούσαν να μετατρέψουν την χαμηλή ταχύτητα και την υψηλή ισχύ των θαλάσσιων κυματισμών, σε «αντίστροφη» υψηλή ταχύτητα και χαμηλή ισχύ. Η υψηλή ταχύτητα είναι απαραίτητη για την λειτουργία μιας ηλεκτρογεννήτριας, ενώ η υψηλή ισχύς των κυματισμών πρέπει να γίνει ηπιότερη έτσι ώστε να μην καταστρέψει την κατασκευή.

Η λύση που εφάρμοσε ο Masuda το 1947 ήταν να δεσμεύσει την ενέργεια των κυματισμών εντός ενός ημιβυθισμένου κυλίνδρου, ο οποίος ήταν ανοικτός με το ένα άκρο του προς την θάλασσα. Έτσι κατασκευάστηκε η πρώτη πλωτή ΠΣΥ με όνομα «**Uraga**», η οποία αποτελείτο από μια μακριά κατακόρυφη στήλη που επεκτείνεται πάνω και κάτω από το κύμα, το οποίο καθώς διέρχεται επί της κυματικής μηχανής, προκαλούσε συμπίεση και αποσυμπίεση του αέρα εντός της στήλης. Ο παλλόμενος αέρας με την σειρά του κινούσε έναν αεροστρόβιλο μιας κατεύθυνσης (ο οποίος περιείχε βαλβίδες αντεπιστροφής για να μπορεί να περιστρέφεται κατά την διάρκεια και των δύο φορών κίνησης του αέρα). Το σύστημα στροβίλου – γεννήτριας παρήγαγε ρεύμα για την τροφοδοσία μιας φωτεινής σημαδούρας στον κόλπο της Οσάκα και την περισσευούμενη ενέργεια την αποθήκευε σε μπαταρίες για τις χρονικές περιόδους όπου δεν υπήρχε κυματισμός.



Εικόνα 42 : Το σχέδιο του πλωτήρα (αριστερά), οι λεπτομέρειες του μηχανικού συστήματος (στην μέση) και ο πραγματικός πλωτήρας ΠΣΥ «Uraga» του Masuda που χρησίμευε ως φωτεινός σηματοδότης (δεξιά) [73]

Αυτή η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε σε εμπορικό επίπεδο το 1965 τόσο στην Ιαπωνία, όσο και στην Αμερική και είναι διαθέσιμες ακόμη και σήμερα από την Ιαπωνική εταιρία *Ryokushisha*. Η παραγωγή σε ηλεκτρική ισχύς αυτών των συσκευών είναι αρκετά μικρή, αλλά αποτελούν την πιο συνήθη εφαρμογή ανάμεσα στις κυματικές μηχανές καθώς αποτελεί την παλαιότερη και πιο τελειοποιημένη τεχνολογία. Η καινοτομία του Masuda αποτέλεσε σταθμό στην θαλάσσια τεχνολογία καθώς απέδειξε πως τα κύματα θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν ευρύτερες απαιτήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας στην θάλασσα.

Από το 1947, μέχρι το 1978 η τεχνολογία αυτή και οι συσκευές που βασίζονταν πάνω της ονομάζονταν “**συσκευές Masuda**”. Η ονομασία «**Παλλόμενη Στήλη Ύδατος**» ή στα αγγλικά, “**Oscillating Water Column**” εμφανίστηκε για πρώτη φορά σε μια επιστημονική δημοσίευση του 1978 του καθηγητή *D.V Evans* υπό την ονομασία: “The oscillating water column wave-energy device” [76] και από τότε ο όρος αυτός εδραιώθηκε.

4.3 Τα πρώτα σχέδια & κατασκευές ΠΣΥ κατά την δεκαετία 1980

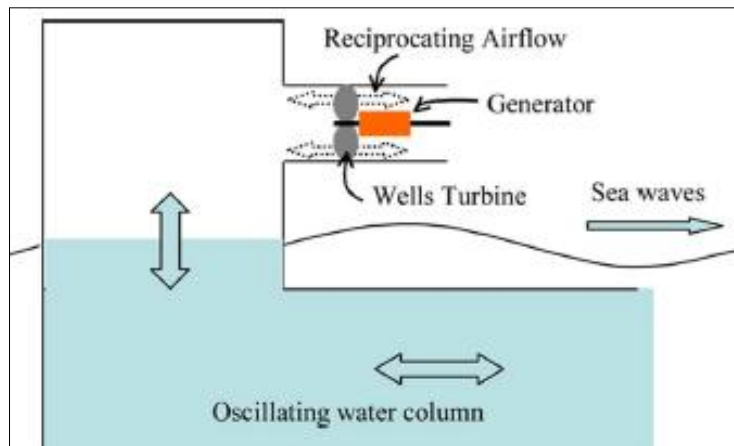
Η πρώτη μεγάλης κλίμακας κατασκευή ΠΣΥ κατασκευάστηκε για το Ιαπωνικό Κέντρο Θαλάσσιας Επιστήμης και Τεχνολογίας (JAMSTEC) και λειτούργησε στις ακτές της Ιαπωνίας, τις περιόδους 1978-80 και 1985-86· ονομαζόταν **Kaimei** και ήταν ένα ακόμη δημιούργημα του Masuba. Αυτή η διάταξη ήταν μια μεγάλη φορτηγίδα (80X12m), στο κύτος της οποίας βρίσκονταν 13 θάλαμοι ΠΣΥ εμβαδού 50 m² περίπου και δυνατότητα παραγωγής 125 kW ο καθένας. Διέθετε αρχικά αεροστρόβιλους μιας κατεύθυνσης με συστήματα βαλβίδων αντεπιστροφής οι οποίοι στην συνέχεια αντικαταστάθηκαν από αυτορυθμιζόμενους στροβίλους Wells και McCormick (βλ. 5.6.1. Εάν ο αναγνώστης επιθυμεί μπορεί να ανατρέξει στο [77] για περισσότερα).

Η φορτηγίδα Kaimei αξιοποιήθηκε δύο φορές σε βάθος νερού 40m, στις δυτικές ακτές της Ιαπωνίας, κοντά στο λιμάνι της Yura. Κατά την πρώτη δοκιμή, από τον Αύγουστο του 1978 μέχρι τον Μάρτιο του 1980, έγιναν πειραματικές μελέτες πάνω στους 8 από τους 13 θαλάμους κάνοντας χρήση διαφόρων ειδών από αεροστρόβιλους. Μάλιστα για ένα τετράμηνο, τον χειμώνα του 1978-79 κατά την περίοδο της πρώτης δοκιμής, ο ένας αεροστρόβιλος παρείχε με ηλεκτρική ενέργεια το τοπικό δίκτυο. Κατά την διάρκεια της δεύτερης δοκιμής, από τον Ιούλιο του 1985 μέχρι τον Ιούλιο του 1986, έγιναν πειραματικές μελέτες πάνω στους υπόλοιπους πέντε θαλάμους περιλαμβάνοντας όμως και τρεις αυτορυθμιζόμενους στροβίλους Impulse (βλ §5.6), έναν στρόβιλο Wells (βλ §5.5) και έναν στρόβιλο McCormick (βλ §5.6). [78]



Εικόνα 43 : Η φορτηγίδα Kaimei [79]

Η υδροδυναμική απόδοση των τεχνολογιών ΠΣΥ ήταν αρκετά μικρότερη από την αναμενόμενη και γι αυτό χρειάστηκε να επινοηθούν και διαφορετικοί σχεδιασμοί του θαλάμου συλλογής. Ο κυριότερος από αυτούς επινοήθηκε από τον Masuda και ονομαζόταν **Πλωτήρας Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα** (*Backward Bent Duct Buoy, BBDB*). Η εν λόγω ευρεσιτεχνία εμπεριέχει έναν θάλαμο συλλογής σχήματος L η οποία μπορεί να αποδώσει σε πιο ρηγά νερά από μια αντίστοιχη διάταξη με κατακόρυφο σωλήνα. Μάλιστα διαπιστώθηκε πως η απόδοση του βυθισμένου σωλήνα ήταν μεγαλύτερη εάν αυτός τοποθετηθεί με το λυγισμένο του άκρο προς το κύμα και τον ανοικτό θάλαμο προς την αντίθετη κατεύθυνση και εξού το επίθετο «Οπίσθιος». Οι δοκιμές αυτής της διάταξης έγιναν στην Ιαπωνία το 1986 με ένα μοντέλο μήκους 2,41 m και απέδειξαν πως η συνολική απόδοση μπορεί να φτάσει και το 35%. [80]



Εικόνα 44 : Ο Πλωτήρας Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα (BBDB)

Στην Ευρώπη οι μελέτες σχετικές με WEC's και ειδικά με τεχνολογίες Π.Σ.Υ εκκίνησαν μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Πρώτα ξεκίνησε την έρευνα το Ηνωμένο Βασίλειο με ένα κρατικό πρόγραμμα που ως στόχο είχε την δημιουργία μιας μονάδας WEC η οποία θα παρήγαγε ρεύμα ισχύος 2 GW και έτσι χρηματοδοτήθηκαν πολλά εγχειρήματα και τεχνολογίες. Τα βρετανικά προγράμματα έρευνας όμως τερματίστηκαν το 1982 χωρίς να



Εικόνα 45: Η επάκτια ΠΣΥ στο Toftestallen της Νορβηγίας (1985)

κατασκευαστούν εν τέλει πλήρης κλίμακας διατάξεις και να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες. Πέρα από το Ηνωμένο Βασίλειο, έρευνα γύρω από τις συσκευές ανάκτησης θαλάσσιας ενέργειας έγινε και στην Νορβηγία το 1985 η οποία απέδωσε ένα πλήρους κλίμακας έργο, εν ονόματι **Toftestallen**. Η διάταξη αυτή εγκαταστάθηκε στο Bergen της Νορβηγίας και επρόκειτο για έναν ψηλό χαλύβδινο πύργο ύψους 20 m περίπου και πακτωμένο σε πυθμένα βάθους 7 m. Ο πύργος αυτός διέθετε έναν αεροστρόβιλο Wells κατακόρυφου άξονα και ονομαστικής ισχύος 500 kW. Ωστόσο η απόδοση αυτής της μονάδας δεν ήταν αρκετά μεγάλη και δυστυχώς καταστράφηκε έπειτα από καταιγίδας το 1988. [78]

Μέχρι την δεκαετία του 1990 η έρευνα γύρω από τις τεχνολογίες αυτές περιορίστηκε σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Από το 1991 και μετά η κατάσταση στην Ευρωπαϊκή έρευνα γύρω από την κυματική ενέργεια γενικά άλλαξε ριζικά καθώς η Ευρωπαϊκή επιτροπή

αποφάσισε να την συμπεριλάβει στο πρόγραμμα Έρευνας και Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε στην μελέτη και τον σχεδιασμό αρκετών επάκτιων μονάδων ΠΣΥ οι οποίες κατασκευάστηκαν σε πλήρη κλίμακα και δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες ωκεανού.

4.4 Επάκτιες μονάδες Π.Σ.Υ

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου οι (μεγάλης κλίμακας) τεχνολογίες παλλόμενης στήλης ύδατος τοποθετήθηκαν στην ακτή για λόγους ευκολίας και ασφάλειας, χάνοντας όμως έτσι σε αποδοτικότητα. Η πλειοψηφία λοιπόν των τεχνολογιών Π.Σ.Υ οι οποίες έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες στην Ευρώπη είναι αυτού του τύπου. Μια αποτελεσματικά σχεδιασμένη και τοποθετημένη έπειτα από αρκετές και εμπειριστατωμένες μελέτες, επάκτια Π.Σ.Υ είναι σε θέση να παράγει ενέργεια σε μια ανταγωνιστική τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο μέχρι στιγμής οι όποιες εγκαταστάσεις έχουν λάβει μέρος, είχαν εν τέλει μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος από το αναμενόμενο. Κατά την δεκαετία του 2000 - 2010 σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν δύο μεγάλες παράκτιες μονάδες Π.Σ.Υ οι οποίες θεωρήθηκαν καινοτόμες και επιτυχημένες ευρεσιτεχνίες, ενώ προσέφεραν πολλά νέα δεδομένα για την τρέχουσα έρευνα και κατ επέκταση για την βελτίωση της τεχνολογίας του εν λόγω επιστημονικού κλάδου.

4.4.1 Η μονάδα LIMPET στο νησί Islay της Σκωτίας

Το πιο σημαντικό επίτευγμα των βρετανικών πανεπιστημίων πάνω στον τομέα της τεχνολογίας της Π.Σ.Υ, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, ήταν μια μικρής ισχύος (75 kW) επάκτια μονάδα εξοπλισμένη με στρόβιλο Wells (επίσης δοκιμάστηκε και ο διπτέρυγος στρόβιλος Wells το 1995, βλέπε § 5.5.4) η οποία εγκαταστάθηκε στο νησί *Islay* της Σκωτίας το 1991 από το Πανεπιστήμιο του Belfast. Η μονάδα λειτούργησε ως το 2000 όπου και παρείχε ρεύμα στο δίκτυο του νησιού. Στην συνέχεια αφαιρέθηκε και ο στρόβιλος της μονάδας στάλθηκε στο Γερμανικό Μουσείο Τεχνολογίας του Μονάχου στο ποίο εκτίθεται από τότε στο κοινό.



Εικόνα 46 : Η μονάδα των 75 kW του Παν/μιου του Belfast (αριστερά) και ο στρόβιλος της κατασκευής (δεξιά) [73]

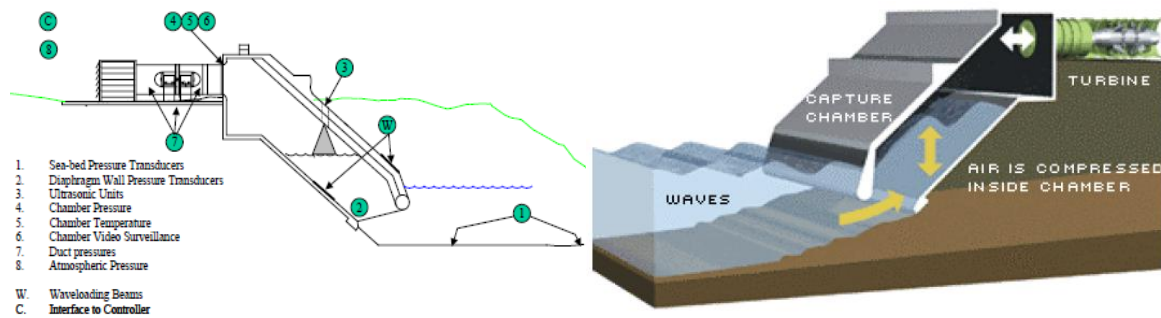
Το ίδιο πανεπιστήμιο σε συνεργασία με την εταιρία *Wavegen Ireland Ltd* το 1998 ανέλαβε την κατασκευή μιας ακόμη μονάδας παραγωγής ενέργειας από τα κύματα, ως συνέχεια της προηγούμενης. Η μονάδα αυτή ονομάστηκε **LIMPET** (Last Installed Marine Power Energy Transmitter) η οποία εγκαταστάθηκε στην ίδια νήσο με την προηγούμενη. Η κυματική μηχανή LIMPET ξεκίνησε την λειτουργία της τον Νοέμβριο του 2000 και την συνέχισε έως και το 2013, τροφοδοτώντας το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου συνεχώς.



Εικόνα 47 : Η μονάδα LIMPET κατά την κατασκευή (αριστερά) και η ολοκληρωμένη κατασκευή (δεξιά) [81]

Η λειτουργία της μονάδας καθ όλη την διάρκεια της ζωής της έγινε χωρίς επίβλεψη από κοντά αλλά μόνο με έλεγχο εξ αποστάσεως, αποδεικνύοντας έτσι πως πρόκειται για μια τεχνολογία πολλά υποσχόμενη στον χώρο της τεχνολογίας απόληψης κυματικής ενέργειας. Ο έλεγχος των λειτουργικών χαρακτηριστικών γινόταν από ειδικό λογισμικό σε πραγματικό χρόνο μέσω συστήματος SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System).

Η μονάδα αποτελείτο από έναν τσιμεντένιο θάλαμο συλλογής, με μια γεννήτρια παραγωγής ρεύματος στο πίσω μέρος του. Η κατασκευή χτίστηκε στην εσοχή ενός βράχου και αποτελείται από τρεις θαλάμους με εσωτερικές διαστάσεις 6Χ6 m και κλίση 40° ως προς το επίπεδο του εδάφους. Ο λόγος για τον οποίο ο θάλαμος συλλογής χτίστηκε υπό κλίση ήταν επειδή έτσι διευκολύνεται η ροή του νερού, τόσο κατά την άνοδο, όσο και κατά την κάθοδο της στήλης του νερού με αποτέλεσμα λιγότερους στροβιλισμούς και μικρότερες απώλειες σε ενέργεια. Αυτή η γεωμετρία είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη σε μονάδες εγκατεστημένες πάνω στην ακτή, καθώς η κίνηση των μορίων του νερού σε αυτό το σημείο δεν είναι μόνο κατά την διεύθυνση heave (κατακόρυφη διεύθυνση z), αλλά και κατά την διεύθυνση surge (οριζόντια διεύθυνση x). Το συμπέρασμα σχετικά με την καλύτερη απόδοση ενός κεκλιμένου θαλάμου έναντι ενός κατακόρυφου, προέκυψε έπειτα από πειραματικές δοκιμές. Από την άλλη, ο λόγος για τον οποίο ο θάλαμος συλλογής χωρίστηκε σε 3 υποθαλάμους ήταν για να μειωθεί ο κίνδυνος διέγερσης εγκάρσιων κυματισμών, πράγμα που θα μείωνε την απόδοση σε δέσμευση ενέργειας.



Εικόνα 48 : Το σχεδιάγραμμα των μερών της μονάδας LIMPET (πάνω) [82] Τρισδιάστατη καλλιτεχνική απεικόνιση της μονάδας LIMPET (κάτω) [83]

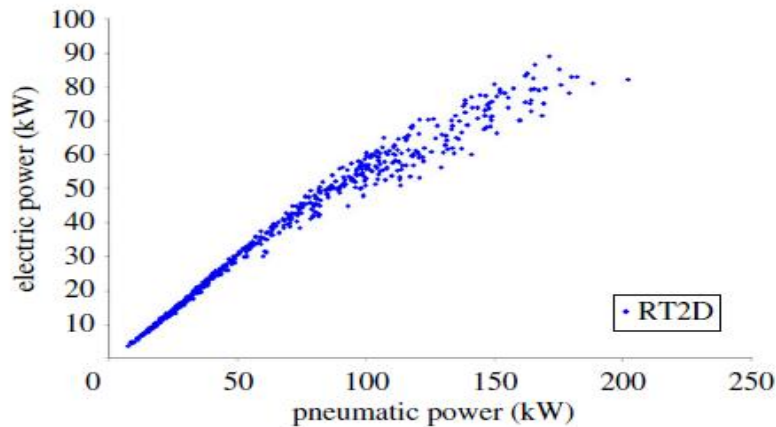
Το επάνω τμήμα των τριών θαλάμων ήταν ενιαίο, οπότε χρειαζόταν μόλις ένας αεροστρόβιλος για την μετατροπή της ενέργειας, ο οποίος ήταν τοποθετημένος στον μεσαίο αγωγό. Οι στήλες ύδατος μέσα στους θαλάμους βρίσκονταν 17 m εσωτερικά της φυσικής ακτογραμμής σε μια προκατασκευασμένη κοιλότητα η οποία σκάφτηκε με τρόπο έτσι ώστε να αυξάνει την αποδοτικότητα της μονάδας. [81]

Κατά την λειτουργία της μονάδας χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο κλασικός μονοπτέρυγος αεροστρόβιλος Wells και στην συνέχεια ο διπτέρυγος (βλέπε §5.5) με ζεύγος στροβίλων αντίστροφης περιστροφής διαμέτρου πτερωτής 2,6 m. Επρόκειτο για μια από τις πιο αξιόπιστες εφαρμογές του αεροστρόβιλου Wells με το όνομα: **Voith Hydro Wavegen**. Ήταν μια απλή κατασκευή, χωρίς μεταβλητής γωνίας πτερύγια και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Τα πτερύγια ήταν ενσωματωμένα απευθείας στον άξονα μιας τροποποιημένης επαγωγικής γεννήτριας 250 kW δίνοντας συνολική εγκατεστημένη ισχύ 500 kW.¹⁸ Τέλος η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος ήταν 700-1500 rpm, ενώ για την μείωση του θορύβου χρησιμοποιήθηκε ένας ακουστικός θάλαμος στον οποίο διερχόταν ο παλλόμενος αέρας πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 49: Ο αεροστρόβιλος Voith Hydro Wavegen RT2 LIMPET (110 kW) [73]

¹⁸ Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε επαγωγική γεννήτρια είναι επειδή επιτρέπει την λειτουργία της διάταξης σε διάφορες ταχύτητες, ενώ ταυτόχρονα έχει υψηλή αξιοπιστία και χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης.



Διάγραμμα 12: Το διάγραμμα απόδοσης του Voith Hydro Wavegen [73]

Ένα παράδειγμα της απόδοσης μετατροπής της ενέργειας για τον διπτέρυγο αεροστρόβιλο Wavegen, όπως μετρήθηκε σε ταραγμένη θάλασσα στο LIMPET παρουσιάζεται στο διάγραμμα 12. Η ισχύς της ροής του αέρα μετρήθηκε συναρτήσει της πίεσης στο θάλαμο και της ροής διαμέσου του στροβίλου, ενώ η ηλεκτρική ισχύς καταγράφηκε στην είσοδο του μετατροπέα συχνότητας της γεννήτριας. Οι μετρήσεις αφορούν τη λειτουργία της διάταξης για περισσότερο από 400 ώρες. Η οριακή απόδοση της μετατροπής σε χαμηλή έως μέτρια θάλασσα είναι 60%. Η απόδοση του στροβίλου επηρεάζεται από την κανονικότητα των προσπιπτόντων κυμάτων. Κατά την περίοδο λειτουργίας της, σημειώθηκαν κάποια προβλήματα τα οποία είχαν σημαντικές επιζήμιες συνέπειες για το σύνολο του προγράμματος του έργου, το κόστος και τις επιδόσεις:

- Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπήρξε έλλειψη λεπτομερών δεδομένων της τοποθεσίας πριν από την επιλογή της τελικής θέσης της συσκευής, πράγμα που οδήγησε σε χαμηλότερη από την προβλεπόμενη ισχύ προσπίπτοντος κυματισμού.
- Η αύξηση της απόδοσης από τον φυσικό λιμένα που δημιουργήθηκε λόγω της εγκατάστασης της μονάδας 17 m πιο βαθιά στο βράχο από την φυσική ακτογραμμή, δεν υπήρξε λόγω των ρηχών υδάτων.
- Ο ακουστικός θάλαμος που τοποθετήθηκε πίσω από τον αεροστρόβιλο για μείωση του θορύβου, μείωσε την απόδοση του. Αυτό οφειλόταν στην δημιουργία μιας ασταθούς ροής αέρα μέσω του στροβίλου κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισόδου, επιτυγχάνοντας μόνο το 75% της εκροής.

Παρ όλα αυτά υπήρξαν και κάποιες επιτυχίες σχετικά με το πρόγραμμα εγκατάστασης και λειτουργίας της μονάδας LIMPET:

- Το κόστος συντήρησης ήταν εξαιρετικά χαμηλό
- Ο έλεγχος της λειτουργίας της μονάδας έγινε με ηλεκτρονικά συστήματα από απόσταση
- Η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο ήταν απλή και επιτυχής

- Η χρήση του πιλοτικού έργου LIMPET ως «πείραμα» σε πραγματικές συνθήκες θάλασσας χάρισε στην επιστήμη πολλά εμπειρικά δεδομένα τα οποία μπορούν πλέον να χρησιμεύσουν ως μέτρο σύγκρισης σε σχέση με μηχανικά θεωρητικά μοντέλα.

Πίνακας 3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας LIMPET [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 21.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 6.0 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 3 x 6.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 4.4 m
Κλίση θαλάμων: 40°	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 13.4 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου, κάτω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 2.3 m	Return period (n/a waves depth limited)
Ύψος πάνω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 12.8 m	Μέγιστη ασκούμενη πίεση κυματισμών: 600 kN/m²
Στρόβιλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας: 2.6 m	Τύπος: F3GTS 400 G8G
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας: 1050 rpm	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας: 2 x 250 kW
Αριθμός στροβίλων: 2	Duty Type: continuous inverter driven
Διάταξη στροβίλων: σε σειρά, αντίθετη περιστροφή	Rotor Type: Wound rotor (but used with rotors shorted)
Σχήμα λεπίδας στροβίλου: NACA 12	Τάση: 400 V
Αριθμός λεπίδων: 7	Μέση Ταχύτητα περιστροφής: 1016 rpm
Χορδή λεπίδας: 320 mm	Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής: 1500 rpm
Αναλογία από κέντρο μέχρι άκρη: 0.62	Αδράνεια Γεννήτρια: 11.5 kgm² Φορτίο: 1300 kgm²

Η εκτίμηση που είχε γίνει αρχικά (κατά την φάση του σχεδιασμού) για τον προσπίπτοντα κυματισμό ήταν ότι θα έφερε ισχύ 20 kW/m. Οι δοκιμές (κατά την διάρκεια της πειραματικής μελέτης) μείωσαν την εκτιμώμενη ισχύ σε 17.9 kW/m. Ωστόσο κατά την διάρκεια λειτουργίας του πιλοτικού έργου, οι πραγματικές μετρήσεις έδειξαν πως ο προσπίπτον κυματισμός έφερε ισχύ μόλις 12 kW/m. Η μέγιστη απόδοση της κυματικής αυτής μηχανής όμως είχε υπολογιστεί ότι επιτυγχανόταν για τιμές κυματικής ισχύος 15-25 kW/m. Αποτέλεσμα αυτής της κακής εκτίμησης ήταν το να μετρηθεί μια τελική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 21 kW, έναντι μιας αρχικά θεωρητικώς εκτιμώμενης ισχύος 202 kW. Μια συνολική εκτίμηση της απόδοσης της κατασκευής φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4 : Εκτιμώμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας LIMPET [83]

Τύπος απόληψης ενέργειας	Συσκευή	Εκτιμώμενη ισχύς %	Μετρούμενη ισχύς %
Κυματική ισχύς – ισχύς πνοής αέρα	Π.Σ.Υ	80	64
Ισχύς πνοής – μηχανική ισχύς	Στρόβιλος Wells	60	40
Μηχανική ισχύς – ηλεκτρική ισχύς	Γεννήτρια ρεύματος	90	32
Συνολική απόδοση		48	8

4.4.2 Η μονάδα ΠΣΥ στο νησί Pico της Πορτογαλίας

Το 1991 ξεκίνησαν μελέτες από την Ευρωπαϊκή επιτροπή (πρόγραμμα Joule) για να βρεθεί μια κατάλληλη τοποθεσία όπου θα μπορούσε να εγκατασταθεί μια επάκτια τεχνολογία ΠΣΥ στις Ευρωπαϊκές ακτές. Επιλέχθηκε η τοποθεσία *Porto Cachorro* στο Νησί *Pico* στις Αζόρες της Πορτογαλίας καθώς, το κυματικό δυναμικό ήταν αρκετά ισχυρό (13,4 kW/m) και η πρόσβαση δια ξηράς ήταν ιδιαίτερα εύκολη πράγμα που μείωνε το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής είναι: ύψος κύματος: $H_s=4,5m$ και ενεργός περίοδος: $T_p=14sec$.

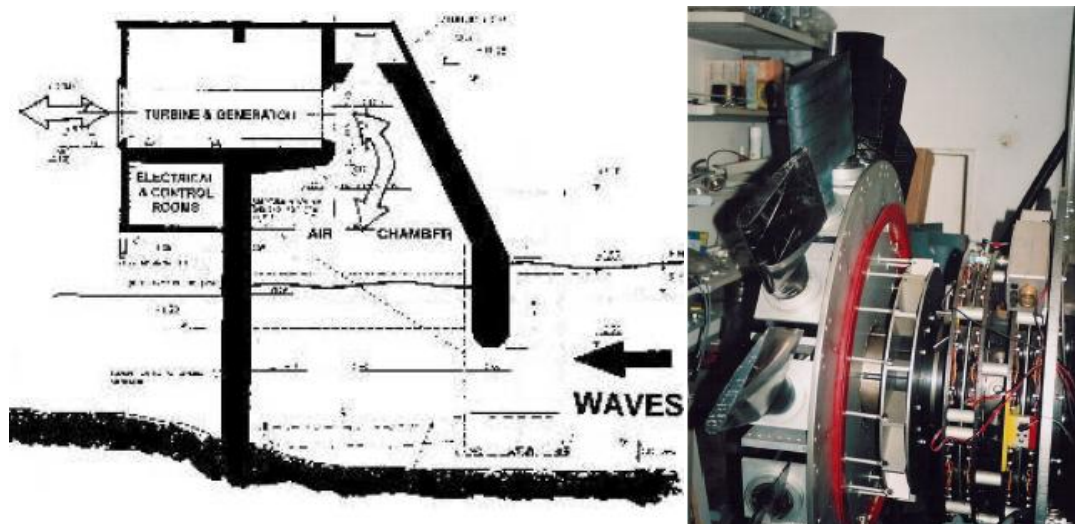


Εικόνα 50: Το εμπρόσθιο (δεξιά) και το πίσω (αριστερά) μέρος της μονάδας στο νησί Pico [83]

Η κατασκευή ξεκίνησε να μελετάται και να σχεδιάζεται το 1995, ενώ η πλήρης εγκατάσταση του τελείωσε το 1999. Η διάταξη συνέχισε να λειτουργεί μέχρι το 2016, για 17 ολόκληρα χρόνια. Η γεννήτρια που εγκαταστάθηκε παρήγαγε 400 KW ισχύς, ο θάλαμος είχε διαστάσεις 12x12 m και κτίστηκε πάνω σε βράχο ο οποίος συνόρευε με νερό βάθους 8m.

Η μονάδα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να περιέχει μια βαλβίδα στην οροφή της κατασκευής η οποία ενεργοποιείται όταν οι συνθήκες της θάλασσας ήταν ιδιαίτερα έντονες. Ο σκοπός της ήταν το να απελευθερώνει μέρος του ισχυρού αέρα ο οποίος ανερχόταν, έτσι ώστε να μην καταπονηθεί ο αεροστρόβιλος ή να μην ενεργοποιηθεί η αυτόματη παύση του. Με αυτόν τον τρόπο η μονάδα παρείχε ηλεκτρική ισχύ ακόμη και σε ακραίες καιρικές συνθήκες που κανονικά θα έπρεπε να σταματήσει την λειτουργία της. Ωστόσο ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να μην καταναλώνεται περισσότερη ισχύς κατά την διάρκεια λειτουργίας της βαλβίδας απ όση επί πλέον ισχύ παραγόταν την ίδια χρονική περίοδο από τον αεροστρόβιλο, έτσι ώστε να έχει νόημα η λειτουργία αυτού του συστήματος βελτιστοποίησης.

Τοποθετήθηκε ακόμη μια βαλβίδα ταχείας δράσης κοντά στον στρόβιλο η οποία μπορούσε να ελέγχει την εκκίνηση και την παύση του και μια δεύτερη βαλβίδα στο σημείο σύνδεσης στρόβιλου και θαλάμου η οποία ως στόχο είχε το να απομονώνει το σύστημα αγωγών – στρόβιλου σε περίπτωση που η εγκατάσταση έπρεπε να κλείσει για μια μεγάλη περίοδο προκειμένου να συντηρηθεί ή να επισκευασθεί.



Εικόνα 51 : Το σχεδιάγραμμα της μονάδας στο νησί Pico [83] (αριστερά) Ο στρόβιλος Wells μεταβλητής γωνίας που χρησιμοποιήθηκε στην μονάδα στο νησί Pico [79] (δεξιά)

Ο στρόβιλος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας στρόβιλος τύπου wells οριζόντιου άξονα και μεταβλητής γωνίας, με 8 πτερύγια που είχε διάμετρο 2,3 m και ισχύος 400 kW (βλ. § 5.5.2). Ακόμη ο στρόβιλος περιείχε και οδηγία πτερύγια για βελτιωμένη απόδοση (βλ. § 5.5.3). Η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε ήταν επαγωγική, τυλιγμένου δρομέα έτσι ώστε να λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα στροφών.

Ο στρόβιλος, η ηλεκτρική γεννήτρια και τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά συστήματα εγκαταστάθηκαν σε δωμάτιο διαστάσεων 10X12 m στο πίσω μέρος του θαλάμου της διάταξης. Ο εξοπλισμός ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας της μηχανής εγκαταστάθηκε σε χώρους κάτω από τον στρόβιλο, όπως φαίνεται και στο σχεδιάγραμμα της εικόνας 66. [84] Η θεωρούμενη μέγιστη απόδοση στροβίλου ήταν 75% και ήταν αυτή που επιτυγχανόταν με σταθερή ροή. Η μέση χρονική απόδοση σε μια αμφίδρομη ροή, θα ήταν σαφώς μικρότερη από αυτή, περίπου στο 50%.

Η εγκατάσταση ήταν πλήρως αυτοματοποιημένη και είχε την δυνατότητα να διανέμει ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο του νησιού σε μόνιμη βάση, ενώ η περιβαλλοντική μελέτη που έγινε καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας της δεν έδειξε ιδιαίτερους κινδύνους. Γενικώς επρόκειτο για μια δοκιμαστική μονάδα πλήρους κλίμακας που δεν κατασκευάστηκε για εμπορικούς σκοπούς, αλλά περισσότερο ως πιλοτικό έργο. Η πρώτη δοκιμή που έγινε, το 2005, αποκάλυψε σοβαρούς τεχνικούς περιορισμούς στο σύστημα στροβίλου – γεννήτριας, οι οποίοι δεν μπορούσαν να επιλυθούν με την διαθέσιμη χρηματοδότηση. Ωστόσο η ερευνητική ομάδα επέμεινε στην συντήρηση και την συνεχή βελτίωση της εγκατάστασης, αυξάνοντας έτσι τις ώρες λειτουργίας και την παραγωγή ενέργειας.

Σημαντικότερες βελτιώσεις έγιναν το 2009 όσον αφορά τις δονήσεις του συστήματος στροβίλου – γεννήτριας, ενώ το 2010 προστέθηκε ένα δευτερεύον κύκλωμα ασφάλειας με αποτέλεσμα την πιο αξιόπιστη λειτουργία του αυτοματοποιημένου συστήματος. Παρά τις διάφορες τεχνικές λειτουργίες της μονάδας, έγιναν εν τέλει επιτυχημένες δοκιμές συνεχούς

λειτουργίας από τον Σεπτέμβριο έως τον Δεκέμβριο του 2010 με συνολική παραγωγή ισχύος 45 MWh σε 1450 ώρες λειτουργίας. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού σχεδίου MARINET η μονάδα στο νησί Pico αναδείχθηκε ως μια από τις σημαντικότερες εφαρμοσμένες υποδομές για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυματισμών. Έως το 2016 όπου η μονάδα λειτούργησε η συνολική παραγωγή ενέργειας ήταν 39 MWh.

Πίνακας 5 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του ερευνητικού έργου Pico [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 12.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 8.0-10.0 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 1 x 12.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 7.5 m
Κλίση θαλάμου: 60°	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 12.0 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου: 2.5 m	Return period
Ύψος από επιφάνεια θάλασσας: 15.0 m	Μέγιστη πίεση κυματισμών: 700 kN/m²
Στρόβιλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας: 2.3 m	Τύπος: Induction, Wound Rotor, Kramer
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας: 750 - 1500 rpm	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας: 400 kW
Αριθμός στροβίλων: 1	Duty Type: 50 Hz, 8 Pole
Διάταξη στροβίλου: Οριζόντιας περιστροφής	Rotor Type: Wound rotor, slip rings
Σχήμα λεπίδας στροβίλου: 3D συμμετρική NACA 15 at root NACA 12 at tip	Τάση: 400 V
Αριθμός λεπίδων: 8	Μέση Ταχύτητα περιστροφής: 1400 rpm
Χορδή λεπίδας: 375 mm	Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής: 1500 rpm
Αναλογία από κέντρο μέχρι άκρη: 0.59	Αδράνεια 600 kgm²

4.5 Τεχνολογίες ΠΣΥ εγκατεστημένες σε κυματοθραύστες λιμένων

Στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου αναφέρθηκε πως οι επάκτιες τεχνολογίες Π.Σ.Υ μπορούν να ενσωματωθούν σε κυματοθραύστες πράγμα που οδηγεί σε τρία πλεονεκτήματα:

1. Η κατασκευή προστατεύει πρόσθετα μαζί με τον κυματοθραύστη το λιμάνι ή την ακτή
2. Το συνολικό κόστος κυματοθραύστη-ΠΣΥ μοιράζεται ανάμεσα στις δύο κατασκευές
3. Η κατασκευή η λειτουργία και η συντήρηση της εγκατάστασης είναι ευκολότερη από αυτές άλλων τύπων τεχνολογιών ΠΣΥ και γενικότερα WEC's.

Δυστυχώς όμως οι πιθανές περιοχές εγκατάστασης τέτοιων τεχνολογιών είναι αρκετά περιορισμένες καθώς το λιμάνι στο οποίο θα εγκατασταθούν θα πρέπει να τηρεί κάποιες προδιαγραφές όπως είναι το απαιτούμενο βάθος νερού έτσι ώστε να είναι αποδοτική η μηχανή και παράλληλα ο λιμενοβραχίονας θα πρέπει να έχει σωστό προσανατολισμό έτσι ώστε να δέχεται κάθετα τους προσπίπτοντες κυματισμούς προκειμένου να αξιοποιεί στο μέγιστο την ισχύ τους. Ένα ακόμη μειονέκτημα των μονάδων αυτών είναι ότι κατά πάσα

πιθανότητα θα είναι εγκατεστημένες κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Η στροβιλογεννήτρια όμως μιας μονάδας Π.Σ.Υ παράγει πολύ θόρυβο, πράγμα που πιθανότατα θα συμβάλει αρνητικά στην ποιότητα ζωής των κατοίκων.

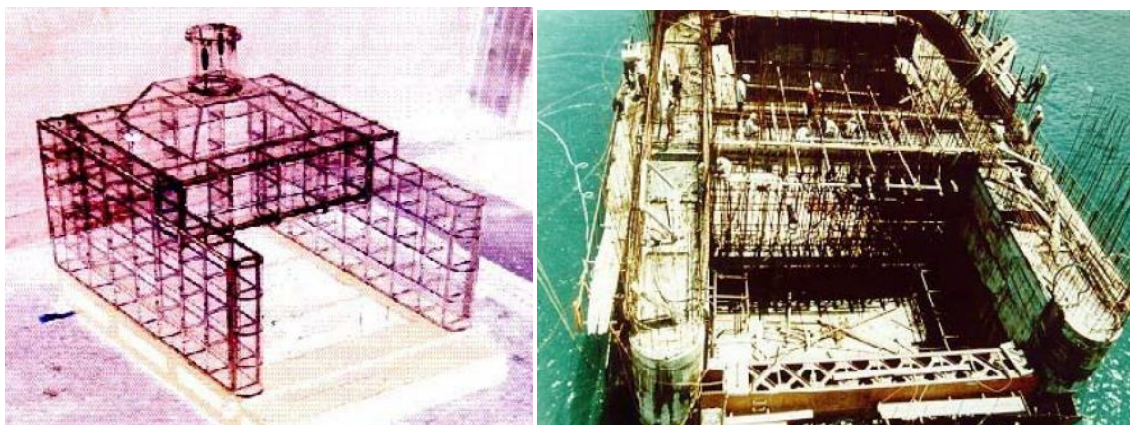
4.5.1 Η μονάδα στο λιμάνι Vizhinjam, στην πόλη Trivandrum της Ινδίας

Το 1991 εγκαταστάθηκε μια ΠΣΥ ισχύος της τάξεως των 150 kW κοντά στο Trivandrum της Ινδίας και τοποθετήθηκε με πλωτή ρυμούλκηση ακριβώς μπροστά από ένα λιμενοβραχίονα στο λιμάνι του Vizhinjam. Επρόκειτο για ένα κυψελοειδές κτίσμα φτιαγμένο από σπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο ζύγιζε 3.000 τόνους και έπαιξε τον ρόλο του θαλάμου εισαγωγής. Πάνω από τον θάλαμο υψωνόταν ένας πύργος από χάλυβα. Ο στρόβιλος της μονάδας συνδεόταν απευθείας με το τοπικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 52 : Η μονάδα ΠΣΥ στο Trivandrum της Ινδίας [27] [83]

Η κατασκευή ουσιαστικά δεν ενσωματώθηκε πάνω στον κυματοθραύστη, αλλά τοποθετήθηκε λίγο πιο μπροστά από αυτόν, καθώς δεν υπήρχαν εκείνη την περίοδο διαθέσιμα χρηματοδοτούμενα προγράμματα για ανακατασκευή του υπάρχοντος κυματοθραύστη ή για την κατασκευή ενός νέου από την αρχή. Προκειμένου να ενισχυθεί η υδροδυναμική απόδοση της μονάδας τα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου εισαγωγής επεκτείνονταν παράλληλα προς την θάλασσα, λίγο πιο μπροστά από την κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο εξομαλύνονταν οι διαφορετικές κυματικές συχνότητες της ανοικτής θάλασσας, σε ένα βέλτιστο εύρος καθώς εισέρχονταν στον θάλαμο της κυματικής μηχανής.



Εικόνα 53 Το 3D σχεδιάγραμμα της μονάδας (αριστερά) και η μονάδα κατά την περίοδο κατασκευής της (δεξιά) [83]

Οι διαστάσεις της κατασκευής ήταν 23.2 m (μήκος) x 17.0 m (πλάτος) x 15.3 m (ύψος). Η είσοδος του θαλάμου συλλογής είχε 10 m φάρδος και 6 m ύψος. Στην κορυφή και προς το πίσω μέρος του θαλάμου συλλογής υπήρχε ένα καμπυλωμένο κυβικό τσιμεντένιο κέλυφος διαστάσεων 10 x 7,75 m. Πάνω σε αυτό βρισκόταν μια κυλινδρική μεταλλική καμινάδα διαμέτρου 2,0 m και ύψους 3,0 m. Μέσα στο κέλυφος αυτό βρισκόταν η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και δια μέσου της καμινάδας συνδεόταν με το τοπικό δίκτυο.

Πίνακας 6 : Ο πίνακας με την εκτιμώμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας [83]

Τύπος απόληψης ενέργειας	Συσκευή	Εκτιμώμενη ισχύς %	Μετρούμενη ισχύς %
Κυματική ισχύς – ισχύς πνοής αέρα	Π.Σ.Υ		50
Ισχύς πνοής – μηχανική ισχύς	Στρόβιλος Wells		25
Μηχανική ισχύς – ηλεκτρική ισχύς	Γεννήτρια ρεύματος		50
Συνολική απόδοση			6.3

Πριν την εγκατάσταση της μονάδας είχε υπολογισθεί πως στο σημείο εγκατάστασης θα προσέπιπτε ένας κυματισμός ισχύος 20 kW/m την περίοδο των Μουσώνων και 5-10 kW/m τον υπόλοιπο χρόνο του έτους. Κατά την περίοδο του σχεδιασμού επίσης, είχε υπολογισθεί πως το μέγιστο φορτίο λόγω κυματικού δυναμικού το οποίο θα μπορούσε να δεχθεί η κατασκευή θα ήταν 12.000 kW/m, ενώ ο υψηλότερος πιθανός κυματισμός πρόσπτωσης εκτιμήθηκε ότι θα ήταν 7m.

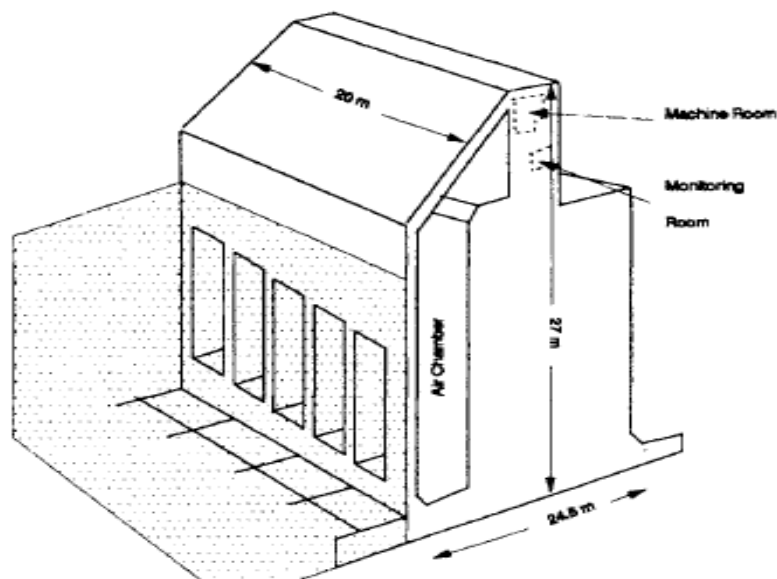
Πίνακας 7 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της Π.Σ.Υ στο Trivandrum [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 14.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 10.2 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 1 x 10.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 7 m
Κλήση θαλάμου: κατακόρυφη	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 8.0-12.0 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου, κάτω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 1.1 m	Return period
Ύψος πάνω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 14.5 m	Μέγιστη ασκούμενη πίεση κυματισμών: 1000 kN/m²
Στρόβιλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας:	Τύπος:
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας:	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας:
Αριθμός στροβίλων: 2	Duty Type:
Διάταξη στροβίλου:	Rotor Type:
Σχήμα λεπίδας στροβίλου: NACA 0021	Τάση:
Αριθμός λεπίδων: 8	Μέση Ταχύτητα περιστροφής:
Χορδή λεπίδας: 380 mm	Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής:
Αναλογία από κέντρο μέχρι άκρη: 0.6	Αδράνεια

Η συγκεκριμένη κυματική μηχανή λειτούργησε με επιτυχία, κάνοντας αρχικώς χρήση ενός στροβίλου Wells και παρέχοντας δεδομένα σχετικά με τις επιδόσεις του, καθώς και τις συνολικές επιδόσεις της κατασκευής. Μετά από τις πρώτες δοκιμές η μονάδα χρησιμοποιήθηκε με διαφορετικό σύστημα παραγωγής ενέργειας (δηλαδή διαφορετικό τύπο στροβίλου και γεννήτριας) για να εξαχθούν εκ νέου συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από αυτήν την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή νέων σχεδίων Π.Σ.Υ ενσωματωμένων σε κυματοθραύστη, τα οποία περιλάμβαναν ένα ενεργειακό πάρκο απαρτιζόμενο από 10 μονάδες συνολικής ισχύος 1,1 MW.

4.5.2 Η μονάδα στο λιμάνι Sakata, στην Ιαπωνία

Το ερευνητικό πρόγραμμα αυτό έγινε από το ινστιτούτο έρευνας «Port and harbor», που ήταν τμήμα του υπουργείου μεταφορών της Κίνας. Αφορούσε μια μονάδα Π.Σ.Υ με 5 θαλάμους εισαγωγής η οποία κτίστηκε στο λιμάνι της Sakata στην Ιαπωνία. Η κυματική μηχανή τέθηκε σε λειτουργία το 1989 μετά από κάποιες πειραματικές μελέτες, αλλά μόνο με τους 3 θαλάμους εν ενεργεία. Στο πίσω μέρος της εγκαταστάθηκε μια γεννήτρια παραγωγής ρεύματος ισχύος 60 kW. Η κατασκευή ενσωματώθηκε στο βόρειο κυματοθραύστη του λιμανιού και έμοιαζε πολύ με αυτήν που κατασκευάστηκε ένα χρόνο αργότερα στο Trivandrum της Ινδίας. Ο λόγος για τον οποίο επιδέχθηκε η συγκεκριμένη τοποθεσία εγκατάστασης ήταν κατά βάση επειδή επρόκειτο για ένα βιομηχανικό λιμάνι με όλο τον απαραίτητο τεχνικό εξοπλισμό για την υλοποίηση αυτού του έργου. Οι διαστάσεις της κατασκευής ήταν 20.0 m (μήκος) x 24.5 m (πλάτος) x 27.0 m (ύψος), ενώ το βάθος του νερού στο σημείο λειτουργίας ήταν 18 m. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, είχε 5 ανοίγματα κατά την κύρια διεύθυνση κύματος και 5 αντίστοιχους θαλάμους εισαγωγής. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 54: Το σχεδιάγραμμα της μονάδας Π.Σ.Υ στην μπροστινή όψη του [78]

Πίνακας 8 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της Π.Σ.Υ στο λιμάνι Sakata [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 20.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 18.0 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 5 x 3.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 15.3 m
Κλίση θαλάμου: 45°	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 14.5 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου, κάτω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 3.0 m	Return period
Ύψος πάνω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 12.5 m	Μέγιστη ασκούμενη πίεση κυματισμών: 1000 kN/m²
Στροβίλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας: 1.337 m	Τύπος:
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας:	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας: 60 kW
Αριθμός στροβίλων:	Duty Type:
Διάταξη στροβίλου:	Rotor Type:
Σχήμα λεπίδας στροβίλου:	Τάση: 200 V AC
Αριθμός λεπίδων: 6	Μέση Ταχύτητα περιστροφής:
Χορδή λεπίδας:	Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής:
Αναλογία από το κέντρο μέχρι την άκρη:	Αδράνεια



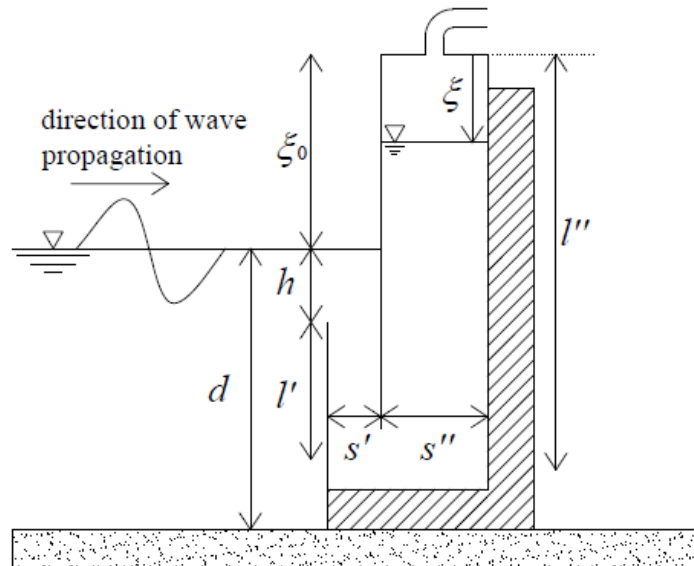
Εικόνα 55 : Η μονάδα ΠΣΥ στο λιμάνι Sakata της Ιαπωνίας κατά την περίοδο κατασκευής της (Αριστερά) & κατά την φάση λειτουργίας της (δεξιά) [27] [83]

4.5.3 Η μονάδα U-OWC λιμάνι της Civitavecchia στην Ιταλία

Στο πρόσφατο 2012 ολοκληρώθηκε μια ακόμη μονάδα Π.Σ.Υ πλήρους κλίμακας η οποία ενσωματώθηκε σε κυματοθραύστη και ονομάστηκε *U-OWC* (U-Oscillating Water Column) ή *REWEC3* (Resonant Wave Energy Converter 3). Αυτός ο τύπος ΠΣΥ-κυματοθραύστη (U-ΠΣΥ) σχεδιάστηκε και άρχισε να κατασκευάζεται στο λιμάνι της Civitavecchia, (το λιμάνι της Ρώμης), στην Ιταλία, με 19 κυψελωτά κιβώτια (caissons) το καθένα από τα οποία είχε 8 θαλάμους ΠΣΥ συνολικού μήκους 34 m. Η κατασκευή του πρώτου κιβωτίου ολοκληρώθηκε το 2012. Η κατασκευή αυτή αποτελεί την πρώτη πλήρη μονάδα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας στη Μεσόγειο Θάλασσα και μια από τις μεγαλύτερες στον κόσμο.

Ο σχεδιασμός αυτής της Π.Σ.Υ είναι διαφορετικός από τις συνηθισμένες τις οποίες αναφέραμε ως τώρα. Όπως και μια κλασική κατασκευή Π.Σ.Υ, αποτελείται από έναν

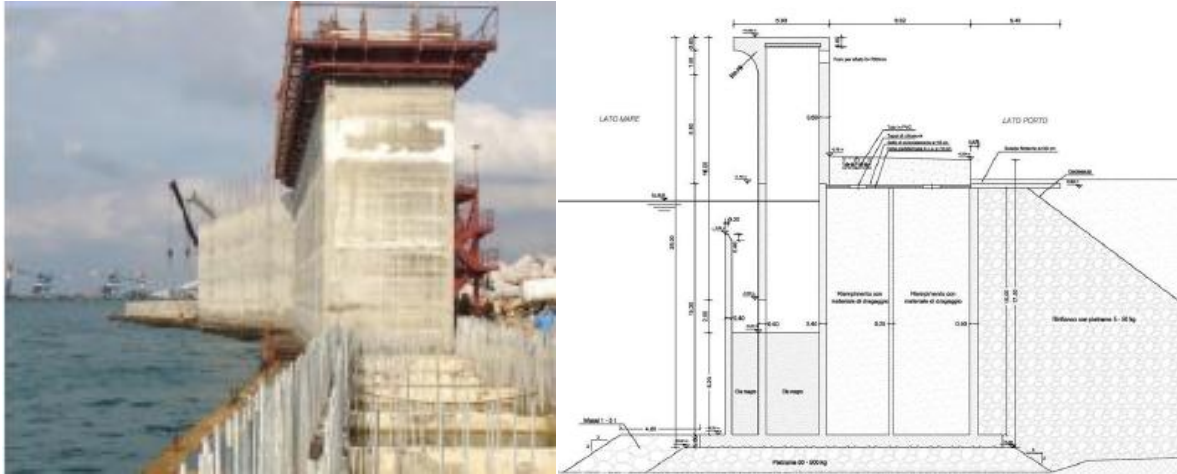
εσωτερικό θάλαμο με μια στήλη αέρα η οποία συμπιέζεται και εκτείνεται λόγω της κίνησης της εσωτερικής στήλης του νερού. Ωστόσο ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται με τον εξωτερικό προσπίπτοντα κυματισμό είναι διαφορετικός. Ο τρόπος σύνδεσης του εσωτερικού θαλάμου με την ανοικτή θάλασσα γίνεται με την βοήθεια ενός μικρού κατακόρυφου αγωγού, η τομή του οποίου έχει σχήμα **U**, όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω:



Εικόνα 56: Το σχεδιάγραμμα της Π.Σ.Υ U-OWC

Υπάρχει ένα εξωτερικό άνοιγμα του θαλάμου το οποίο αποτελείται από ένα πακτωμένο στον πυθμένα τοίχος το οποίο «βλέπει» προς τα πάνω. Λίγο πιο πίσω υπάρχει το «χείλος» του θαλάμου το οποίο είναι ένας ημιβυθισμένος τοίχος που μοιάζει με αυτόν της κλασικής Π.Σ.Υ και «κοιτάζει» προς τον πυθμένα. Αυτοί οι δύο τοίχοι αποτελούν το εξωτερικό άνοιγμα του θαλάμου. Πίσω από το εσωτερικό χείλος, βρίσκεται ο εσωτερικός θάλαμος που περιέχει την στήλη του νερού και από πάνω την παλλόμενη στήλη του αέρα. Το εξωτερικό άνοιγμα είναι στενότερο ($s' < s''$) και κοντύτερο ($l' < l''$) σε σχέση με το εσωτερικό.

Η διάταξη αυτή ουσιαστικά φέρει αυτόν τον εξωτερικό πρόσθετο κατακόρυφο σωλήνα ο οποίος συνδέει την υδάτινη στήλη με την θάλασσα και ο οποίος επιτρέπει τον συντονισμό της ιδιοπεριόδου του θαλάμου, με την περίοδο αιχμής (δηλαδή την περίοδο των κυματισμών που φέρουν τα υψηλότερα ποσοστά ενέργειας). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να επιτευχθούν συνθήκες συντονισμού χωρίς την χρήση συσκευών έλεγχου φάσεως (phase control device), ενώ ταυτόχρονα το εύρος των πιέσεων που ασκούν οι διερχόμενοι κυματισμοί στον αέρα αυξάνεται, αυξάνοντας έτσι και την συνολική απόδοση της διάταξης.



Εικόνα 57 : Το σχεδιάγραμμα της Τομής της τεχνολογίας U-OWC (δεξιά) και η πραγματική μονάδα στο λιμάνι της Civitavecchia κατά την διάρκεια κατασκευής της (αριστερά) [79] [85]

Ο σχεδιασμός αυτός αλλάζει ριζικά την υδροδυναμική της διάταξης, αφού πλέον οι κυματισμοί δεν διαδίδονται στον εσωτερικό θάλαμο προκαλώντας ταλάντωση της στάθμης του νερού· αντίθετα οι εσωτερικές ταλαντώσεις προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της πίεσης των κυμάτων στο άνοιγμα του εξωτερικού κατακόρυφου σωλήνα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι επιτρέπει την αύξηση του συνολικού μήκους της υδάτινης στήλης, χωρίς να τοποθετηθεί το άνοιγμα πολύ χαμηλά από την επιφάνεια της θάλασσας.

4.6 Παράκτιες και υπεράκτιες μονάδες Π.Σ.Υ

Η αρχή λειτουργίας των υπεράκτιων ή παράκτιων (είτε πλωτών, είτε πακτωμένων στον πυθμένα) τεχνολογιών ΠΣΥ είναι παρόμοια με αυτή των επάκτιων εγκαταστάσεων. Οι διαφορές έγκεινται στο ότι αυτές οι τεχνολογίες ΠΣΥ αποτελούν πηγές παραγωγής πολύ μεγαλύτερης ισχύος, καθώς ολόκληρη η κατασκευή επιπλέει στην θάλασσα και αλληλεπιδρά με τα θαλάσσια κύματα με τον βέλτιστο υδροδυναμικό τρόπο συλλαμβάνοντας υψηλό ποσοστό της ενέργειάς τους με ελάχιστο κόστος. Αυτό βέβαια ισχύει για τις πλωτές και όχι τις πακτωμένες μονάδες. Πέρα από αυτό όμως, έχουμε και προηγουμένως αναφέρει πως οι θαλάσσιοι κυματισμοί στην ανοικτή θάλασσα φέρουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από αυτούς που φτάνουν στην ακτή.

4.6.1 Η πλωτή κατασκευή OSPREY

Η κατασκευή **OSPREY** (Ocean Swell Powered Renewable Energy) είναι το πρώτο παράδειγμα τεχνολογίας ΠΣΥ που θα δούμε και αποτελεί μια παράκτια συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε βάθος νερού μέχρι 15 m και έως 1 χιλιόμετρο μακριά από την ακτή. Το πρώτο μοντέλο αυτής της ευρεσιτεχνίας ονομάστηκε *OSPREY 1* και κατασκευάστηκε το 1995 για να εγκατασταθεί 100 μέτρα από την ακτή στο Dounreay στη βόρεια Σκωτία.



Εικόνα 58 : Η συσκευή OSPREY 1 κατά την διάρκεια της κατασκευής της [83]

Αποτελείτο από έναν ορθογώνιο θάλαμο συλλογής κυματικής ενέργειας, κατασκευασμένο από χάλυβα με δύο τραπεζοειδείς δεξαμενές αριστερά και δεξιά του θαλάμου, οι οποίες θα γεμίζονταν με έρμα οι οποίες χρησιμεύοντας έτσι στην σταθεροποίηση και την αγκύρωση της δομής. Στην κορυφή του θαλάμου συλλογής ήταν τοποθετημένη η μονάδα ισχύος που περιείχε τις γεννήτριες και τους στροβίλους, καθώς και τον εξοπλισμό ελέγχου. Ο θάλαμος συλλογής είχε πλάτος 20 m, ενώ κάθε δεξαμενή έρματος είχε μέγιστο ύψος 20 m και μήκος 44 m.

Πίνακας 9 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της μονάδας OSPREY 1 [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 20.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 14.5 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 1 x 20.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 8.6 m
Κλήση θαλάμου: καμπυλωτή	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 10.9 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου, κάτω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 3.8 m	Return period (n/a depth limited waves)
Ύψος πάνω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 5.24 m	Μέγιστη ασκούμενη πίεση κυματισμών
Στρόβιλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας: 3 m	Τύπος: Induction / Cage
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας: 800 - 1400 rpm	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας: 4 x 500 kW
Αριθμός στροβίλων: 4	Duty Type: continuous inverter driven
Διάταξη στροβίλου: Back-to-Back pairs	Rotor Type: Cage
Σχήμα λεπίδας στροβίλου: NACA 12	Τάση: 600 V AC
Αριθμός λεπίδων: 9/11 (different to minimize effects of blade passing)	Μέση Ταχύτητα περιστροφής: 1000 rpm
Χορδή λεπίδας: 444/363 mm	Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής: 1500 rpm
Αναλογία από κέντρο μέχρι άκρη: 0.62	Αδράνεια 1500 kgm² per rotor

Όταν έγιναν οι πρώτες πειραματικές δοκιμές, οι προσπίπτοντες κυματισμοί έφεραν ισχύ 12 kW/m, αλλά η μέγιστη αντοχή της κατασκευής υπολογιζόταν πως ήταν για ισχυρότερους. Στο σημείο εγκατάστασης λοιπόν είχε υπολογισθεί πως η ισχύς των κυματισμών θα ήταν πολύ μεγαλύτερη, της τάξεως των 30 kW/m. Ωστόσο οι υπολογισμοί αυτοί ήταν λανθασμένοι και κατά την εγκατάσταση της, πριν γεμίσει τις δύο πλευρικές δεξαμενές με έρμα και σταθεροποιηθεί, η τεράστια αυτή δομή των 750 τόνων δέχθηκε ένα μεγάλο κύμα το οποίο έσπασε τις πλάγιες ερμάτινες δεξαμενές με αποτέλεσμα να βουλιάξει η κατασκευή. Παρ όλα αυτά οι κατασκευαστές της μονάδας OSPREY 1 είχαν αρκετό χρόνο να σώσουν τον πολύτιμο εξοπλισμό, πριν η θάλασσα «καταπιεί» την κατασκευή.

Το βασικό πρόβλημα ήταν πως η κατασκευή δεν ερματώθηκε γρήγορα, με αποτέλεσμα να είναι ασταθής και να τρυπήσει λόγω της κακοκαιρίας. Οποιαδήποτε μελλοντική κατασκευή λοιπόν θα πρέπει να γίνει με σωστό προγραμματισμό εγκατάστασης, έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποιος ανάλογος κίνδυνος στο μέλλον. Ο απολογισμός από αυτήν την αποτυχία ήταν πως η κατασκευή θα έπρεπε να γεμίσει με έρμα πριν την ρυμούλκηση της στην περιοχή εγκατάστασης. Ακόμη οι δεξαμενές θα μπορούσαν να είναι κυψελοειδής έτσι ώστε σε περίπτωση να μην πλημμυρήσει ολόκληρη η δεξαμενή αλλά μόνο ένα μικρό κομμάτι της.

Η εταιρία Wavegen σχεδίασε εκ νέου τη συσκευή αυτή, με νέο όνομα: *OSPREY 2000*, από χάλυβα και σκυρόδεμα. Αυτό οδήγησε την ιρλανδική κυβέρνηση να ανακοινώσει το 1998 ότι θα στηρίξει την εταιρία Wavegen στην προσπάθεια της. Ωστόσο τελικά δεν υπήρξε αρκετή χρηματοδότηση και το έργο δεν τελειοποιήθηκε ποτέ. [83]

Πίνακας 10 : Ο πίνακας με την εκτιμώμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας OSPREY 1 [83]

Τύπος απόληψης ενέργειας	Συσκευή	Εκτιμώμενη ισχύς %	Μετρούμενη ισχύς %
Κυματική ισχύς – ισχύς πνοής αέρα	Παλλόμενη στήλη ύδατος	115 ¹⁹	NA
Ισχύς πνοής – μηχανική ισχύς	Στρόβιλος Wells	70	NA
Μηχανική ισχύς – ηλεκτρική ισχύς	Γεννήτρια ρεύματος	80	NA
Συνολική απόδοση		63	NA

¹⁹ Η απόδοση σε αυτό το σημείο είναι μεγαλύτερη του 100% επειδή το πραγματικό αποδοτικό μήκος απορρόφησης του κυματισμού, δηλαδή η απόσταση των πλευρικών τοιχωμάτων της κατασκευής, είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του θαλάμου συλλογής. Ωστόσο η εκτίμηση αυτή είναι καθαρά θεωρητική και προφανώς υπερεκτιμημένη από τους κατασκευαστές.

4.6.2 Αξονοσυμμετρικές πλωτές συσκευές ΠΣΥ (spar buoy)

Ο σχεδιασμός μιας αξονοσυμμετρικής πλωτής συσκευής ΠΣΥ, που να αποτελείται από έναν βυθισμένο μακρύ κατακόρυφο σωλήνα (tail tube) που είναι προσαρτημένος σε έναν αξονοσυμμετρικό πλωτήρα είδαμε πως είχε μελετηθεί από τον Masuda ήδη από την δεκαετία του 1970 (βλ. §4.2). Επίσης αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης σε δύο από τις πρώτες επιστημονικές δημοσιεύσεις (1974 και 1976 από τον McCormick).

Αυτός ο σχεδιασμός είναι αρκετά αποδοτικός διότι μπορεί να εκμεταλλευθεί όλες τις διευθύνσεις των προσπιπτόντων κυματισμών. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή με το όνομα **spar buoy** (πλωτήρας πάσσαλος) και είδαμε πως αρκετοί τύποι σημαδούρων ναυσιπλοΐας που λειτουργούσαν με κυματική ενέργεια βασίστηκαν στον σχεδιασμό της. Εν τέλει εφαρμόστηκε και σε μεγαλύτερη κλίμακα για ενεργειακή παραγωγή. Αν ο σωλήνας είναι αρκετά μακρύς τότε η απόσταση του κάτω ανοιχτού άκρου από την επιφάνεια της θάλασσας είναι τέτοια ώστε η αλληλεπίδραση των κυμάτων και της εσωτερικής παλλόμενης υδάτινης στήλης να είναι αμελητέα, οπότε η απορρόφηση ενέργειας από τα κύματα οφείλεται κυρίως στις κινήσεις του συστήματος πλωτήρας-σωλήνας και όχι στην κίνηση της υδάτινης στήλης. Ακόμη οι πειραματικές μελέτες έδειξαν πως εάν το κάτω μέρος της κατασκευής είναι κωνικό, τότε η απόδοση είναι μεγαλύτερη.

Μια ανάλογη κατασκευή είναι ο επονομαζόμενος **sloped buoy** (κεκλιμένος πλωτήρας), η οποία αποτελείται από έναν πλωτήρα με 3 κεκλιμένους βυθισμένους σωλήνες, έτσι ώστε το σύστημα να πάλλεται κατά μια γωνία ενδιάμεση μεταξύ της κατακόρυφης (heave) και της οριζόντιας διεύθυνσης (surge). Συγκριτική μελέτη μεταξύ τριών πλωτών συσκευών ΠΣΥ, του spar buoy, του κεκλιμένου πλωτήρα και του BBDB (βλέπε §4.3 ή §4.6.5), για παραγωγή κυματικής ενέργειας στις βρετανικές ακτές του Ατλαντικού, έδειξε ότι ο spar buoy έχει τις καλύτερες οικονομικές προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη.



Εικόνα 59 : Η τομή της συσκευής spar buoy (αριστερά) και το μοντέλο κλίμακας 1:16 που δοκιμάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο (μέση) [75] Η μονάδα Sparbuoy με πολλαπλούς σωλήνες ΠΣΥ (δεξιά) [78] [27]

Στο Ηνωμένο Βασίλειο αναπτύχθηκε και μια άλλη πλωτή διάταξη ΠΣΥ για υπεράκτιες εφαρμογές. Πρόκειται για τον πλωτήρα **Sperboy** της βρετανικής εταιρίας Embley Energy Ltd που αποτελείται από μια πλωτή κατασκευή πάνω στην οποία βρίσκονται οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες και όλα τα σχετικά μηχανικά τμήματα του συστήματος, καθώς και από μια κλειστή στήλη κάτω από το νερό.

Το μέγεθος του ποικίλει ανάλογα με τις θαλάσσιες συνθήκες και την τοποθεσία εγκατάστασης, αλλά οι μέγιστες διαστάσεις είναι διάμετρος 30 m, ύψος 50 m και βύθισμα 35 m. Η μέση ετήσια παραγωγή ισχύος που μπορεί να επιτύχει είναι 450 kW. Πρόκειται για ένα σύστημα πολλαπλών σωλήνων, διαφορετικού μήκους, οι οποίοι αποτελούν τις ΠΣΥ. Κάθε σωλήνας, λόγω του διαφορετικού μήκους του, συντονίζεται σε διαφορετικές συχνότητες κυματισμού και έτσι η συσκευή μπορεί να συντονίζεται σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων του κυματικού πεδίου της θάλασσας με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η απόδοσή της. Μια πιλοτική μορφή της εγκαταστάθηκε στο λιμάνι του Plymouth, στα μέσα του 2000. [27]

4.6.3 Οι ευρεσιτεχνίες greenWave και blueWave της Oceanlinx

Η εταιρία *Oceanlinx* (η οποία αρχικά ονομαζόταν *Energetech*) εστίασε ιδιαίτερα στην μελέτη συστημάτων ΠΣΥ και έπειτα από πολλά χρόνια έρευνας και δοκιμών κατασκεύασε δύο τεχνολογίες: Η μια είναι κατάλληλη για ρηχά νερά (παράκτια τεχνολογία) και ονομάστηκε **greenWave**, ενώ η δεύτερη είναι κατάλληλη για μεγαλύτερα βάθη (υπεράκτια τεχνολογία) και ονομάστηκε **blueWave**. Και οι δύο μονάδες (greenWave και blueWave) της Oceanlinx χρησιμοποιούν στρόβιλο *airWAVE*, ο οποίος είναι πατέντα της Oceanlinx, εξέλιξη του στρόβιλου Deniss – Auld που χρησιμοποιούνταν στις προηγούμενες πειραματικές διατάξεις.

Η διάταξη greenWave εγκαθίσταται σε βάθος περίπου 10 m και θεμελιώνεται στον πυθμένα. Σε περιοχή με υψηλό κυματικό δυναμικό, μία τέτοια μονάδα παράγει περίπου 1 MW ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο πέρα από την παράγωγη ενέργειας η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού.



Εικόνα 60 : Η κατασκευή greenWave στο λιμάνι Adelaide της Αυστραλίας πριν ρυμουλκηθεί προς το σημείο εγκατάστασης, 2014 (αριστερά) [79] και η πλέον εγκατεστημένη μονάδα greenWave (δεξιά)

Η μονάδα της blueWave θεωρείται πλωτή ΠΣΥ. Διαφέρει από την greenWave στο ότι αποτελείται από συστάδα 6 Π.Σ.Υ ενώ τοποθετείται σε βάθη 40 - 80 m με διαδικασία προσόρμισης και αγκύρωσης. Σε καλό κυματικό δυναμικό, μια μονάδα blueWave παράγει περίπου 2,5 MW.

Η Oceanlinx κατέλκυσε τον Φεβρουάριο του 2010, στο λιμάνι Kembbla της Αυστραλίας, μια πλωτή συσκευή ΠΣΥ τύπου blueWave με το όνομα: Mk3. Πρόκειται για πιλοτικό μοντέλο στο 1:3 της κλίμακας της πραγματικής κατασκευής ΠΣΥ των 2,5 MW, συνδεδεμένης με το ηλεκτρικό δίκτυο, μιας πλωτής πλατφόρμας με 8 θαλάμους ΠΣΥ, καθένας από τους οποίους είχε έναν αεροστρόβιλο. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών δύο μόνο στρόβιλοι τέθηκαν σε λειτουργία. Ο ένας στρόβιλος ήταν ο airWAVE, ενώ ο δεύτερος ήταν ο HydroAir. Σκοπός της κατασκευής ήταν η επίδειξη της τεχνολογίας, η δοκιμή και η μελέτη και όχι η τόσο η πολυετής τελική λειτουργία. Όμως 3 μήνες μετά, τον Μάιο του 2010, λόγω ισχυρών κυματισμών, στο λιμάνι Kembbla στη Νέα Νότια Ουαλία κατέρρευσε από τους πυλώνες του ένας στρόβιλος και η κατασκευή βούλιαξε. [27]



Εικόνα 61 : Το πιλοτικό μοντέλο Mk3, κλίμακας 1:3, τύπου blueWave της Oceanlinx [73]

4.6.4 Το φαινόμενο του πολυσυντονισμού και η ευρεσιτεχνία της Energetech

Τα ενεργά μέρη των WEC's είναι συνήθως ρυθμισμένα έτσι ώστε να συντονίζονται με μια συγκεκριμένη περιοχή κυματικών συχνοτήτων. Αυτός ο συντονισμός μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους και στην περίπτωση των τεχνολογιών ΠΣΥ επιτυγχάνεται με την διαμόρφωση των κατάλληλων διαστάσεων του θαλάμου έτσι ώστε η παγιδευμένη μάζα του νερού εντός του να συντονίζεται με τις υδροστατικές δυνάμεις επαναφοράς του. Ο βασικός στόχος είναι η επίτευξη του "**πολυσυντονισμού**" (*multi-resonance*), δηλαδή ο συντονισμός σε πολλές συχνότητες κυματισμών. Για να επιτευχθεί όμως αυτό κατασκευάστηκαν σε διάφορους τύπους τεχνολογιών Π.Σ.Υ πλευρικά τοιχώματα που προεξέχουν από τον θάλαμο προς την κατεύθυνση των εισερχόμενων κυμάτων, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα είδος "λιμανιού" το οποίο θα προκαλέσει πρόσθετο συντονισμό με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόδοση.

Ο πολυσυντονισμός ονομάστηκε και "**συντονισμός λιμανιού**" και επιτυγχάνεται αν το προσπίπτον κύμα έχει τετραπλάσιο μήκος κύματος από το μήκος των πλευρικών

τοιχωμάτων, οπότε για την κατασκευή αυτής της τεχνολογίας απαιτείται η μελέτη των κυματικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 και τέτοια λιμάνια συντονισμού προστέθηκαν ήδη στις πρώτες επάκτιες κατασκευές ΠΣΥ, όπως στο Toftestallen (Νορβηγία) και στο Trivandrum στην Ινδία που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η εταιρία Energetech (πριν μετονομαστεί σε Oceanlinx) ανέπτυξε μια τεχνολογία για να αξιοποιήσει το φαινόμενο του "λιμανιού συντονισμού" κάνοντας χρήση τοιχωμάτων παραβολικού σχήματος τα οποία εστιάζουν την ενέργεια της κορυφής του κύματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Καθώς λοιπόν το κύμα συγκλίνει περιοριζόμενο από τα πλευρικά τοιχώματα το ύψος της κορυφής του μεγιστοποιείται ακριβώς στο σημείο που βρίσκεται ο θάλαμος συλλογής (δηλαδή το **εστιακό σημείο**). Ο σχεδιασμός αυτός προτάθηκε αρχικά το 1992 και αναπτύχθηκε εν τέλει το 1997 από το Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας. Μέγιστη απόδοση σημειώνεται όταν [27]:

1. Η κατεύθυνση της κορυφής του κύματος είναι παράλληλη προς τον άξονα συμμετρίας των παραβολικών τοιχωμάτων της κατασκευής
2. Ο πυθμένας της θάλασσας κοντά στη συσκευή είναι επίπεδος και το βάθος αρκετά μεγάλο, έτσι ώστε να μην μεταβάλλεται η διεύθυνση των κυματισμών ή αυτοί να "σπάζουν" όπως συμβαίνει κοντά στις ακτές λόγω της ρήχωσης.
3. Η εστιακή απόσταση (focal length) πρέπει να καθορίζεται έτσι ώστε τα κύματα να μην προλαβαίνουν να διασκορπιστούν.

Μια τέτοια παράκτια χαλύβδινη κατασκευή στερεωμένη στον βυθό, εγκαταστάθηκε από την Energetech στο λιμάνι Kembla, 100 km νότια του Σίδνεϊ στην Αυστραλία, το 2005. Η γεννήτρια της ήταν της τάξεως των 300 kW, ενώ ο θάλαμος της κατασκευής είχε κωνοειδές σχήμα, όπως φαίνεται στο σχήμα, με αποτέλεσμα ο διερχόμενος αέρας να εξάγεται και να εισέρχεται πάλι με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα επιτρέποντας έτσι και τη βέλτιστη απόσπαση της ενέργειας των κυματισμών. Η μονάδα είχε μήκος περίπου 36 m και πλάτος 35 m.



Εικόνα 62 : Η πακτωμένη μονάδα ΠΣΥ με τοιχώματα συντονισμού, της Oceanlinx (ή Energetech), 2005 (αριστερά) [86] και ένα καλλιτεχνικό σχέδιο της (δεξιά) [46]

Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση η κατασκευή έπρεπε να είναι ευθυγραμμισμένη έτσι ώστε οι κυματισμοί να εισέρχονται παράλληλα στον άξονα συμμετρίας των δύο παραβολικών τοιχωμάτων. Όσο μικρότερη είναι η γωνία μεταξύ του άξονα συμμετρίας και της διεύθυνσης διάδοσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενεργειακή απόδοση. Ο κυματισμός που έφτανε στο στόμιο του θαλάμου συλλογής θεωρήθηκε πως στο σημείο εγκατάστασης θα έφτανε την ισχύ των 9 kW/m.

Η συγκεκριμένη μονάδα διέθετε αεροστρόβιλο Dennis - Auld ο οποίος έχει μικρότερη ταχύτητα περιστροφής και υψηλότερη ροπή από τους παραδοσιακούς στρόβιλους με αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση, καλύτερη αξιοπιστία, χαμηλά επίπεδα θορύβου και φυσικά λιγότερες ανάγκες σε συντήρηση. Η λειτουργία του στρόβιλου αυτού ελέγχεται από έναν αισθητήρα πίεσης τοποθετημένο στο εστιακό σημείο του παραβολικού σχήματος. Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να εγκατασταθεί σε επάκτιες κατασκευές και σε κυματοθραύστες. Ο περιορισμός στον σχεδιασμό της είναι ότι πρέπει να εγκατασταθεί σε βαθιά νερά (τουλάχιστον 40 m) έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, όπως αναφέρθηκε και στα σημεία 1, 2 και 3.

Πίνακας 11: Ο πίνακας με την εκτιμώμενη και την μετρούμενη απόδοση της μονάδας Π.Σ.Υ της Oceanlinx [83]

Τύπος απόληψης ενέργειας	Συσκευή	Εκτιμώμενη ισχύς %	Μετρούμενη ισχύς %
Κυματική ισχύς – ισχύς πνοής αέρα	Παλλόμενη στήλη ύδατος	67	NA
Ισχύς πνοής – μηχανική ισχύς	Στρόβιλος Dennis-Auld	54-80	NA
Μηχανική ισχύς – ηλεκτρική ισχύς	Γεννήτρια ρεύματος	90	NA
Συνολική απόδοση		32.4	NA

Πίνακας 12 : Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της μονάδας Π.Σ.Υ της Oceanlinx [83]

Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά κυματισμών
Συνολικό πλάτος: 36.0 m	Βάθος περιοχής εγκατάστασης: 8-16 m
Αριθμός θαλάμων + πλάτος: 1 x 10.0 m	Ύψος κύματος σχεδιασμού: 7.0 m
Κλίση θαλάμου: 45°	Περίοδος κύματος σχεδιασμού: 8-12 s
Βύθισμα μπροστινού θαλάμου, κάτω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 3.0 m	Return period 100 year
Ύψος πάνω από την μέση επιφάνεια της θάλασσας: 12.0 m	Μέγιστη ασκούμενη πίεση κυματισμών
Στρόβιλος	Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος
Διάμετρος τουρμπίνας: 1.6 m	Τύπος: Suirell cage/induction
Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας: 500 rpm	Ονομαστική ισχύς Γεννήτριας: 200/300 kW
Αριθμός στρόβιλων: 1	Duty Type: 50 Hz, 12-pole
Διάταξη στρόβιλου: horizontal axis	Rotor Type: Cage
Σχήμα λεπίδας στρόβιλου:	Τάση: 415 V
Αριθμός λεπίδων: 21	Μέση Ταχύτητα περιστροφής: 500 rpm

Χορδή λεπίδας:

Μέγιστη ταχύτητα δοκιμής: 750 rpm

Αναλογία από κέντρο μέχρι άκρη: 0.75

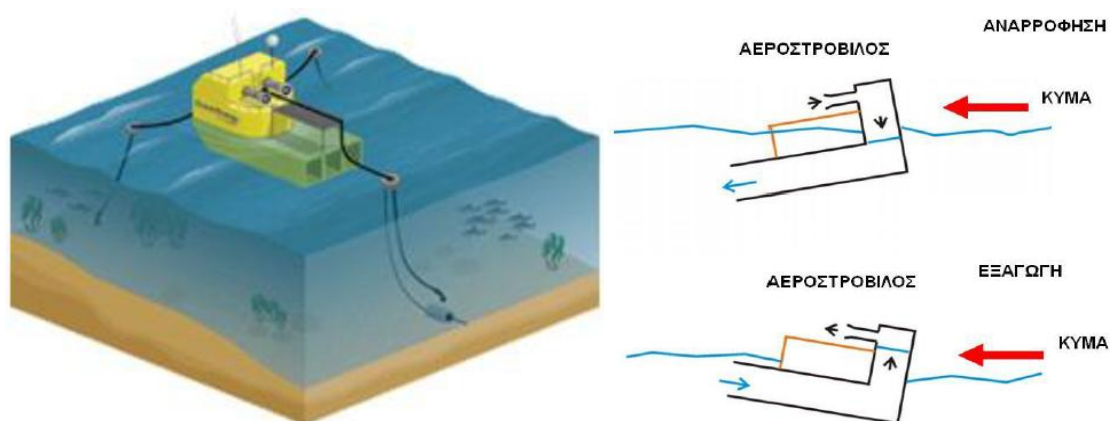
Αδράνεια

4.6.5 Ο πλωτήρας ΟΕ Βυοϋ τύπου BBDB

Όπως αναφέρθηκε και στην §4.3 την δεκαετία του 1980 στην Ιαπωνία έγιναν οι πρώτες πειραματικές σχετικά με την διάταξη του Πλωτήρα Οπίσθιου Λυγισμένου Σωλήνα (Backward Bent Duct Buoy, BBDB). Ωστόσο η μελέτη της συγκεκριμένης διάταξης έλαβε μέρος και σε πολλές άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, όπως και στην Νότια Κορέα, στις ΗΠΑ, στην Κίνα και στην Ινδία.

Η Ιρλανδική εταιρία Ocean Energy Ltd, που ιδρύθηκε το 2001 από τους Michael Whelan και John Mc Carthy, ανέλαβε να σχεδιάσει και να κατασκευάσει μια πρώτη πιλοτική μονάδα Π.Σ.Υ η οποία θα ήταν τύπου BBDB. Οι πρώτες δοκιμές έγιναν σε πειραματική δεξαμενή στο Πανεπιστημιακό Κολλέγιο του Croc και αφορούσαν ένα μοντέλο κλίμακας 1:50. Ανάλογες πειραματικές δοκιμές έγιναν στο Encole Centrale της Νάντης στην Γαλλία σε ένα μοντέλο κλίμακας 1:15. Δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες ωκεανού έγιναν στον όρμο Galway της Ιρλανδίας για ένα μοντέλο κλίμακας 1:4 και βάρους 32 τόνων που κατασκευάστηκε από την Ocean Energy Ltd. Το πιλοτικό αυτό έργο δοκιμάστηκε το διάστημα 2006-2009, συνολικά για 21.900 ώρες λειτουργίας. Η μονάδα ονομάστηκε πλωτήρας **ΟΕ Buoy** (Ocean Energy Buoy).

Η θάλασσα της Ιρλανδίας περιέχει ένα από τα ισχυρότερα κυματικά δυναμικά παγκοσμίως, καθώς τα κύματα του Ατλαντικού Ωκεανού που προσπίπτουν στις ακτές της υπολογίζεται ότι φέρουν 18,6 GW ισχύ και δύναται να προσφέρουν ετήσια παραγωγή ενέργειας 48 TWh. Σύμφωνα λοιπόν με τις επιστημονικές εκτιμήσεις η κυματική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει άνετα το 20% των αναγκών της χώρας αυτής σε ηλεκτρική ενέργεια. Αντιλαμβανόμεστε λοιπόν πως οι ακτές της Ιρλανδίας είναι ένα πολύ καλό σημείο για πειραματικές δοκιμές που αφορούν την τεχνολογία της Π.Σ.Υ και γενικότερα των WECs. [87]



Εικόνα 63: Καλλιτεχνική απεικόνιση του πλωτήρα ΟΕ Βυοϋ (αριστερά), ένα σχεδιάγραμμα σχετικό με τον τρόπο λειτουργίας του (δεξιά) [87]

Η λειτουργία και η μορφή αυτής της τεχνολογίας ήταν αυτή που είχε προτείνει και ο Masuda (βλ. εικόνα 44). Το ανοικτό άκρο της κατασκευής τοποθετήθηκε στην ίδια φορά με αυτήν του προσπίπτοντος κυματισμού, έτσι ώστε το προσπίπτον κύμα να πέφτει πρώτα πάνω στο λυγισμένο άκρο παράγοντας έτσι ισχυρές ταλαντώσεις στο σύστημα οι οποίες θα συνέβαλαν στην σχετική κίνηση της επιφάνειας του νερού και της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο αυξήθηκε η απόδοση σε σχέση με έναν απλό αξονοσυμμετρικό πλωτήρα. Η απόδοση μειωνόταν όταν η ενεργειακή κατάσταση της θάλασσας ήταν πολύ υψηλή καθώς ο αεροστρόβιλος έπαυε την λειτουργία του για να μην καταστραφεί. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο, μέσα στον θάλαμο εισαγωγής τοποθετήθηκε μια βαλβίδα εκτόνωσης αέρα η οποία απέτρεπε την παύση της λειτουργίας της του αεροστροβίλου και ταυτόχρονα τον προστάτευε από την δημιουργία υπερπίεσης εντός του θαλάμου. Ο αεροστρόβιλος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας απλός στρόβιλος Wells εννέα πτερυγίων, διαμέτρου περίπου 1.5 m.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς η εν λόγω τεχνολογία απέδειξε ότι έχει αρκετές δυνατότητες. Συγκεκριμένα:

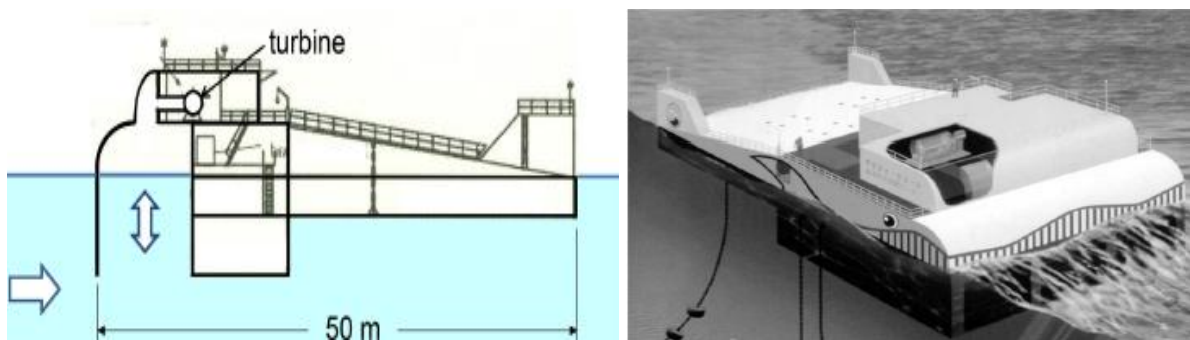
- Δοκιμάστηκε στην ανοικτή θάλασσα του Ατλαντικού Ωκεανού σε κυματισμούς που έφεραν ύψος πάνω από 32 m. Σε αυτές τις συνθήκες επιβίωσε και λειτούργησε αποδοτικά.
- Παρήγαγε ενέργεια για 1500 κατοικίες για χρονικό διάστημα ενός χρόνου
- Ο ειδικός σχεδιασμός της κατασκευής μείωσε τις ασκούμενες εντάσεις στο σύστημα αγκυρώσεως, αυξάνοντας την ασφάλεια
- Προσαρμόστηκε σε πολλά διαφορετικά κυματικά κλίματα καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας της
- Οι εργασίες συντήρησης δεν ήταν πολύ δαπανηρές ή δύσκολες κατά την διεξαγωγή τους
- Η κατασκευή αποδείχθηκε εύκολη κατά τον σχεδιασμό και την παραγωγή της



Εικόνα 64 : Η συσκευή ΟΕ Βυογ τύπου BBDB στην Ιρλανδία, σε φυσιολογικές συνθήκες θάλασσας (αριστερά) και κατά την διάρκεια καταιγίδας (δεξιά) [73]

4.6.6 Η μονάδα **Mighty Whale** στην Ιαπωνία

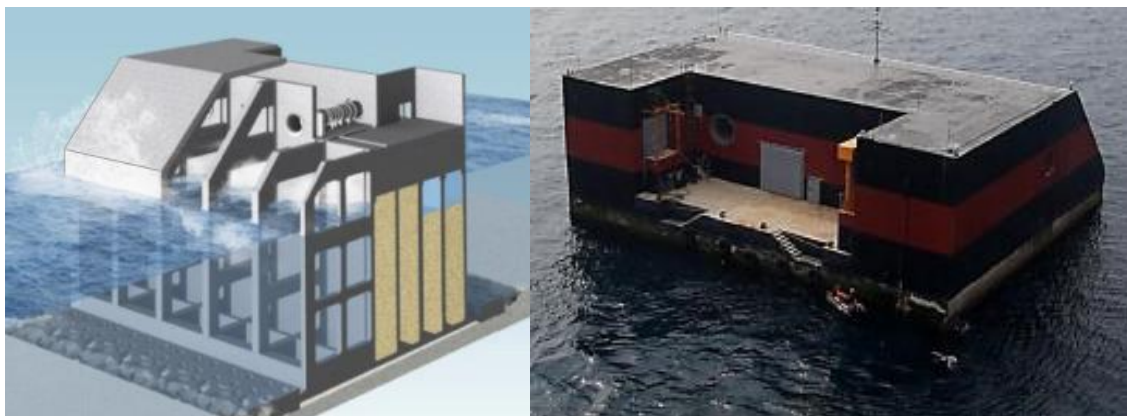
Η μονάδα **Mighty Whale** ("Ισχυρή Φάλαινα") αναπτύχθηκε από το Ιαπωνικό Κέντρο Θαλάσσιας Επιστήμης και Τεχνολογίας (JAMSTEC - Japan Marine Science and Technology Center) και υπό την ηγεσία του Takeaki Miyazaki. Είναι μια πλωτή ΠΣΥ που μοιάζει με φάλαινα. Έχει μήκος 50 m, πλάτος 30 m και βύθισμα 12 m και εκτόπισμα 4400 τόνους. Έχει 3 θαλάμους αέρα στην μπροστινή πλευρά, ο ένας δίπλα στον άλλον, καθώς και δεξαμενές πλευστότητας (buoyancy tanks). Κάθε θάλαμος συνδέεται με έναν αεροστρόβιλο Wells. Η συνολική ονομαστική ισχύς της ήταν 110 kW. Η κατασκευή κατελκύστηκε στον Όρμο Gokasho στην Ιαπωνία το 1998 και δοκιμάστηκε για αρκετά χρόνια.



Εικόνα 65 : Η μονάδα **Mighty Whale**. Η κατασκευή στον Όρμο Gokasho στην Ιαπωνία (δεξιά) και το σχεδιάγραμμα του προφίλ της (αριστερά) [79] [78]

4.6.7 Η πακτωμένη πιλοτική μονάδα στο **Yongsoo** της Νότιας Κορέας

Τον Ιούλιο του 2016 ολοκληρώθηκε η κατασκευή μιας υπεράκτιος πιλοτικής μονάδας ΠΣΥ, στερεωμένης στον πυθμένα, 500 kW, η οποία εγκαταστάθηκε στο Yongsoo, περίπου 1,5 km από την ακτή του νησιού Jeju, στη Νότια Κορέα. Η μονάδα έχει μήκος 37 m και πλάτος 31 m. Είναι εξοπλισμένη με αεροστροβίλους impulse και γεννήτριες 250 kW και είναι συνδεδεμένη με υποβρύχιο καλώδιο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα πρώτα στοιχεία των δοκιμών λειτουργίας της δείχνουν μέγιστη απόδοση του θαλάμου ΠΣΥ 52,7%, του αεροστροβίλου 40% και της γεννήτριας 91,7%, αντίστοιχα.



Εικόνα 66 : Η πακτωμένη κατασκευή ΠΣΥ στο Yongsoo της νότιας Κορέας. Αριστερά το σχεδιάγραμμα της και δεξιά η πραγματική μονάδα από την πίσω πλευρά. [75] [79]

4.7 Σχολιασμός και συμπεράσματα σχετικά με τις τεχνολογίες της Π.Σ.Υ

Όλες οι ευρεσιτεχνίες Π.Σ.Υ οι οποίες έχουν κατασκευαστεί και τοποθετηθεί μέχρι και σήμερα είναι πιλοτικές μονάδες οι οποίες είχαν και έχουν περισσότερο πειραματικό χαρακτήρα. Ο σκοπός εγκατάστασης τους δηλαδή αφορούσε περισσότερο την δοκιμή, την έρευνα και την συλλογή πειραματικών δεδομένων σχετικά με την απόδοση και την αντοχή τους, με στόχο την βελτιστοποίηση της εν λόγω τεχνολογίας προκειμένου κάποτε να κατασκευαστεί και σε βιομηχανική κλίμακα για να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αρκετές από τις μονάδες μου εγκαταστάθηκαν μέσα στην τριακονταετία 1990-2020 έδειξαν ιδιαίτερη ικανότητα στο να αντέχουν στις δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες και στα μεγάλα φορτία που ασκούνται πάνω τους από τους προσπίπτοντες κυματισμούς. Επίσης έδωσαν πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση τους. Σε γενικές γραμμές η απόδοση των μονάδων αυτών ήταν κατώτερη από την πειραματικώς προβλεπόμενη αλλά και πάλι ήταν ικανοποιητική. Αν λάβει κανείς υπόψιν το γεγονός πως αυτές οι τεχνολογίες βελτιώνονται συνεχώς με τα χρόνια, θα βγάλει συμπέρασμα ότι σύντομα η Π.Σ.Υ θα βγει στην αγορά με προδιαγραφές να καλύψει μεγάλο ποσοστό των αναγκών σε ενέργεια.

Όλα αυτά τα χρόνια των δοκιμών όμως υπήρξαν και σοβαρές αποτυχίες, κυρίως σ' ότι αφορά τις παράκτιες τεχνολογίες οι οποίες λειτουργούν και στις πιο αντίξοες συνθήκες. Συγκεκριμένα οι δύο μεγαλύτερες από άποψη ισχύος τεχνολογίες, Osprey 1 στην Σκωτία και greenWAVE στην Αυστραλία, καταστράφηκαν. Η πρώτη βούλιαξε γιατί δεν γέμισαν τις πλάγιες δεξαμενές της με έρμα σύντομα μετά την καθέλκυση της και η δεύτερη βούλιαξε λίγους μήνες μετά την εγκατάσταση της. Και οι δύο περιπτώσεις καταστροφής οφείλονταν σε καιαιγίδες, πράγμα που δείχνει ότι οι υπολογισμοί για την αντοχή τους (στην περίπτωση της μονάδας greenWAVE) ή και ο τεχνικός σχεδιασμός εγκατάστασης (στην περίπτωση της μονάδας Osprey 1), δεν ήταν ακριβείς. Η δυσάρεστη αυτή κατάληξη δείχνει πως πριν από την διαδικασία καθέλκυσης και εγκατάστασης πρέπει να γίνονται πολύ καλές μελέτες σχετικά με το κυματικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης. Ωστόσο η πρόσφατη επιτυχής εγκατάσταση της μονάδας στο Yongsoo της Νότιας Κορέας δείχνει ότι αυτό το ρίσκο είναι κάτι που μπορεί να ξεπεραστεί με σωστά κυματικά δεδομένα και τον κατάλληλο σχεδιασμό της κυματικής μηχανής, καθώς και της διαδικασίας ρυμούλκησης και εγκατάστασης της στην επιλεχθείσα τοποθεσία.

Ένα βασικό πρόβλημα ακόμη είναι πως η εκάστωτε τεχνολογία Π.Σ.Υ από αυτές που μελετήθηκαν ήταν λίγο ή πολύ κατάλληλα σχεδιασμένη για την συγκεκριμένη περιοχή εγκατάστασης και δεν είναι σίγουρο ότι θα αποδίδει το ίδιο σε όλες τις άλλες πιθανές τοποθεσίες, τουλάχιστον προς το παρόν και ειδικά για τις επάκτιες κατασκευές. Πιθανότατα στο μέλλον να υπάρξει μια μόνο ευρεσιτεχνία η οποία το πιθανότερο είναι να αντιστοιχεί σε μια τεχνολογία κατάλληλη για παράκτια εγκατάσταση ή πιθανόν να υπάρξει και μια δεύτερη ευρεσιτεχνία κατάλληλη για επάκτια εγκατάσταση σε λιμενοβραχίονα. Μια γενική

τεχνολογία η οποία να είναι εγκατεστημένη στην φυσική ακτογραμμή δεν προβλέπεται να υπάρξει ποτέ. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από την παρακάτω παράγραφο:

4.7.1 Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι επάκτιες τεχνολογίες Π.Σ.Υ

Οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η κατασκευαστική ομάδα επιστημόνων και μηχανικών μιας επάκτιας τεχνολογίας Π.Σ.Υ είναι τα εξείς [83]:

1. *Η σωστή αξιολόγηση των κυματικών πόρων στην περιοχή εγκατάστασης έτσι ώστε η μηχανή να μπορεί να αποδώσει στο μέγιστο.*

Οι κυματισμοί κοντά στην ακτή αποκλίνουν πολύ από την απλή γραμμική θεώρηση (βλ. §2.3), πράγμα που οδηγεί σε ασαφή αριθμητική μοντελοποίηση τους, λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως είναι οι απώλειες λόγω τριβής του ρευστού με τον πυθμένα, οι τοπικές ιδιαιτερότητες της ακτογραμμής που μπορεί να έχουν επίδραση στην απόδοση της κατασκευής κτλ. Ο κυματισμός λοιπόν επηρεάζεται πολύ από την τοπική βαθυμετρία και την μορφή της ακτογραμμής και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματικό σχεδιασμό της διάταξης του στροβίλου και έτσι αυτός να μην ταιριάζει με την επιλεγμένη γεννήτρια. Υπό αυτές τις συνθήκες οι απώλειες σε παραγωγή ενέργειας θα είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αρχικές θεωρητικές εκτιμήσεις.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί κάνοντας χρήση δεδομένων που έχουν παραχθεί από κάποιο κυματικό μοντέλο και αφορούν την πιθανή περιοχή εγκατάστασης. Τα μοντέλα έχουν την δυνατότητα να προβλέψουν ικανοποιητικά τις παράκτιες συνθήκες, όπως είναι το βάθος στο οποίο ο κυματισμός «σπάζει», η τριβή που ασκείται από τον πυθμένα, ο άνεμος στην περιοχή και την εμβέλεια της παλίρροιας (εάν αυτή υπάρχει στην εν λόγω περιοχή). Πέρα όμως από τα κυματικά μοντέλα πρόοδο σχετικά με την προβλεψιμότητα των κυματισμών έχουν σημειώσει και τα δορυφορικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να μετρήσουν τα στιγμιαία ύψη κυματισμών, καθώς και το ενεργειακό φάσμα τους πάνω από την περιοχή εγκατάστασης. Ωστόσο, χωρίς ακριβείς επιτόπιες μετρήσεις κύματος με την βοήθεια πλωτήρα, κάθε πιθανή πρόβλεψη των τοπικών θαλάσσιων συνθηκών μόνο με χρήση μοντέλων ή δορυφορικών δεδομένων είναι επισφαλής. Ακόμη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ωκεανογραφικά σκάφη τα οποία θα σαρώνουν τον πυθμένα με ηχοβολιστικά μηχανήματα έτσι ώστε να καταγράψουν την μορφολογία του. Ωστόσο μια τέτοια διαδικασία είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

2. *Ο σωστός σχεδιασμός της μηχανής έτσι ώστε να αξιοποιεί τις δυνατότητες της συγκεκριμένης περιοχής, καθώς και η σωστή προετοιμασία του χώρου πριν την εκκίνηση των εργασιών εγκατάστασης.*

Η μορφή της ακτογραμμής, δηλαδή κάποιος πιθανός όρμος, κάποιο υποθαλάσσιο ρεύμα καθώς και η μορφή των βράχων στην περιοχή εγκατάστασης θα είναι μοναδική. Έτσι ο τύπος του βράχου στον οποίο δύναται να τοποθετηθεί η μηχανή θα επηρεάζει την δομή και την γεωμετρία που αυτή θα πρέπει να λάβει. Ακόμη η τοπική βαθυμετρία θα επηρεάζει την

ισχύ των κυματισμών, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Επίσης ο τρόπος και η δυσκολία πρόσβασης στο σημείο εγκατάστασης αλλάζει από περιοχή σε περιοχή. Όλα αυτά λοιπόν έχουν ως αποτέλεσμα ο προτεινόμενος τρόπος κατασκευής και το κόστος να αλλάζουν ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Επομένως είναι πολύ δύσκολο να παραχθεί κάποιος συγκεκριμένος σχεδιασμός κατάλληλος για πολλές διαφορετικές τοποθεσίες και ως εκ τούτου για κάθε περιοχή θα πρέπει να γίνονται ειδικές μελέτες, πράγμα το οποίο θα αυξάνει το κόστος.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί εάν τοποθετούνται οι τεχνολογίες Π.Σ.Υ μόνο σε μεγάλες, ευθείες και συνεχείς παραθαλάσσιες τοποθεσίες και όχι σε μέρη όπου η ακτογραμμή έχει περίπλοκο σχήμα και βαθυμετρία. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθούν οι μεταβλητές του σχεδιασμού και έτσι θα μπορεί να παραχθεί ένα γενικό πλάνο προετοιμασίας της περιοχής εγκατάστασης.

3. Ειδικές τεχνικές ικανότητες και κατάλληλος εξοπλισμός έτσι ώστε να γίνουν αποτελεσματικά οι εργασίες εγκατάστασης.

Οι επάκτιες κατασκευές Π.Σ.Υ προκειμένου να κατασκευαστούν απαιτείται η μεταποίηση της τοπικής ακτογραμμής και η άμεση προσέγγιση του πυθμένα. Έτσι λοιπόν ανάλογα τις ιδιαιτερότητες της ακτογραμμής υπάρχουν και διαφορετικές κατασκευαστικές μέθοδοι.

Μια πρώτη μέθοδος είναι η επιτόπια κατασκευή πίσω από τον βράχο στον οποίο δύναται να τοποθετηθεί η μονάδα Π.Σ.Υ. Αρχικά σκάβεται ένα μεγάλο χαντάκι πίσω από το σημείο εγκατάστασης και εκεί κατασκευάζεται η μονάδα Π.Σ.Υ. Μόλις τελειώσει το έργο απομακρύνεται ο μπροστινός βράχος έτσι ώστε να διέλθει το θαλασσινό νερό (έτσι για παράδειγμα κατασκευάστηκε η μονάδα LIMPET).

Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής: Εάν ακολουθηθεί αυτός ο τρόπος κατασκευής τότε η μονάδα θα βρίσκεται «μέσα» στον βράχο και πίσω από την φυσική ακτογραμμή, πράγμα που έχει αποδειχθεί πως μειώνει την ισχύ του προσπίπτοντος κυματισμού (τουλάχιστον στην περίπτωση ρηχού βάρους νερού). Επιπλέον απαιτείται μεγάλο ύψος του μπροστινού βράχου έτσι ώστε κατά την διαδικασία εγκατάστασης και κατασκευής να παρέχεται ασφάλεια στο εργοτάξιο, πράγμα που μειώνει σημαντικά τις κατάλληλες θέσεις που μπορεί να μπει μια Π.Σ.Υ. Ακόμη, όταν ο μπροστινός βράχος αφαιρεθεί ένα μέρος του ιζήματος θα πέσει μπροστά από την μονάδα και στην συνέχεια θα πρέπει να αφαιρεθεί για να μην επηρεαστεί η λειτουργία και η απόδοση της. Τέλος κατά την διαδικασία εγκατάστασης πρέπει να γίνουν κάποια προσωρινά έργα στήριξης έτσι ώστε να μην καταρρεύσει ο μπροστινός βράχος από τα ασκούμενα εξωτερικά κυματικά φορτία.

Μια άλλη μέθοδος είναι η κατασκευή μόνο της οροφής της Π.Σ.Υ, η οποία πακτώνεται πάνω στον βράχο εγκατάστασης. Ο φυσικός βράχος κάτω από την εγκατεστημένη οροφή παίζει τον ρόλο του πυθμένα του θαλάμου της Π.Σ.Υ, χωρίς όμως να παραμείνει ανέπαφος· πρέπει και αυτός να σκαφτεί με κατάλληλα μηχανήματα και να λάβει ειδική μορφή και γεωμετρία. Ωστόσο αυτός ο τρόπος κατασκευής απαιτεί εργασίες κάτω από την επιφάνεια της

θάλασσας και έναν πολύ καλό σχεδιασμό, έτσι ώστε αυτές να γίνουν σε περιόδους με καλές καιρικές συνθήκες.

Γενικώς η πλειοψηφία των τοποθεσιών που επιλέγονται για επάκτιες μονάδες Π.Σ.Υ βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η πρόσβαση σε τεχνικό εξοπλισμό και πρώτες ύλες. Επίσης οι τοποθεσίες που επιλέγονται συνήθως είναι εκτεθειμένες σε κυματισμούς υψηλής ισχύος πράγμα που σημαίνει ότι η μόνη κατάλληλη περίοδος για εργασίες είναι η καλοκαιρινή. Ακόμη λόγω των προσωρινών έργων ασφάλειας του εργοταξίου, καθώς και των εργασιών κάτω από το νερό απαιτείται πολύ καλός σχεδιασμός, ειδικός εξοπλισμός, καθώς και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Όλες όμως αυτές οι συνθήκες αυξάνουν το κόστος κατασκευής.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα μπορούν εν μέρει να αντιμετωπισθούν με σωστό σχεδιασμό, τόσο όσον αφορά το κόστος κατασκευής, όσο και σχετικά με τον χρόνο εγκατάστασης. Μερικές ιδέες προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων της μονάδας (όπως είναι για παράδειγμα μια έτοιμη οροφή του θαλάμου εισαγωγής), καθώς και οι πιο πρακτικές και ευέλικτες μορφές εργασίας οι οποίες θα μειώσουν τον χρόνο κατασκευής, αυξάνοντας όμως το κόστος. Μια ακόμη μέθοδος είναι το να προκατασκευαστεί ολόκληρος ο θάλαμος εισαγωγής και στην συνέχεια να μεταφερθεί και να εγκατασταθεί ολόκληρος στο επιλεγμένο σημείο. Αυτή η λύση θα μείωνε κατά πολύ το κόστος προετοιμασίας της περιοχής εγκατάστασης, ενώ η κατασκευή δεν θα ήταν απαραίτητο να γίνει από την ακτή πράγμα που με την σειρά του σημαίνει πως δεν είναι απαραίτητο να ανοίξουν δρόμοι. Επίσης η υποβρύχιες εργασίες θα ήταν πολύ πιο περιορισμένες και το εργατικό δυναμικό δεν θα χρειαζόταν να είναι τόσο καλά εξειδικευμένο.

4. Ο κίνδυνος καταστροφής ή καθυστέρησης του έργου λόγω κακών καιρικών συνθηκών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ακτογραμμή που επιλέγεται για την εγκατάσταση μιας μονάδας Π.Σ.Υ είναι συνήθως εκτεθειμένη σε ισχυρούς κυματισμούς πράγμα που σημαίνει ότι οι εργασίες κατασκευής και εγκατάστασης δεν μπορούν παρά να γίνουν τους καλοκαιρινούς μήνες. Ωστόσο συνήθως, όσο και καλός να είναι ο τεχνικός σχεδιασμός, το συνολικό πρόγραμμα εγκατάστασης ξεπερνάει τους τέσσερις μήνες πράγμα που σημαίνει ότι ένα μέρος της κατασκευής θα λάβει μέρος τους Χειμερινούς μήνες. Επί πλέον όμως ακραίες καιρικές συνθήκες και καταιγίδες μπορεί να συμβούν και κατά την διάρκεια του καλοκαιριού.

Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει πριν και κατά την διάρκεια των εργασιών εγκατάστασης να γίνονται επιπλέον μετεωρολογικές μελέτες έτσι ώστε να υπάρχει μια συνεχής ενημέρωση για τις καιρικές συνθήκες. Παράλληλα θα πρέπει να υπάρχει ένα σχέδιο προστασίας των όποιων εργασιών έχουν γίνει σε περίπτωση κακοκαιρίας. Τέλος η διαδικασία κατασκευής θα μπορούσε να χωριστεί σε μικρές περιόδους μέσα στις οποίες θα είναι εξασφαλισμένο ότι δεν θα προκύψουν καταιγίδες.

4.7.2 Σύγκριση των παράκτιων με τις επάκτιες μονάδες Π.Σ.Υ

Αρκετοί από τους εγγενείς περιορισμούς των επάκτιων συσκευών Π.Σ.Υ που αναφέρθηκαν στην §4.7.1, παύουν να υφίστανται όταν η μονάδα τοποθετείται μέσα στην θάλασσα. Τα πλεονεκτήματα λοιπόν των παράκτιων σε σχέση με τις επάκτιες μονάδες είναι τα εξής:

- Αρχικά η διαδικασία κατασκευής της μηχανής μπορεί να γίνει σε κάποιο ναυπηγείο ή σε κάποιον άλλο κλειστό χώρο και όχι πάνω στην ακτή, πράγμα που αποκλείει την πιθανότητα καταστροφής, βλάβης ή αργοπορίας λόγω κακών καιρικών συνθηκών. Παράλληλα μειώνεται το συνολικό κόστος κατασκευής διότι δεν χρειάζονται προσωρινά έργα προστασίας.
- Επειδή η λειτουργία μιας πλωτής Π.Σ.Υ δεν επηρεάζεται τόσο έντονα από την ακτογραμμή και από τον πυθμένα είναι πιο εύκολο να παραχθεί στο μέλλον μια καθολική ευρεσιτεχνία που να είναι κατάλληλη για πολλές διαφορετικές τοποθεσίες.
- Παρά το γεγονός πως η χρήση ενός χώρου κατασκευής, είτε πρόκειται για κάποιο ναυπηγείο είτε για κάποιο άλλου είδους εργοτάξιο, μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή για την κατασκευή μιας μόνο συσκευής Π.Σ.Υ, εντούτοις εάν πρόκειται να κατασκευαστούν πολλές συσκευές και να δημιουργηθεί μια γραμμή παραγωγής, αυτό το κόστος μειώνεται σε συνολικό επίπεδο. Αυτό βέβαια είναι κάτι που θα γίνει εάν μια τεχνολογία Π.Σ.Υ τελειοποιηθεί και αρχίσει να παράγεται σε βιομηχανική κλίμακα.
- Ακόμη η μηχανή κατασκευάζεται ευκολότερα καθώς το εργοτάξιο δεν είναι εκτεθειμένο στην κακοκαιρία, ενώ δεν χρειάζονται σχεδόν καθόλου εργασίες κάτω από το νερό, αυξάνοντας έτσι την παραγωγικότητα συνολικά.
- Η προετοιμασία του χώρου εγκατάστασης της μονάδας είναι ελάχιστη ή δεν υφίσταται καθόλου, ενώ δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου υποθαλάσσια εργασία
- Μια πλωτή συσκευή μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της με το να ρυμουλκηθεί, ή και να περιστραφεί σε μια νέα θέση εντός της θάλασσας στην οποία θα μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικότερα, πράγμα που δεν είναι δυνατό να γίνει στην περίπτωση των επάκτιων κατασκευών.

Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματα, οι παράκτιες συσκευές Π.Σ.Υ έχουν και αρκετά μειονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι:

- Αρχικά το κόστος αυξάνεται λόγω του ότι η κατασκευή πρέπει να αγκυρωθεί ή να πακτωθεί στον πυθμένα, ενώ θα πρέπει να γίνει χρήση και υποθαλάσσιων καλωδίων προκειμένου να παρέχει στο δίκτυο την ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγει.
- Η πρόσβαση στην μηχανή για τις διεργασίες συντήρησης θα είναι πολύ δυσκολότερη με αποτέλεσμα να αυξάνεται επί πλέον το κόστος. Παρ' όλα αυτά το μέσο κόστος συντήρησης μιας επάκτιας και μιας υπεράκτιας κατασκευής υπολογίζεται να είναι σχεδόν το ίδιο.

- Οι συνθήκες στην ανοικτή θάλασσα είναι πιο αντίξοες με αποτέλεσμα να ασκούνται ισχυρότερα φορτία στην κατασκευή η οποία πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντέχει.
- Όλες οι Π.Σ.Υ οι οποίες βρίσκονται σε αποστάσεις μικρότερες των 5 χιλιομέτρων από την ακτή θα αλλάζουν το φυσικό τοπίο και πιθανόν να προκαλούν οπτική όχληση, ιδίως εάν είναι κατασκευασμένες σε πλήρη κλίμακα. Αντίθετα οι επάκτιες μονάδες, είτε είναι εγκατεστημένες σε ακτογραμμές, είτε σε λιμενοβραχίονες δεν θα επηρεάσουν στον ίδιο βαθμό την εικόνα του φυσικού τοπίου.
- Επίσης οι πλωτές Π.Σ.Υ θα επηρεάζουν και θα προκαλούν μεταβολές στο βενθικό περιβάλλον, πράγμα που δεν συμβαίνει τόσο έντονα με τις επάκτιες κατασκευές.

4.7.3 Επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας Π.Σ.Υ

Οι παράκτιες πλωτές Π.Σ.Υ με κατακόρυφο κυλινδρικό σωλήνα σαν θάλαμο εισαγωγής είναι συνήθως οι πιο απλές κατασκευές (όπως είναι για παράδειγμα το spar-buoy, βλ §4.6.2) και αποδίδουν περίπου τα ίδια ποσά ενέργειας με το ίδιο περίπου κόστος, όπως και αυτά των point absorbers, ενώ έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν και σε μεγάλα βάθη νερού. Παράλληλα είναι σε θέση να αξιοποιήσουν την ισχύ κυματισμών ανεξαρτήτως της διεύθυνσης με την οποία προσπίπτουν πάνω στην κυματική μηχανή. Οι διατάξεις τύπου BBDB (οπίσθιου λυγισμένου σωλήνα) είναι διατάξεις με μικρό βύθισμα σε σχέση με τις προηγούμενες και είναι καταλληλότερες για πιο ρηχά νερά. Οι κατάλληλες τοποθεσίες για τέτοιες κατασκευές είναι οι ακτές των ανοικτών ωκεανών όπου το δυναμικό των κυματισμών είναι ιδιαίτερα υψηλό. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των τεχνολογιών είναι ότι η συσκευή ταλαντώνεται έντονα με τον προσπίπτοντα κυματισμό αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοσή τους. Παράλληλα όμως υπάρχουν και άλλες παράκτιες τεχνολογίες οι οποίες έδειξαν ότι έχουν καλές προδιαγραφές, όπως είναι οι ευρεσιτεχνίες της Oceanlinx που περιγράφηκαν στις §4.6.3 και §4.6.4. Οι μελλοντικές έρευνες μένουν να δείξουν ποια από όλες αυτές τις τεχνολογίες δύναται να επικρατήσει στην αγορά.

Γενικώς οι πλωτές τεχνολογίες έχουν υψηλότερο κόστος και ρίσκο από τις παράκτιες κυματικές συσκευές, αλλά αξιοποιούνε μεγαλύτερα ποσά κυματικής ενέργειας, ενώ έχουν και όλα τα πλεονεκτήματα που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι παράκτιες τεχνολογίες από την άλλη, παρά το γεγονός πως έχουν μικρότερες πιθανότητες καταστροφής ή βλάβης και μικρότερο κόστος συντήρησης, αποδείχθηκε ότι έχουν μεγάλο κόστος κατασκευής και υψηλό ρίσκο καταστροφής κατά την διαδικασία εγκατάστασης. Αν λάβουμε κι όλες υπόψιν πως είναι δυσκολότερο να επικρατήσει μια καθολική επάκτια τεχνολογία στο μέλλον, αντιλαμβανόμαστε πως το πιθανότερο σενάριο είναι το να επικρατήσει μια παράκτια τεχνολογία.

Η ενσωμάτωση μιας τεχνολογίας Π.Σ.Υ σε κάποιον λιμενοβραχίονα φαίνεται με μια πρώτη εκτίμηση να είναι τελικά η πιο πρακτική λύση, τόσο από οικονομικής απόψεως αφού το κόστος κατασκευής μοιράζεται ανάμεσα στον κυματοθραύστη και την Π.Σ.Υ, όσο και από τεχνικής απόψεως καθώς η πρόσβαση για συντήρηση ή η σύνδεση με το τοπικό δίκτυο θα

είναι ιδιαίτερα απλές διαδικασίες. Ωστόσο ο κυματοθραύστης που θα επιλεγεί για την τοποθέτηση μιας μονάδας Π.Σ.Υ θα πρέπει να βρίσκεται σε τοποθεσία με ικανοποιητικό κυματικό δυναμικό και να έχει την κατάλληλη διεύθυνση σε σχέση με τους προσπίπτοντες κυματισμούς. Ένα σοβαρό μειονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η ακουστική όχληση, καθώς ο αεροστρόβιλος της κυματικής μηχανής παράγει πολύ θόρυβο και οι λιμενοβραχίονες βρίσκονται συνήθως κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Το αν λοιπόν τελικά θα επικρατήσει μια επάκτια τεχνολογία εγκατεστημένη σε λιμενοβραχίονα ή μια παράκτια τεχνολογία είναι κάτι που δεν μπορούμε να το συμπεράνουμε με απόλυτη βεβαιότητα.

4.7.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας μονάδας Π.Σ.Υ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αναφέρονται στο παρόν εδάφιο αφορούν κατά βάση τις πλωτές κατασκευές και έχουν να κάνουν κατά κύριο λόγο με την περίοδο εγκατάστασης της μονάδας, καθώς τα κατασκευαστικά σκάφη που πηγαινοέρχονται και οι δραστηριότητες κατασκευής διαταράσσουν σημαντικά το φυσικό περιβάλλον της υποθαλάσσιας περιοχής. Για παράδειγμα η εγκατάσταση των αγκυρώσεων και η πόντιση των υποθαλάσσιων αγωγών (εάν πρόκειται για πλωτή κατασκευή) προκαλούν μεγάλες αναταράξεις στον βυθό.

Κατά το στάδιο λειτουργίας και συντήρησης οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφορούν κατ' αρχάς την διατάραξη των υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων, καθώς η κατασκευή και κυρίως τα θεμέλια της στον βυθό έχουν επίδραση στις φυσικές κατοικίες των ψαριών, των θαλάσσιων θηλαστικών και των πουλιών, ενώ επιδρούν αρνητικά στο πλαγκτόν και στις βενθικές κοινότητες του βυθού. Ακόμη τα ψάρια και τα πουλιά και κυρίως τα καρχαριοειδή επηρεάζονται από την αναπαραγωγή υποθαλάσσιου θορύβου, καθώς και από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τους υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς του ρεύματος.

Πέρα όμως από τις επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, οι εν λόγω κατασκευές είτε επάκτιες, είτε υπεράκτιες δημιουργούν προβλήματα και στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Βασικό πρόβλημα είναι η οπτική όχληση, καθώς αυτές οι μηχανές είναι μεγάλες σε μέγεθος και κατ' επέκταση ορατές από μεγάλες αποστάσεις με αποτέλεσμα να επηρεάζουν σημαντικά το τοπίο γύρω τους και αυτό θα είναι σίγουρα ένα θέμα που θα προκαλέσει αντιδράσεις των τοπικών κοινωνιών. Εκτός όμως από την οπτική όχληση θα περιοριστούν και οι θαλάσσιες δραστηριότητες αλιείας, αναψυχής και τουρισμού στην περιοχή εγκατάστασης της μονάδας Π.Σ.Υ.

Οι Π.Σ.Υ ωστόσο δεν προβλέπεται να έχουν μόνο αρνητικές, αλλά και θετικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κατοικία για διάφορα θαλάσσια θηλαστικά ή και για πουλιά, ενώ παράλληλα να εξελιχθούν ως καταφύγια για τους πληθυσμούς των ψαριών λόγω της μειωμένης αλιείας στην περιοχή εγκατάστασης.

5. Οι αεροστρόβιλοι της τεχνολογίας Παλλόμενης Στήλης Ύδατος

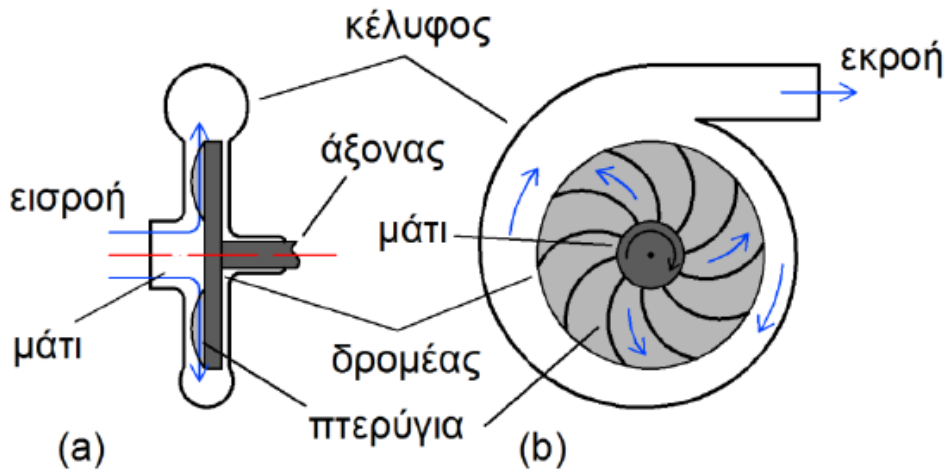
Οι **στροβιλομηχανές** (turbomachines) είναι μηχανές οι οποίες, είτε προσθέτουν ενέργεια σε μία ροή ενός ρευστού, είτε αποσπούν ενέργεια από αυτή. Στην περίπτωση που προσθέτουν ενέργεια στην ροή οι στροβιλομηχανές καλούνται **αντλίες**, ενώ εάν αποσπούν ενέργεια από την ροή καλούνται **αεροστρόβιλοι** (εάν διέρχεται εντός τους αέρας), **υδροστρόβιλοι** (εάν διέρχεται εντός τους κάποιο υγρό ρευστό) ή γενικώς και **τουρμπίνες**. Οι στρόβιλοι με τους οποίους θα ασχοληθούμε και θα αναλύσουμε στο παρόν κεφάλαιο είναι οι αεροστρόβιλοι. Το περιστρεφόμενο τμήμα μίας στροβιλομηχανής το οποίο συμπεριλαμβάνει τα πτερύγια της καλείται **δρομέας** ή **ρότορας**. Οι περισσότερες στροβιλομηχανές, έχουν ένα ακόμη βασικό τμήμα το οποίο ονομάζεται **κέλυφος** και περιβάλλει τον δρομέα. [88] [89]

Η **Βαθμίδα** (stage) είναι ένα επίσης βασικό στοιχείο μιας στροβιλομηχανής και αποτελείται από μια συστοιχία *κινητής πτερύγωσης* (δηλαδή τα πτερύγια που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο δίσκο - δρομέα, κινούνται μαζί του και λαμβάνουν έργο από το ρευστό) και μιας *ακίνητης πτερύγωσης* (δηλαδή τα πτερύγια που είναι στερεωμένα και ακίνητα στο εξωτερικό κέλυφος της μηχανής). Αρκετές φορές χρησιμοποιείται και μια επιπλέον σειρά ακίνητων πτερυγίων που ονομάζονται *οδηγά πτερύγια* (guide vanes) και ο ρόλος τους είναι να διαμορφώσουν την διεύθυνση της γωνίας της ροής ώστε να προσπίπτει με την επιθυμητή γωνία στην περιστρεφόμενη πτερυγοσειρά και να βελτιώνει έτσι την απόδοση της μηχανής.

Η *βασική αρχή λειτουργίας* ενός αεροστρόβιλου είναι απλή: Ο αέρας, καθώς ρέει ανάμεσα στα πτερύγια της βαθμίδας ενός αεροστρόβιλου, ασκεί σε αυτά δυναμική άνωση (βλ. §5.2) και επομένως στον δρομέα ασκείται περιστροφική ροπή. Η ροπή αυτή μεταβιβάζεται μέσω του άξονα στον ηλεκτροκινητήρα με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

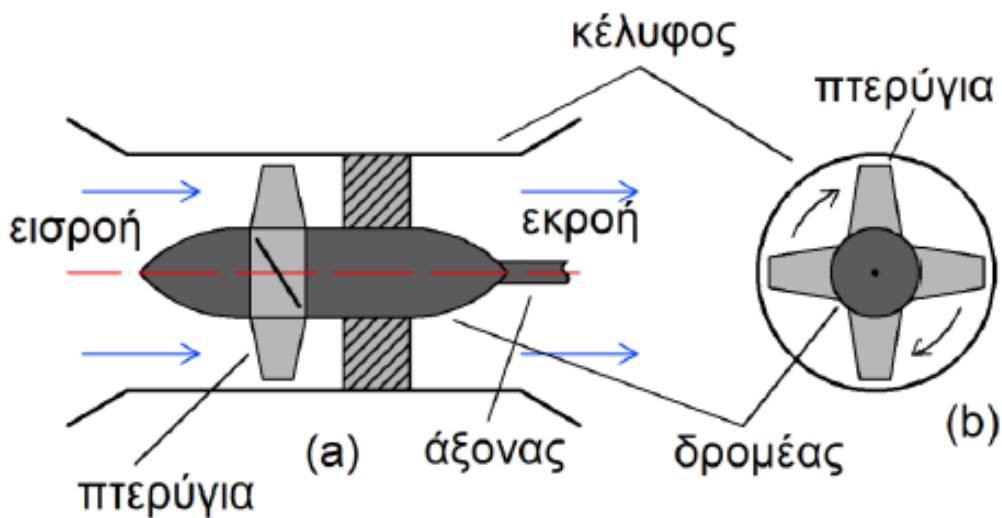
Σημαντική είναι η διάκριση των στροβιλομηχανών σε μηχανές **ακτινικής**, **αξονικής** και **μικτής** ροής. [90]

- Σε μία στροβιλομηχανή **ακτινικής ροής**, το ρευστό κινείται ακτινικά πάνω στον δρομέα. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται, η αντλία αναρροφά το ρευστό από το κέντρο του κελύφους της, το οποίο αποκαλείται μάτι, και το οδηγεί προς το κέντρο του δρομέα. Εξαιτίας της περιστροφής των πτερυγίων το ρευστό κινείται ακτινικά υπό την επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης και μεταφέρεται από το κέντρο του δρομέα προς την περιφέρεια του. Έπειτα, εκρέει από την αντλία. Παρατηρούμε ότι το κέλυφος της αντλίας δεν έχει σταθερή ακτίνα αλλά αυξάνεται κατά την διεύθυνση της περιστροφής του δρομέα. Αυτό συμβαίνει για να παραμένει σταθερή η ταχύτητα του νερού εντός του κελύφους.



Εικόνα 67: (α) Τομή μιας τουρμπίνας ακτινικής ροής παράλληλη στον άξονα περιστροφής του δρομέα (β) Τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής του δρομέα. [90]

- Σε μία στροβιλομηχανή **αξονικής ροής**, η κίνηση του ρευστού γίνεται κυρίως κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής του δρομέα. Στο παρακάτω σχήμα, ο δρομέας παριστάνεται με σκούρο γκρι χρώμα ενώ τα πτερύγια του παριστάνονται με ανοικτό γκρι. Με διαγράμμιση φαίνεται μία μηχανική δομή που σταθεροποιεί την περιστροφική κίνηση του δρομέα.



Εικόνα 68: (α) Τομή μιας τουρμπίνας αξονικής ροής, παράλληλη στον άξονα περιστροφής του δρομέα (β) Τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής του δρομέα. [90]

- Επιπρόσθετα, ως μηχανές **μικτής ροής** χαρακτηρίζονται οι στροβιλομηχανές στις οποίες καθώς το ρευστό διέρχεται από τον δρομέα έχει συνιστώσες ταχύτητας τόσο ως προς την ακτινική κατεύθυνση όσο ως προς την αξονική κατεύθυνση.

5.1 Οι αυτορυθμιζόμενοι αεροστρόβιλοι (self-rectifying turbines)

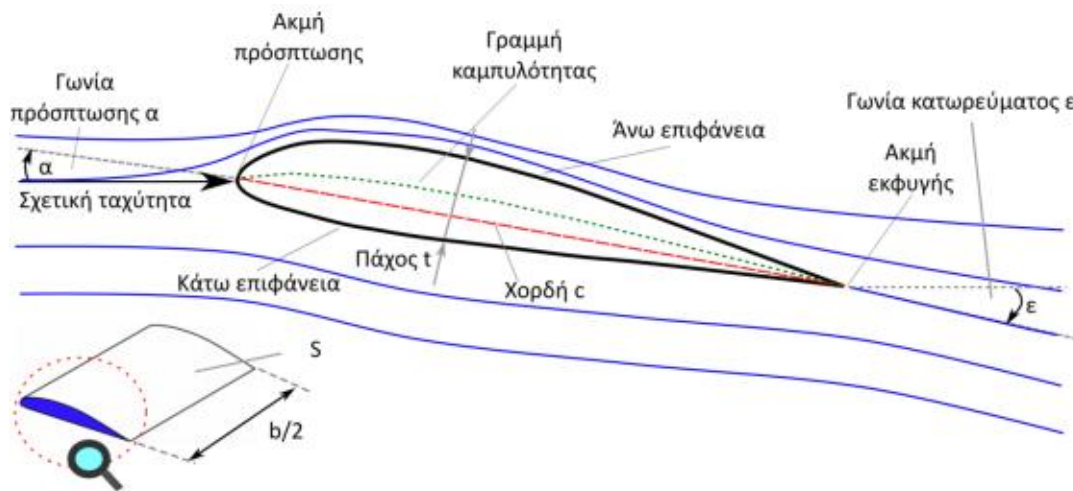
Οι κλασικοί στρόβιλοι είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν με τον αέρα να κινείται προς μία κατεύθυνση, με σταθερό μέτρο ταχύτητας και με τα πτερύγια τους να εκμεταλλεύονται τη βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης. Ωστόσο, αναφέραμε ότι στις τεχνολογίες Π.Σ.Υ η ροή του αέρα δεν βρίσκεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση και σίγουρα δεν έχει σταθερή ταχύτητα. Με βάση αυτά τα δεδομένα αντιλαμβανόμαστε πως οι συμβατικοί στρόβιλοι αποδεικνύονται αναποτελεσματικοί, καθώς δεν είναι σε θέση να αξιοποιήσουν πλήρως την ενέργεια των κυματισμών. Βεβαίως θα μπορούσε να γίνει χρήση τέτοιων στροβίλων (τύπου Francis ή αξονικής ροής για παράδειγμα) εάν συνοδεύονταν από ένα σύστημα **βαλβίδων αντεπιστροφής** (*non return valves*) για να ρυθμίζεται η κατεύθυνση ροής του αέρα. Ωστόσο και αυτή η λύση θα μπορούσε να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση μικρών μονάδων, όπως είναι οι σημαδούρες ναυσιπλοΐας, αλλά κάτι τέτοιο δεν θα ήταν λειτουργικό σε μεγάλες διατάξεις όπου η παροχή όγκου (volume flow) είναι της τάξεως των $100 \text{ m}^3/\text{s}$ και ο απαιτούμενος χρόνος απόκρισης είναι συνήθως μικρότερος από 1 s , γιατί αυτού του είδους οι αεροστρόβιλοι είναι πολύπλοκοι και δύσκολο να διατηρήσουν αποτελεσματικά την λειτουργία τους. [91] [77]

Ο στόχος στις τεχνολογίες που αφορούν την ΠΣΥ είναι η ικανοποιητική απόδοση σε μια ευρεία περιοχή συνθηκών λειτουργίας καθώς η ροή του αέρα, όχι μόνο αλλάζει κατ' απόλυτη τιμή, αλλά και κατά φορά, καθώς κατά την διέλευση των κορυφών ο αέρας ανέρχεται, ενώ κατά την διέλευση των κοιλιών ο αέρας κατέρχεται διαπερνώντας τον στρόβιλο και από τις δύο φορές. Για να λειτουργήσει όμως η μονάδα ΠΣΥ η περιστροφή του άξονα πρέπει να παραμένει στην ίδια κατεύθυνση. Για τον λόγο αυτό στην πλειονότητα των μονάδων ΠΣΥ χρησιμοποιούνται **αυτορυθμιζόμενοι αεροστρόβιλοι** (*self-rectifying*) που δεν απαιτούν βαλβίδες αντεπιστροφής καθώς μπορούν να περιστρέφονται με την ίδια φορά ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης ροής του αέρα, όταν δηλαδή εισρέει ή εκρέει από τον θάλαμο. Ωστόσο η κατασκευή τέτοιων στροβίλων είναι προβληματική για δύο λόγους: Αρχικά ο γεωμετρικός τους σχεδιασμός είναι εκ φύσεως πολύπλοκος. Επί πλέον ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αποδοτικότητα για ολόκληρο το σύστημα· πράγμα που σημαίνει ότι δεν πρέπει να επιτευχθεί μόνο η μέγιστη απόδοση της στροβιλομηχανής, αλλά αυτό να συνδυαστεί και με την μέγιστη απόδοση του θαλάμου συλλογής. [91]

Οι επικρατέστεροι αυτορυθμιζόμενοι αεροστρόβιλοι που έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς μέχρι στιγμής είναι αξονικής ροής δύο βασικών τύπων: Ο αεροστρόβιλος **Wells** και ο αεροστρόβιλος **Impulse**. Ο Wells επινοήθηκε το 1976 από τον *Alan A. Wells* (στο Queen's University Belfast της Β. Ιρλανδίας), ενώ ο **Impulse** (ή αυτορυθμιζόμενος αεροστρόβιλος δράσεως) από τον *Ivan A. Babintsev* το 1975.

5.2 Η Φυσική εξήγηση περιστροφής των αεροστροβίλων (Θεωρία αεροτομών)

Η **Αεροτομή** (Aerofoil) είναι το επίπεδο σχήμα μιας εγκάρσιας τομής ενός πτερυγίου. **Χορδή αεροτομής** είναι η ευθεία γραμμή που ενώνει την ακμή **πρόσπτωσης** ή **προσβολής** (πρόσθιο άκρο αεροτομής) με την ακμή **εκφυγής** (πίσω μέρος αεροτομής). Σε κάθε πτερύγιο διακρίνουμε την πλευρά πίεσης (που είναι η κοίλη κάτω επιφάνεια) και την πλευρά αναρρόφησης (που είναι η κυρτή άνω επιφάνεια) σύμφωνα με τη φορά περιστροφής του άξονα.



Εικόνα 69: Η αεροτομή του πτερυγίου ενός αεροστροβίλου

Η κυρτότητα της αεροτομής, «αναγκάζει» τη ροή να αποκτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα στη μία πλευρά (άνω επιφάνεια) σε σχέση με την άλλη (κάτω επιφάνεια), ούτως ώστε, να διατηρηθεί η ενέργεια του ρευστού, καθώς έχει μεγαλύτερη απόσταση να διανύσει στην πλευρά αυτή. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται από την εξίσωση του Bernoulli (βλ. σχ. 2.5, κεφ. 2, §2.3.1) η οποία περιγράφεται τώρα από την σχέση:

$$E = \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + U + gz \quad (5.1)$$

Όπου: E η ολική ενέργεια, v η ταχύτητα ροής, p η στατική πίεση, U η εσωτερική ενέργεια και ρ η πυκνότητα του αέρα. Θεωρώντας πως η εσωτερική ενέργεια του αέρα και η επίδραση της βαρύτητας είναι αμελητέες και πολλαπλασιάζοντας ως προς την πυκνότητα ρ , προκύπτει η κατανομή της ολικής πίεσης – ως άθροισμα της δυναμικής (πρώτος όρος) και στατικής πίεσης (δεύτερος όρος) – του ρευστού γύρω από την αεροτομή:

$$p_{tot} = \frac{v^2}{2} \rho + p \quad (5.2)$$

Η σχέση (5.2) μας πληροφορεί ότι στα σημεία της αεροτομής όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη, παρουσιάζουν και μικρότερη στατική πίεση. Στην άνω πλευρά λοιπόν που η ταχύτητα του ρευστού παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές, επικρατεί μια κατάσταση **αρνητικής στατικής πίεσης** όπου ονομάζεται και **αναρρόφηση** (*suction side*). Αντίθετα στην κάτω πλευρά η ταχύτητα του ρευστού αέρα παρουσιάζει μικρότερες τιμές και επικρατεί μια κατάσταση **θετικής στατικής πίεσης** που ονομάζεται και **κατάθλιψη** (*pressure side*).

Λόγω λοιπόν της σχετικής κίνησης μεταξύ της αεροτομής και του ρευστού (αέρα) αναπτύσσεται πάνω στην αεροτομή μια **αεροδυναμική δύναμη** \vec{F} γύρω από την αεροτομή που μπορεί να αναλυθεί σε δύο επί μέρους συνιστώσες:

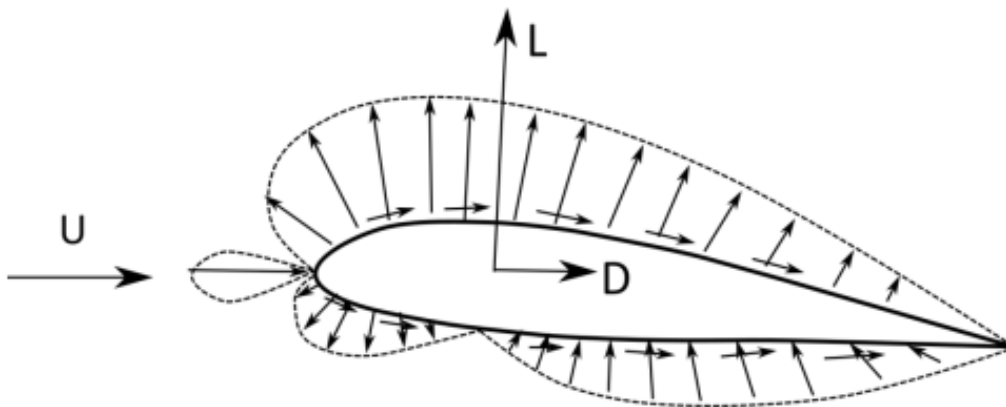
- Την **δύναμη άνωσης** ή **άντωσης** (*Lift force – L*) η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταχύτητας ροής:

$$L = (1/2) \cdot A \cdot \rho \cdot u^2 \cdot C_L \quad (5.3)$$

- Την **δύναμη αντίστασης** (*Drag force – D*) η οποία είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ταχύτητας ροής και με φορά αντίθετη από αυτήν της κίνησης της αεροτομής:

$$D = (1/2) \cdot A \cdot \rho \cdot u^2 \cdot C_D \quad (5.4)$$

Όπου: A είναι το εμβαδό της επιφάνειας του πτερυγίου, ρ η πυκνότητα του αέρα και C_L , C_D οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης (ή **οπισθέλκουσας**) αντίστοιχα.

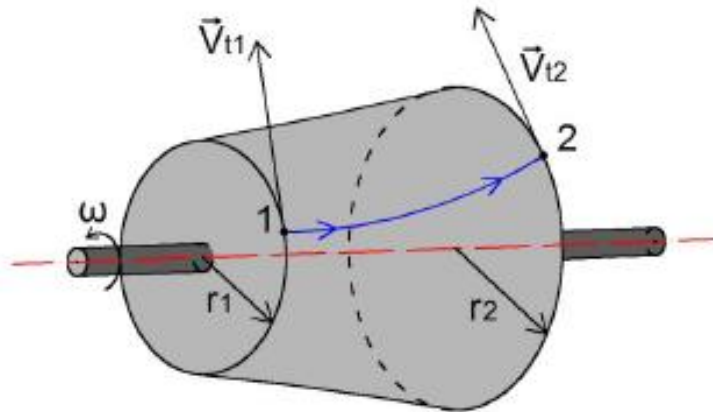


Εικόνα 70: Η κατανομή της πίεσης και οι δυνάμεις που ασκούνται σε αεροτομή μέσα σε ρεύμα αέρα.

Η δύναμη άνωσης είναι αυτή η οποία ωθεί τον στρόβιλο να κινηθεί, οπότε στις στροβιλομηχανές επιδιώκεται **μεγιστοποίηση** της άνωσης L και **ελαχιστοποίηση** της αντίστασης D ώστε να επιτευχθεί μέγιστος βαθμός απόδοσης. Οι δυνάμεις άνωσης και αντίστασης εξαρτώνται από τη γωνία **προσβολής** ή **πρόσπτωσης** α (angle of attack) την οποία σχηματίζει η διεύθυνση της ροής και ο άξονας στον οποίο ανήκει η χορδή της αεροτομής (βλ. εικ. 69). [92] [93]

5.3 Η εξίσωση του Euler για τις στροβιλομηχανές

Είναι αναγκαίο σε μία στροβιλομηχανή να συσχετίσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρομέα με την ισχύ της στροβιλομηχανής. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να εφαρμόσουμε την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Έστω ότι έχουμε τον δρομέα της εικόνας 71 ο οποίος περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω (ή αλλιώς Ω , όπως θα δούμε παρακάτω) γύρω από έναν άξονα (κόκκινη γραμμή).



Εικόνα 71: Ο δρομέας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω και φαίνεται με κόκκινο χρώμα. Η διαδρομή ενός σωματιδίου του ρευστού φαίνεται με μπλε χρώμα καθώς μετακινείται από την είσοδο 1, στην έξοδο 2 του δρομέα

Ένα σωματίδιο μάζας dm στο σημείο 1 (είσοδος) του ρευστού στον δρομέα, έχει στροφορμή: $L_1 = dm \cdot V_{t1} \cdot r_1$

Αντίστοιχα ένα σωματίδιο μάζας στο σημείο 2 (έξοδος) του ρευστού στον δρομέα, έχει στροφορμή: $L_2 = dm \cdot V_{t2} \cdot r_2$

Όπου: V_{t1} η εφαπτομενική (ή περιφερειακή) συνιστώσα του διανύσματος \vec{V}_1 που είναι η απόλυτη ταχύτητα εισόδου του ρευστού (εάν έχει την ίδια φορά με την γραμμική περιφερειακή ταχύτητα \vec{U}_1 , τότε είναι θετική). Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα V_{t2} μόνο που αυτή αναφέρεται στην απόλυτη ταχύτητα εξόδου του ρευστού \vec{V}_2 .

Η εξίσωση στροβιλομηχανών του Euler συσχετίζει την ασκούμενη ροπή T (που παράγεται από τη ροή του ρευστού) πάνω στον δρομέα της στροβιλομηχανής, με την μεταβολή της στιγμιαίας ροής της ορμής κατά μήκος του δρομέα [77]:

$$T = \int_{S_1} r_1 \cdot V_{t1} \frac{dm_1}{dt} - \int_{S_2} r_2 \cdot V_{t2} \frac{dm_2}{dt} \quad (5.5)$$

Όπου r είναι η ακτινική απόσταση, V_t είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας ροής (flow velocity) \vec{V} , Q ή $\dot{m} = dm/dt$ ο ρυθμός ροής (παροχή) της μάζας του αέρα και $S_1 = \pi r_1^2$, $S_2 = \pi r_2^2$ είναι επιφάνειες (περιστροφής) όπου ο αέρας εισέρχεται και

εξέρχεται από την περιοχή του ρότορα. Στην σχ. (5.5), η ροπή των διατμητικών δυνάμεων επί των επιφανειών S_1 και S_2 , και επί του εσωτερικού τοιχώματος του στάτορα μεταξύ των επιφανειών S_1 και S_2 , αγνοήθηκε, ως συνήθως.

Αν δεχτούμε πως η ροή είναι μονοδιάστατη και παράλληλη με τον ρότορα τότε, με την βοήθεια των δύο παραπάνω σχέσεων για τα L_1 και L_2 , προκύπτει η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης (5.5) (βλ. [93] [90]):

$$T = \frac{dL}{dt} \Rightarrow T = \frac{dm}{dt} (r_1 \cdot V_{t1} - r_2 \cdot V_{t2}) \quad (5.6)$$

Όπου οι τιμές των r και V_t είναι οι μέσες τιμές ανάμεσα στην επιφάνεια εισόδου S_1 και στην επιφάνεια εξόδου S_2 . Για μια στροβιλομηχανή αξονικής ροής η σχέση (5.7) μπορεί να γραφεί και ως:

$$E = \Omega \cdot (r_{t1} \cdot V_{t1} - r_{t2} \cdot V_{t2}) \quad (5.6\beta)$$

Όπου:

$$E = \Omega \cdot \frac{T}{\dot{m}} = \Omega \cdot \frac{T}{Q} \quad (5.7)$$

Είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού. Για δρομέα στροβίλου αξονικής ροής, με μέση ακτίνα $r_1=r_2=r$, η σχέση (5.6β) απλουστεύεται:

$$E = \Omega \cdot r (V_{t1} - V_{t2}) \quad (5.6\gamma)$$

Μπορούμε επίσης να αναφέρουμε την σχέση που δίνει την ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού αέρα σε συνάρτηση με τις απώλειες:

$$E = E_{avai} - L \quad (5.8)$$

Όπου είναι E_{avai} η διαθέσιμη ενέργεια λόγω πνοής αέρα (ανά μονάδα μάζας), ενώ το L αναπαριστά τις απώλειες της ενέργειας στο στρόβιλο και μέσα στον αγωγό, ο οποίος συνδέει τον θάλαμο συλλογής με τον στρόβιλο και τον ατμοσφαιρικό αέρα (συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών λόγω πιθανής ύπαρξης βαλβίδων). Η σχέση που μας δίνει το L είναι: $L = L_{rot} + L_{GV} + L_{duct}$, όπου οι τρεις δείκτες αναφέρονται στις απώλειες του ρότορα, των οδηγών πτερυγίων του στροβίλου και του συνδετικού αγωγού.

Η πίεση του αέρα εντός του θαλάμου συλλογής μιας Π.Σ.Υ εκφράζεται ως το άθροισμα της ατμοσφαιρικής πίεσης και της δυναμικής πίεσης λόγω ταλάντωσης του αέρα εντός του θαλάμου: $P_{atm} + P_{ch(t)}$

Η διαθέσιμη ενέργεια E_{avai} είναι η συνολική πτώση της ιστροπικής ενθαλπίας μεταξύ του θαλάμου και της ατμόσφαιρας (για εξωτερική ροή – outward flow) ή μεταξύ της ατμόσφαιρας και του θαλάμου (για εσωτερική ροή – inward flow). Για ένα ιδανικό αέριο ισχύει:

$$E_{avai} = c_p T_{ch} \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{ch}(t)} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad \text{για} \quad P_{ch}(t) > 0 \quad (5.9)$$

$$E_{avai} = c_p T_{atm} \left[1 - \left(\frac{P_{atm} + P_{ch}(t)}{P_{atm}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad \text{για} \quad P_{ch}(t) < 0 \quad (5.9\beta)$$

Όπου τα μεγέθη T_{ch} και T_{atm} είναι οι θερμοκρασίες (σε μονάδες μέτρησης Kelvin) εντός του θαλάμου και στην ατμόσφαιρα αντίστοιχα, $\gamma = c_p/c_v$ όπου c_p και c_v είναι οι γραμμομοριακές ειδικές θερμότητες σταθερής πίεσης και όγκου αντίστοιχα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα γραμμικοποιήσουμε τις σχέσεις (5.9) και (5.9β) και αυτές θα απλοποιηθούν στην σχέση:

$$E_{avai} = \frac{|P_{ch}(t)|}{\rho} \quad (5.10)$$

Όπου ρ είναι μια μέση τιμή της πυκνότητας του αέρα εντός του θαλάμου. Η δυναμική πίεση λόγω ταλάντωσης εντός του θαλάμου εισαγωγής, $P_{ch}(t)$, σχετίζεται με το προσπίπτον πεδίο κυματισμού στην κυματική μηχανή, με τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των βυθισμένων μερών της κατασκευής και με τον όγκο του θαλάμου εισαγωγής πάνω από τη στάθμη ηρεμίας της θάλασσας. Θα πρέπει να τονιστεί βέβαια ότι εξαρτάται επίσης και από την χαρακτηριστική καμπύλη (κατά την στιγμιαία περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου) της υψηλότερης πίεσης που δημιουργείται (pressure head) έναντι του ρυθμού παροχής της μάζας του αέρα \dot{m} (φαινόμενο απόσβεσης – damping effect).

5.4 Δισδιάστατη ανάλυση ροής ενός αξονικού στροβίλου (2D Cascade Flow Analysis)

Η μαθηματική-φυσική μελέτη της ροής δια των αεροστροβίλων αφορά τόσο τις ακίνητες, όσο και τις κινητές πτερυγώσεις (που περιστρέφονται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από τον άξονα της μηχανής). Η ροή κατά την διέλευση της διά διαμέσου μίας στροβιλομηχανής είναι τρισδιάστατη, παρουσιάζει διακυμάνσεις πίεσης (έτσι, σημαντικές μεταβολές στην πυκνότητα του αέρα μπορούν να λάβουν χώρα στη ροή δια μέσω του στροβίλου), επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση με τα τοιχώματα του αγωγού στον οποίο βρίσκεται ο στροβίλος και είναι μη-μόνιμη (μεταβάλλεται με τον χρόνο). Στην παρούσα ανάλυση της ροής εντός του στροβίλου θα υιοθετήσουμε μια απλουστευμένη ανάλυση και θα κάνουμε κάποιες παραδοχές [77]:

- Θα θεωρήσουμε αρχικά πως η ροή εντός του θαλάμου είναι *ασυμπιεστη*, και δεν μεταβάλλεται η πυκνότητα της παρά μόνο όταν διέρχεται από τον αεροστρόβιλο.
- Επιπλέον θεωρούμε πως τα τοιχώματα του αγωγού μέσα στον οποίο βρίσκεται ο στροβίλος είναι ομοαξονικές κυλινδρικές επιφάνειες, οι οποίες βρίσκονται αρκετά μακριά, έτσι ώστε να μπορούμε να *αγνοήσουμε την αλληλεπίδραση τους με την ροή που διέρχεται από τις πτέρυγες του αεροστρόβιλου*.
- Ακόμη αγνοούμε την ύπαρξη ακτινικής διεύθυνσης της ροής δια του στροβίλου. Η ροή θεωρείται πως βρίσκεται στο επίπεδο που είναι κάθετο σε σχέση με αυτό που ορίζουν οι πτέρυγες του στροβίλου. Θεωρείται λοιπόν δισδιάστατη.
- Τέλος η ροή θεωρείται *μόνιμη* (δηλαδή ότι δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο).

Η ταχύτητα της ροής του αέρα λοιπόν μπορεί τώρα να αναλυθεί με την βοήθεια διανυσματικών διαγραμμάτων που ονομάζονται **τρίγωνα ταχυτήτων**. [94] Η περιγραφή με την βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων, γίνεται κάνοντας χρήση δύο συστημάτων αναφοράς που το κάθε ένα είναι ακίνητο ως προς τα πτερύγια που μελετώνται σε κάθε περίπτωση:

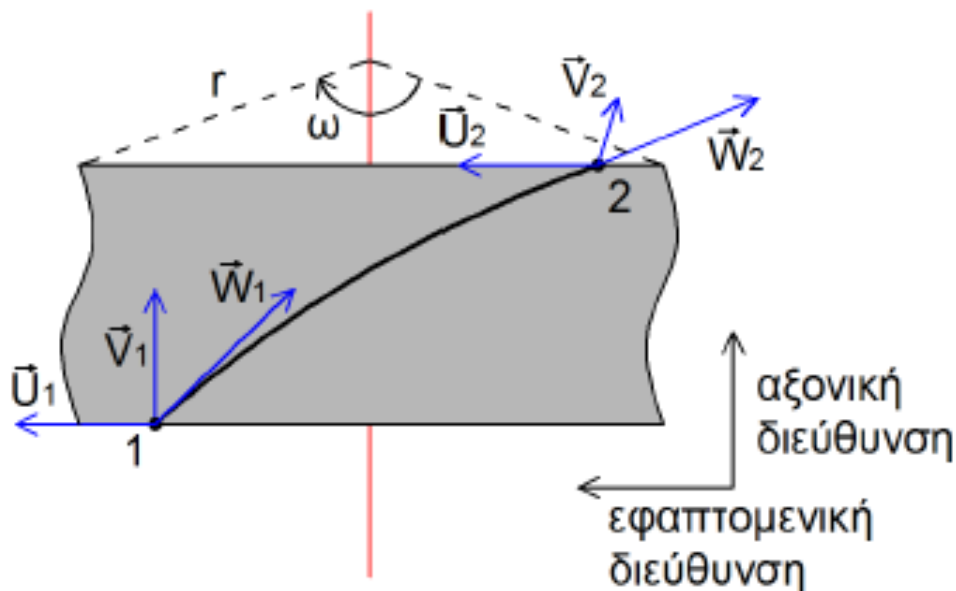
- Το σύστημα αναφοράς που είναι ακίνητο ως προς τις κινητές πτερυγώσεις ονομάζεται **απόλυτο σύστημα** και η ταχύτητα του ρευστού ως προς αυτό, **απόλυτη ταχύτητα ρευστού** \vec{V} .
- Το σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με τις κινητές πτερυγώσεις ονομάζεται **σχετικό σύστημα** και η ταχύτητα ως προς αυτό, **σχετική ταχύτητα ρευστού** \vec{W} (η οποία είναι πάντα εφαπτομενική του κινούμενου πτερυγίου). Αυτή είναι και η ταχύτητα του διερχόμενου αέρα που «αντιλαμβάνεται» το πτερύγιο του αεροστροβίλου.
- $\vec{U} = \vec{\Omega} \cdot \vec{r}$ είναι η **γραμμική περιφερειακή ταχύτητα** του δρομέα (του οποίου η διεύθυνση είναι εφαπτομενική στην ακτίνα του δρομέα).

Οι τρεις αυτές ταχύτητες σχετίζονται με την ακόλουθη σχέση: $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U} = \vec{W} + \vec{\Omega} \cdot \vec{r}$ (5.11)

Δηλαδή το διανυσματικό άθροισμα της περιφερειακής ταχύτητας του δρομέα και της σχετικής ταχύτητας του ρευστού είναι ίσο με την απόλυτη ταχύτητά του. Η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων \vec{U} και \vec{V} συμβολίζεται συνήθως με α . Η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων \vec{U} και \vec{W} συμβολίζεται συνήθως με β .

Στην εικόνα 72 παρουσιάζεται ένα πτερύγιο ενός υδροστρόβιλου αξονικής ροής. Το σημείο 1 αντιστοιχεί στην είσοδο του ρευστού στο πτερύγιο και το σημείο 2 στην έξοδο του. Παρατηρούμε ότι τα διανύσματα \vec{W}_1 και \vec{W}_2 εφάπτονται στο πτερύγιο στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα διότι το ρευστό εισρέει και εκρέει ομαλά από το πτερύγιο. Επιπλέον, τα διανύσματα \vec{U}_1 και \vec{U}_2 έχουν το ίδιο μέτρο καθώς τα σημεία 1 και 2 ισαπέχουν κατά απόσταση r από τον άξονα περιστροφής του δρομέα (ισχύει $\vec{U}_1 = \vec{U}_2 = \vec{\Omega} \cdot \vec{r}$).

Το ρευστό εισέρχεται με ταχύτητα \vec{V}_1 η οποία δεν έχει απλώς αξονική συνιστώσα αλλά είναι και παράλληλη στον δρομέα. Αυτό δεν συμβαίνει πάντα προφανώς, αλλά μόνο στην απλοϊκή περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ. Το ρευστό εξέρχεται από το πτερύγιο με ταχύτητα \vec{V}_2 η οποία έχει τόσο αξονική όσο και εφαπτομενική συνιστώσα. Η εφαπτομενική συνιστώσα του διανύσματος \vec{V}_2 έχει φορά προς την αρνητική εφαπτομενική διεύθυνση (προς τα δεξιά στην εικόνα 72) διότι το ρευστό ώθησε το πτερύγιο του υδροστρόβιλου, συνεπώς παρήγαγε έργο επί αυτού, δηλαδή του μετέφερε ενέργεια.



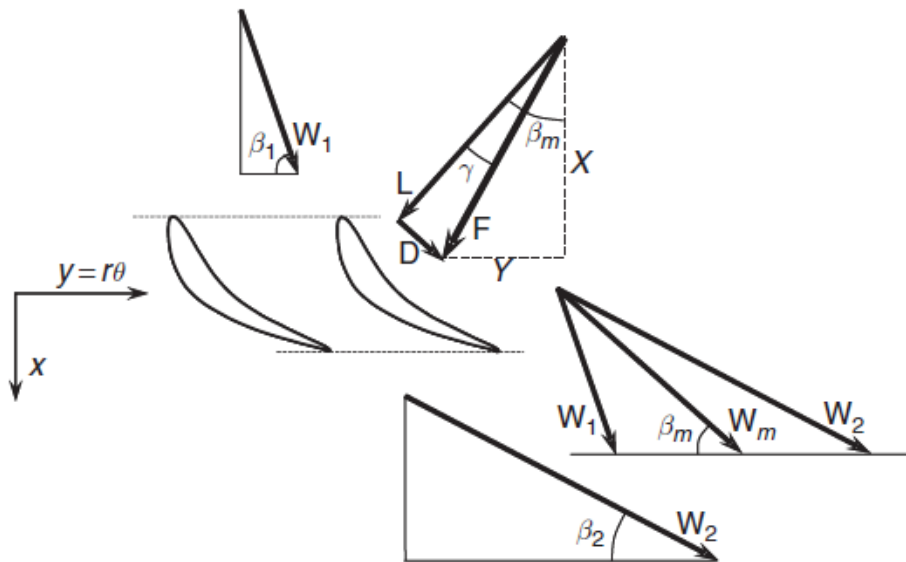
Εικόνα 72: Πτερύγιο ενός αεροστρόβιλου αξονικής ροής. Με γκρι χρώμα παριστάνεται ένα τμήμα του δρομέα, ενώ η κόκκινη γραμμή είναι ο άξονας του δρομέα [92]

Για να περιγράψουμε το σύστημα μας κάνουμε χρήση ενός συστήματος κυλινδρικών συντεταγμένων (r, θ, x) . Το επίπεδο της ροής θεωρείται το (x, y) , ενώ η τρίτη διάσταση z είναι η αξονική διεύθυνση την οποία έχουμε αγνοήσει. Ισχύει λοιπόν: $(x, y) = (x, r\theta)$, όπως

φαίνεται και στην εικόνα 73. Θεωρούμε λοιπόν πως η συστοιχία των πτερυγίων του στροβίλου βρίσκεται μέσα σε μια δισδιάστατη ροή η οποία διέρχεται από μια κυλινδρική επιφάνεια ακτίνας r . Η χορδή της κάθε πτερυγίου συμβολίζεται με c .

- Το «περιφερειακό βήμα», δηλαδή η απόσταση ανάμεσα στις κορυφές προσβολής δύο διαδοχικών πτερυγίων, είναι: $t = 2\pi r/Z$ (5.12)
όπου: Z είναι ο αριθμός των λεπίδων ή πτερυγίων του στροβίλου.
- Η περιφερειακή ταχύτητα της κάθε λεπίδας είναι (όπως και παραπάνω):
 $\vec{U} = \vec{\Omega} \cdot \vec{r}$ ή $U = \Omega r$ (5.13)
- Ορίζουμε ως W_1 το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας της ροής που εισέρχεται στις πτέρυγες του αεροστρόβιλου (*upstream*) και W_2 το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας της ροής που εξέρχεται από τις πτέρυγες του αεροστρόβιλου (*downstream*). Η μέση ταχύτητα W_m δίνεται μέσω της σχέσης: $\vec{W}_m = (\vec{W}_1 + \vec{W}_2)/2$ (5.14)
- Οι αντίστοιχες γωνίες μεταξύ των ταχυτήτων U και W (ή μεταξύ του άξονα y και της σχετικής ταχύτητας W) για κάθε μια από τις ταχύτητες W_1 και W_2 είναι β_1 και β_2 αντίστοιχα. Επίσης ισχύει: $\beta_m = \text{arc cot}[1/2(\cot \beta_1 + \cot \beta_2)]$ (5.15)
- Οι (5.3) και (5.4) ξαναγράφονται ως εξής:

$$C_L = \frac{L}{(1/2) \cdot c \cdot \rho \cdot W_m^2}, \quad C_D = \frac{D}{(1/2) \cdot c \cdot \rho \cdot W_m^2}, \quad \gamma = \arctan(c_D/c_L) \quad (5.16)^{20}$$



Εικόνα 73: Τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ταχυτήτων της ροής μιας στροβιλομηχανής

Η αεροδυναμική δύναμη F αναφέραμε στο §5.2 (και φαίνεται και στην εικ. 73) πως είναι η συνισταμένη των δυνάμεων άνωσης L και αντίστασης D με βάση ένα σύστημα συντεταγμένων που βρίσκεται πάνω στην αεροτομή (με την D να είναι παράλληλη στην

²⁰ Η μεταβλητή γ εδώ πέρα δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον λόγο $\gamma = c_p/c_v$ που αναφέραμε στην § 5.3

χορδή της αεροτομής και την L να είναι κάθετη σε αυτήν). Η αεροδυναμική δύναμη F όμως μπορεί να παρασταθεί και ως συνισταμένη δύο άλλων δυνάμεων των X και Y οι οποίες ορίζονται με βάση το σύστημα συντεταγμένων (x, y) του πεδίου ροής που αναφέραμε προηγουμένως. Με την βοήθεια λοιπόν των τριγώνων ταχύτητας της εικόνας 73 και της δύναμης άνωσης L , μπορούμε να ορίσουμε τις δυνάμεις X και Y ως εξής:

$$X = \frac{L}{\cos \gamma} \cos(\beta_m - \gamma) \quad Y = \frac{L}{\cos \gamma} \sin(\beta_m - \gamma) \quad (5.17)$$

Επίσης ορίζουμε την αξονική συνιστώσα V_x που είναι η συνιστώσα της σχετικής ταχύτητας αέρα κατά την διεύθυνση του άξονα που είναι παράλληλος στον δρομέα, δηλαδή του άξονα x . Από την εικόνα 73 προκύπτει ότι:

$$W_x \text{ ή } V_x = W_1 \sin \beta_1 = W_2 \sin \beta_2 = W_m \sin \beta_m \quad (5.18)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση της ορμής και με την βοήθεια της εξίσωσης Bernoulli, προκύπτουν (βλ [93]) :

Αξονική συνιστώσα:

$$X = t \Delta P = t \frac{\rho}{2} (W_2^2 - W_1^2) = t \frac{\rho}{2} \left(\frac{V_x^2}{\sin^2 \beta_2} - \frac{V_x^2}{\sin^2 \beta_1} \right) = t \frac{\rho}{2} V_x^2 \left(\frac{1}{\sin^2 \beta_2} - \frac{1}{\sin^2 \beta_1} \right)$$

Γνωρίζουμε την τριγωνομετρική ταυτότητα: $\frac{1}{\sin^2 x} = \cot^2 x + 1$. Με την βοήθεια της η παραπάνω σχέση λαμβάνει την μορφή:

$$X = \frac{1}{2} \rho t V_x^2 (\cot^2 \beta_2 - \cot^2 \beta_1) \quad (5.19)$$

Οριζόντια Συνιστώσα (παράλληλη στα πτερύγια):

$$Y = \rho t W_x (W_{y2} - W_{y1}) = \rho t V_x (W_2 \cos \beta_2 - W_1 \cos \beta_1) = \rho t V_x \left(\frac{V_x}{\sin \beta_2} \cos \beta_2 - \frac{V_x}{\sin \beta_1} \cos \beta_1 \right)$$

$$Y = \rho t V_x^2 (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \quad (5.20)$$

Το έργο το οποίο προσφέρεται από τη ροή του αέρα στα πτερύγια του στροβίλου, ανά μονάδα μάζας, δίνεται με την βοήθεια των (5.7), (5.16), (5.17), (5.18), από την σχέση (βλ [77]) :

$$E = \frac{\Omega \cdot \Gamma}{Q} = \frac{\Omega r Y}{\rho t V_x} = \frac{\Omega r}{\rho t V_x} \cdot L \cdot \frac{\sin(\beta_m - \gamma)}{\cos \gamma} = \frac{\Omega r}{\rho t V_x} \cdot C_L (1/2) c \rho W_m^2 \cdot \frac{\sin(\beta_m - \gamma)}{\cos \gamma}$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \frac{c}{t} \cdot \Omega r V_x \cdot \frac{\sin(\beta_m - \gamma)}{\sin^2 \beta_m \cos \gamma} \quad (5.21)$$

Εάν αντί της σχέσης (5.17) κάνουμε χρήση της σχέσης (5.20) τότε το έργο ανά μονάδα μάζας δίνεται από την σχέση:

$$E = \frac{\Omega \cdot T}{Q} = \frac{\Omega r Y}{\rho t V_x} = \frac{\Omega r \rho t V_x^2}{\rho t V_x} (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) = \Omega r V_x (\cot \beta_2 - \cot \beta_1)$$

$$E = \Omega r V_x (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \quad (5.22)$$

Από την σχέση (5.15) προκύπτει: $2 \cot \beta_m = \cot \beta_1 + \cot \beta_2 \Rightarrow \cot \beta_2 = 2 \cot \beta_m - \cot \beta_1$. Οπότε η σχέση (5.22) γίνεται:

$$E = 2 \Omega r V_x (\cot \beta_m - \cot \beta_1) \quad (5.22\beta)$$

Επιπλέον μπορούμε να βρούμε την πτώση πίεσης κατά μήκος της σειράς των πτερυγίων με την βοήθεια των σχέσεων (5.15) (5.17) και (5.18) ως εξής:

$$\Delta P = \frac{X}{t} = \frac{L}{t} \cdot \frac{\cos(\beta_m - \gamma)}{\cos \gamma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_L c \rho W_m^2}{t} \cdot \frac{\cos(\beta_m - \gamma)}{\cos \gamma}$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \frac{c}{t} \cdot \rho V_x^2 \cdot \frac{\cos(\beta_m - \gamma)}{\sin^2 \beta_m \cos \gamma} \quad (5.23)$$

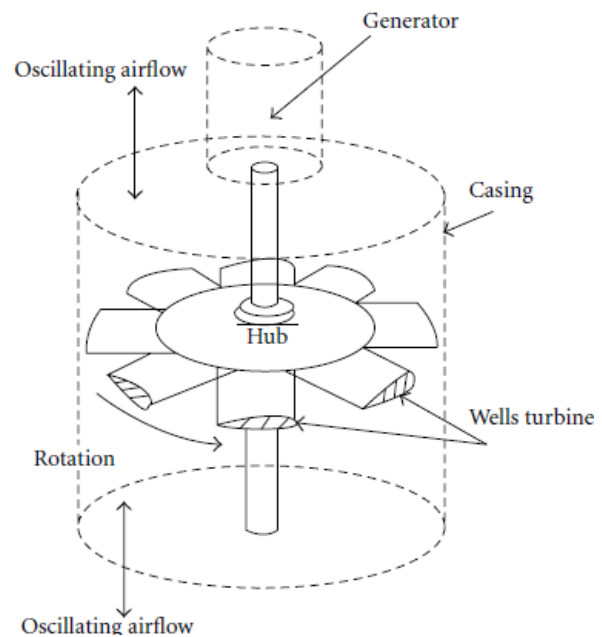
Τέλος μπορούμε να ορίσουμε την απόδοση η του στροβίλου κάνοντας χρήση των (5.21) και (5.23):

$$\eta = \frac{\rho E}{\Delta P} = \frac{\Omega r}{V_x} \tan(\beta_m - \gamma) \quad (5.24)$$

Μέχρι στιγμής υποθέσαμε ότι υπάρχει μόνο μία σειρά πτερυγίων πάνω στον ρότορα (*single cascade*). Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε επίσης πιο πολύπλοκα συστήματα πτερυγίων, συμπεριλαμβανομένων των οδηγών πτερυγίων και/ή παραπάνω από μια περιστρεφόμενων σειρών πτερυγίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ροή του αέρα θα προσπίπτει στην πρώτη σειρά πτερυγίων (*upstream blades*) και θα οδηγείται στην συνέχεια στις επόμενες σειρές πτερυγίων (*downstream blades*), οι οποίες μπορεί να είναι είτε σχετικά ακίνητες ως προς την πρώτη σειρά ή να κινούνται σε σχέση με αυτήν. Σε τέτοιες περιπτώσεις κάνουμε την υπόθεση ότι η αξονική απόσταση μεταξύ των διαφορετικών σειρών πτερυγίων (σταθερών ή κινούμενων) είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να προλαβαίνει να εξομαλυνθεί η ροή.

5.5 Ο αυτορυθμιζόμενος αεροστρόβιλος Wells

Ο στρόβιλος **Wells** είναι ο πιο δοκιμασμένος και αποδοτικός αυτορυθμιζόμενος στρόβιλος. Ο δρομέας του αεροστρόβιλου αυτού αποτελείται από πτερύγια με συμμετρική αεροτομή (ως προς τη χορδή της), τα οποία είναι τοποθετημένα έτσι ώστε το επίπεδο των χορδών των πτερυγίων να είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής· δηλαδή το επίπεδο συμμετρίας είναι παράλληλο προς το επίπεδο της περιστροφής και κάθετο στη διεύθυνση ροής του αέρα. Με αυτή την διάταξη των πτερυγίων ο στρόβιλος δεν επηρεάζεται από την εναλλαγή στην κατεύθυνση της ροής του διερχόμενου αέρα. Η φυσική εξήγηση αυτής της συμπεριφοράς αναλύεται παρακάτω.

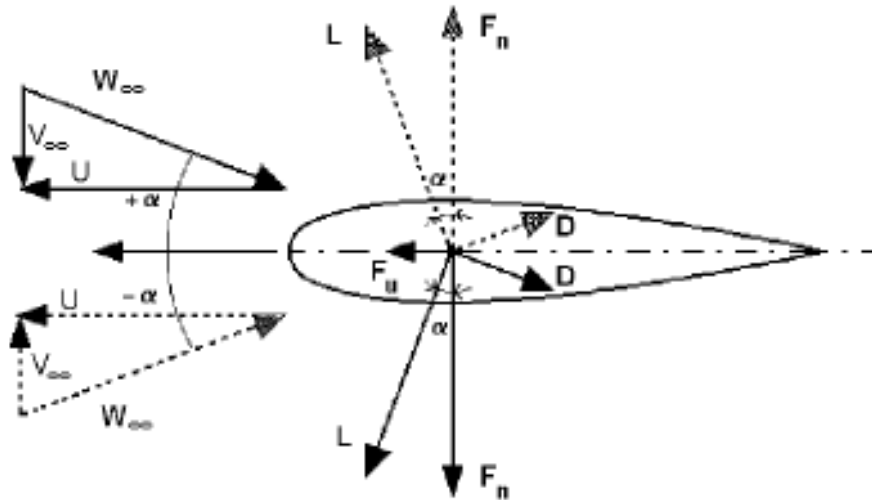


Εικόνα 74: Ένα πρωτότυπο μοντέλο αεροστρόβιλου Wells [95] (αριστερά). Το σκιαγράφημα του αεροστρόβιλου Wells [72] (δεξιά)

Όπως ειπώθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου 5, σε μια αεροτομή η οποία βρίσκεται εντός ενός πεδίου ροής \mathbf{V} και κινείται με περιστροφική ταχύτητα \mathbf{U} , «αντιλαμβάνεται» μια ταχύτητα ροής \mathbf{W} η οποία προσπίπτει σε αυτήν με γωνία προσβολής α . Ακόμη ασκούνται σε αυτήν δύο δυνάμεις: η *δύναμη αντίστασης* \mathbf{D} (η οποία είναι παράλληλη του πεδίου ροής) και η *δύναμη άνωσης* \mathbf{L} (η οποία είναι κάθετη με την δύναμη αντίστασης). Οι δύο αυτές δυνάμεις έχουν συνισταμένη μια *αεροδυναμική δύναμη* \mathbf{F} η οποία μπορεί να αναλυθεί στην *εφαπτομενική δύναμη* \mathbf{Y} ή \mathbf{F}_u (παράλληλη στο επίπεδο περιστροφής) και στην *αξονική δύναμη* \mathbf{X} ή \mathbf{F}_n (παράλληλη στο επίπεδο ροής) όπως φαίνεται στην εικόνα 75. Το μέγεθος αυτών των δύο δυνάμεων μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται και η ροή δια του στροβίλου. [95]

Η \mathbf{F}_u δημιουργεί *ροπή* γύρω από τον άξονα του στροβίλου και η \mathbf{F}_n προκαλεί *ώθηση* (thrust) κατά μήκος του άξονα του στροβίλου. Επομένως, για έναν στρόβιλο που περιστρέφεται σε μια μεταβαλλόμενη κατά διεύθυνση ροή, η *γωνία προσβολής* α μεταβάλλεται από θετική

σε αρνητική τιμή (και μαζί της μεταβάλλεται το μέτρο και η φορά της F_n), με μέση τιμή το μηδέν, αλλά λόγω της συμμετρίας της αεροτομής η F_u έχει την ίδια φορά ανεξάρτητα από τις θετικές ή αρνητικές τιμές της γωνίας α . Με αυτόν τον τρόπο η παλινδρομική ροή του αέρα δημιουργεί ροπή σε μια μόνο κατεύθυνση ανεξάρτητα με τη δική της φορά, με αποτέλεσμα ο άξονας να περιστρέφεται πάντα προς την ίδια κατεύθυνση. [95]



Εικόνα 75 : οι δυνάμεις που ασκούνται στην αεροτομή κατά τις δύο φορές της ροής του αέρα [95]

Ισχύουν: F_u ή $Y = L \sin \alpha - D \cos \alpha$ F_n ή $X = L \cos \alpha + D \sin \alpha$ (5.25)

Στα μεταβατικά σημεία αλλαγής της κατεύθυνσης ροής του αέρα, όπου η ταχύτητα του αέρα μηδενίζεται, ενώ η στάθμη του νερού στο θάλαμο συλλογής βρίσκεται στην μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της, τα αεροδυναμικά φορτία μηδενίζονται αλλά η πτερωτή συνεχίζει να περιστρέφεται για λίγο λόγω αδράνειας. Μόλις μεταβληθεί πάλι το ύψος της στάθμης του νερού στο θάλαμο, ο αέρας αρχίσει να κινείται και επάγονται ξανά αεροδυναμικά φορτία στα πτερύγια ασκώντας ροπή στην πτερωτή. Εάν η πτερωτή όμως σταματήσει, είναι δύσκολο η παλινδρομούσα στήλη αέρα να την επανεκκινήσει και γι' αυτό η διάταξη είναι εξοπλισμένη με έναν μικρό ηλεκτρικό κινητήρα που εξασφαλίζει στην πτερωτή μια ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής.

Η λειτουργία του αεροστρόβιλου Wells μπορεί να εκφραστεί μέσω τριών αδιάστατων συντελεστών [96] [97]:

- Συντελεστής πτώσης πίεσης: Ψ ή $C_p = \frac{\Delta P}{\rho \Omega^2 r^2}$ (5.26)

- Συντελεστής ροπής: Π ή $C_T = \frac{T}{\rho \Omega^2 r^2}$ (5.27)

- Βαθμός απόδοσης: $\eta = \frac{\rho E}{\Delta P} = \frac{T \cdot \Omega}{\Delta P \cdot Q}$ (5.28)

Όπου (όπως αναφέραμε και παραπάνω): ΔP είναι η πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου, ρ η πυκνότητα του διερχόμενου αέρα, T η παραγόμενη ροπή από τον στρόβιλο ως προς τον άξονα περιστροφής του, $\Omega = 2\pi \cdot Z/60$ η γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου, $Q = V_x \cdot A = V_x \cdot \pi r^2$ η παροχή μάζας αέρα πάνω στον στρόβιλο, A είναι η διατομή του πτερυγίου και r είναι η μέση ακτίνα του ρότορα του αεροστροβίλου.

Για κάθε συγκεκριμένο μοντέλο αεροστρόβιλου αυτές οι τρεις παράμετροι εξαρτώνται από τον [97]:

- **Συντελεστή παροχής (ή ρυθμού ροής):**
$$\varphi = \frac{Q}{\Omega \pi r^3} = \frac{V_x}{\Omega r} = \frac{V_x}{U} \quad (5.29)$$

Όπου, όπως παρατηρούμε στην σχέση (5.29), αποτελεί την αναλογία μεταξύ της αξονικής συνιστώσας της σχετικής ταχύτητας του ρευστού V_x και γραμμικής περιφερειακής ταχύτητας του δρομέα U .

Για την ανάλυση της ροής δια του στροβίλου Wells θα χρησιμοποιήσουμε την δισδιάστατη προσέγγιση που αναλύσαμε στο §5.4. Οπότε η ροή είναι επίπεδη και ασυμπίεστη, ενώ επιπλέον το πάχος του κάθε πτερυγίου του αεροστρόβιλου παραλείπεται. Ο **παράγοντας ή συντελεστής παρεμβολής** της συστοιχίας των επίπεδων λεπίδων (σε γωνία 90°) του αεροστρόβιλου ορίζεται με βάση την σχέση:

$$k = \frac{c_L}{c_{L0}} = \frac{2t}{\pi c} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.30)$$

c_L είναι ο συντελεστής άνωσης και c_{L0} είναι ο συντελεστής άνωσης μιας απομονωμένης λεπίδας υπό γωνία προσβολής που ορίζεται από την μέση ταχύτητα W_m . Για μια απομονωμένη επίπεδη αεροτομή, αμελητέου πάχους μέσα σε μια δισδιάστατη ροή η οποία προσπίπτει υπό γωνία β_m ισχύει: $c_{L0} = 2\pi \sin \beta_m$ Οπότε προκύπτει:

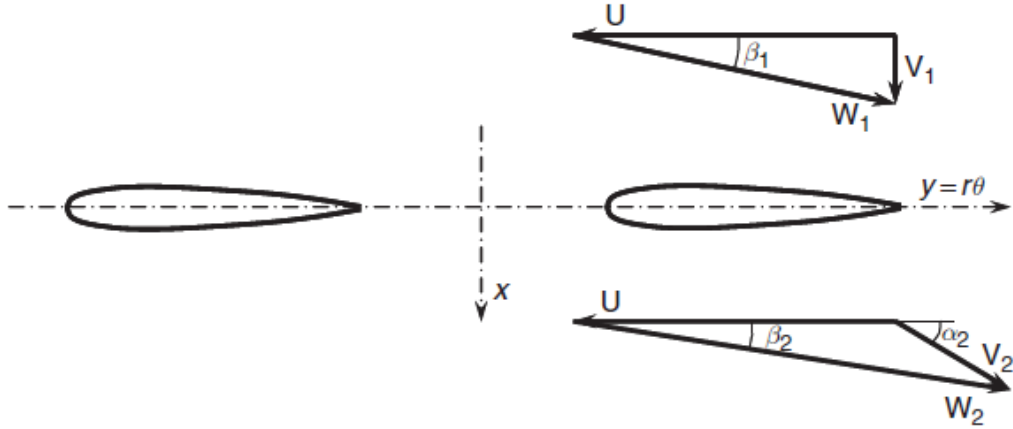
$$c_L = c_{L0} k = \frac{4t}{c} \sin \beta_m \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.31)$$

Άρα η σχέση (5.26) με την βοήθεια των (5.23) και (5.31) μας δίνει τον συντελεστή πτώσης πίεσης, συναρτήσει του συντελεστή παροχής:

$$\Psi = \frac{1}{\rho \Omega^2 r^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{t} \cdot \rho V_x^2 \cdot \frac{\cos(\beta_m - \gamma)}{\sin^2 \beta_m \cos \gamma} \cdot c_L = \frac{1}{\rho \Omega^2 r^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{t} \cdot \rho V_x^2 \cdot \frac{\cos(\beta_m - \gamma)}{\sin^2 \beta_m \cos \gamma} \cdot \frac{4t}{c} \sin \beta_m \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\Psi = 2 \frac{V_x^2}{\Omega^2 r^2} \cot \beta_m \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

Με χρήση και της σχέσης (5.29) έχουμε:
$$\Psi = 2 \varphi^2 \cot \beta_m \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.32)$$



Εικόνα 76: Δισδιάστατη αναπαράσταση των τριγώνων ταχυτήτων ενός αεροστρόβιλου Wells

Το έργο το οποίο παράγεται από μια δισδιάστατη ροή V_1 , η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων, επί του αεροστρόβιλου δίνεται με την βοήθεια της σχέσης (5.22) και με βάση την εικόνα 76:

$$\boxed{E = \Omega r V_x (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) = \Omega r V_x \cot \alpha_2} \quad (5.33)$$

Εάν θεωρήσουμε πως οι δυνάμεις αντίστασης είναι αμελητέες (πράγμα που συμβαίνει όταν η ροή του αέρα δεν έχει μεγάλη ταχύτητα ή όταν είναι αστρόβιλη), τότε η σχέση (5.16) δίνει: $\gamma = \arctan(c_D/c_L) = 0$

$$\text{Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση (5.21) απλοποιείται: } E = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \frac{c}{t} \cdot \Omega r V_x \cdot \frac{1}{\sin \beta_m} \quad (5.34)$$

Τοποθετώντας στην συνέχεια την (5.31) στην απλοποιημένη (5.34) έχουμε:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{4t}{c} \sin \beta_m \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \cdot \frac{c}{t} \cdot \Omega r V_x \cdot \frac{1}{\sin \beta_m} \Rightarrow \boxed{E = 2\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)} \quad (5.35)$$

Τέλος εξισώνοντας την (5.35), με την (5.33) προκύπτει:

$$\cot \alpha_2 = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right) = 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.36)$$

Αυτό δείχνει ότι η (απόλυτη) εισερχόμενη ροή V_1 εκτρέπεται από μια γωνία $\pi/2 - \alpha_2$, η οποία εξαρτάται μόνο από την αναλογία c/t (και όχι από την ταχύτητα του ρότορα $U = \Omega r$ ή την ταχύτητα V_1). Η (5.29) λοιπόν πρέπει να μετασχηματιστεί κατάλληλα με βάση την γεωμετρία των τριγώνων των ταχυτήτων της εικόνας 76 και της σχέσης (5.18):

$$\varphi = \frac{V_x}{U} = \frac{W_1 \sin \beta_1}{W_1 \cos \beta_1} = \frac{1}{\cot \beta_1} \Rightarrow \cot \beta_1 = \varphi^{-1} \quad (5.37)$$

Με την βοήθεια των (5.33), (5.36) και (5.37) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \cot \alpha_2 &= \cot \beta_2 - \cot \beta_1 \Rightarrow \cot \alpha_2 = \cot \beta_2 - \varphi^{-1} \Rightarrow \cot \beta_2 = \cot \alpha_2 + \varphi^{-1} \\ \cot \beta_2 &= 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) + \varphi^{-1} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Οπότε εν τέλει η (5.32), με την βοήθεια της (5.15) από την οποία προκύπτει ότι:

$$2 \cot \beta_m = \cot \beta_1 + \cot \beta_2 \quad (5.39)$$

$$\text{μας δίνει: } \Psi = \varphi^2 (\cot \beta_1 + \cot \beta_2) \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.40)$$

Παράλληλα κάνοντας χρήση των σχέσεων (5.37) και (5.38) έχουμε τον συντελεστή πτώσης πίεσης για έναν αεροστρόβιλο Wells:

$$\Psi = \varphi^2 \left(\varphi^{-1} + 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) + \varphi^{-1} \right) \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = \varphi^2 \varphi^{-1} \left(1 + 2\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) + 1 \right) \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\boxed{\Psi = 2\varphi \left[1 + \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)} \quad (5.41)$$

Παρατηρούμε πως ο λόγος c/t δεν μπορεί να τείνει προς την μονάδα καθώς τότε θα ισχύει: $\tan(\pi c/2t) \rightarrow \infty$

Τα **μειονεκτήματα** του αεροστροβίλου Wells σε σύγκριση με τους συμβατικούς αεροστροβίλους είναι τα εξής [91]:

- Χαμηλότερη απόδοση²¹
- Λειτουργία σε στενό εύρος ρυθμών ροής του αέρα με καλή απόδοση
- Υψηλότερα επίπεδα θορύβου
- Μεγαλύτερη δυσκολία εκκίνησης του στροβίλου
- Μεγάλες ταχύτητες κατά την λειτουργία του αεροστρόβιλου, πράγμα που καταπονεί το σύστημα συνολικά
- Υψηλότερη περιοδική αξονική ώθηση²²

²¹ Ο στρόβιλος Wells είναι χαμηλής πίεσης και απόδοσή του είναι μικρότερη από αυτή των στροβίλων με σταθερή φορά κίνησης και ασύμμετρη αεροτομή. Αυτό οφείλεται στο ότι οι συμμετρικές αεροτομές εμφανίζουν μεγαλύτερο **συντελεστή οπισθέλκουσας** (ή δύναμη αντιστάσεως, βλ. §5.2) από τις ασύμμετρες αεροτομές ακόμη και για τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τους. Επιπλέον στον στρόβιλο Wells η αεροτομή λειτουργεί υπό μεγάλη γωνία προσβολής (δηλαδή μικρός λόγος ταχύτητας πτερυγίου προς ταχύτητα αέρα) στις περιπτώσεις των μέγιστων τιμών της ταχύτητας του αέρα που παράγεται από την παλλόμενη στήλη. Τότε υπάρχει κίνδυνος απώλειας στήριξης και μείωσης της απόδοσης. Η μέγιστη απόδοση των απλών στροβίλων Wells φτάνει περίπου στο 60%. Όταν προστεθούν οδηγία πτερύγια, όπως θα δούμε παρακάτω, αυξάνεται στο 70% λόγω της μείωσης του στροβιλισμού της ροής στην έξοδο του στροβίλου.

Προκειμένου να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα έχουν κατά καιρούς εξεταστεί πολλές και διάφορες τροποποιήσεις στον σχεδιασμό του. Μερικές από αυτές είναι οι παρακάτω:

1. Αεροστρόβιλος Wells με **πτερύγωση σταθερής γωνίας** (variable pitch angle blades)
2. Αεροστρόβιλος Wells με **πτερύγωση μεταβλητής γωνίας** (self-pitch-controlled-guide vanes)
3. Αεροστρόβιλος Wells με **οδηγά πτερύγια** (axial Wells turbine with fixed guide vanes)
4. Αεροστρόβιλος Wells με **δύο σειρές περιστρεφόμενων πτερυγίων** (biplane rotor & contra-rotating rotor)

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλύσουμε τις παραπάνω παραλλαγές του αεροστροβίλου Wells και θα δούμε πως βελτιώνεται η απόδοση του σε κάθε μια από αυτές.

5.5.1 Αεροστρόβιλος Wells με πτερύγωση σταθερής γωνίας

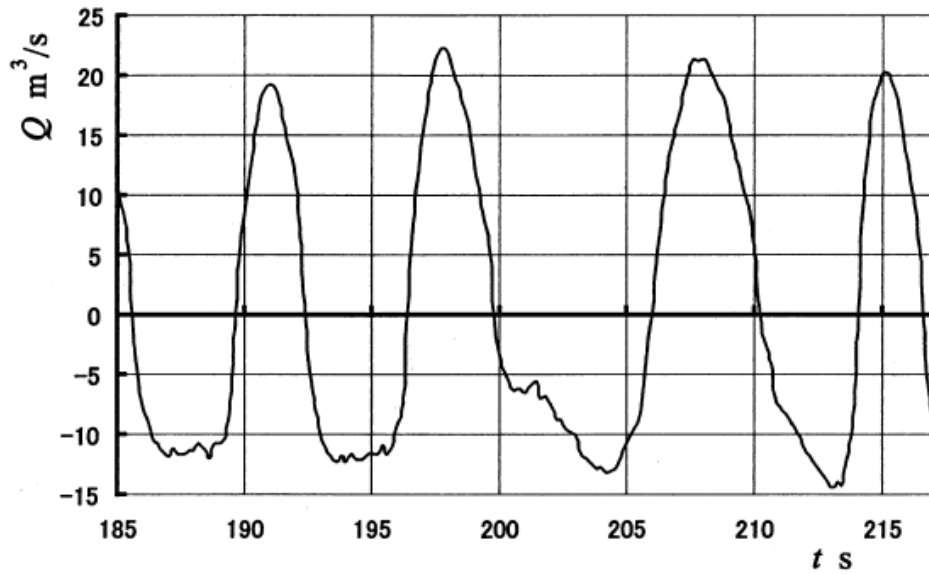
Σε πραγματικές συνθήκες θάλασσας δεν ισχύει η γραμμική θεώρηση κυματισμών Airy που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συνθήκες ροής στον αεροστρόβιλο να είναι αρκετά διαφορετικές από τις εξιδανικευμένες συνθήκες που περιγράψαμε ως τώρα. Μετρήσεις που διεξήχθησαν σε μονάδες παραγωγής ενέργειας OWC οι οποίες βρίσκονταν στην Ινδία και την Ιαπωνία, [98] δείχνουν ότι η ταχύτητα του διερχόμενου από τον αεροστρόβιλο αέρα, δεν είναι ίδια και στις δύο κατευθύνσεις.

Συγκεκριμένα, επειδή οι κορυφές των κυμάτων τείνουν να είναι μεγαλύτερες από τις κοιλίες, έτσι και οι συνθήκες των ανάλογων ροών της παλλόμενης στήλης αέρα είναι διαφορετικές, με τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας ροής για την «εξωτερική» ροή (η ροή του αέρα προς την ατμόσφαιρα ή **εκπνοή**, που αντιστοιχεί στην διέλευση μιας κορυφής κύματος) να είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές για την «εσωτερική» ροή (η ροή του αέρα προς τον θάλαμο συλλογής ή **εισπνοή**).

Προκειμένου λοιπόν να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του στροβίλου (να αποφευχθεί δηλαδή η απώλεια στήριξης, λόγω της μεγάλης γωνίας προσβολής) και να εξισωθούν οι μέγιστες τιμές της γωνίας προσβολής στην είσοδο του δρομέα για τις εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές, προτείνεται να υιοθετηθεί μια **γωνία κλίσης της πτερύγωσης** (stagger angle) ελαφρώς ασύμμετρη και με μια θετική κλίση.

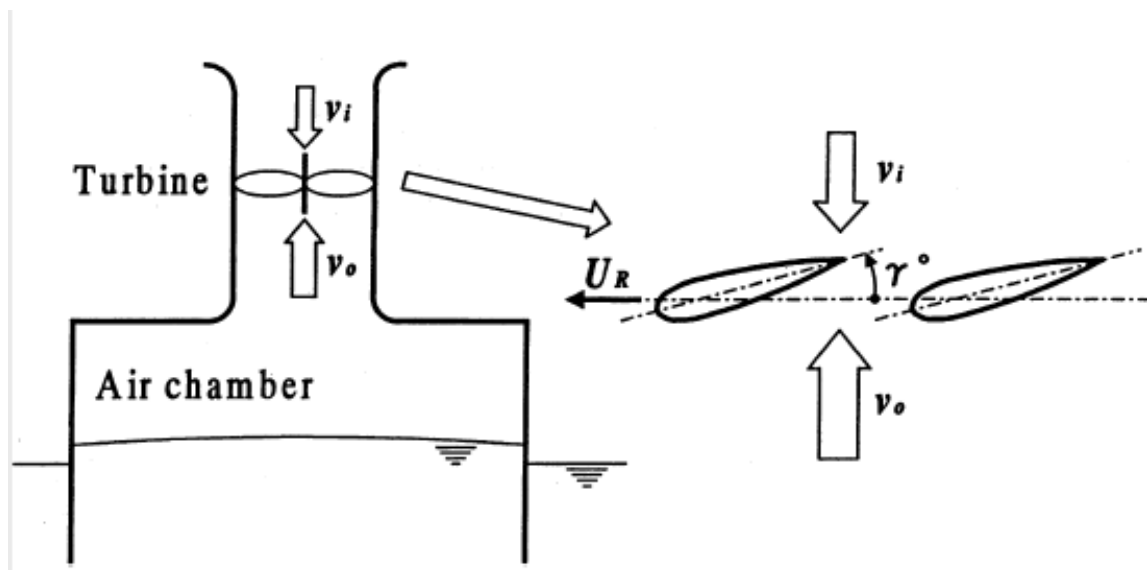
Σε μετρήσεις που διεξήχθησαν στο *Εθνικό Ινστιτούτο Ωκεάνιας Τεχνολογίας της Ινδίας*, παρατηρήθηκε πως η παροχή μάζας αέρα Q δεν είναι συμμετρική κατά την εισπνοή και την εκπνοή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πράγμα που φαίνεται και στην εικόνα 77. Οι θετικές τιμές του Q αντιστοιχούν στην εκπνοή, ενώ οι αρνητικές τιμές αντιστοιχούν στην εισπνοή.

²² **Αξονική ώθηση** είναι η δύναμη που ασκείται στον στρόβιλο από τον διερχόμενο αέρα κατά την διεύθυνση της ροής του. Στους αεροστρόβιλους Wells ασκείται υψηλότερη αξονική ώθηση επειδή το επίπεδο των πτερυγίων τους είναι κάθετο στην διεύθυνση ροής, με αποτέλεσμα να καταπονούνται περισσότερο.



Εικόνα 77: Η παροχή όγκου αέρα συναρτήσει του χρόνου σε μια μονάδα απόληψης κυματικής ενέργειας OWC

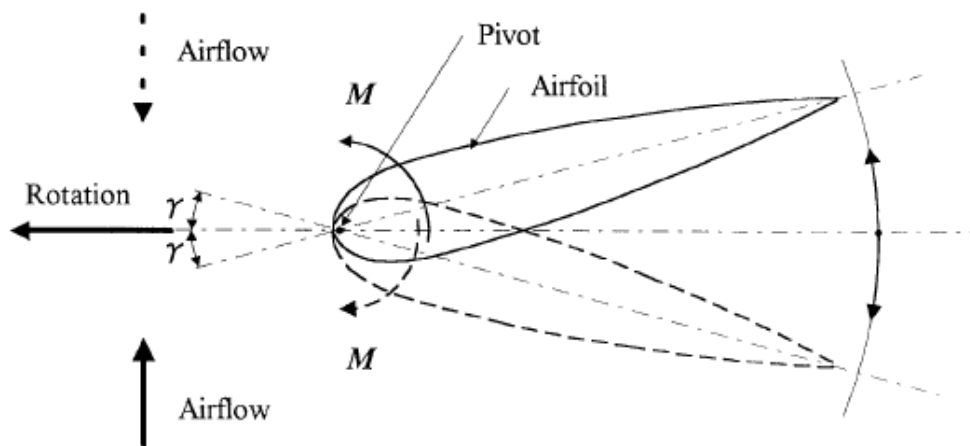
Με βάση μια πειραματική διάταξη προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών θάλασσας, η οποία στήθηκε από το *Εθνικό Πανεπιστήμιο τεχνολογίας του Matsue* (Matsue National College of Technology) στην Ιαπωνία το 2001 [98], έγιναν μια σειρά από μετρήσεις βάσει πειραματικού μοντέλου προσομοίωσης σχετικά με την απόδοση του στροβίλου Wells υπό γωνία διαφορετική των 0° . Οι μετρήσεις αφορούσαν την απόδοση ενός στροβίλου Wells σε πέντε διαφορετικές περιπτώσεις γωνίας αεροτομών του ρότορα, συμπεριλαμβανομένης και της μηδενικής γωνίας: $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$. Επίσης οι μετρήσεις έγιναν με και χωρίς την χρήση οδηγών πτερυγίων. Βρέθηκε ότι ένας στρόβιλος με πτερύγια ρότορα σταθερής γωνίας είναι πιο αποδοτικός από τον παραδοσιακό στρόβιλο Wells. Συγκεκριμένα η βέλτιστη γωνία ρύθμισης είναι 2° , τόσο στην περίπτωση χρήσης οδηγών πτερυγίων, όσο και χωρίς αυτά.



Εικόνα 78: Σχηματική απεικόνιση του αεροστρόβιλου Wells με χρήση πτερυγίων υπό γωνία γ

5.5.2 Αεροστρόβιλος Wells με πτερύγωση μεταβλητής γωνίας

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του αεροστροβίλου Wells μπορεί να γίνει χρήση στροβίλων με **μεταβλητή αυτορυθμιζόμενη γωνία κλίσης πτερύγωσης**. Ο αεροστρόβιλος αυτού του είδους αποτελείται από πολλά συμμετρικά πτερύγια που αλλάζουν τη γωνία κλίσης ανάλογα την αεροδυναμική που τους ασκείται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ροπή και αποτελεσματικότητα κατά την παλινδρομική κίνηση του αέρα. Αυτός ο στρόβιλος είναι απλούστερος γεωμετρικά και πιο φθηνός κατασκευαστικά σε σύγκριση με έναν αεροστρόβιλο που χρησιμοποιεί πτερύγια ρυθμιζόμενης και σταθερής γωνίας. Επί πλέον, σύμφωνα με μελέτες ο στρόβιλος αυτός είναι πλεονεκτικός σε μειωμένες ταχύτητες του ρότορα, ενώ έχει και καλύτερα χαρακτηριστικά περιστροφής και εκκίνησης σε σύγκριση με τον στρόβιλο Wells. [99] Από υπολογιστικές προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη γωνία ρύθμισης κάθε λεπίδας του δρομέα είναι περίπου 6° , [100] αν και δεν υπολογίσθηκε η εναλλαγή κατεύθυνσης της ροής στους υπολογισμούς.



Εικόνα 79 : Στροβιλομηχανή που χρησιμοποιεί στρόβιλο Wells με λεπίδες αυτορυθμιζόμενης γωνίας κλίσης. [100]

Στην εικόνα 79 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους στροβίλου. Η κάθε λεπίδα της τουρμπίνας τίθεται επί της πλήμνης μαζί με ένα στροφέα τοποθετημένο κοντά στην πρόσθια ακμή, ο οποίος επιτρέπει στην λεπίδα να ταλαντεύεται μεταξύ δύο προκαθορισμένων γωνιών ρυθμίσεως $\pm \gamma$. Καθώς λειτουργεί η τουρμπίνα η αεροτομή της κάθε λεπίδας δέχεται μία συγκεκριμένη ροπή M , με φορά γύρω από τον άξονα περιστροφής – ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής – και περιστρέφεται κατά μια συγκεκριμένη γωνία. Επομένως, η ροπή που ασκείται στον στρόβιλο είναι μεγαλύτερη και κατ'επέκταση επιτυγχάνεται υψηλότερη αποδοτικότητα με χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής από αυτές που θα χρειαζόταν μια συμβατική τουρμπίνας Wells.

5.5.3 Αεροστρόβιλος Wells με οδηγά πτερύγια

Σε αυτό το εδάφιο θα αναλύσουμε την λειτουργία του αεροστρόβιλου Wells με βάση το **δισδιάστατο μοντέλο σειράς πτερυγίων** (*cascade flow approximation*) και θεωρώντας πως υπάρχουν οδηγά πτερύγια στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα (βλ. εικόνα 77). Κατ' αρχάς πρέπει να αναφέρουμε πως χωρίς οδηγά πτερύγια η κινητική ενέργεια που χάνεται στην έξοδο (λόγω στροβιλισμών του πεδίου ροής), ανά μονάδα μάζας είναι ίση με [77]:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} V_x^2 \cot^2 \alpha_2 \quad (5.42)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις (5.33), (5.42) και κάνοντας ταυτόχρονα χρήση της (5.36), προκύπτει πως η **σχετική απώλεια ενέργειας** είναι ίση με:

$$\frac{E_{kin}}{E} = \frac{V_x}{\Omega r} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.43)$$

Η απώλεια ενέργειας, για δεδομένη τιμή του λόγου $V_x/\Omega r$, αυξάνεται μαζί με τον λόγο χορδή/βήμα (ή c/t) και με την γωνιακή απόκλιση της ροής. Αυτήν ακριβώς την απώλεια είναι που μπορούμε να αποφύγουμε κάνοντας χρήση οδηγών πτερυγίων. Δεδομένου ότι ο στρόβιλος κατά την λειτουργία του προβλέπεται να απορροφήσει ενέργεια από την αναστροφή της φοράς του διερχόμενου αέρα, η απόδοσή του θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση ροής και επομένως θα πρέπει να γίνει χρήση δύο σειρών οδηγών πτερυγίων, μία σε κάθε πλευρά του δρομέα, έτσι ώστε ο στρόβιλος να είναι συμμετρικός σε σχέση με το επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής. Η διάταξη αυτή του στροβίλου με τα οδηγά πτερύγια, καθώς και τα τρίγωνα ταχυτήτων του δισδιάστατου μοντέλου λειτουργίας φαίνονται στην εικόνα 80. Με βάση αυτήν την διάταξη η εισερχόμενη ροή εκτρέπεται από την πρώτη σειρά οδηγών πτερυγίων και αποκτά μια συνιστώσα λόγω περιστροφής (παράλληλη κατά την διεύθυνση του άξονα γ) ίση με:

$$V_x \cot \alpha_1, \text{ όπου } \alpha_1 > \frac{\pi}{2} \quad (5.44)$$

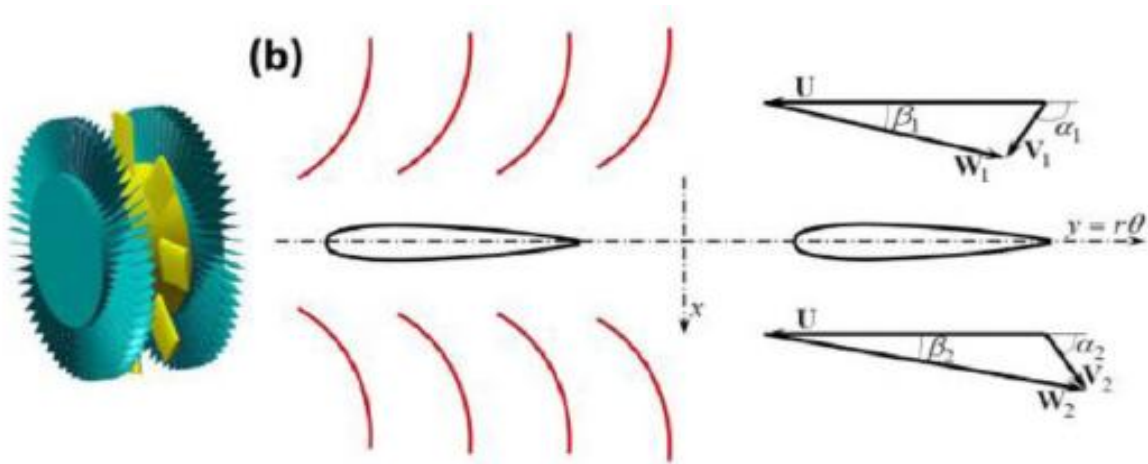
Η (5.33) λοιπόν που υπολογίσαμε για έναν στρόβιλο χωρίς οδηγά πτερύγια, τώρα μετασχηματίζεται ως εξής (βλ. εικόνα 80):

$$\boxed{E = \Omega r V_x (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) = \Omega r V_x (\cot \alpha_2 - \cot \alpha_1)} \quad (5.45)$$

Με τον ίδιο τρόπο που αποδείξαμε την σχέση (5.36), αλλά χρησιμοποιώντας την (5.45) αντί για την (5.33), μπορούμε να αποδείξουμε πως ισχύει [101]:

$$\cot \alpha_2 = \cot \alpha_1 + 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.46)$$

Το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε είναι μια γενίκευση της (5.36) που υπολογίσαμε για έναν αεροστρόβιλο χωρίς οδηγά πτερυγία. Η σχέση (5.46) δείχνει ότι η γωνία εξόδου α_2 της ροής εξαρτάται μόνο από τη γωνία εισόδου α_1 και τον λόγο c/t (δηλαδή το μήκος χορδής προς την περιφερειακή απόσταση δύο διαδοχικών πτερυγίων, όπως και η (5.36)).



Εικόνα 80 : Τα τρίγωνα ταχυτήτων για τον αεροστρόβιλο Wells με οδηγά πτερυγία.

Τοποθετώντας τώρα την (5.46) στην (5.45), προκύπτει πάλι η σχέση (5.35) για το έργο ανά μονάδα μάζας διερχόμενου αέρα, όπως και στην περίπτωση του απλού αεροστρόβιλου:

$$E = 2\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.35)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι για σταθερή περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας και σταθερή ροή αέρα, δηλαδή με σταθερό τον όρο $\Omega r V_x$, το προσφερόμενο έργο ανά μονάδα μάζας αυξάνεται καθώς αυξάνεται παράλληλα ο λόγος c/t και είναι ανεξάρτητο της γωνίας πρόσπτωσης α_1 . Συνεπώς, σύμφωνα με τη θεωρία δυσδιάστατων δυναμικών ροών, δεν προβλέπεται καμία μεταβολή στην ισχύ εξόδου λόγω της εισαγωγής πτερυγίων καθοδήγησης. Οι σχέσεις (5.46) και (5.35) είναι η βάση για τον σχεδιασμό οδηγών πτερυγίων για έναν στρόβιλο Wells.

Κάθε οδηγό πτερύγιο χρησιμεύει για να κατευθύνει τον αέρα προς και από τον αεροστρόβιλο εναλλάξ, ανάλογα με τη φορά της ροής του αέρα. Στην παρούσα ανάλυση θεωρείται πως καθώς ο αέρας διέρχεται από τα οδηγά πτερύγια, δεν στροβιλίζεται λόγω της αλληλεπίδρασης του με αυτά. Υποθέτουμε λοιπόν πως η ροή είναι δυναμική. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την υπόθεση και την μαθηματική συνθήκη Kutta, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, υπό ιδανικές συνθήκες σχεδιασμού, το πεδίο ροής γύρω από την μία σειρά πτερυγίων οδηγών είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα y με την ροή της άλλης σειράς οδηγών πτερυγίων, καθώς και ότι η ροή φεύγει από τον στρόβιλο χωρίς να παράγονται στροβιλισμοί. Αν λοιπόν οι δύο σειρές οδηγών πτερυγίων αποτελούν κατοπτρικό είδωλο η μία της άλλης, τότε για οι γωνίες εισόδου α_1 και εξόδου α_2 της

απόλυτης ταχύτητας του αέρα συνδέονται μέσω της σχέσης: $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$ οπότε η σχέση (5.46) με την βοήθεια της τριγωνομετρίας μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \cot(\pi - \alpha_1) &= \cot \alpha_1 + 2 \tan \frac{\pi c}{2t} \Rightarrow -\cot \alpha_1 = \cot \alpha_1 + 2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \Rightarrow -\cot \alpha_1 = \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \\ \cot(\pi - \alpha_1) &= \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \Rightarrow \tan \left[\frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha_1) \right] = \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \Rightarrow \tan \left(-\frac{\pi}{2} + \alpha_1 \right) = \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \\ -\frac{\pi}{2} + \alpha_1 &= \frac{\pi c}{2t} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi c}{2t} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{c}{t} \right) \end{aligned} \quad (5.47)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι για ένα δισδιάστατο ιδανικό ρευστό, το οποίο διέρχεται από έναν αεροστρόβιλο Wells με πτερύγια αμελητέου πάχους, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα σε οδηγία πτερύγια τα οποία δεν διαταράσσουν την ροή, η γωνία α_1 την οποία σχηματίζει η απόλυτη ροή του αέρα που εξέρχεται από τα οδηγία πτερύγια εισόδου (βλ εικόνα 80), είναι μια συνάρτηση του λόγου c/t και ανεξάρτητη της απόλυτης ταχύτητας της ροής του αέρα V_1 ή της ταχύτητας του ρότορα $U = \Omega r$. Εάν λοιπόν η γωνία α_1 ικανοποιεί την σχέση (5.47) τότε ισχύει και η σχέση: $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$

Στην περίπτωση που τα οδηγία πτερύγια ικανοποιούν την σχέση (5.47), προκύπτει ότι (βλ. [77]): $2 \cot \beta_m = \cot \beta_1 + \cot \beta_2 = \varphi^{-1}$ (5.48)

Άρα η (5.32) που μας δίνει τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης Ψ μέσω του επίσης αδιάστατου συντελεστή παροχής φ μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\boxed{\Psi = 2\varphi \tan \frac{\pi c}{2t}} \quad (5.49)$$

5.5.4 Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells αντίθετης φοράς

Στον στρόβιλο Wells προκειμένου να αποφύγουμε τις απώλειες εξόδου, δηλαδή τις απώλειες κινητικής ενέργειας λόγω στροβιλισμών του πεδίου ροής, μπορούμε πέρα από την χρήση οδηγίων πτερυγίων να κάνουμε χρήση **δύο σειρών πτερυγώσεων**. Οι αντίστοιχοι ρότορες μπορεί να κινούνται με την *ίδια φορά* (biplane rotor), ή και με *αντίθετες φορές* (contra-rotating rotors) κάνοντας χρήση δύο αξόνων περιστροφής. [102]

Θα αναλύσουμε πρώτα την δεύτερη περίπτωση. Υπάρχουν δύο σειρές πτερυγίων οι οποίες έχουν ίδιο προφίλ και ίδιο περιφερειακό βήμα t , κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις με ίση γωνιακή ταχύτητα Ω ενώ δεν έχουν οδηγία πτερύγια. Στην εικόνα 81 παρατηρούμε πως γίνεται η χρήση των δεικτών: 1 που αναφέρεται στην ροή που εισέρχεται στον άνω ρότορα, 2 δηλαδή η ροή που εξέρχεται από τον άνω ρότορα και οδεύει προς τον δεύτερο ρότορα και 3 είναι η ροή που εξέρχεται από τον δεύτερο ρότορα.

Εφόσον στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται χρήση οδηγών πτερυγίων ισχύει: $\alpha_1 = \pi/2$, οπότε προκύπτει: $\cot \alpha_1 = 0$, οπότε και εδώ ισχύει η σχέση (5.36):

$$\cot \alpha_2 = 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.36)$$

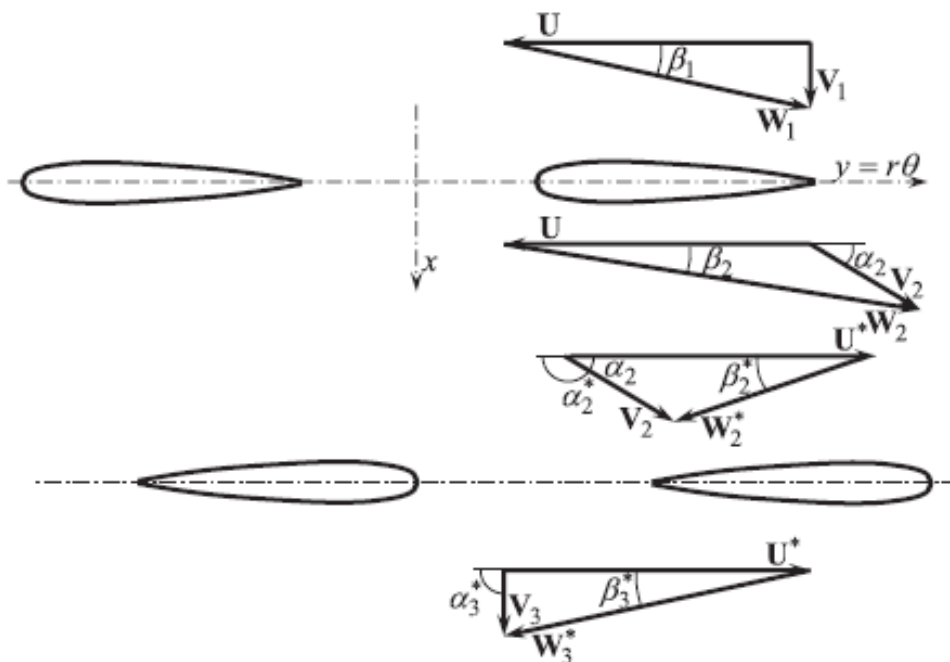
Εφόσον η κάτω σειρά οδηγών πτερυγίων κινείται κατά την αντίθετη φορά, εμάς μας ενδιαφέρουν οι παραπληρωματικές γωνίες: $\alpha_2^* = \pi - \alpha_2$ και $\alpha_3^* = \pi - \alpha_3$, όπως φαίνονται στην εικόνα 81. Η (5.36) λοιπόν γίνεται:

$$\cot \alpha_2^* = \cot(\pi - \alpha_2) = -\cot \alpha_2 = -2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.50)$$

$$\text{Αντίστοιχα με την (5.46) ισχύει και η σχέση: } \cot \alpha_3^* = \cot \alpha_2^* + 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.46\beta)$$

$$\text{Από τις (5.46}\beta) \text{ και (5.50) προκύπτει ότι: } \cot \alpha_3^* = 0 \Rightarrow \alpha_3^* = \alpha_3 = \frac{\pi}{2} \quad (5.51)$$

Σαν συμπέρασμα λοιπόν προκύπτει πως η ροή του αέρα εισέρχεται κάθετα στο επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων του πρώτου ρότορα και εξέρχεται πάλι κάθετα από το επίπεδο των πτερυγίων του δεύτερου ρότορα. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 81. Άρα η ροή στην έξοδο από τον αεροστρόβιλο είναι δυναμική και δεν παρουσιάζει στροβιλισμούς.



Εικόνα 81 : Το διδιάστατο προφίλ της διπλής αντίρροπης πτερύγωσης του αεροστρόβιλου Wells και τα αντίστοιχα τρίγωνα των ταχυτήτων. [79]

Στην σχέση (5.35) αποδείξαμε πως για σταθερή περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας και σταθερή ροή αέρα, δηλαδή με σταθερό τον όρο $\Omega r V_x$, το προσφερόμενο έργο ανά μονάδα μάζας αυξάνεται, καθώς αυξάνεται παράλληλα ο λόγος c/t και είναι ανεξάρτητο της γωνίας πρόσπτωσης α_1 ή α_2 . Άρα εύκολα αποδεικνύεται, με την βοήθεια της (5.45), πως το έργο ανά μονάδα μάζας που προσφέρεται στους δύο στροβίλους είναι:

$$E_1 = \Omega r V_x (\cot \alpha_2 - \cot \alpha_1) = \Omega r V_x \left[2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) - \cot \frac{\pi}{2} \right] = 2 \Omega r V_x \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.35\beta)$$

$$E_2 = \Omega r V_x (\cot \alpha_3^* - \cot \alpha_2^*) = \Omega r V_x \left[\cot \frac{\pi}{2} + 2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \right] = 2 \Omega r V_x \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.35\gamma)$$

Δηλαδή το έργο ανά μονάδα μάζας είναι ίσο και στους δύο στροβίλους:

$$\boxed{E_1 = E_2} \quad (5.52)$$

Όπου: οι E_1 , E_2 δίνονται, κάθε μια, από την σχέση (5.35) – ή τις (5.35β) και (5.35γ).

Για τον πρώτο αεροστρόβιλο μπορούμε να ορίσουμε τον συντελεστή πίεσης Ψ_1 μέσω του συντελεστή παροχής φ με την ίδια μαθηματική διαδικασία που εκτελέσαμε στην §5.5, καταλήγοντας πάλι στην σχέση (5.41):

$$\Psi_1 = 2\varphi \left[1 + \varphi \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \right] \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.41\beta)$$

Ο συντελεστής παροχής φ που δίνεται από την (5.29), θεωρείται σταθερός καθώς οι συνιστώσες του V_x και Ωr είναι επίσης σταθερές.

Βάση της σχέσης (5.45) μπορούμε να εξάγουμε την αντίστοιχη σχέση:

$$E_2 = \Omega r V_x (\cot \alpha_3^* - \cot \alpha_2^*) = \Omega r V_x (\cot \beta_3^* - \cot \beta_2^*) \quad (5.45\beta)$$

$$\text{Από την οποία προκύπτει η ισότητα: } \cot \alpha_3^* - \cot \alpha_2^* = \cot \beta_3^* - \cot \beta_2^* \quad (5.53)$$

Παράλληλα με την βοήθεια της εικόνας 81 προκύπτει ότι:

$$\varphi = \frac{V_x}{U} = \frac{W_3^* \sin \beta_3^*}{W_3^* \cos \beta_3^*} = \frac{1}{\cot \beta_3^*} \Rightarrow \cot \beta_3^* = \varphi^{-1} \quad (5.54)$$

Η σχέση (5.53) με την βοήθεια των (5.50), (5.51), (5.54) γίνεται:

$$2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) = \varphi^{-1} - \cot \beta_2^* \Rightarrow \cot \beta_2^* = \varphi^{-1} - 2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.55)$$

Για τον δεύτερο αεροστρόβιλο μετασχηματίζοντας κατάλληλα την (5.39) και με την βοήθεια των (5.54), (5.55) ισχύει ότι (βλ. [77]) :

$$2 \cot \beta_m^* = \cot \beta_2^* + \cot \beta_3^* = 2\varphi^{-1} - \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2\varphi^{-1} \left[1 - \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \quad (5.56)$$

Αντικαθιστώντας την (5.56) στην (5.32), προκύπτει ότι συντελεστή πίεσης Ψ_2 μέσω του συντελεστή παροχής φ , για τον δεύτερο αεροστρόβιλο είναι:

$$\Psi_2 = 2\varphi \left[1 - \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.57)$$

Ο συντελεστής πίεσης και των δύο στροβίλων λοιπόν δίνεται αθροίζοντας τις σχέσεις (5.41β) και (5.57):

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = 4\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.58)$$

Παρατηρώντας όμως και τις σχέσεις (5.35α), (5.35β) και (5.52) βλέπουμε πως το απορροφούμενο έργο ανά μονάδα μάζας διπλασιάζεται επίσης:

$$E_1 + E_2 = 2E = 4\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.59)$$

5.5.5 Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells ίδιας φοράς

Ένας εναλλακτικός τρόπος διάταξης είναι το να τοποθετηθούν δύο σειρές αξονικά μετατοπισμένων στροβίλων, τοποθετημένων σε ένα μόνο ρότορα και κατ' επέκταση κινούμενων κατά την ίδια φορά (*biplane rotor*). Αυτή είναι η πρώτη περίπτωση διπλού αεροστρόβιλου Wells που αναφέραμε στην αρχή του §5.5.4 και φαίνεται στην εικόνα 82. Και σε αυτήν την περίπτωση παρακολουθώντας την εικόνα 82, συμπεραίνουμε πως εξακολουθούν να ισχύουν οι σχέσεις:

$$\alpha_1 = \pi/2 \Rightarrow \cot \alpha_1 = 0 \text{ και (5.36): } \cot \alpha_2 = 2 \tan(\pi c/2t).$$

Επιπλέον ισχύει και η σχέση (5.46), οπότε συνδυάζοντας την με την (5.36), προκύπτει:

$$\cot \alpha_3 = \cot \alpha_2 + 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \Rightarrow \cot \alpha_3 = 4 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.60)$$

Με την βοήθεια της (5.45) και των (5.36) και (5.60) προκύπτουν οι σχέσεις για το απορροφούμενο έργο ανά μονάδα μάζας:

$$E_1 = \Omega r V_x (\cot \alpha_2 - \cot \alpha_1) = \Omega r V_x \left[2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) - \cot \frac{\pi}{2} \right] = 2\Omega r V_x \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.35\beta)$$

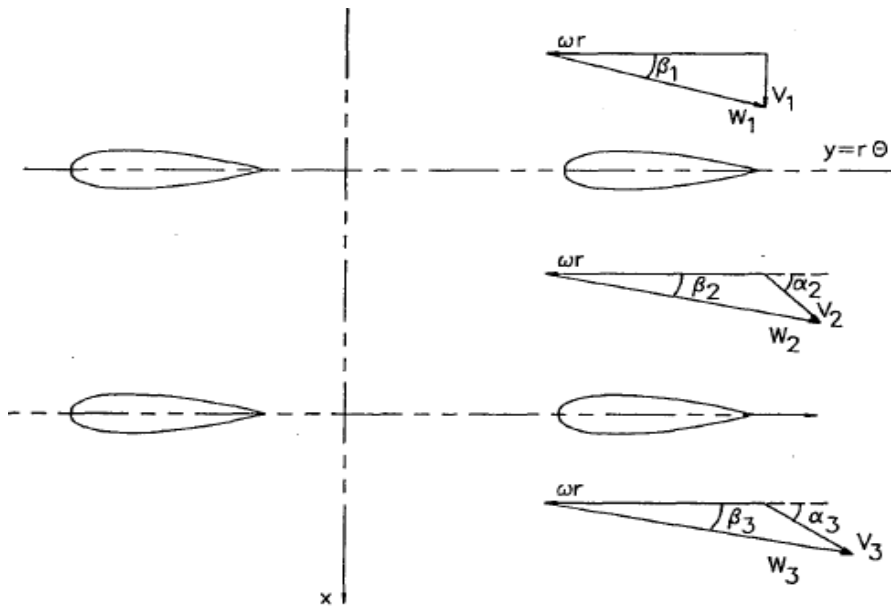
$$E_2 = \Omega r V_x (\cot \alpha_3 - \cot \alpha_2) = \Omega r V_x \left[4 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) - 2 \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \right] = 2\Omega r V_x \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right) \quad (5.35\delta)$$

Παρατηρούμε πως η (5.35β) για τον πρώτο αεροστρόβιλο παραμένει η ίδια, ενώ και πάλι συμπεραίνουμε πως το έργο ανά μονάδα μάζας είναι ίσο και στους δύο στροβίλους:

$$\boxed{E_1 = E_2} \quad (5.52\beta)$$

Όπου: οι E_1 , E_2 δίνονται κάθε μια από την σχέση (5.35) – ή τις (5.35β) και (5.35δ). Βλέπουμε λοιπόν πως και σε αυτήν την περίπτωση το απορροφούμενο έργο ανά μονάδα μάζας διπλασιάζεται:

$$\boxed{E_1 + E_2 = 2E = 4\Omega r V_x \tan \left(\frac{\pi c}{2t} \right)} \quad (5.59\beta)$$



Εικόνα 82: Το διδιάστατο προφίλ της διπλής ομόρροπης περύγωσης του αεροστρόβιλου Wells και τα αντίστοιχα τρίγωνα των ταχυτήτων. [102]

Για τον πρώτο αεροστρόβιλο ο συντελεστής πίεσης Ψ_1 μέσω του συντελεστή παροχής φ δίνεται πάλι από την (5.41β): $\Psi_1 = 2\varphi [1 + \varphi \tan(\pi c/2t)] \tan(\pi c/2t)$

Και σε αυτήν την περίπτωση βάση της σχέσης (5.45) μπορούμε να εξάγουμε την αντίστοιχη σχέση:

$$E_2 = \Omega r V_x (\cot \alpha_3 - \cot \alpha_2) = \Omega r V_x (\cot \beta_3 - \cot \beta_2) \quad (5.45\gamma)$$

$$\text{Από την οποία προκύπτει η ισότητα: } \cot \alpha_3 - \cot \alpha_2 = \cot \beta_3 - \cot \beta_2 \quad (5.53\beta)$$

Παράλληλα λόγω γεωμετρίας ισχύουν και οι σχέσεις (5.37) και (5.38) που υπολογίσαμε στο §5.5. Άρα η (5.53β) με την βοήθεια των (5.36), (5.38) και (5.50) γίνεται:

$$4 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) - 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = \cot \beta_3 - 2 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) - \varphi^{-1} \Rightarrow \cot \beta_3 = 4 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) + \varphi^{-1} \quad (5.61)$$

Για τον δεύτερο αεροστρόβιλο λοιπόν μετασχηματίζοντας κατάλληλα την (5.15) και με την βοήθεια των (5.60), (5.61) ισχύει ότι (βλ. [77]) :

$$2 \cot \beta_m = \cot \beta_2 + \cot \beta_3 = 2\varphi^{-1} + 6 \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2\varphi^{-1} \left[1 + 3\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \quad (5.62)$$

Αντικαθιστώντας την (5.62) στην (5.32), προκύπτει ότι συντελεστή πίεσης Ψ_1 μέσω του συντελεστή παροχής φ , για τον δεύτερο αεροστρόβιλο είναι:

$$\Psi_2 = 2\varphi \left[1 + 3\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.63)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (5.41β) και (5.63) για τον συντελεστή πίεσης, παρατηρούμε πως η πτώση πίεσης δια μέσου του δεύτερου ρότορα είναι υψηλότερη από αυτήν δια μέσου του πρώτου: $\Psi_1 < \Psi_2$.

Τέλος προσθέτοντας κατά μέλη τις (5.41β) και (5.63) προκύπτει η σχέση:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = 4\varphi \cdot \left(1 + 2\varphi \tan\frac{\pi c}{2t} \right) \cdot \tan\frac{\pi c}{2t} \quad (5.64)$$

5.5.6 Σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων του στροβίλου Wells

- Για τον **απλό μονοβάθμιο** αεροστρόβιλο Wells (βλ. §5.5), ισχύουν²³:

$$\text{Έργο/μον. μάζας (5.35):} \quad E = 2\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής πίεσης (5.41):} \quad \Psi = 2\varphi \left[1 + \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

Ο συντελεστής απόδοσης του υπολογίζεται με την βοήθεια των (5.28), (5.29), (5.35), (5.41) ως εξής:

²³ Ο συντελεστής παροχής φ θεωρείται σταθερός για όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις.

$$\eta = \frac{\rho E}{\Delta P} = \frac{\rho E}{\Omega^2 r^2 \rho \Psi} = \frac{2\rho\Omega r V_x \tan(\pi c/2t)}{2\Omega^2 r^2 \rho \varphi [1 + \varphi \tan(\pi c/2t)] \tan(\pi c/2t)} = \frac{V_x}{\Omega r \varphi} \cdot \frac{1}{1 + \varphi \tan(\pi c/2t)}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \varphi \tan(\pi c/2t)} \quad (5.65)$$

Με εντελώς ανάλογο τρόπο υπολογίζουμε τα παραπάνω μεγέθη και για τους υπόλοιπους τύπους που αναφέρθηκαν προηγουμένως:

- Αεροστρόβιλος Wells **με οδηγά πτερύγια** (βλ. §5.5.1) :

$$\text{Έργο/μον. μάζας (5.35):} \quad E = 2\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής πίεσης (5.49):} \quad \Psi = 2\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής απόδοσης :} \quad \eta = 1 \quad (5.66)$$

- Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells **με δύο αντίθετης φοράς στροβίλους** (βλ. §5.5.1) :

$$\text{Έργο/μον. μάζας (5.58):} \quad E = 4\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής πίεσης (5.59):} \quad \Psi = 4\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής απόδοσης(5.66) :} \quad \eta = 1$$

- Διβάθμιος Αεροστρόβιλος Wells **με δύο ίδιας φοράς στροβίλους** (βλ. §5.5.1) :

$$\text{Έργο/μον. μάζας (5.59β):} \quad E = 4\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής πίεσης (5.64):} \quad \Psi = 4\varphi \left[1 + \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right)$$

$$\text{Συντελεστής απόδοσης :} \quad \eta = \frac{1}{1 + \varphi \tan(\pi c/4t)} \quad (5.67)$$

Παρατηρώντας την σχέση (5.41), που αφορά τον απλό μονοβάθμιο στρόβιλο Wells, βλέπουμε πως σε αυτήν συσχετίστηκε η πτώση πίεσης $\Delta\rho$ δια του στροβίλου, με τον ρυθμό ροής του αέρα, αφού καταφέραμε να ορίσουμε τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης Ψ μέσω του επίσης αδιάστατου συντελεστή παροχής φ . Η παραπάνω εξίσωση λοιπόν, δείχνει ότι ο στρόβιλος Wells παρουσιάζει περίπου γραμμική συμπεριφορά (δηλ. Η πτώση

πίεσης Ψ είναι περίπου ανάλογη με τον συντελεστή παροχής φ , σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου), υποθέτοντας ότι ο όρος $\varphi \tan(\pi c/2t)$ είναι πολύ μικρότερος από την μονάδα.

Παρατηρώντας την σχέση (5.49), που αφορά τον απλό μονοβάθμιο στρόβιλο Wells με οδηγία πτερύγια, βλέπουμε πως υπάρχει μια απολύτως γραμμική συσχέτιση μεταξύ της πίεσης και του ρυθμού ροής, σε αντίθεση με την αντίστοιχη σχέση (5.41) που αφορά τον στρόβιλο χωρίς οδηγία πτερύγια και η οποία είναι κατά προσέγγιση γραμμική. Η γραφική παράσταση της (5.49) είναι μια ευθεία η οποία αυξάνει την κλίση της καθώς αυξάνεται ο λόγος c/t .

Επιπλέον σύγκριση των σχέσεων (5.41) και (5.49) δείχνει ότι η παρουσία οδηγών πτερυγίων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου ψ / φ . Αυτό το συμπέρασμα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι (για σταθερό συντελεστή παροχής φ και σταθερό λόγο c/t) το παραγόμενο έργο είναι ανεξάρτητο από τη γωνία α_1 (βλ. §5.5.3, σχ. 5.35), δείχνει ότι η παρουσία οδηγών πτερυγίων έχει ως αποτέλεσμα το να παράγεται το ίδιο έργο επί των κινούμενων πτερυγίων, από μια μικρότερη διαφορά πίεσης ΔP διαμέσου του στροβίλου. Άρα τα οδηγία πτερύγια στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα, μειώνουν τις απώλειες της ενέργειας (λόγω στροβιλισμού). Αυτό γίνεται φανερό παρατηρώντας και τους αντίστοιχους συντελεστές απόδοσης που δίνονται από τις (5.65) και (5.66).

Η σχέση (5.64), που αφορά τον διβάθμιο στρόβιλο Wells με στροβίλους αντίθετης φοράς, δείχνει ότι αυτός λειτουργεί σαν μια πλήρως γραμμική τουρμπίνα, ακριβώς και όπως ισχύει για τον μονό στρόβιλο Wells με οδηγία πτερύγια. Παρατηρώντας επίσης τις σχέσεις (5.41β) και (5.58) (βλ. §5.5.4), βλέπουμε πως παρ'ότι και στους δύο στροβίλους απορροφάται η ίδια ποσότητα έργου ανά μονάδα μάζας διερχόμενου αέρα (βλ. §5.5.4, σχ. 5.56), εντούτοις η πτώση πίεσης στον πρώτο στρόβιλο είναι μεγαλύτερη από αυτήν στον δεύτερο: $\Psi_1 > \Psi_2$. Επιπλέον συγκρίνοντας τις σχέσεις (5.49) και (5.58), βλέπουμε πως η πτώση πίεσης στο ζεύγος των αντίστροφα περιστρεφόμενων στροβίλων είναι διπλάσια από αυτήν του ενός στροβίλου με οδηγία πτερύγια: $\Psi_1 + \Psi_2 = 2\Psi$

Τέλος συγκρίνοντας τις (5.41), (5.49) και (5.59) παρατηρούμε πως η διάταξη του ζεύγους των δύο αντίθετα περιστρεφόμενων στροβίλων παρέχει διπλασιασμό του απορροφούμενου έργου E , τόσο σε σχέση με τον απλό στρόβιλο, όσο και σε σχέση με αυτόν που φέρει οδηγία πτερύγια. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα του στροβίλου Wells με ένα ζεύγος αντίθετα περιστρεφόμενων στροβίλων, είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα της διάταξης η οποία οφείλεται στην αναγκαιότητα ύπαρξης διπλού ρότορα. Επίσης αναπτύσσονται δυσκολίες και σε σχέση με την μετατροπή της περιστρεφόμενης μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική λόγω της αντίθετης περιστροφικής κίνησης.

Ένας εναλλακτικός τρόπος διάταξης, με σκοπό να μειωθεί η πολυπλοκότητα, είναι το να τοποθετηθούν δύο σειρές κινούμενων στροβίλων κατά την ίδια φορά (*biplane rotor*). Και σε

αυτήν την περίπτωση παράγεται το διπλάσιο έργο ανά μονάδα μάζας, αλλά αυξάνεται η πτώση πίεσης όπως φαίνεται στην (5.64) ενώ η λειτουργία της μηχανής μπορεί να θεωρηθεί μόνο κατά προσέγγιση γραμμική όπως ισχύει και στην περίπτωση του απλού μονοβάθμιου στροβίλου.

Έχει ενδιαφέρον το να συγκριθεί η απόδοση ενός μονοβάθμιου στροβίλου Wells (λόγος χορδής-βήματος c/t) με έναν διβάθμιο στροβίλο Wells, ο οποίος όμως να έχει και στους δύο στροβίλους μαζί τον ίδιο αριθμό πτερυγίων με αυτά του μονοβάθμιου (λόγος χορδής-βήματος κάθε στροβίλου $c/2t$). Σε αυτήν την περίπτωση οι σχέσεις: (5.35), (5.41), (5.59β) και (5.64), δίνουν:

$$\text{Μονοβάθμιος Wells: } \Psi_m = 2\varphi \left[1 + \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) , \quad E_m = 2\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.68)$$

$$\text{Διβάθμιος Wells: } \Psi_b = 4\varphi \left[1 + \varphi \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right) \right] \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right) , \quad E_b = 4\Omega r V_x \tan\left(\frac{\pi c}{4t}\right) \quad (5.69)$$

Έχουμε αναφέρει ήδη πως ισχύει αναγκαστικά: $0 < c/t < 1$ και αυτό σημαίνει με την σειρά του πως ισχύει:

$$0 < c/2t < 1/2 \Rightarrow \tan 0 < \tan(c/2t) < \tan(1/2) \Rightarrow 0 < \tan(c/2t) < 8,726867791 \cdot 10^{-3}$$

$$0 < c/4t < 1/4 \Rightarrow \tan 0 < 2 \tan(c/4t) < 2 \tan(1/4) \Rightarrow 0 < 2 \tan(c/4t) < 8,726701641 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Άρα προκύπτει πως γενικά ισχύει ότι: } 2 \tan(c/4t) < \tan(c/2t) \quad (5.70)$$

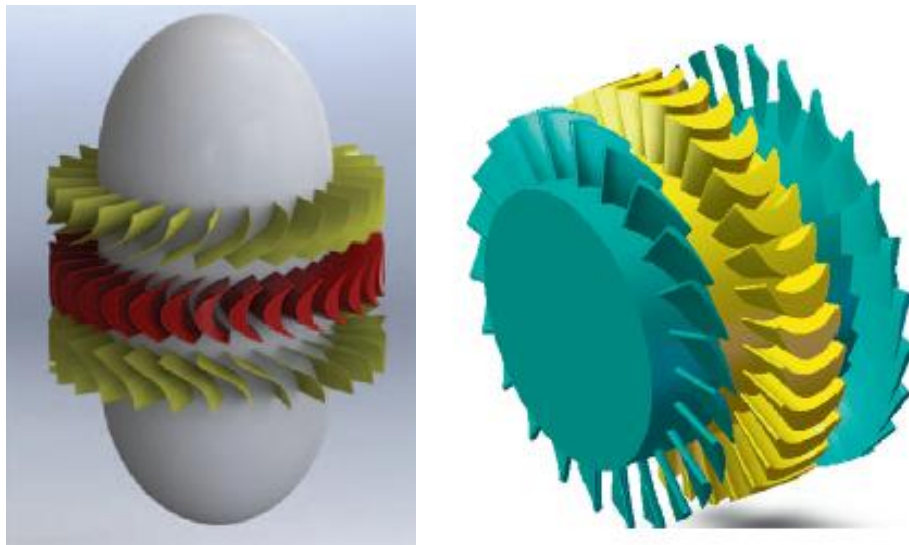
$$\text{Άρα εν τέλει με βάση τις (5.65), (5.66) και (5.67) προκύπτει ότι: } \Psi_b < \Psi_m \text{ και } E_b < E_m \quad (5.71)$$

Με λίγα λόγια το απορροφούμενο έργο ενός μονοβάθμιου στροβίλου είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός διβάθμιου με τον ίδιο αριθμό πτερυγίων. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τον συντελεστή πτώσης πίεσης. Οι διαφορές αυτές γίνονται πιο μεγάλες καθώς ο λόγος c/t τείνει προς την μονάδα. Η συνολική απόδοση αυτής της διάταξης είναι μικρότερη τόσο από τον απλό μονοβάθμιο στροβίλο, όσο και όλες τις άλλες περιπτώσεις στροβίλων, πράγμα που φαίνεται χαρακτηριστικά στην (5.67) και έπειτα από σύγκριση της με τις (5.65) και (5.66).

5.6 Ο αυτορυθμιζόμενος αεροστρόβιλος impulse

Στην Ευρώπη οι θαλάσσιοι κυματισμοί έχουν μεγάλα ύψη και μακρές περιόδους κύματος, με αποτέλεσμα να μεταφέρουν πυκνότητα ροής ενέργειας που είναι κατάλληλη για χρήση των στροβίλων Wells, οι οποίοι λειτουργούν με υψηλή απόδοση σε μόνο ένα στενό εύρος συχνοτήτων και γύρω από μικρούς συντελεστές παροχής φ . Από την άλλη στις περιοχές του Δυτικού Ειρηνικού, κοντά στις ακτές της Ασίας, τα μέσα ύψη και οι περίοδοι είναι μικρές αντίστοιχα, πράγμα που σημαίνει ότι ένας αεροστρόβιλος εγκατεστημένος σε αυτές τις περιοχές πρέπει να λειτουργεί στους κατώτερους συντελεστές παροχής. Αυτά τα κυματικά χαρακτηριστικά μαρτυρούν πως στις ακτές του Δυτικού Ειρηνικού (όπως είναι αυτές της Ινδίας και της Κορέας) είναι καταλληλότερη η χρήση του **αξονικής ροής αυτορυθμιζόμενου αεροστρόβιλου δράσεως** (self-rectifying impulse turbine) ή απλούστερα **αεροστρόβιλου impulse**. [103] Συγκριτικά με τον αεροστρόβιλο Wells, ο στρόβιλος Impulse έχει κάποια πλεονεκτήματα:

- Καλύτερη απόδοση κατά την εκκίνηση του
- Πιο ευρύ φάσμα λειτουργικών ρυθμών ροής
- Χαμηλότερα επίπεδα θορύβου κατά την λειτουργία του



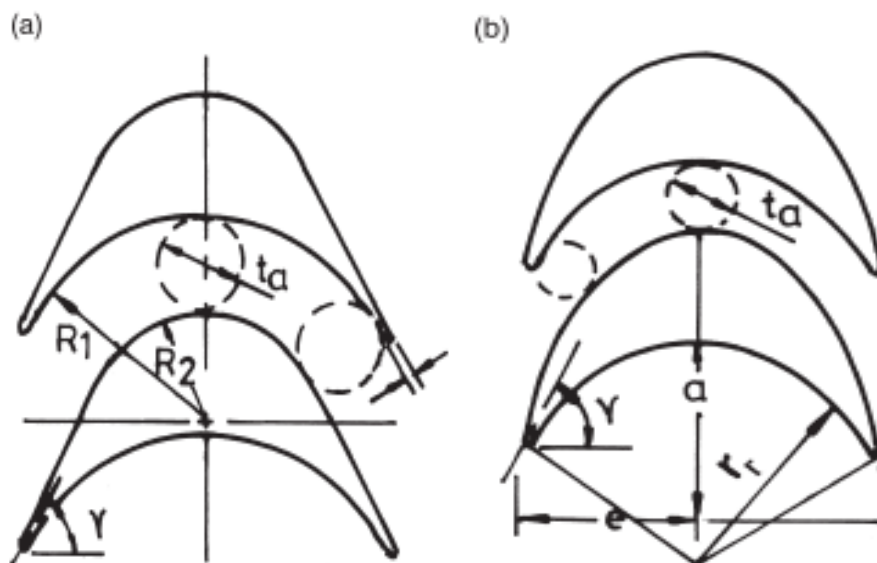
Εικόνα 83: : Τρισδιάστατο σκίτσο του αεροστρόβιλου impulse . [102]

Ο αεροστρόβιλος impulse, έχει δρομέα που είναι πανομοιότυπος με αυτόν ενός συμβατικού ατμοστρόβιλου δράσεως αξονικής ροής τύπου *de Laval* (επινοήθηκε το 1889 από τον Gustaf de Laval), με την διαφορά ότι η ροή πρέπει να είναι δυνατή και από τις δύο κατευθύνσεις. Για να επιτευχθεί αυτό ο στρόβιλος δράσεως αποτελείται από έναν δρομέα με περιστρεφόμενα πτερύγια και δύο σειρές από οδηγά πτερύγια, τοποθετημένα συμμετρικά (ως προς το επίπεδο του κινητού στροβίλου) και στις δύο πλευρές του, έτσι ώστε η μία σειρά να αποτελεί κατοπτρικό είδωλο της άλλης όπως φαίνεται στην εικόνα 83. Η γωνία ροής εισόδου (σε σχέση με το απόλυτο σύστημα αναφοράς) είναι περίπου ίση με

τη γωνία εξόδου των (κινητών ή και σταθερών) πτερυγίων (η γωνιακή μικρή διαφορά οφείλεται στο φαινόμενο της ολίσθησης – *effect of slip*, βλ. [77]). Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου στροβίλου μελετήθηκε από τον Ιάπωνα ερευνητή **Setoguchi** το 2002 ο οποίος συνέκρινε δύο σχέδια πτερυγίων:

- Στο πρώτο σχέδιο το πτερύγιο διαμορφώνεται από δύο κυκλικά τόξα διαφορετικής ακτίνας και τέσσερις ευθείες γραμμές που εκτείνονται από την πρόσθια έως την οπίσθια πλευρά του πτερυγίου. (**Απλό προφίλ** πτερυγίων ρότορα)
- Στο δεύτερο σχέδιο η αεροτομή των πτερυγίων είναι ελλειπτική. Διαμορφώνεται από ένα κυκλικό τόξο στην πλευρά της πίεσης και από ένα μερικώς ελλειπτικό τόξο στην πλευρά της αναρρόφησης. Ο διάυλος δια του οποίου ρέει ο διερχόμενος αέρας, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στα διαδοχικά πτερύγια, είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να υπάρχει ελαφρώς πιο ευρύς στο κέντρο, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι μη αναγκαίες υψηλές ταχύτητες ροής. (**Ελλειπτικό προφίλ** πτερυγίων ρότορα)

Οι πειραματικές δοκιμές που εξήγαγε ο Setoguchi απέδειξαν ότι το δεύτερο σχέδιο έχει μεγαλύτερη απόδοση και έτσι τελικά επικράτησε. Τα οδηγία πτερύγια του έχουν την μορφή "λυγισμένων" πλακιδίων, όπου το πρώτο τμήμα τους έχει σχήμα κυκλικού τόξου και στην συνέχεια ευθυγραμμίζονται, ώστε να οδηγήσουν την ροή του αέρα εντός του δρομέα.



Εικόνα 84: Προφίλ των πτερυγίων του Δρομέα (α) Απλό προφίλ (β) Ελλειπτικό προφίλ [104]

Ο τρόπος λειτουργίας του στροβίλου αυτού είναι ο εξής: Δημιουργείται **υψηλή πίεση** (pressure head) στην στήλη του αέρα κατά την ανέγερση της στάθμης του νερού και έτσι εξαναγκάζεται (ο αέρας) να εισρεύσει στον στρόβιλο. Τα οδηγία πτερύγια εισόδου εκτρέπουν τη ροή και έτσι αυτή οδηγείται σε στροβιλισμό ο οποίος με την σειρά του εισρέει στα κινούμενα πτερύγια δημιουργώντας μια ισχυρή ροπή στρέψης στον δρομέα του στροβίλου. Καθώς η στήλη του νερού, και κατ επέκταση του αέρα, κατέρχεται, η ασκούμενη πίεση αντιστρέφεται και η ροή αλλάζει φορά, χωρίς όμως να αλλάξουν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της, λόγω της ειδικά σχεδιασμένης συμμετρίας του στροβίλου. Έτσι το

κινούμενο μέρος περιστρέφεται διαρκώς προς την ίδια φορά, ανεξάρτητα της φοράς της ροής του ανέμου.

Σύμφωνα με την πρόταση του Setoguchi, η απόδοση του στροβίλου impulse σε μια σταθερής κατευθύνσεως και τρισδιάστατης ροής εκτιμάται συνήθως με όρους τεσσάρων αδιάστατων παραμέτρων [104]:

- Ο συντελεστής εισόδου (input coefficient): $C_A = \frac{2\Delta p Q}{\rho_\alpha (v_\alpha^2 + U_R^2) b l_r z v_\alpha}$ (5.71)

- Ο συντελεστής ροπής (torque coefficient): $C_T = \frac{2T_0}{\rho_\alpha (v_\alpha^2 + U_R^2) b l_r z v_R}$ (5.72)

- Η απόδοση του στροβίλου (turbine efficiency): $\eta = \frac{T_0 \cdot \omega}{\Delta P \cdot Q} = \frac{C_T}{C_A \varphi}$ (5.73)

- Ο συντελεστής παροχής (flow coefficient): $\varphi = \frac{v_\alpha}{U_R}$ (5.74)

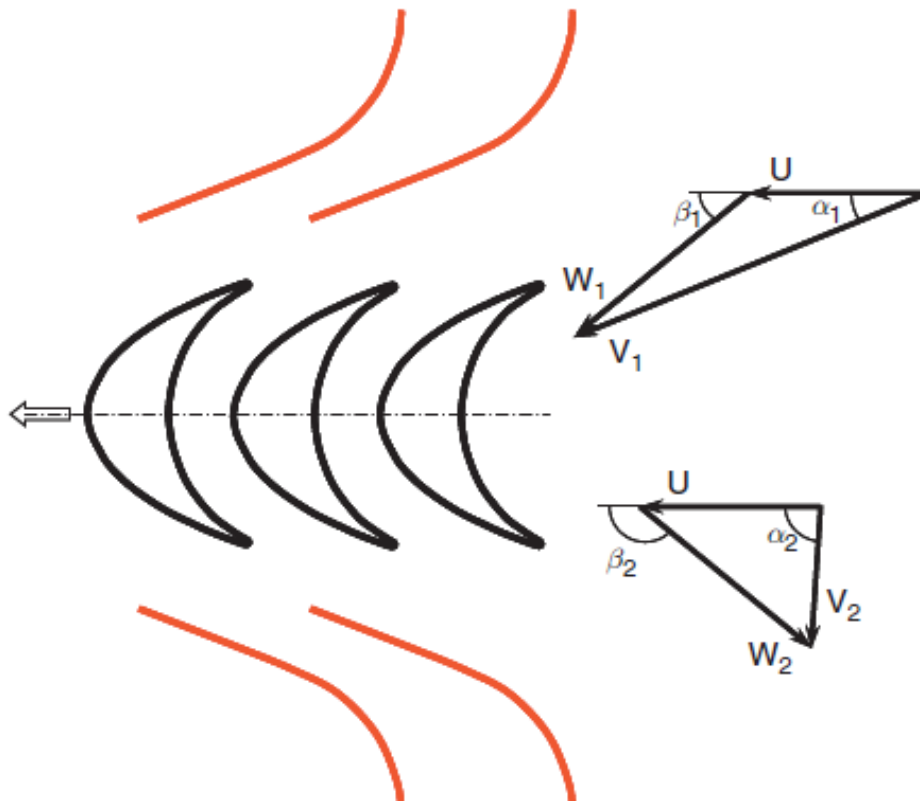
Πίνακας 13 Οι ερμηνείες των μεταβλητών που εμπεριέχονται τις παραπάνω σχέσεις [103]

Συμβολισμός	Ερμηνεία
C_A	Συντελεστής εισόδου/Input coefficient
η	Απόδοση στροβίλου/Turbine efficiency
Δp	Πτώση πίεσης/Pressure drop
Q	Παροχή όγκου/Flow rate
b	Ύψος (ή απόσταση) Πτερυγίων/Blade height
v_α	Αξονική συνιστώσα απόλυτης ταχύτητας αέρα/Axial flow velocity
ω	Γωνιακή ταχύτητα στροβίλου/Angular velocity of turbine
l_r	Μήκος Χορδής πτερυγίου/Chord length to rotor blade
C_T	Συντελεστής Ροπής/Torque coefficient
φ	Συντελεστής ροής/Flow coefficient
T_0	Ροπή/Torque
ρ_α	Πυκνότητα/Density of air
$z(b_n)$	Αριθμός κινούμενων πτερυγίων/Number of rotor blades
r_R	Ακτίνα ενδιάμεσου στροβίλου/Mid span radius
U_R	Περιφερειακή ταχύτητα ακτίνας στροβίλου r_R /Circumferential velocity

Ο λόγος σταθερότητας Ω (solidity ratio) του δρομέα ορίζεται ως το πηλίκο του αριθμού των ακίνητων οδηγών πτερυγίων (κάθε σειράς) προς τον αριθμό των κινούμενων πτερυγίων του δρομέα: $\Omega = g_n / b_n$ (5.75)

Η αναλογία αυτή δηλώνει τη μεταβολή του πλάτους της διόδου ροής του αέρα. Ο λόγος αυτός επηρεάζει άμεσα την ροή του αέρα κατά τη διαδρομή του μέσα από τον στρόβιλο.

Επίσης επηρεάζει και την κατανομή της πίεσης στα κινούμενα πτερύγια του δρομέα, καθώς και στα στατικά οδηγά πτερύγια· επομένως ο λόγος στερεότητας επηρεάζει γενικότερα τη λειτουργία και την απόδοση του στροβίλου. Συγκριτικές μελέτες έδειξαν ότι για $\Omega = 0,63$ εμφανίζεται μεγάλη διαφορά ταχύτητας στις δύο πλευρές του στροβίλου, μεγαλύτερες διαφορές πίεσης και κατ'επέκταση η βέλτιστη απόδοση. [103]



Εικόνα 85: Τυπική σχηματική απεικόνιση του προφίλ αεροστροβίλου Impulse και των αντίστοιχων τριγώνων ταχυτήτων. [77]

Όπως και στην περίπτωση του στροβίλου Wells (βλ. §5.5), αντικαθιστούμε την τρισδιάστατη σειρά πτερυγίων με την αντίστοιχη **δισδιάστατη** (cascade of blades) ενώ δεχόμαστε και ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και αστρόβιλη.²⁴ Σε αυτήν την περίπτωση οι συντελεστές που δίνονται από τις σχέσεις (5.71) έως (5.74) απλοποιούνται και δίδονται από τις σχέσεις (5.26) έως (5.29), οι οποίες παρουσιάστηκαν στην §5.5. Ακόμη ισχύει η θεωρία δισδιάστατης δυναμικής ροής που περιγράφηκε στην §5.4. Από την γεωμετρία της εικόνας 85 προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις (βλ. [77]):

$$\cot \alpha_1 = -\varphi^{-1} + \cot \beta_1 \quad (5.76)$$

$$\cot \alpha_2 = -\varphi^{-1} + \cot \beta_2 \quad (5.77)$$

²⁴ Υπενθυμίζουμε πως γωνία μεταξύ των διανυσμάτων \vec{U} και \vec{V} συμβολίζεται και εδώ με α , ενώ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων \vec{U} και \vec{W} συμβολίζεται με β .

Από την θεωρία της δισδιάστατης δυναμικής ροής είναι γνωστό πως για μια δεδομένη γεωμετρία ροής, υπάρχει μια μοναδική τιμή της γωνίας β_1 (την οποία και θα συμβολίσουμε ως β_1) για την οποία ισχύει: $\beta_2 = \pi - \beta_1$ (δηλαδή οι γωνίες εισόδου και εξόδου είναι παραπληρωματικές). Από την στιγμή μάλιστα που τα οδηγία πτερύγια είναι συμμετρικά μεταξύ τους, προκύπτει πως και η σχετική ροή W είναι επίσης συμμετρική, ενώ τα άκρα των οδηγίων πτερυγίων θεωρούνται «σημεία στασιμότητας» της σχετικής ροής. Τέτοιες συνθήκες σχετικά με τα πτερύγια ονομάζονται **Συνθήκες «Σχεδιασμού»** (“design” conditions) του στρόβιλου.

Για να αποφευχθούν οι απώλειες ενέργειας λόγω της υδροδυναμικής απώλειας στήριξης (διαχωρισμός οριακού στρώματος – boundary layer separation) πάνω στα πτερύγια, έχει αποδειχθεί πειραματικά πως η διαφορά $|\beta_1 - \beta_1|$ δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη. Αυτό σημαίνει πως η ύπαρξη οδηγίων πτερυγίων εισόδου (input guide vanes) είναι απολύτως απαραίτητη.

Η γωνία α_1 εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία των οδηγίων πτερυγίων και είναι ανεξάρτητη από τον συντελεστή παροχής φ και την φορά της ροής. Εάν λοιπόν θεωρήσουμε πως ισχύει η συνθήκη σχεδιασμού $\beta_1 = \beta_1$, τότε η (7.36) δίνει την σχέση:

$$\varphi = (\cot \beta_1 - \cot \alpha_1)^{-1} \quad (5.78)$$

Η οποία καλείται **Συντελεστής Παροχής «Σχεδιασμού»** (“design” flow coefficient) και δείχνει πως η ύπαρξη μιας θετικής τιμής για τον συντελεστή παροχής έχει ως προϋπόθεση το ότι ισχύει: $\alpha_1 > \beta_1$

Ας εξετάσουμε τώρα τι συμβαίνει με την ροή του αέρα η οποία εξέρχεται από τον στρόβιλο. Για την συνθήκη σχεδιασμού: $\beta_2 = \pi - \beta_1 = \pi - \beta_1$, οι σχέσεις (5.77) και (6.78) δίνουν:

$$\begin{aligned} \cot \alpha_2 &= -\varphi^{-1} + \cot(\pi - \beta_1) \Rightarrow \cot \alpha_2 = -\varphi^{-1} - \cot \beta_1 \Rightarrow \cot \alpha_2 = -\varphi^{-1} - \varphi^{-1} - \cot \alpha_1 \\ \cot \alpha_2 &= \cot(\pi - \alpha_1) - 2\varphi^{-1} \end{aligned} \quad (5.79)$$

Η πάνω σχέση πρακτικά μας δείχνει πως κάτω από συνθήκες «σχεδιασμού» η απόλυτη ροή του αέρα βγαίνει από τον κινούμενο στρόβιλο κατά μια γωνία α_2 , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από την $\pi - \alpha_1$, όπου α_1 είναι η γωνία με την οποία βγαίνει η ροή του αέρα από τα οδηγία πτερύγια εισόδου.

Τώρα αξίζει να σημειωθεί πως οι συμμετρικές προϋποθέσεις που θέσαμε απαιτούν την ύπαρξη μιας δεύτερης σειράς οδηγίων πτερυγίων (output guide vanes) η οποία – όπως είπαμε και παραπάνω – πρέπει να αποτελεί κατοπτρικό είδωλο της πρώτης. Η ιδανική

γωνία εισόδου της ροής στο σύστημα αυτών των οδηγών πτερυγίων γνωρίζουμε βάση πειραμάτων πως είναι ίση με $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$. Ωστόσο σύμφωνα με την σχέση (5.79) αυτό δεν είναι δυνατόν να συμβεί, οπότε δημιουργείται μια κατάσταση ασυμβατότητας του συστήματος: *Η ροή του αέρα δεν μπορεί να προσπίπτει κατά την βέλτιστη δυνατή γωνία πάνω στον περιστρεφόμενο ρότορα (έτσι ώστε να μην υπάρχουν απώλειες στήριξης) και ταυτόχρονα πάνω στη δεύτερη σειρά οδηγών πτερυγίων.*

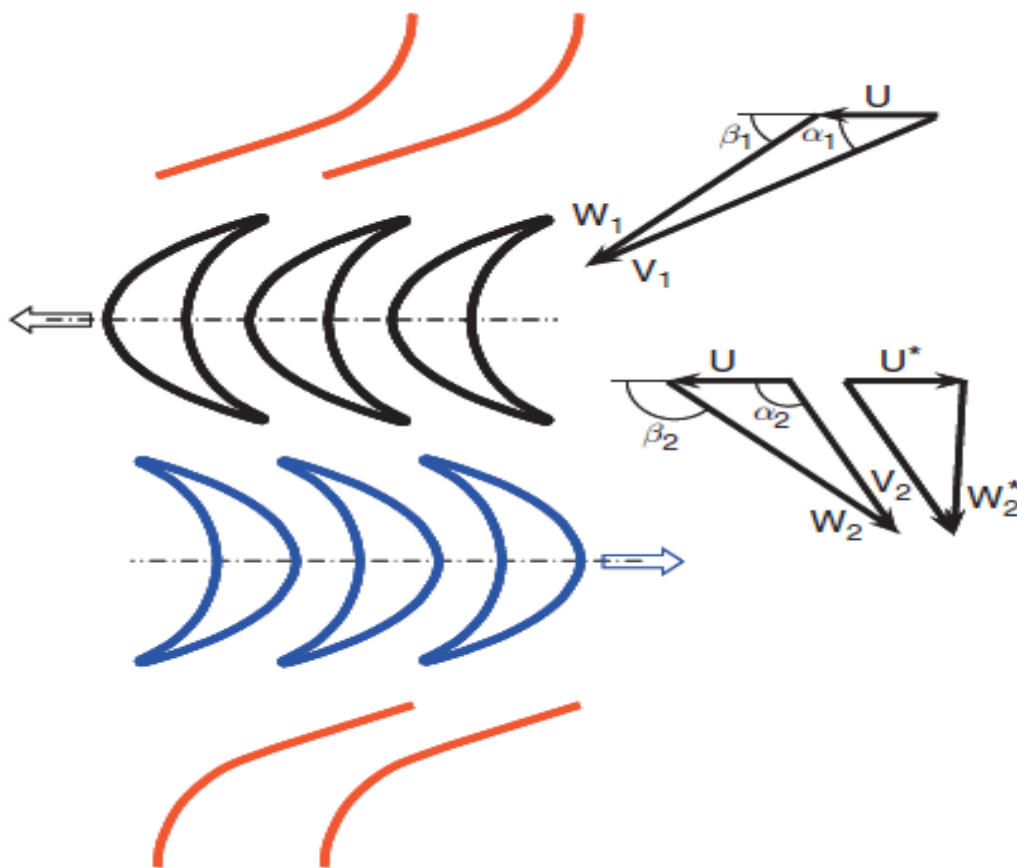
Έτσι ο διαχωρισμός της ροής στα οδηγά πτερύγια της εξόδου προκαλεί σημαντικές απώλειες πίεσης, πράγμα που με την σειρά του οδηγεί σε μεγάλες αεροδυναμικές απώλειες και κατ'επέκταση μειώνει την απόδοση του στροβίλου. Αυτό είναι και το βασικό μειονέκτημα των στροβίλων impulse από τότε που σχεδιάστηκαν για πρώτη φορά. Από την άλλη βέβαια ο στρόβιλος δράσεως δεν εμφανίζει σημαντικά προβλήματα απώλειας στήριξης λόγω της μεγάλης καμπυλότητας των πτερυγίων του και γι αυτό η καμπύλη απόδοσης του είναι αρκετά ευρεία και ομαλή. (βλ. Διάγραμμα 13)

Πίνακας 14 : Οι προδιαγραφές ενός αυτορυθμιζόμενου στροβίλου impulse [103]

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Διάμετρος πτερυγίου / Tip diameter	D	300 mm
Κενό μεταξύ κινούμενου και οδηγού πτερυγίου / Gap between guide vane and rotor blade	G	20 mm
Αριθμός πτερυγώσεων / Number of blades	b_n	30 – 36
περιφερειακό βήμα / Rotor blade pitch	S_r	22.2 – 22.6
Μήκος Χορδής πτερυγίου / Chord length	l_r	54 mm
Εσωτερική γωνία μεταξύ των πτερυγίων / Blade inlet angle	γ	60°
Αριθμός οδηγών πτερυγίων / Number of guide vane	g_n	20 - 30
Μήκος Χορδής / Chord length	l_g	70 mm
Μήκος γραμμής / Strait line length	l_s	34.8 mm
Περιφερειακή ακτίνα/ Radius of circular arc	R_a	37.2 mm
Γωνία οδηγών πτερυγίων / Guide vane setting angle	θ	30°
Λόγος σταθερότητας / Solidity ratio	Ω	0,56 – 1,00

5.6.1 Οι παραλλαγές του αυτορυθμιζόμενου αεροστρόβιλου impulse

Ο *Mc Cormick* προκειμένου να λύσει αυτό το πρόβλημα πρότεινε να χρησιμοποιηθεί ένας **διπλός αυτορυθμιζόμενος στρόβιλος αντίθετης περιστροφής** (contra-rotating self-rectifying impulse turbine), ο οποίος δοκιμάστηκε στην μονάδα Kaimeί στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (βλ. §4.3). Το πρόβλημα όμως της μεγάλης γωνίας προσβολής υπήρχε και σε αυτόν τον στρόβιλο, τόσο στην σχετική ταχύτητα ροής στην είσοδο του δεύτερου δρομέα, όσο και στη ροή στην είσοδο της δεύτερης σειράς οδηγών πτερυγίων, όπως ακριβώς συνέβαινε και στον στρόβιλο με έναν δρομέα. Αυτό εύκολα μπορεί να αποδειχθεί με την βοήθεια της εικόνας 86 (για περισσότερα βλ. [105]).

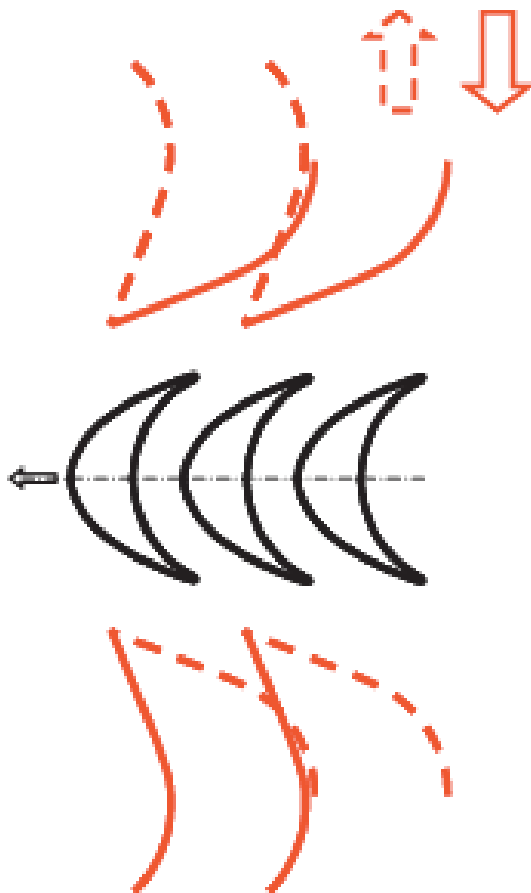


Εικόνα 86 : δισδιάστατη απεικόνιση του προφίλ του αεροστρόβιλου Mc Cormick και των τριγώνων ταχυτήτων

Μετά τον Mc Cormick, ο *Kim* πρότεινε την χρήση **οδηγών πτερυγίων μεταβλητής γεωμετρίας** τα οποία θα μπορούσαν να περιστρέφονται υπό την επίδραση των αεροδυναμικών ροπών που ενεργούν σε αυτά και να καταλαμβάνουν δύο προκαθορισμένες γωνιακές θέσεις, ανάλογα με το αν ο αέρας ρέει προς τα μέσα ή προς τα έξω (βλ. εικόνα 87). Αυτός ο σχεδιασμός βοήθησε την κάτω σειρά οδηγών πτερυγίων να πλησιάσει περισσότερο τη γωνία α_1 της ροής εξόδου από τον δρομέα και βελτίωσε σημαντικά την απόδοση, παρόλο που αύξησε την μηχανική πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις συντήρησης. (για περισσότερα βλ. [106])

Η χρήση **κινητών οδηγών πτερυγίων**, εφαρμόστηκε επιτυχώς στην διάταξη του πλωτήρα οπίσθιου λυγισμένου σωλήνα, OE Buoy (BBDB, βλ. §4.6.5) στην Ιρλανδία. Σε γενικές γραμμές πάντως, δεδομένου ότι ο συντελεστής ροής ϕ μεταβάλλεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου καθώς παλινδρομεί ακανόνιστα μεταξύ αρνητικών και θετικών τιμών, είναι αδύνατο να αποφευχθεί η αεροδυναμική απώλεια στήριξης στα πτερύγια του δρομέα και ταυτόχρονα στην κάτω σειρά των οδηγών πτερυγίων κατά τη διάρκεια ολόκληρου του χρόνου λειτουργίας τους. [79]

Μια άλλη μέθοδος για την μείωση των αεροδυναμικών απωλειών είναι η **ακτινική και αξονική μετατόπιση (offset)** των οδηγών πτερυγίων σε σχέση με τα πτερύγια του δρομέα. Η



Εικόνα 87 : Η δισδιάστατη απεικόνιση του αεροστρόβιλου με οδηγά πτερύγια μεταβλητής γωνίας, σε δύο γωνιακές θέσεις

πρόταση αυτή εφαρμόστηκε στην διάταξη HydroAir στο λιμάνι Kembla της Αυστραλίας το 2010. (βλ. §4.6.4).

Ακόμη στο λιμάνι Vizhinjam της Ινδίας εγκαταστάθηκε μια μονάδα ΠΣΥ η οποία είχε αεροστρόβιλο δράσεως με **δύο αξονικούς στροβίλους μιας κατεύθυνσης** και χωρίς βαλβίδες αντεπιστροφής (βλ. §4.5.1). Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τον κλασικό αυτορυθμιζόμενο στρόβιλο δράσεως, αλλά απαιτούνταν πρόσθετοι αγωγοί και δεύτερος δρομέας, πράγμα που έκανε περίπλοκη την κατασκευή. Τέλος μελετήθηκε μια ακτινική παραλλαγή του στροβίλου δράσεως με **οδηγά πτερύγια σε κάθε ακτινική πλευρά του δρομέα**, αλλά όπως και στην περίπτωση του αξονικού στροβίλου, σημειώθηκαν μεγάλες απώλειες πίεσης στα οδηγά πτερύγια της εξόδου.

Μια ακόμη εναλλακτική λύση που προτάθηκε από τον Setoguchi ήταν ο **αξονικός στρόβιλος δράσεως με οδηγά πτερύγια** που διαθέτουν

αυτο-έλεγχο βήματος. Οι πειραματικές δοκιμές επιβεβαίωσαν την καλύτερη επίδοση του έναντι του κλασικού στροβίλου Wells, όμως τα κινητά οδηγά πτερύγια με τα οποία ήταν εξοπλισμένος απαιτούσαν περισσότερη συντήρηση. [107] Για τον λόγο αυτό **μελετήθηκε ο αξονικός στρόβιλος δράσεως με σταθερά οδηγά πτερύγια**, ο οποίος πάλι σε σύγκριση με τον στρόβιλο Wells έχει καλύτερη απόδοση και συμπεριφορά, τόσο κατά την εκκίνηση, όσο και κατά την λειτουργία υπό ακανόνιστες συνθήκες.

Γενικότερα το βασικό μειονέκτημα των αυτορυθμιζόμενων στροβίλων είναι η πολύπλοκη γεωμετρία τους, πράγμα που σημαίνει πως κατά τον σχεδιασμό τους πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη λύση ώστε να επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση του συστήματος η οποία δεν εξαρτάται μόνο από την απόδοση του στροβίλου αλλά και από την απόδοση του θαλάμου συλλογής. Αυτό σημαίνει ότι ο στρόβιλος πρέπει να παρέχει την βέλτιστη "**απόσβεση**" του **πεπιεσμένου αέρα** (δηλαδή διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του στροβίλου), ώστε να μεγιστοποιείται η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.

5.7 Σύγκριση των αυτορυθμιζόμενων αεροστροβίλων Wells & Impulse

Η ανάλυση δύο διαστάσεων που παρουσιάστηκε στο §5.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση διαφόρων παραμέτρων των δύο αυτορυθμιζόμενων στροβίλων Wells & Impulse που περιγράψαμε στα §5.5 και §5.6 αντίστοιχα. Μερικές από αυτές είναι: Η περιστροφική ταχύτητα, η αεροδυναμική απόδοση και η διάμετρος του ρότορα. Η σύγκριση που θα ακολουθήσει αφορά τις απλές περιπτώσεις αυτών των δύο στροβίλων· δηλαδή την περίπτωση του μονοβάθμιου αεροστρόβιλου Wells (με ή χωρίς οδηγά πτερύγια) και του μονοβάθμιου αεροστρόβιλου Impulse με σταθερά οδηγά πτερύγια. Αρχικά ορίζουμε τον **συντελεστή φορτίου της τουρμπίνας** (*turbine loading coefficient*):

$$E^* = E/\Omega^2 r^2 \quad (5.80)$$

Ο οποίος αποτελεί το πηλίκο του έργου ανά μονάδα μάζας, προς την περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα (κινητού στροβίλου).

- Για έναν μονοβάθμιο στρόβιλο Wells η (5.80) δίνει (βλ. σχέση 5.35):

$$E_w^* = 2 \frac{V_x}{\Omega r} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) \quad (5.81)$$

$$\text{Γνωρίζουμε βάση της εικόνας 76 (βλ. §5.5), πως: } \varphi = V_x/U = \tan \beta_1 \quad (5.82)$$

Σε πραγματικές συνθήκες ροής είναι γνωστό πως υπάρχουν απώλειες ενέργειας λόγω της **υδροδυναμικής απώλειας στήριξης**²⁵ πάνω στα πτερύγια, εάν η γωνία πρόσπτωσης της σχετικής ροής του αέρα ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή την οποία ονομάζουμε β_{1cr} και εξαρτάται από το προφίλ των πτερυγίων, τον λόγο c/t , τις συνθήκες ροής και τον αριθμό Reynolds.²⁶ Εάν θεωρήσουμε τις χαρακτηριστικές τιμές: $\beta_{1cr} = 11^\circ$, $c/t = 0,5$ τότε η (5.81) με την βοήθεια της (5.82) μας δίνει:

$$E_w^* = 2 \frac{V_x}{\Omega r} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2 \frac{V_x}{U} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2\varphi \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2 \tan \beta_{1cr} \tan\left(\frac{\pi c}{2t}\right) = 2 \tan(11^\circ) \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot 0,5\right)$$

$$E_w^* = 0,389$$

²⁵ διαχωρισμός οριακού στρώματος – boundary layer separation, από την «ράχη» της αεροτομής.

²⁶ Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι η αδιάστατος λόγος των δυνάμεων αδράνειας, προς τις δυνάμεις ιξώδους. Χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την σχετική σημασία αυτών των δύο δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής. Η **στρωτή** ροή (μικρές ταχύτητες του ρευστού) λαμβάνει χώρα σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds διότι σε αυτήν την περίπτωση κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι ιξώδεις δυνάμεις, ενώ η **τυρβώδης** ροή (μεγάλες ταχύτητες του ρευστού) λαμβάνει χώρα σε υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds διότι σε αυτήν την περίπτωση κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι αδρανειακές δυνάμεις.

- Για έναν μονοβάθμιο στρόβιλο Impulse ισχύουν τα εξής:

Θεωρούμε ότι ισχύει η συνθήκη «σχεδιασμού»: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_1$ και $\beta_1 = \pi - \beta_2$, τότε οι σχέσεις (5.22) και (5.80) μας δίνουν:

$$E_{imp}^* = \frac{V_x}{\Omega \cdot r} (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \xrightarrow{(5.29)} E_{imp}^* = \varphi (\cot \beta_2 - \cot \beta_1) \Rightarrow E_{imp}^* = \varphi [\cot \beta_2 - \cot(\pi - \beta_2)]$$

$$E_{imp}^* = \varphi (\cot \beta_2 + \cot \beta_2) \Rightarrow E_{imp}^* = 2\varphi \cot \beta_2 \Rightarrow E_{imp}^* = 2\varphi \cot \beta_1 \quad (5.83)$$

Εάν θεωρήσουμε τις χαρακτηριστικές τιμές: $\beta_1 = 40^\circ$, $\varphi = 0,85$ τότε η (5.83) μας δίνει:
 $E_{imp}^* = 2.03$

- Διαιρώντας κατά μέλη τις (5.81) και (5.83) λαμβάνουμε:

$$\frac{E_{imp}^*}{E_w^*} = \frac{2\varphi \cot \beta_1}{2(V_x)_w / (\Omega r)_w \tan(\pi c/2t)} = \frac{2(V_x)_{imp} / (\Omega r)_{imp} \cot \beta_1}{2(V_x)_w / (\Omega r)_w \tan(\pi c/2t)} = \frac{2.03}{0.389} \quad (5.84)$$

Θεωρώντας πως το έργο ανά μονάδα μάζας που απορροφάται και στους δύο στρόβιλους είναι το ίδιο (και ίσο με E) και κάνοντας χρήση της (5.80), μετασχηματίζουμε την (5.84) ως εξής:

$$\frac{E / (\Omega r_{imp})^2}{E / (\Omega r_w)^2} = \frac{(\Omega r_w)^2}{(\Omega r_{imp})^2} = \frac{2.03}{0.389} \quad (5.85)$$

$$\frac{(\Omega r_w)}{(\Omega r_{imp})} = \sqrt{\frac{2.03}{0.389}} = 2,2844 \Rightarrow (\Omega r_w) = 2,2844 \cdot (\Omega r_{imp}) \quad (5.86)$$

Τώρα μπορούμε να συγκρίνουμε τους δύο τύπους στρόβιλομηχανών σε ότι αφορά και άλλες παραμέτρους, όπως είναι το τετράγωνο της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας της ροής: V_x^2 (ποσότητα η οποία σχετίζεται με την κινητική ενέργεια εξόδου ανά μονάδα μάζας), η διάμετρος των στρόβιλων: D και η γωνιακή τους ταχύτητα: Ω .

Εάν λοιπόν λάβουμε και πάλι υπόψιν μας τις χαρακτηριστικές τιμές: $\beta_1 = 40^\circ$, $c/t = 0,5$, $\varphi = \tan \beta_{1cr} = \tan 11^\circ$, $\varphi = 0,85$, θεωρήσουμε το έργο ανά μονάδα μάζας ίσο για τους δύο στρόβιλους και αντικαταστήσουμε τα δεδομένα μας στην (5.84), θα την μετασχηματίσουμε ως εξής:

$$\frac{E_w^*}{E_{imp}^*} = \frac{(V_x)_w / (\Omega r)_w \tan(\pi/4)}{(V_x)_{imp} / (\Omega r)_{imp} \cot 40^\circ} = \frac{0.389}{2.03} \quad (5.87)$$

$$\frac{E/(\Omega r_W)^2}{E/(\Omega r_{imp})^2} = \frac{(\Omega r_{imp})^2}{(\Omega r_W)^2} = \frac{(V_x)_W/(\Omega r)_W \tan(\pi/4)}{(V_x)_{imp}/(\Omega r)_{imp} \cot 40^\circ} \Rightarrow \frac{(\Omega r_{imp})^2}{(\Omega r_W)^2} = \frac{(V_x)_W (\Omega r)_{imp} \tan(\pi/4)}{(V_x)_{imp} (\Omega r)_W \cot 40^\circ}$$

$$\frac{(\Omega r_{imp})}{(\Omega r_W)} = \frac{(V_x)_W \tan(\pi/4)}{(V_x)_{imp} \cot 40^\circ} \Rightarrow \frac{(V_x)_W}{(V_x)_{imp}} = \frac{(\Omega r_{imp})}{(\Omega r_W)} \cdot \frac{\cot 40^\circ}{\tan(\pi/4)} \Rightarrow \frac{(V_x)_W^2}{(V_x)_{imp}^2} = \frac{(\Omega r_{imp})^2}{(\Omega r_W)^2} \cdot \frac{\cot^2 40^\circ}{\tan^2(\pi/4)}$$

Με την βοήθεια της (5.85) η τελευταία σχέση γίνεται:

$$\frac{(V_x)_W^2}{(V_x)_{imp}^2} = \frac{0,389}{2,03} \cdot \frac{\cot^2 40^\circ}{\tan^2(\pi/4)} = 0,273 \Rightarrow (V_x)_W^2 = 0,273 (V_x)_{imp}^2 \quad (5.88)$$

Με ανάλογο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε και τους λόγους: D_W/D_{imp} και Ω_W/Ω_{imp} .

Πίνακας 15 : Λόγοι παραμέτρων μεταξύ των στροβίλων Wells και impulse

$(\Omega r_W)/(\Omega r_{imp})$	$(V_x)_W^2/(V_x)_{imp}^2$	Ω_W/Ω_{imp}	D_W/D_{imp}
2,28	0,273	1,38	1,65

Παρατηρώντας τον πίνακα 15 συμπεραίνουμε αρχικά πως η περιφερειακή ταχύτητα Ωr του στροβίλου Wells είναι υπερδιπλάσια από αυτήν του στροβίλου impulse. Επίσης ο στροβίλος Wells έχει μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα Ω και διάμετρο D . Αυτά τα αποτελέσματα μας πληροφορούν πως η ακουστική όχληση κατά την λειτουργία του στροβίλου Wells, λόγω των έντονων αεροδυναμικών φαινομένων, αναμένεται να είναι πολύ ισχυρότερη από αυτήν του στροβίλου impulse. Ο στροβίλος Wells όμως έχει την δυνατότητα να απορροφά και να αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου και της μεγαλύτερης φτερωτής του (Αυτό είναι σημαντικό για την εξομάλυνση των μεταβολών της ισχύος του ηλεκτρικού συστήματος κατά την απορρόφηση της από τους κυματισμούς).

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, κατά την διάρκεια λειτουργίας των στροβίλων αναπτύσσονται στροβιλισμοί του αέρα κατά την έξοδο του από την τουρμπίνα, στους οποίους οφείλεται ένα σημαντικό ποσό απώλειας απορροφούμενης ενέργειας. Ωστόσο αυτό είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να περιοριστεί ή και να αποφευχθεί με την χρήση οδηγών πτερυγίων ή με την χρήση (στην περίπτωση του αεροστροβίλου Wells) δύο αντίθετης φοράς περιστρεφόμενων πτερυγίων.

Η απώλεια της κινητικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας αέρα (που σχετίζεται με την αξονική ταχύτητα ροής V_x^2) δεν μπορεί να αποφευχθεί, εκτός κι αν ένας αξονοσυμμετρικός αποκλίνων αγωγός (divergent duct) χρησιμοποιηθεί ως διαχυτήρας. Αυτή η απώλεια είναι μεγαλύτερη στον στροβίλο impulse από ό,τι στον στροβίλο Wells, όπως φαίνεται και στον πίνακα 15. Εάν μάλιστα κάνουμε χρήση όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών τιμών θα

δούμε πως ισχύουν: $(V_x)_w^2/2E=0,049$ και $(V_x)_{imp}^2/2E=0,178$. Αυτό εξηγεί και το γιατί η χρήση ενός αξονοσυμμετρικού διαχυτήρα είναι πολύ πιο σημαντική στην περίπτωση του στροβίλου *impulse* σε σχέση με τον στρόβιλο *Wells*.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να δούμε πως σε ένα πραγματικό ρευστό επιδρούν οι δυνάμεις ιξώδους στην αεροδυναμική απόδοση του στροβίλου στην περίπτωση και των δύο τύπων τουρμπίνας. Θα κάνουμε χρήση της σχέσης (5.21) που αποδείξαμε στο §5.4 και θα συγκρίνουμε την τιμή του έργου ανά μονάδα μάζας για την περίπτωση ροής ιδανικού - E - χωρίς ιξώδες και ενός πραγματικού - E - ρευστού, θεωρώντας πως οι τιμές για τα μεγέθη: $\beta_1, c/t, \Omega r, V_x$ είναι οι ίδιες και στις δύο περιπτώσεις.²⁷ Παίρνοντας τον λόγο E/E , βρίσκουμε:

$$\mu = \frac{E}{E} = \frac{C_L \sin(\beta_m - \gamma)}{C_L \sin \beta_m \cos \gamma} \quad (5.89)$$

Υπενθυμίζουμε πως ισχύουν: $\gamma = \arctan(c_D/c_L)$ και $\gamma = 0$ (για αστρόβιλη ροή). Προφανώς επειδή σε συνθήκες πραγματικής ροής οι απώλειες σε απορρόφηση έργου θα είναι μεγαλύτερες, σε μια πρώτη εκτίμηση θα ισχύει: $E > E$, δηλαδή $\mu = E/E < 1$.

- Ο συντελεστής αναλογίας μ επηρεάζεται και από τον λόγο $C_L/C_L < 1$, διότι τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε συνθήκες ροής πραγματικού ρευστού μειώνουν τον συντελεστή της δύναμης άνωσης.
- Επιπλέον η σχέση (5.89) δείχνει ότι ο συντελεστής αναλογίας μ μειώνεται καθώς αυξάνεται η ποσότητα γ . Αυτό το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όσο μικρότερη είναι η γωνία β_m .

Η χαρακτηριστική τιμή του β_m για την περίπτωση του αεροστροβίλου *Wells* είναι περίπου: $10^\circ - 14^\circ$, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τον αεροστρόβιλο *impulse* είναι περίπου 90° , δηλαδή πολύ μεγαλύτερη. Είναι ευρέως γνωστό ότι για σταθερή γωνία πρόσπτωσης β_1 και σταθερό συντελεστή παροχής $\varphi = V_x/U$, η αναλογία c_D/c_L και κατ'επέκταση η ποσότητα γ , αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds. Άρα η απόδοση του στροβίλου *Wells* μεταβάλλεται σημαντικά καθώς αλλάζει ο αριθμός Reynolds, πράγμα που δεν συμβαίνει τόσο σχετικά με την απόδοση του στροβίλου *impulse*. Συγκεκριμένα το απορροφούμενο έργο από τον στρόβιλο μηδενίζεται $E = 0$, εάν ισχύει η ισότητα $\gamma = \beta_m$, καθώς από την

²⁷ Παρά το γεγονός πως η γωνία πρόσπτωσης της ροής β_1 , είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, εντούτοις η γωνιακή εκτροπή $\beta_1 - \beta_2$ που θα δεχθεί η σχετική ταχύτητα ροής W καθώς θα περνάει δια του στροβίλου, δηλαδή οι γωνίες β_m και β_2 θα μεταβληθούν στην περίπτωση της πραγματικής ροής. Ωστόσο για να διευκολύνουμε την κατάσταση θα θεωρήσουμε πως θα παραμείνουν σταθερές και αυτές.

σχέση (5.89) προκύπτει ότι: $\sin(\beta_m - \gamma) = 0$. Οπότε, λόγω της επίδρασης των μεταβολών του αριθμού Reynolds, ο στρόβιλος Wells έχει πολύ χαμηλές αποδόσεις σε χαμηλές ταχύτητες ροής ή σε πειραματικές δοκιμές με μοντέλα στροβίλων μικρής κλίμακας.

Η απόδοση του αυτορυθμιζόμενου στροβίλου impulse με σταθερά οδηγία πτερύγια είναι πεπερασμένη, λόγω του ότι η ροή του αέρα δεν μπορεί να προσπίπτει κατά την βέλτιστη δυνατή γωνία πάνω στη δεύτερη σειρά οδηγών πτερυγίων, όπως αναφέρθηκε στο §5.6.²⁸ Από την άλλη όμως οι καμπύλες αποδοτικότητας του στροβίλου impulse είναι πιο ομαλές και δεν παρουσιάζουν απότομη πτώση, όπως συμβαίνει με τον αεροστρόβιλο Wells. Στην περίπτωση του στροβίλου Wells οι μέγιστες αποδόσεις παρουσιάζονται για πολύ μικρότερες τιμές του συντελεστή παροχής $\phi = V_x/U$ συγκριτικά με τον αεροστρόβιλο impulse.²⁹ Για μεγαλύτερες τιμές η καμπύλη της απόδοσης παρουσιάζει μια απότομη πτώση η οποία συμβαίνει όταν η γωνία πρόσπτωσης τις πτέρυγες ξεπερνά την οριακή τιμή β_{1cr} μετά την οποία ξεκινά να παρουσιάζεται το φαινόμενο της απώλειας στήριξης (stall-free limit).

Εδώ είναι καλό να αναφέρουμε τον αδιάστατο συντελεστή παροχής Φ^* ως το πηλίκο της μέσης αξονικής συνιστώσας της παροχής Q , προς την περιφερειακή ταχύτητα της πτέρυγας του στροβίλου. Για μια ροή τριών διαστάσεων ισχύουν:

$$\Phi^* = \frac{8Q}{\pi(1-h^2)\Omega D^3} = \frac{8\Phi}{\pi(1-h^2)} \quad (5.90)$$

Όπου D η διάμετρος του ρότορα, Ω η γωνιακή του ταχύτητα και h είναι η αναλογία της εσωτερικής προς την εξωτερική ακτίνα του στροβίλου (hub-to-tip ratio). Στην περίπτωση της τρισδιάστατης ροής ισχύουν:

- Συντελεστής παροχής: $\Phi = Q/\Omega D^3$ (5.91)

- Συντελεστής πτώσης πίεσης: $\Psi = P/\rho\Omega^2 D^2$ (5.92)

- Συντελεστής ισχύος: $\Pi = P_t/\rho\Omega^3 D^5$ (5.93)

- Ισχύς εξόδου της Τουρμπίνας: $P_t = \Omega T$ (5.94)

- Απόδοση: $\eta = \eta(\Phi) = \Pi/\Psi\Phi$ (5.95)

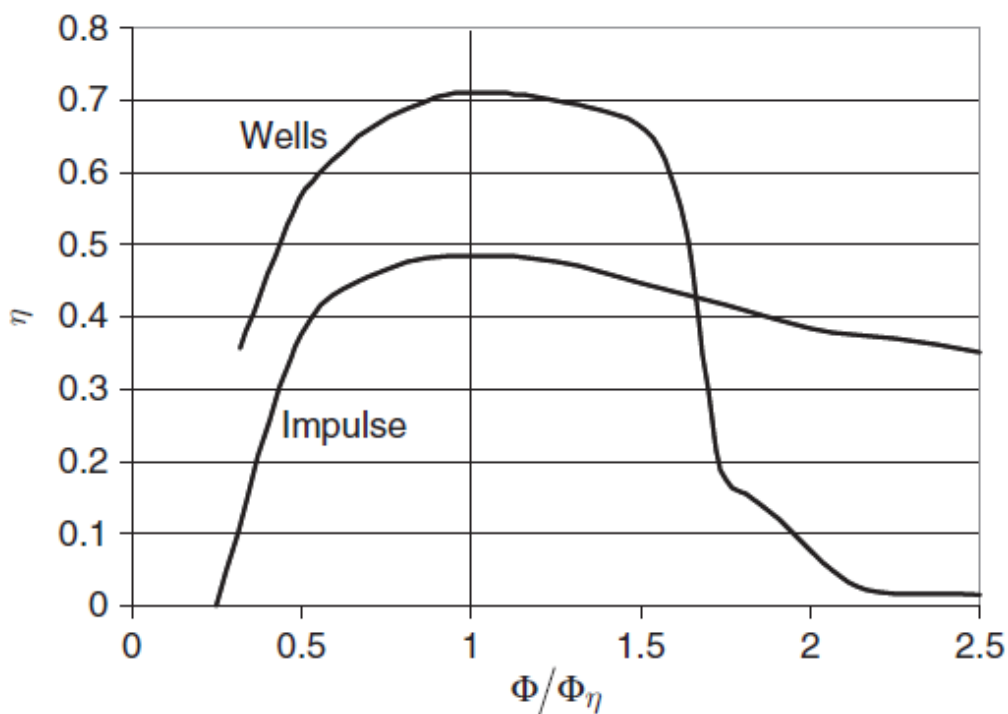
Με βάση τα όσα ειπώθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αντιλαμβανόμαστε πως μια «δίκαιη» σύγκριση ανάμεσα στους δύο στροβίλους Wells και impulse θα έπρεπε να βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με μεγάλης κλίμακας μοντέλα

²⁸ Οι υψηλότερες αποδόσεις οι οποίες καταμετρούνται στις πειραματικές δοκιμές δεν ξεπερνούν την απόδοση $\eta = 0,5$, ενώ για τον στρόβιλο Wells οι μέγιστες αποδόσεις φτάνουν στο $\eta = 0,7$.

²⁹ Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα που βγάλαμε στον πίνακα 15 όπου είδαμε ότι για απορρόφηση της ίδιας ποσότητας έργου ανά μονάδα μάζας, απαιτείται ρότορας μεγαλύτερης διαμέτρου και περιστρεφόμενος με υψηλότερη ταχύτητα για την περίπτωση του στροβίλου Wells.

(διάμετρος ρότορα τουλάχιστον 0,6 m).³⁰ Παράλληλα θα έπρεπε το διάγραμμα σύγκρισης να είναι της μορφής: $\eta = \eta(\Phi/\Phi_\eta)$ – όπου Φ_η είναι η τιμή του συντελεστή παροχής Φ για συνθήκες μέγιστης απόδοσης – και όχι της μορφής: $\eta = \eta(\Phi)$.

Το διάγραμμα 13 παρουσιάζει μια γραφική παράσταση της απόδοσης η , έναντι του λόγου Φ/Φ_η , ενός μονοβάθμιου στροβίλου Wells με οδηγιά πτερύγια (με πειραματικά δεδομένα από το [108]), καθώς και ενός στροβίλου impulse με σταθερά οδηγιά πτερύγια (με πειραματικά δεδομένα από το [109]), με σκοπό την σύγκριση της αποδοτικότητας αυτών των δύο. Οι δοκιμές στους δύο στροβίλους πραγματοποιήθηκαν σε παρόμοια κλίμακα με μοντέλα διαμέτρου $D \cong 0,6$ m. Στην περίπτωση του στροβίλου Wells, ισχύουν: $h = 0,68$, $\sigma = 0,64$ ³¹, $\Phi_\eta = 0,024$ και $\Phi_\eta^* = 0,11$, ενώ στην περίπτωση του στροβίλου impulse ισχύουν: $h = 0,6$, $\Phi_\eta = 0,25$, $\Phi_\eta^* = 1,0$. Οι καμπύλες του διαγράμματος δείχνουν ότι η μέγιστη απόδοση είναι σημαντικά μεγαλύτερη για τον στροβίλο Wells για τον οποίο ισχύει $\eta_{\max} = 0,71$ (σε σύγκριση με $\eta_{\max} = 0,48$ του στροβίλου impulse). Από την άλλη πλευρά, ο στροβίλος impulse δεν χαρακτηρίζεται από την απότομη πτώση της απόδοσης του σε μεγαλύτερους συντελεστές παροχής (η επίδραση των αεροδυναμικών απωλειών λόγω απώλειας στήριξης με την αύξηση του συντελεστή παροχής είναι πολύ πιο βαθμιαία).



Διάγραμμα 13: Οι καμπύλες απόδοσης των στροβίλων Wells και impulse [77]

³⁰ Οπότε αρκετές πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί κατά καιρούς και δείχνουν υψηλότερη μέγιστη απόδοση για τον αεροστροβίλο impulse σε σχέση με τον Wells, βασίζονται σε μοντέλα διαμέτρου ρότορα 0,3 m (ή και μικρότερης), καθώς και σε ροές με σχετικά μικρό αριθμό Reynolds.

³¹ Όπου σ είναι η στερεότητα του ρότορα, δηλαδή η επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια του προς την συνολική επιφάνεια του στροβίλου.

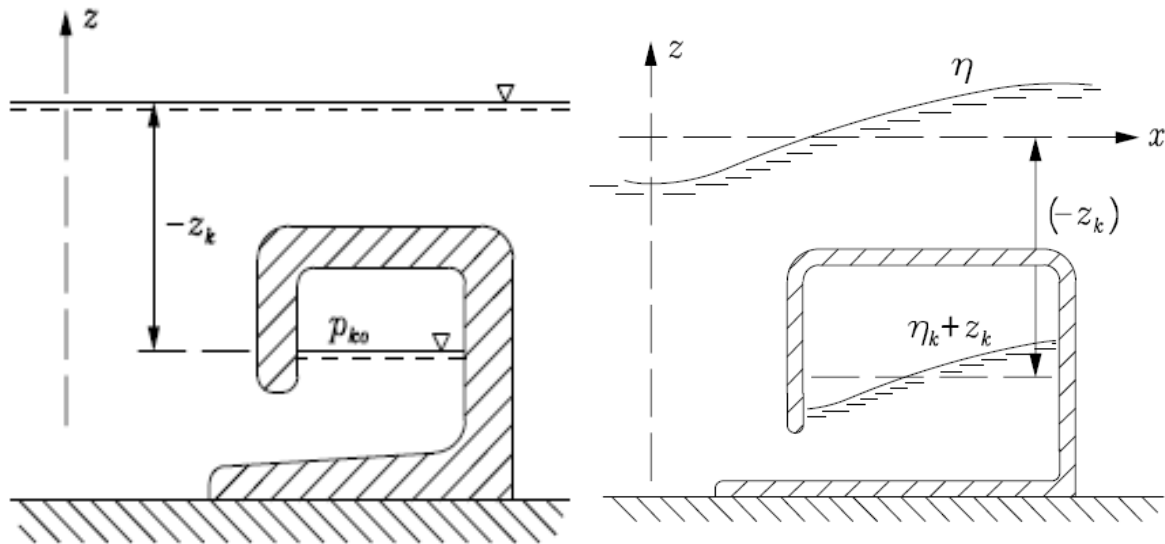
6. Η φυσική περιγραφή και μαθηματική μοντελοποίηση της Π.Σ.Υ

Ο υπολογισμός της συχνότητας συντονισμού μιας συσκευής Π.Σ.Υ μπορεί να πραγματοποιηθεί αρχικά με απλοποιημένα μαθηματικά και τύπους που περιλαμβάνουν το γεωμετρικό μέγεθος του ανοίγματος του θαλάμου εισαγωγής, τις δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται από τον προσπίπτοντα κυματισμό, την απόσβεση της ταλάντωσης του συστήματος, καθώς και την «ακαμψία» (stiffness) του. Όλα αυτά τα χρόνια έχουν μοντελοποιηθεί αρκετές τεχνολογίες Π.Σ.Υ αλλά οι περισσότεροι από τους διαθέσιμους μαθηματικούς τύπους που προέκυψαν αφορούσαν την εκάστωτε ευρεσιτεχνία και δεν ήταν γενικευμένοι. Αυτό ισχύει ειδικά για τις συσκευές που είναι ενσωματωμένες σε κυματοθραύστες λιμένων. Άλλοι μαθηματικοί τύποι είναι γενικότεροι και αφορούν κυρίως τις Π.Σ.Υ με ημιβυθισμένο το θάλαμο εισαγωγής σωληνοειδούς μορφής.

Μέχρι στιγμής έχουν ερευνηθεί πολλές και διαφορετικές τεχνολογίες Π.Σ.Υ, είτε με υδραυλικό σύστημα μεταφοράς της κίνησης και μετατροπής της ισχύος σε ηλεκτρική (*hydraulic power takeoff*), είτε με τον πιο κοινότυπο τρόπο που είναι το σύστημα μετατροπής ισχύος μέσω της ισχύος πνοής αέρα (*pneumatic power takeoff*) με χρήση στροβιλομηχανών (βλ. κεφ. 5). Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την φυσική περιγραφή και την μαθηματική μοντελοποίηση της δεύτερης περίπτωσης Π.Σ.Υ που ονομάζεται και «Π.Σ.Υ περιοδικής πίεσης επιφανείας» (*Periodic surface pressure*) ή «Π.Σ.Υ Διανομής πίεσης παλλόμενης επιφάνειας» (*oscillating surface-pressure distribution*). [32] Σκοπός είναι το να μελετήσουμε τα φορτία (ή καλύτερα τις πιέσεις) που αυτή δέχεται και να υπολογίσουμε την ενέργεια (ή καλύτερα την ισχύ) που απορροφά από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Στην προσπάθεια μας αυτήν θα χρησιμοποιήσουμε πολλά από τα δεδομένα και τις σχέσεις που εξάγαμε στο κεφάλαιο 2 – §2.3, στο οποίο αντιμετωπίσαμε το 1^ο-τάξιο πρόβλημα των γραμμικών αρμονικών κυματισμών (κυματισμοί Airy) με την βοήθεια του μιγαδικού φορμαλισμού. Οι εξισώσεις που προέκυψαν ήταν οι (2.74) έως (2.83).

Στην εικόνα 89 παρουσιάζεται ένα σύστημα Π.Σ.Υ το οποίο σε συνθήκες ηρεμίας έχει στήλη αέρα πάνω από την επιφάνεια του νερού εντός της οποίας επικρατεί πίεση P_{k0} , που δεν μπορεί να θεωρηθεί μηδενική όπως η ατμοσφαιρική την οποία θέσαμε μηδέν στο §2.3.10. Επί πλέον με την παρουσία κυματισμού μέσα σε μια υποβρύχια μονάδα Π.Σ.Υ η πίεση του αέρα δεν είναι σταθερή πάνω από την στήλη ύδατος, καθώς υπάρχει και το δυναμικό μέρος της P_k που δίνεται από την σχέση (2.45). Οπότε η συνολική πίεση εντός του θαλάμου μέσα σε βάθος z_k κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, με την βοήθεια της (2.44) γίνεται:

$$\text{Πεδίο πιέσεων εντός του θαλάμου: } P_{tot} = P_{k0} + P_k = -\rho g z_k - i\omega\rho\Phi \quad (6.1)$$



Εικόνα 88: Υποβρύχιος θάλαμος που περιέχει παγιδευμένο αέρα πίεσης P_{k0} σε ηρεμία (αριστερά) και υπό την επίδραση κυματισμού (αριστερά) [32]

Αντίστοιχα μετασχηματίζονται και άλλες σχέσεις από τις παραπάνω. Η δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός του θαλάμου γίνεται:

$$\mathbf{\Delta.Σ.Ε.Ε.Θ} \text{ (2.40): } \quad i\omega\Phi + g\eta + \frac{P_k}{\rho} = 0 \quad , \quad z = z_k \quad (6.2)$$

Η κινηματική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός του θαλάμου γίνεται:

$$\mathbf{Κ.Ε.Ε.Ε.Θ} \text{ (2.41): } \quad \frac{\partial \eta_k}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad , \quad z = z_k \quad (6.3)$$

Η ενοποιημένη οριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός του θαλάμου γίνεται:

$$\mathbf{Ο.Σ.Ε.Ε.Θ} \text{ (2.42): } \quad \left(-\omega^2 \Phi + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP_k}{dt} \quad , \quad z = z_k \quad (6.4)$$

$\eta_k = \eta_k(x;t)$ είναι η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός του θαλάμου και προκύπτει ότι δίνεται από την σχέση:

$$\eta_k = -\frac{i\omega}{g} \Phi - \frac{1}{\rho g} \cdot P_k \quad , \quad z = z_k \quad (6.5)$$

Επί πλέον ισχύουν οι σχέσεις που μας δίνουν τις δύο βασικές διαφορικές εξισώσεις του κυματικού προβλήματος, καθώς και το πεδίο ταχυτήτων των κυματισμών, τις οποίες συναντήσαμε στην §2.3:

$$\mathbf{Bernoulli:} \quad i\omega\Phi + gz + \frac{P}{\rho} = 0 \quad (2.37)$$

Laplace: $\nabla^2 \Phi = 0$ (2.38)

Πεδίο ταχυτήτων: $\vec{u} = \vec{\nabla} \Phi$ (2.43)

Καθώς έχουμε πλέον να αντιμετωπίσουμε ένα φυσικό πρόβλημα που δεν αφορά μόνο τους θαλάσσιους κυματισμούς οι οποίοι έρχονται σε επαφή με τον πυθμένα και τον ατμοσφαιρικό αέρα (δια της ελεύθερης επιφάνειας), αλλά αφορά επίσης και την επαφή των κυματισμών με την Π.Σ.Υ (ή γενικότερα πλωτά στερεά σώματα), οφείλουμε να εισάγουμε μια επί πλέον οριακή συνθήκη που ισχύει πάνω στην επιφάνεια της. Εάν λοιπόν γενικώς ένα πλωτό σώμα κινείται με ταχύτητα \vec{U} μέσα στο πεδίο ροής, τότε πρέπει να θεωρήσουμε πως το ρευστό δεν διαπερνάει την επιφάνεια του, όπως ακριβώς υποθέσαμε και ότι συμβαίνει στον πυθμένα στην §2.3.1.

Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του σώματος, σε σχέση με την επιφάνεια του είναι: $U_n = \vec{n} \cdot \vec{U}$

Η κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου ροής του ρευστού πάνω στην επιφάνεια του σώματος είναι: $u_{n \perp} = \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{n} = \partial \Phi / \partial n$

Εφόσον το νερό δεν διαπερνάει την επιφάνεια του σώματος, θα πρέπει να ισχύει η *Οριακή συνθήκη επιφάνειας σώματος*:

Ο.Σ.Ε.Σ: $u_{n \perp} = U_n \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_s = U_n}$ ή $\boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_s = U_n}$ (6.6)

Εάν το σώμα δεν κινείται με κάποια ταχύτητα, όπως συμβαίνει με τον πακτωμένο θάλαμο Π.Σ.Υ της εικόνας 89, τότε η παραπάνω οριακή συνθήκη απλοποιείται:

Ο.Σ.Ε.Σ: $\boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0}$ ή $\boxed{\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0}$ (6.6β)

Η σχέση (6.6β) είναι πανομοιότυπη με την οριακή συνθήκη πυθμένα που είδαμε στο κεφάλαιο 2, εάν το ακίνητο σώμα είναι ο επίπεδος πυθμένας. Τότε αυτή η σχέση γίνεται η (2.11) της §2.3.1.

6.1 Δυνάμεις αλληλεπίδρασης Πλωτών σωμάτων και κυματισμών

Κατά την αλληλεπίδραση ενός οποιουδήποτε πλωτού σώματος (και της Π.Σ.Υ) μέσα στην θάλασσα ασκούνται *τρία είδη δυνάμεων*, τα οποία δημιουργούνται αντίστοιχα από *τρία είδη δυναμικών* του συνολικού πεδίου ροής που δημιουργείται γύρω από το σύστημα *θαλάσσιοι κυματισμοί – πλωτό σώμα*:

- **Δυνάμεις Froude-Kryloff:** Πρόκειται για τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα από τους προσπίπτοντες κυματισμούς με την παραδοχή ότι το σώμα δεν παραμορφώνει καθόλου το πεδίο ροής με την παρουσία του. Ο υπολογισμός αυτών των δυνάμεων προκύπτει με την βοήθεια του δυναμικού των θαλάσσιων κυματισμών έτσι όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 και στην §2.3. Το δυναμικό αυτό πλέον θα συμβολίζεται ως: Φ_0
- **Δυνάμεις Diffraction (Περίθλασης):** Πρόκειται για τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα λόγω του επί πλέον δυναμικού που δημιουργείται λόγω της παραμόρφωσης ή περίθλασης του πεδίου ροής λόγω της παρουσίας του σώματος. Πρόκειται δηλαδή για τις δυνάμεις που παραλείψαμε να λάβουμε υπόψιν παραπάνω. Ωστόσο και εδώ γίνεται μια παραδοχή και αυτή είναι πως το σώμα κατά την πρόσπτωση των κυματισμών δεν κινείται. Το δυναμικό αυτό θα συμβολίζεται ως: Φ_d

Οι δυνάμεις Froude-Kryloff και Diffraction συνήθως εξετάζονται μαζί και οι ενιαίες συνιστάμενες δυνάμεις που παράγουν ονομάζονται **Δυνάμεις Excitation (Διέγερσης)**. Το δυναμικό που παράγει τις δυνάμεις αυτές είναι το άθροισμα: $\Phi_0 + \Phi_d$

- **Δυνάμεις Radiation (ακτινοβολίας):** Εάν άρουμε και την τελευταία παραδοχή που κάναμε παραπάνω και θεωρήσουμε πως το σώμα πάλλεται ή γενικώς κινείται με την παρουσία των προσπιπτόντων κυματισμών (πράγμα που συμβαίνει και στην πραγματικότητα), τότε αρχίζει να παράγει επί πλέον κυματισμούς και κατ επέκταση ένα νέο δυναμικό ροής το οποίο με την σειρά του επάγει δυνάμεις πάνω στο σώμα. Το δυναμικό αυτό ονομάζεται δυναμικό ακτινοβολίας και θα συμβολίζεται ως: Φ_r

Από εδώ και πέρα λοιπόν δεν θα αναφερόμαστε στο δυναμικό του πεδίου ροής Φ του ρευστού, αλλά στην συνισταμένη των δυναμικών:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_d + \Phi_r \quad \text{ή} \quad \Phi = \Phi_0 + \Phi_d + \Phi_r \quad (6.7)$$

Για να υπολογίσουμε τους μαθηματικούς τύπους των δυνάμεων που ασκούνται πάνω σε ένα πλωτό σώμα ή σε μια μονάδα Π.Σ.Υ, θα πρέπει πρώτα να δούμε την κίνηση ενός πλωτού σώματος μέσα στο νερό, το οποίο έχει 6 βαθμούς ελευθερίας (3 κινήσεις περιφοράς και 3 κινήσεις περιστροφικές).

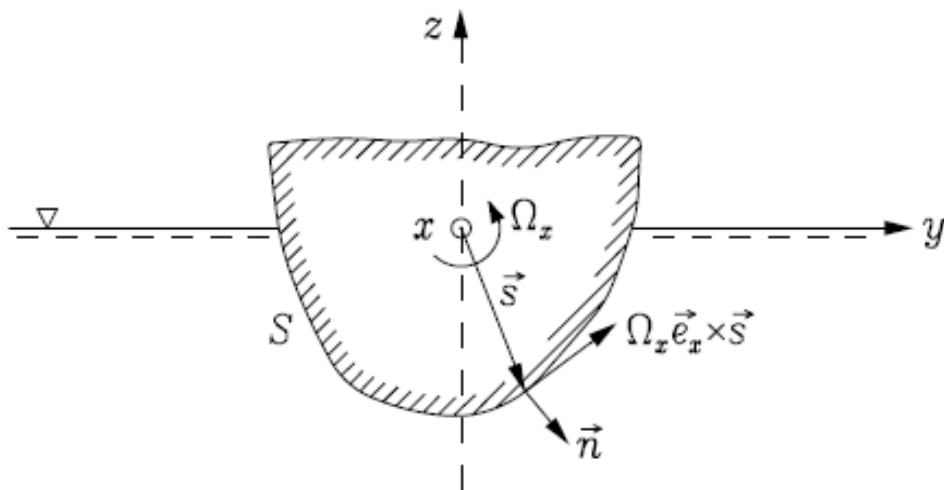
Θα θεωρήσουμε πως ο άξονας z έχει φορά προς τα πάνω, ο y έχει φορά προς τα δεξιά και ο x έχει φορά κάθετη στο επίπεδο του χαρτιού και προς τον αναγνώστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 57. Τότε η συνολική ταχύτητα \vec{u} ενός στοιχειώδους κομματιού dS της βρεχούμενης καρίνας του πλωτού σώματος, το οποίο περιφέρεται και περιστρέφεται είναι:

$$\vec{u} = \vec{U} + \vec{\Omega} \times \vec{s} \quad \text{ή} \quad \vec{u} = \vec{U} + \vec{\Omega} \times \hat{s} \quad (6.8)$$

Όπου: \vec{U} η μεταφορική ταχύτητα του σώματος, $\vec{\Omega}$ η γωνιακή ταχύτητα του σώματος ως προς ένα σημείο αναφοράς (το οποίο είναι συνήθως το κέντρο βάρους του) και \vec{s} η διανυσματική ακτίνα που εκκινεί από το σημείο αναφοράς και έχει πέρας στο dS . Οι ποσότητες \vec{u} , \vec{U} , $\vec{\Omega}$, \hat{s} είναι τα αντίστοιχα μιγαδικά πλάτη.

Παντού λοιπόν πάνω στην επιφάνεια S του πλοίου ισχύει η Ο.Σ.Ε.Σ (6.6):

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{n} &= \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = U_n \\ U_n &= u \end{aligned} \right\} \xrightarrow{(4.7)} u = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \times \hat{s} \cdot \vec{n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \cdot \hat{s} \times \vec{n} \quad (6.9)$$



Εικόνα 89: Η κίνηση ενός παλλόμενου πλωτού σώματος

Το μέτρο της ταχύτητας u του dS έχει έξι συνιστώσες και μπορεί να παρασταθεί ως ένας πίνακας (6X1), ενώ το μοναδιαίο διάνυσμα \vec{n} , η διανυσματική ακτίνα \hat{s} , καθώς και οι ταχύτητες \vec{U} , $\vec{\Omega}$ είναι διανύσματα τριών διαστάσεων τα οποία μπορούν να παρασταθούν με πίνακες (3X1). Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το εξωτερικό γινόμενο $\hat{s} \times \vec{n}$.

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_6 \end{bmatrix} \quad \vec{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad \vec{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \quad \vec{\Omega} = \begin{bmatrix} u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$\hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \hat{s}_x & \hat{s}_y & \hat{s}_z \\ n_x & n_y & n_z \end{vmatrix} = (\hat{s}_y n_z - \hat{s}_z n_y) \vec{i} - (\hat{s}_x n_z - \hat{s}_z n_x) \vec{j} + (\hat{s}_x n_y - \hat{s}_y n_x) \vec{k} \quad (6.11)$$

Όπου:

$$n_4 = \left(\hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} \right)_x = (\hat{s}_y n_z - \hat{s}_z n_y), \quad n_5 = \left(\hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} \right)_y = -(\hat{s}_x n_z - \hat{s}_z n_x), \quad n_6 = \left(\hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} \right)_z = (\hat{s}_x n_y - \hat{s}_y n_x)$$

$$\text{Οπότε: } \hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} = [n_4 \quad n_5 \quad n_6]^T \quad (6.11\beta)$$

Στον πίνακα 16 φαίνονται όλες οι συνιστώσες της κίνησης οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω, καθώς και τα ονόματά τους: **surge** (μεταφορά κατά τον x), **sway** (μεταφορά κατά τον y), **heave** (μεταφορά κατά τον z), **roll** (περιστροφή περί τον x), **pitch** (περιστροφή περί τον y), **yaw** (περιστροφή περί τον z).

Πίνακας 16 : Οι έξι συνιστώσες της κίνησης ενός πλωτού ταλαντευόμενου σώματος

Αριθμός Κίνησης	Συνιστώσα ταχύτητας	Όνομα κίνησης
1	$u_1 = U_x$	Surge
2	$u_2 = U_y$	Sway
3	$u_3 = U_z$	Heave
4	$u_4 = \Omega_x$	Roll
5	$u_5 = \Omega_y$	Pitch
6	$u_6 = \Omega_z$	yaw

Με την βοήθεια των σχέσεων (6.9), (6.10), (6.10β) η (6.8) γίνεται:

$$\underline{u} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \cdot \hat{\underline{s}} \times \hat{\underline{n}} = (u_1 n_1 + u_2 n_2 + u_3 n_3) + (u_4 n_4 + u_5 n_5 + u_6 n_6) = \sum_{j=1}^6 u_j n_j \quad (6.9\beta)$$

Αντίστοιχα η Ο.Σ.Ε.Σ (6.6) πάνω στην καρίνα του σώματος, γίνεται:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \underline{n}} = \sum_{j=1}^6 u_j n_j = \underline{u}^T \underline{n} \quad (6.6\gamma)$$

Κατά την φυσική περιγραφή και την μαθηματική μοντελοποίηση της Π.Σ.Υ αντιμετωπίζουμε δύο μαθηματικά προβλήματα [32] :

- Το **πρόβλημα διάχυσης ή διέγερσης (scattering or excitation problem)**: Ο προσπίπτον κυματισμός πάνω στο σύστημα της Π.Σ.Υ προκαλεί ταλάντωση της στήλης του νερού και κατ'επέκταση της στήλης του αέρα, η οποία πιέζεται και αποσυμπίεζεται καθώς διέρχονται οι κοιλίες και οι κορυφές των κυματισμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την

δημιουργία μιας μεταβαλλόμενης αεροδυναμικής πίεσης P_k σε όλο τον όγκο του αέρα εντός του θαλάμου συλλογής. Η δυναμική πίεση αυτή προκαλείται από την ασκούμενη δύναμη του δυναμικού διέγερσης $\Phi_0 + \Phi_d$.

- Το **πρόβλημα ακτινοβολίας** (*radiation problem*): Η επιβαλλόμενη αεροδυναμική πίεση P_k που δημιουργείται λόγω των προσπιπτόντων κυματισμών, προκαλεί ταλάντωση στην υποβρύχια στήλη του αέρα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα παλλόμενο στερεό σώμα. Αυτή η ταλάντωση έχει ως αποτέλεσμα το να παράγεται ένας ακτινοβολούμενος κυματισμός δυναμικού Φ_r από αυτήν.

6.1.1 Δυνάμεις Διέγερσης (excitation)

Μια συνιστώσα j της ασκούμενης υδροδυναμικής δύναμης πάνω στην στοιχειώδη επιφάνεια dS ενός πλωτού ταλαντευόμενου σώματος είναι: $dF_j = P(-n_j)dS$.

Ολοκληρώνοντας την σχέση αυτή προκύπτει η συνιστώσα j της ασκούμενης **υδροδυναμικής δύναμης** πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια S . Κάνοντας χρήση και της σχέσεως (2.45) που δίνει την υδροδυναμική πίεση, συναρτήσει του δυναμικού, έχουμε:

$$F_j = -\iint_S P n_j dS = i\omega\rho \iint_S \Phi n_j dS \quad j=1,2,3 \quad (6.12)$$

Με εντελώς ανάλογο τρόπο προκύπτει και η συνιστώσα j της ασκούμενης **υδροδυναμικής ροπής** πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια S :

$$M_j = -\iint_S P n_j dS = i\omega\rho \iint_S \Phi n_j dS \quad j=4,5,6 \quad (6.13)$$

Η ισχύς λοιπόν που δέχεται η στοιχειώδης επιφάνεια dS από τον προσπίπτοντα κυματισμό με την βοήθεια των (6.9) και (6.9β) είναι:

$$dP_R = \vec{u} \cdot dF_j = -\left(\vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{\Omega} \cdot \hat{s} \times \vec{n}\right) PdS = -\left(\sum_{j=1}^6 u_j n_j\right) PdS \quad (6.14)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση προκύπτει η **συνολική ισχύς** που δέχεται η επιφάνεια S του πλωτού ταλαντευόμενου σώματος:

$$P_R = -\iint_S \left(\sum_{j=1}^6 u_j n_j\right) PdS = \sum_{j=1}^6 F_j u_j = \vec{F} \cdot \vec{U} + \vec{M} \cdot \vec{\Omega} \quad (6.15)$$

Η **δύναμη διέγερσης** (Froude-Kryloff και περίθλασης) λοιπόν, η οποία μπορεί να συμβολισθεί με την βοήθεια ενός πίνακα (1X6), είναι ένα διάνυσμα-πίνακας με έξι συνιστώσες:

$$\vec{F}_e = \left[F_{e,1} \quad F_{e,2} \quad F_{e,3} \quad F_{e,4} \quad F_{e,5} \quad F_{e,6} \right] = \left(\vec{F}_e \cdot \vec{M}_e \right) \quad (6.16)$$

Οι τρεις πρώτες συνιστώσες της παραπάνω σχέσης που αντιπροσωπεύουν τις δυνάμεις στους τρεις άξονες συντεταγμένων έχουν μονάδες μέτρησης $[F_{e,1,2,3}] = \text{N}$ και οι τρεις τελευταίες που αφορούν τις ροπές περί των τριών αξόνων έχουν αντίστοιχα μονάδες μέτρησης $[F_{e,4,5,6}] = \text{N} \cdot \text{m}$.

Με την βοήθεια της (6.12) μπορούμε κάθε συνιστώσα $F_{e,j}$ της δύναμης διέγερσης (είτε πρόκειται για δύναμη, είτε για ροπή), να την υπολογίσουμε με την βοήθεια της σχέσης:

$$\boxed{F_{e,j} = i\omega\rho \iint_S (\Phi_0 + \Phi_d) n_j dS} \quad j=1,\dots,6 \quad (6.12\beta)$$

6.1.2 Δυνάμεις Ακτινοβολίας (Radiation)

Ας θεωρήσουμε τώρα λοιπόν πως το πλωτό σώμα δεν δέχεται εξωτερικές δυνάμεις, αλλά πάλλεται μόνο του. Το δυναμικό που παράγεται κατά την κίνηση του αυτή είναι το δυναμικό ακτινοβολίας Φ_r που αναφέρθηκε πριν και δημιουργεί επί πλέον δυνάμεις που ασκούν φορτία πάνω στο σώμα, τις δυνάμεις ακτινοβολίας F_r .

Το δυναμικό αυτό και για τους έξι βαθμούς ελευθερίας του σώματος μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμική συνάρτηση του πεδίου ταχυτήτων u του νερού:

$$\Phi_r = \sum_{j=1}^6 \varphi_j u_j \quad (6.17)$$

Όπου: $\varphi_j = \varphi_j(x, y, z)$ είναι ένας μιγαδικός συντελεστής αναλογικότητας ανάμεσα στις ποσότητες Φ_r και u .

Οι μονάδες μέτρησης στο σύστημα μονάδων S.I των παραπάνω ποσοτήτων είναι οι εξείς: $[\Phi_r] = \text{m}^2/\text{s}$, $[\varphi_{j=1,2,3}] = \text{m}$, $[\varphi_{j=4,5,6}] = \text{m}^2/\text{rad}$.

Ο συντελεστής φ_j μπορεί να ερμηνευθεί ως το μιγαδικό πλάτος του ακτινοβολούμενου δυναμικού ταχυτήτων του νερού και ικανοποιεί την Δ.Ε Laplace, καθώς και όλες τις οριακές συνθήκες στις οποίες αναφερθήκαμε στις παραπάνω παραγράφους. Ισχύουν λοιπόν:

$$\text{Laplace:} \quad \vec{\nabla}^2 \varphi_j = 0 \quad (6.18)$$

$$\text{Ο.Σ.Ε.Ε:} \quad \left(-\omega^2 \varphi_j + g \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (6.19)$$

$$\text{Ο.Σ.Π:} \quad \left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (6.20)$$

$$\text{Ο.Σ.Ε.Σ:} \quad \left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} \right|_S = n_j \quad (6.21)$$

Η συνιστώσα $F_{r,j'}$ της ασκούμενης δύναμης λόγω ύπαρξης του δυναμικού ακτινοβολίας δίνεται από μια σχέση εντελώς ανάλογη με την (6.12β):

$$\boxed{F_{r,j'} = i\omega\rho \iint_S \varphi_j u_j n_j dS} \quad j, j' = 1, \dots, 6 \quad (6.12\gamma)$$

Ο δείκτης j' δηλώνει την συνιστώσα της ασκούμενης δύναμης ακτινοβολίας, ενώ ο δείκτης j δηλώνει την συνιστώσα της αντίστοιχης κίνησης του σώματος ($j = 1, 2, 3$ μεταφορικές κινήσεις, $j = 4, 5, 6$ περιστροφικές κινήσεις).

Με την βοήθεια της σχέσης (6.21) μπορούμε να θέσουμε:

$$Z_{j',j} = -i\omega\rho \iint_S \varphi_j n_j dS = -i\omega\rho \iint_S \varphi_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} dS \quad j, j' = 1, \dots, 6 \quad (6.22)$$

Οπότε η σχέση (6.12γ) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\boxed{F_{r,j'} = -Z_{j',j} u_j} \quad j, j' = 1, \dots, 6 \quad (6.12\delta)$$

Το στοιχείο $Z_{j',j}$ είναι μέρος της μήτρας \underline{Z} η οποία είναι πίνακας διαστάσεων (6X6) και ονομάζεται **Μήτρα σύνθετης αντίστασης ακτινοβολίας**. Πρόκειται για μια ποσότητα ανάλογη της σύνθετης μηχανικής αντίστασης $Z = R + iX$ ενός εξαναγκασμένου αρμονικού ταλαντωτή, όπου R είναι η πραγματική αντίσταση του συστήματος, ενώ X είναι η άεργος φανταστική αντίσταση του συστήματος. [34]

Με αυτήν την λογική και γνωρίζοντας πως κάθε συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης ακτινοβολίας είναι συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας $Z_{j',j} = Z_{j',j}(\omega)$, μπορούμε να την χωρίσουμε σε ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος:

$$\boxed{Z_{j',j} = R_{j',j} + iX_{j',j} = R_{j',j} + i\omega m_{j',j}} \quad (6.23)$$

Το στοιχείο $R_{j',j}$ ανήκει στην (6X6) **μήτρα αντίστασης ακτινοβολίας – radiation resistance matrix** (ή αλλιώς στην **μήτρα συντελεστών προστιθέμενης απόσβεσης – added damping coefficient matrix**) \underline{R} , το στοιχείο $X_{j',j}$ στην (6X6) **μήτρα της άεργου αντίστασης – radiation**

reactance matrix \underline{X} , ενώ το στοιχείο $m_{j,j}$ στην (6X6) **μήτρα προστιθέμενης μάζας – added mass matrix** \underline{m} . (βλ. [32] κεφ 5, §5.2.1)

Οι μονάδες μέτρησης των στοιχείων $Z_{j,j}$ είναι οι εξείς: Για τα στοιχεία της διαγωνίου: $j = j'$ είναι $[Z_{j',j=1,2,3}] = Ns/m = kg/s$ και $[Z_{j',j=4,5,6}] = Nsm/rad$. Ενώ για τα μη διαγώνια στοιχεία της μήτρας $j \neq j'$ είναι $[Z_{j',j}] = Ns$.

Ακόμη οφείλουμε να αναφέρουμε πως η μήτρα \underline{Z} είναι **συμμετρική**: $\underline{Z} = \underline{Z}^T$ ή για την ακρίβεια **ερμιτιανή**: $\underline{Z} = \underline{Z}^\dagger$ (αφού τα στοιχεία της $Z_{j,j}$ είναι μιγαδικοί αριθμοί). Ισχύει λοιπόν η **σχέση αμοιβαιότητας – reciprocity relation**:

$$Z_{j'j} = Z_{jj'} \quad (6.24)$$

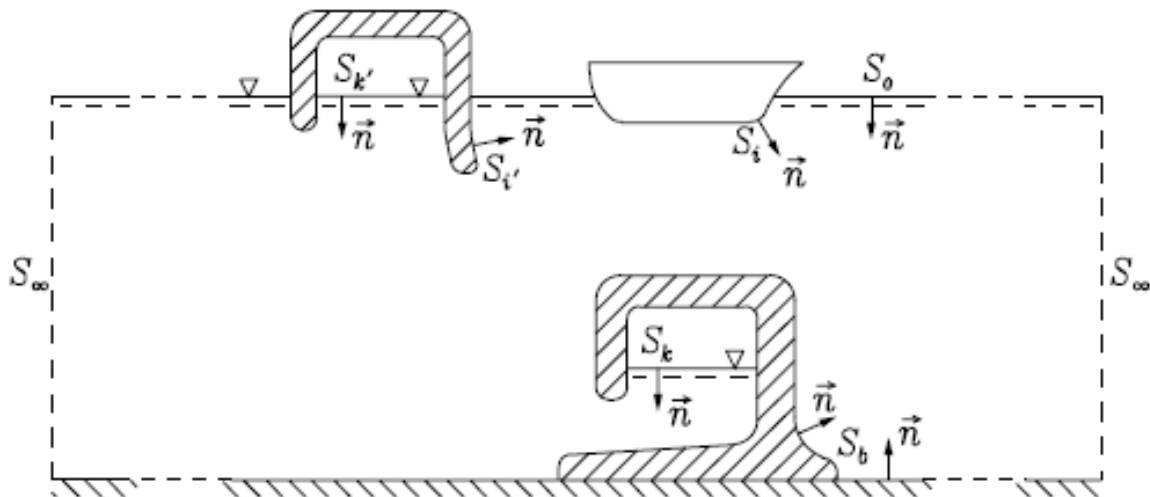
Τέλος οφείλουμε να αναφέρουμε πως η φυσική ερμηνεία της **προστιθέμενης ή υδροδυναμικής μάζας** είναι η εξής: Το ρευστό επιταχύνεται κατά την διέλευση του κυματισμού, όπως είδαμε και στην §2.3.8, και προσπίπτει πάνω στο πλωτό σώμα το οποίο, πέρα από την δική του σταθερή μάζα, αποκτά και μια επί πλέον μάζα η οποία οφείλεται στην «αντίσταση» που αυτό αναπτύσσει ενάντια στην διέλευση του κυματισμού. Η πρόσθετη μάζα αυτή εξαρτάται από την γεωμετρία του σώματος. *Η υδροδυναμική μάζα λοιπόν είναι μια φανταστική πρόσθετη μάζα που «αποκτά» ένα οποιοδήποτε πλωτό σώμα λόγω της παρουσίας του μέσα σε επιταχυνόμενο πεδίο ροής.*

Η συνιστώσα j' της **συνολικής της ασκούμενης δύναμης** πάνω σε ένα πλωτό σώμα είναι (βλ. [32] κεφ 5, §5.5.1):

$$\boxed{F_{t,j'} = F_{e,j'} + F_{r,j'} = F_{e,j'} - Z_{j',j} u_j} \quad (6.25)$$

6.2 Το παραγόμενο δυναμικό κατά την αλληλεπίδραση Π.Σ.Υ και κυματισμών

Θεωρούμε το σύστημα που φαίνεται στην εικόνα 90 το οποίο αποτελείται από πλωτά στερεά σώματα, πλωτές Π.Σ.Υ, καθώς και από πακτωμένες Π.Σ.Υ στον πυθμένα σε βάθος z_k . Η κατανομή της ασκούμενης πίεσης από τους θαλάσσιους κυματισμούς γίνεται κατά μήκος της φανταστικής κυλινδρικής επιφάνειας S_∞ . Οι βρεχούμενες επιφάνειες των πλωτών στερεών σωμάτων υποδεικνύονται με το σύμβολο S_i , των πλωτών Π.Σ.Υ με το S_i' και των πακτωμένων στον πυθμένα Π.Σ.Υ με το S_b . Η Εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια των πλωτών Π.Σ.Υ είναι η S_k' , ενώ των πακτωμένων στον πυθμένα Π.Σ.Υ είναι η S_k . Επιπλέον, η ελεύθερη επιφάνεια του νερού είναι η S_0 , ενώ η επιφάνεια του πυθμένα που θεωρείται επίπεδος είναι επίσης η S_k . Τα διανύσματα \vec{n} είναι τα κάθετα μοναδιαία διανύσματα που βρίσκονται πάνω σε όλες τις προαναφερθείσες επιφάνειες και μας βοηθούν να ορίσουμε τον προσανατολισμό τους σε σχέση με το δυναμικό ροής των κυματισμών. [32]



Εικόνα 90: Ένα σύστημα πλωτών σωμάτων και Π.Σ.Υ μέσα στην θάλασσα

Θα μελετήσουμε το πώς διαμορφώνεται το δυναμικό του πεδίου ταχυτήτων στην Π.Σ.Υ που βρίσκεται πακτωμένη στον πυθμένα με εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια την S_k' . Το προσπίπτον δυναμικό στην εν λόγω Π.Σ.Υ δίνεται από την σχέση (2.47γ) της §2.3:

$$\Phi_0(x, y, z) = -\frac{g}{i\omega} \cdot \eta_0(x, y) \cdot e(kz) \quad (6.26)$$

Στην γενικότερη περίπτωση όπου ο κυματισμός δεν προσπίπτει κάθετα στην Π.Σ.Υ, αλλά υπό γωνία, η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας S_0 δίνεται από την (2.46γ):

$$\eta_0(x, y) = Ae^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (6.27)$$

Στην απλούστερη περίπτωση η ελεύθερη επιφάνεια γίνεται με την βοήθεια των (2.46β) και (2.52):

$$\eta_0(x) = \eta_f = A e^{-ikx} \quad (6.27\beta)$$

Το δυναμικό του πεδίου ροής στην περιοχή γύρω από την κατασκευή της Π.Σ.Υ δίνεται από την συνισταμένη των τριών δυναμικών που αναφέρθηκαν παραπάνω και από την (6.7). Ισχύουν λοιπόν οι εξείς Διαφορικές εξισώσεις και Οριακές συνθήκες:

$$\Delta.E \text{ Laplace: } \nabla^2 \begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Phi_d \\ \Phi_r \end{bmatrix} = 0 \quad (6.28)$$

Η σχέση αυτή ισχύει σε όλη την περιοχή του ρευστού από το οποίο διέρχονται κυματισμοί και μας δίνεται με την βοήθεια της (2.38).

$$\text{Ο.Σ.Ε.Ε: } \left(-\omega^2 + g \frac{\partial}{\partial z} \right) \begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Phi_d \\ \Phi_r \end{bmatrix} = 0 \quad (6.29)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί την ενοποιημένη οριακή συνθήκη (2.42) της §2.3.4 η οποία ισχύει στην ελεύθερη επιφάνεια S_0

$$\text{Ο.Σ.Π και Ο.Σ.Θ: } \frac{\partial}{\partial n} \begin{bmatrix} \Phi_0 + \Phi_d \\ \Phi_r \end{bmatrix} = 0 \quad (6.30)$$

Η σχέση αυτή ισχύει στον πυθμένα (Ο.Σ.Π) και πάνω στην εξωτερική επιφάνεια του υποβρυχίου θαλάμου (Ο.Σ.Θ), δηλαδή σε όλη την επιφάνεια S_b . Δίνεται με την βοήθεια της Ο.Σ.Ε.Σ (6.6β)

$$\text{Ο.Σ.Ε.Ε.Θ: } \left(-\omega^2 + g \frac{\partial}{\partial z} \right) \begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Phi_d \end{bmatrix} = 0 \quad (6.31)$$

$$\text{Ο.Σ.Ε.Ε.Θ: } \left(-\omega^2 + g \frac{\partial}{\partial z} \right) \Phi_r = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP_k}{dt} = -\frac{i\omega}{\rho} P_k \quad (6.31\beta)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν την ενοποιημένη οριακή συνθήκη (6.4) της ελεύθερης επιφάνειας S_k του νερού εντός του θαλάμου.

Το δυναμικό ακτινοβολίας στην περίπτωση της Π.Σ.Υ δεν δίνεται από την γενική σχέση (6.17) της §6.1.2 αλλά από μια παρόμοια σχέση που μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμική συνάρτηση του δυναμικού πεδίου των πιέσεων P_k της στήλης του αέρα εντός του θαλάμου:

$$\Phi_r = \varphi_k P_k \quad (6.32)$$

Όπου: $\varphi_k = \varphi_k(x, y, z)$ είναι ένας μιγαδικός συντελεστής αναλογικότητας ανάμεσα στις ποσότητες Φ_r , P_k και ανάλογος προς τον συντελεστή φ_j που είχαμε εισάγει παραπάνω. Ο συντελεστής φ_k μπορεί να ερμηνευθεί ως το μιγαδικό πλάτος του ακτινοβολούμενου δυναμικού πιέσεων του νερού. Οι μονάδες μέτρησης στο σύστημα μονάδων S.I των παραπάνω ποσοτήτων είναι οι εξείς:

$$[\Phi_r] = m^2/s, [\varphi_k] = m^3 s/kg, [P_k] = Pa = N/m^2 = kg/s^2 m$$

Το δυναμικό πεδίο πιέσεων εντός του θαλάμου με την βοήθεια των σχέσεων (2.45) (της §2.3.4) και (2.45β) (της §2.3.10) δίνεται από την σχέση:

$$P_k = -i\omega\rho\Phi\Big|_{z_k} = \rho g \eta_k e(kz_k) \quad (6.33)$$

Η σχέση (6.32) Ικανοποιεί τις ομογενείς διαφορικές εξισώσεις (6.28), (6.29), (6.30) και (6.31), καθώς και την μη ομογενή διαφορική εξίσωση (6.31β) υπό την μορφή:

$$\mathbf{O.S.E.E.O:} \left(-\omega^2 + g \frac{\partial}{\partial z} \right) \varphi_k = -\frac{i\omega}{\rho} \quad (6.31\gamma)$$

Εισάγουμε τώρα μια νέα έννοια, αυτή της **παροχής όγκου** (*volume flow*) του νερού η οποία παράγεται από την εσωτερική παλλόμενη στήλη ύδατος κατά την διεύθυνση του άξονα z. Η ροή όγκου δίνεται από την σχέση:

$$Q_{t,k} = \iint_{S_k} u_z dS = \iint_{S_k} \frac{\partial \Phi}{\partial z} dS \quad (6.34)$$

Η μονάδα μέτρησης της ροής όγκου είναι: $[Q_{t,k}] = m^3/s$. Βολεύει αρκετά να διαχωρίσουμε την **συνολική παροχή όγκου** του νερού σε δύο συνιστώσες:

$$Q_{t,k} = Q_{e,k} + Q_{r,k} \quad (6.35)$$

Όπου:

$$Q_{e,k} = \iint_{S_k} \frac{\partial (\Phi_0 + \Phi_d)}{\partial z} dS \quad (6.36)$$

Είναι η **παροχή όγκου διέγερσης** (*excitation volume flow*) που οφείλεται στην ύπαρξη του δυναμικού διέγερσης $\Phi_0 + \Phi_d$

Ενώ:

$$Q_{r,k} = \iint_{S_k} \frac{\partial \Phi_r}{\partial z} dS \quad (6.37)$$

Είναι η **παροχή όγκου ακτινοβολίας** (*excitation volume flow*) που οφείλεται στο δυναμικό ακτινοβολίας Φ_r .

Φυσικά, όπως αναφέραμε και παραπάνω στην §2.3, θεωρούμε πως ο κυματισμός που παράγεται είναι ημιτονοειδής και γραμμικός και γι αυτό μπορεί να παρασταθεί με το αντίστοιχο μιγαδικό του πλάτος δηλαδή το δυναμικό που δίνεται από την σχέση (6.7) παραπάνω. τα δυναμικά Φ_0 και Φ_d θεωρούνται γραμμικά ως προς το σταθερό πλάτος κύματος το οποίο δόθηκε από την (2.49) στην §2.3.4, ενώ το δυναμικό Φ_r θεωρείται γραμμικό ως προς μια ποσότητα Y_{kk} που ονομάζεται «**αποδοχή**» **ακτινοβολίας** (*radiation admittance*). Η σχέση (6.35) λοιπόν λαμβάνει την μιγαδική μορφή:

$$Q_{t,k} = Q_{e,k} + Q_{r,k} = q_{e,k} A - Y_{kk} P_k \quad (6.35\beta)$$

Όπου:

$$q_{e,k} = \frac{Q_{e,k}}{A} = \frac{1}{A} \iint_{S_k} \frac{\partial (\Phi_0 + \Phi_d)}{\partial z} dS \quad (6.36\beta)$$

Είναι ο συντελεστής **παροχής όγκου διέγερσης** (*excitation-volume-flow coefficient*)

Ενώ:

$$Y_{kk} = - \iint_{S_k} \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} dS \quad (6.37\beta)$$

Είναι η **αποδοχή ακτινοβολίας** (*radiation admittance*) η οποία δίνεται με την βοήθεια των (6.32) και (6.37). Πρόκειται για την αναλογία ανάμεσα στα μιγαδικά πλάτη της παροχής όγκου ακτινοβολίας και της δυναμικής πίεσης εντός του θαλάμου συλλογής:

$$Y_{kk} = - \frac{Q_{r,k}}{P_k} \quad (6.38)$$

Ο όρος «αποδοχή» (*admittance*) είναι δανεισμένος από την *θεωρία των ηλεκτρικών ταλαντώσεων* σε κυκλώματα. [34], [110] Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ο όρος αυτός είναι ο αντίστροφος από την σύνθετη (ή μιγαδική) ηλεκτρική αντίσταση (*electrical Impedance*).

$Z = R + iX$ ενός κυκλώματος με αντίσταση, πηνίο και πυκνωτή (R-L-C), όπου R είναι η αντίσταση, ενώ X είναι η άεργος φανταστική αντίσταση που οφείλεται στην χωρητικότητα του πυκνωτή C και την αυτεπαγωγή του πηνίου L του κυκλώματος. Η φυσική του ερμηνεία αφορά το πόσο «εύκολα» ένα κύκλωμα επιτρέπει την ροή ρεύματος. Η αποδοχή είναι μια μιγαδική συνάρτηση για την οποία ισχύει:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + iX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - i \frac{X}{R^2 + X^2} = G + iB \quad (6.39)$$

$$\text{Όπου:} \quad G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \text{Re}\{Y\} \quad \text{και} \quad B = -\frac{X}{R^2 + X^2} = \text{Im}\{Y\} \quad (6.40)$$

Σε πλήρη αναλογία με τις σχέσεις (6.39) και (6.40), μπορούμε να θεωρήσουμε την σχέση:

$$\boxed{Y_{kk} = G_{kk} + iB_{kk}} \quad (6.41)$$

Όπου:

$$G_{kk} = \text{Re}\{Y_{kk}\} = \frac{1}{2}(Y_{kk} + Y_{kk}^*) \quad (6.42)$$

Είναι το πραγματικό μέρος της αποδοχής ακτινοβολίας, η **αγωγιμότητα ακτινοβολίας** (*radiation conductance*) και

$$B_{kk} = \text{Im}\{Y_{kk}\} \quad (6.43)$$

Είναι το φανταστικό μέρος της αποδοχής ακτινοβολίας, η **φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας** (*radiation susceptance*)

Οι μονάδες μέτρησης των ποσοτήτων Y_{kk} , G_{kk} , B_{kk} είναι: $m^3 s^{-1} / Pa = m^5 s^{-1} N^{-1}$

6.3 Απορροφούμενη και άεργος ισχύς κατά την λειτουργία της Π.Σ.Υ

Προκειμένου να μελετήσουμε την Ισχύ η οποία απορροφάται κατά την διαδικασία λειτουργίας μιας μονάδας Π.Σ.Υ πρέπει να δούμε το πώς παράγεται ισχύς σε έναν *ιδεατό μηχανικό εξαναγκασμένο αρμονικό ταλαντωτή*. Στο σύστημα δρα μια συνισταμένη εξωτερική δύναμη $F(t)$. (βλ. [32] κεφ 2, §2.2.2). Ακολουθώντας λοιπόν ακριβώς την ίδια μαθηματική διαδικασία με αυτήν της §2.3.4 (στην οποία αποδείξαμε την σχέση 2.31δ), προκύπτει η μιγαδική σχέση για την εξωτερικώς επιβαλλόμενη δύναμη:

$$F(t) = F_0 \cos(\omega t + \varphi_F) = \frac{F}{2} e^{i\omega t} + \frac{F^*}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re} \left\{ F e^{i\omega t} \right\} \quad (6.44)$$

Σε ευθεία αναλογία με την σχέση (2.31δ). Όπου:

$$F = F_0 e^{i\varphi_F} \quad \text{και} \quad F^* = F_0 e^{-i\varphi_F} \quad (6.45)$$

Σε ευθεία και πάλι αναλογία με τις σχέσεις (2.33) και (2.34). Ακόμη οφείλουμε να αναφέρουμε ότι ω είναι η γωνιακή συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης ημιτονοειδούς δύναμης F , F_0 είναι το πλάτος της δύναμης και φ_F είναι η «φάση» της δύναμης. Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει και η μιγαδική σχέση για την ταχύτητα και του συστήματος με φάση φ_u και πλάτος u_0 :

$$u(t) = u_0 \cos(\omega t + \varphi_u) = \frac{u}{2} e^{i\omega t} + \frac{u^*}{2} e^{-i\omega t} = \text{Re} \left\{ u e^{i\omega t} \right\} \quad (6.46)$$

$$\text{Όπου: } u = u_0 e^{i\varphi_u} \quad \text{και} \quad u^* = u_0 e^{-i\varphi_u} \quad (6.47)$$

Γνωρίζουμε πως σε κάθε μηχανικό σύστημα η ισχύς που παράγεται ή απορροφάται είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας του συστήματος ή με το γινόμενο της συνισταμένης δύναμης επί την ταχύτητα του συστήματος. Άρα και σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι ισχύει (βλ. [32] κεφ 2, §2.3.1):

$$P_R(t) = F(t) \cdot u(t) = \left(\frac{F}{2} e^{i\omega t} + \frac{F^*}{2} e^{-i\omega t} \right) \cdot \left(\frac{u}{2} e^{i\omega t} + \frac{u^*}{2} e^{-i\omega t} \right)$$

$$P_R(t) = \frac{1}{4} \left(F u^* + F^* u + F u e^{2i\omega t} + F^* u^* e^{-2i\omega t} \right) \quad (4.48)$$

Η σχέση αυτή είναι ευθέως ανάλογη με την (2.101) της §2.3.12, άρα η μέση τιμή της ισχύος δίνεται από την σχέση που είναι ανάλογη της (2.102) και για τους ίδιους λόγους:

$$\overline{P_R(t)} = P_R = \frac{1}{4} (F u^* + F^* u) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F u^* \} \quad (6.49)$$

Επί πλέον γνωρίζουμε πως σε έναν αρμονικό μηχανικό ταλαντωτή ισχύει (βλ. [32] κεφάλαιο 2, §2.2.1):

$$u = F/Z \quad (6.50)$$

Όπου $Z = R + iX$ είναι η σύνθετη μηχανική αντίσταση που αναφέραμε και στην §6.2.2. Οπότε η (6.49) με την βοήθεια των (6.47) και (6.50) γίνεται:

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Z u u^* \} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Z |u|^2 \} = \frac{1}{2} R |u|^2 = \frac{1}{2} R u_0^2 \quad (6.49\beta)$$

Θεωρούμε τώρα ένα πλωτό σώμα το οποίο κινείται μόνο με ένα βαθμό ελευθερίας (για παράδειγμα κινείται στην διεύθυνση *heave*, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός point absorber, που περιγράψαμε στην §3.2.1). Τότε το προσπίπτον κύμα θα παράγει μια δύναμη διέγερσης $F_{e,j}$ και το σώμα θα αποκρίνεται στην άσκηση αυτής κινούμενο με μια αντίστοιχη ταχύτητα u_j . Η συνιστώσα j της συνολικής της ασκούμενης δύναμης πάνω σε στο πλωτό σώμα δίνεται από την (6.25): $F_{t,j} = F_{e,j} + F_{r,j} = F_{e,j} - Z_{j,j} u_j$

Η **μέση απορροφούμενη ισχύς** λοιπόν θα δίνεται με μια σχέση ανάλογη της (6.49), σε συνδυασμό με την (6.25):

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F_{t,j} u_j^* \} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F_{e,j} u_j^* + F_{r,j} u_j^* \} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F_{e,j} u_j^* - Z_{j,j} u_j u_j^* \}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F_{e,j} u_j^* \} - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Z_{j,j} u_j u_j^* \} = P_e - P_r \quad (6.51)$$

Όπου:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ F_{e,j} u_j^* \} = \frac{1}{4} (F_{e,j} u_j^* + F_{e,j}^* u_j) \quad (6.52)$$

Η **ισχύς διέγερσης (excitation power)** του προσπίπτοντος κυματισμού και

$$P_r = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Z_{j,j} u_j u_j^* \} = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Z_{j,j} |u_j|^2 \} \xrightarrow[(4.23)]{(4.49\beta)} P_r = -\frac{1}{2} R_{j,j} |u_j|^2 \quad (6.53)$$

Η **ισχύς ακτινοβολίας (radiated power)** η οποία παράγεται από το ταλαντευόμενο σώμα.

Η (6.51) μπορεί, με την βοήθεια των (6.45) και (6.47), να λάβει και μια διαφορετική μορφή:

$$P_e = \frac{1}{4} (F_{e,j} u_j^* + F_{e,j}^* u_j) = \frac{1}{4} (|F_{e,j}| e^{i\varphi_F} |u_j| e^{-i\varphi_u} + |F_{e,j}| e^{-i\varphi_F} |u_j| e^{i\varphi_u})$$

$$P_e = \frac{1}{4} |F_{e,j}| |u_j| \left(e^{-i(\varphi_u - \varphi_F)} + e^{i(\varphi_u - \varphi_F)} \right) = \frac{1}{2} |F_{e,j}| |u_j| \cos(\varphi_u - \varphi_F)$$

$$P_e = \frac{1}{2} |F_{e,j}| |u_j| \cos(\gamma_j) \quad (6.52\beta)$$

Όπου: $\gamma_j = \varphi_u - \varphi_F$ η διαφορά φάσης ανάμεσα στην ταχύτητα ταλάντωσης του σώματος u_j και την δύναμη διέγερσης $F_{e,j}$.

Στην περίπτωση που δεν αναφερόμαστε απλώς σε ένα ταλαντευόμενο σώμα, αλλά σε ένα σύστημα Π.Σ.Υ, τότε για τον υπολογισμό της ισχύος, δεν θα κάνουμε χρήση της ασκούμενης εξωτερικής δύναμης από τον κυματισμό, ούτε την ταχύτητα του κινούμενου σώματος (το οποίο στην παρούσα περίπτωση είναι η στήλη ύδατος), αλλά αντίθετα θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια της ροής όγκου $Q_{t,k}$, που εισαγάγαμε μέσω της σχέσης (6.35), καθώς και την ασκούμενη δυναμική πίεση P_k που αναπτύσσεται εντός του θαλάμου, που είδαμε στην σχέση (6.33), λόγω του προσπίπτοντος κυματισμού.

Οι μονάδες μέτρησης της ισχύος είναι οι εξείς:

$$[P_R(t)] = [F(t)] \cdot [u(t)] = N \cdot m/s = J/s = Watt$$

Στην περίπτωση της Π.Σ.Υ είπαμε πως θα κάνουμε χρήση των ποσοτήτων: $Q_{t,k}(t) \equiv u(t)$ και $P_k(t) \equiv F(t)$ αντίστοιχα. Έχουμε λοιπόν:

$$[P_R(t)] = [P_k(t)] \cdot [Q_{t,k}(t)] = Pa \cdot m^3/s = N/m^2 \cdot m^3/s = N \cdot m/s = J/s = Watt$$

Βλέπουμε λοιπόν πως διαστατικά είμαστε σε σωστό δρόμο και πως η ισχύς ενός μηχανικού συστήματος που περιέχει ρευστό, ισούται και με το γινόμενο της ασκούμενης δυναμικής πίεσης σε αυτό, επί την ροή όγκου του. Σε πλήρη λοιπόν αναλογία με την (6.51) και με την βοήθεια της (6.35β), μπορούμε να γράψουμε την **μέση απορροφούμενη ισχύ ενός συστήματος Π.Σ.Υ:**

$$\overline{P_R(r)} = \overline{P_k(t) \cdot Q_{t,k}(t)}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Q_{t,k}^* \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k \left(Q_{e,k} + Q_{r,k} \right)^* \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k \left(q_{e,k} A - Y_{kk} P_k \right)^* \right\}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Q_{e,k}^* \right\} + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Q_{r,k}^* \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k q_{e,k}^* A^* \right\} - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Y_{kk}^* P_k^* \right\} = P_e - P_r \quad (6.54)$$

Όπου:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Q_{e,k}^* \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k q_{e,k}^* A^* \right\} \quad (6.55)$$

$$P_e = \frac{1}{4} P_k Q_{e,k}^* + \frac{1}{4} P_k^* Q_{e,k} = \frac{1}{4} P_k q_{e,k}^* A^* + \frac{1}{4} P_k^* q_{e,k} A \quad (6.55\beta)$$

Η **ισχύς διέγερσης** (*excitation power*) λόγω του προσπίπτοντος κυματισμού πάνω στην Π.Σ.Υ και:

$$P_r = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Q_{r,k}^* \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ P_k Y_{kk}^* P_k^* \right\} \quad (6.56)$$

$$P_r = -\frac{1}{4} P_k Q_{r,k}^* - \frac{1}{4} P_k^* Q_{r,k} = \frac{1}{4} P_k Y_{kk}^* P_k^* + \frac{1}{4} P_k^* Y_{kk} P_k \quad (6.56\beta)$$

Η **ισχύς ακτινοβολίας** (*radiated power*) η οποία παράγεται από την ταλαντευόμενη Π.Σ.Υ.

Η (6.55) μπορεί να πάρει την ανάλογη μορφή με αυτήν της (6.52β):

$$P_e = \frac{1}{2} |P_k| |Q_{e,k}| \cos(\gamma_k) = \frac{1}{2} |P_k| |q_{e,k} A| \cos(\gamma_k) \quad (6.55\gamma)$$

Όπου: $\gamma_j = \varphi_Q - \varphi_P$ η διαφορά φάσης ανάμεσα στην παροχή όγκου διέγερσης $Q_{e,k}$ και την ασκούμενη υδροδυναμική πίεση P_k εντός του θαλάμου συλλογής.

Αντίστοιχα η (6.56)-(6.56β) μπορεί με την βοήθεια της (6.42) να λάβει την μορφή:

$$P_r = \frac{1}{4} P_k P_k^* (Y_{kk}^* + Y_{kk}) = \frac{1}{2} |P_k|^2 G_{kk} \quad (6.56\gamma)$$

Άρα η μέση απορροφούμενη ισχύς του συστήματος, που δίνεται από την (6.54), μπορεί με την βοήθεια των (6.55γ) και (6.56γ) να λάβει την μορφή:

$$P_R = P_e - P_r = \frac{1}{2} |P_k| |Q_{e,k}| \cos(\gamma_k) - \frac{1}{2} |P_k|^2 G_{kk} \quad (6.54\beta)$$

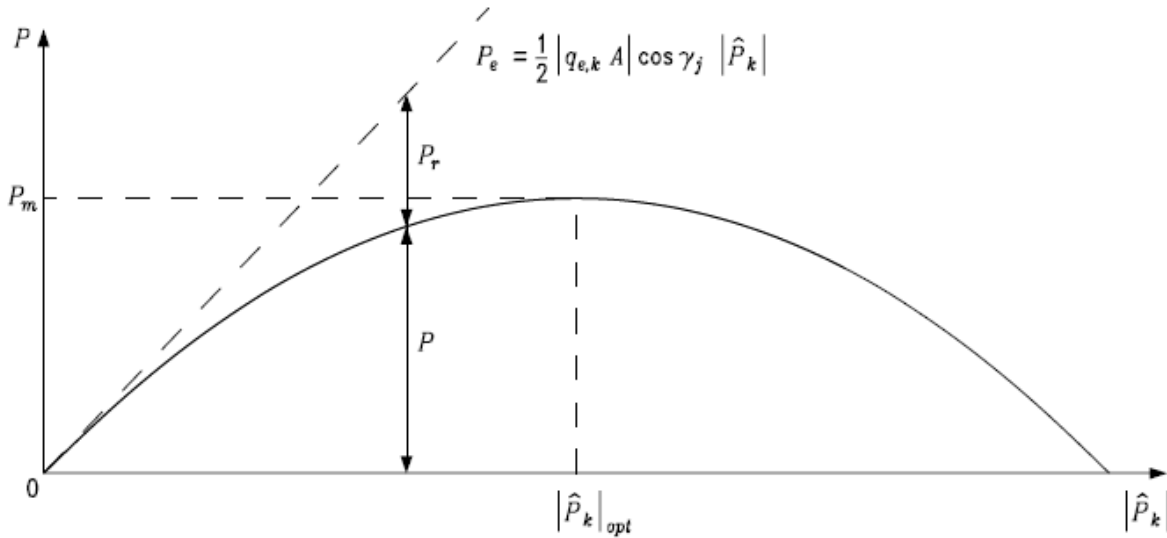
Στην παραπάνω σχέση παρατηρούμε πως για ένα δοθέν προσπίπτον κυματισμό και μια δεδομένη διαφορά φάσης γ_k η ισχύς διέγερσης P_e θα είναι μια γραμμική συνάρτηση της δυναμικής πίεσης P_k . Αντίθετα η ισχύς ακτινοβολίας P_r είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της δυναμικής πίεσης P_k . Η συνάρτηση λοιπόν της ισχύος διέγερσης θα είναι μια ευθεία, ενώ της ισχύος ακτινοβολίας θα είναι μια παραβολή με αρνητικό σταθερό συντελεστή. Έτσι και η συνολική μέση απορροφούμενη ισχύς P_R , που είναι το άθροισμα τους, θα είναι επίσης μια παραβολή, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 14.

Η μέγιστη τιμή της ισχύος, βάση της μαθηματικής ανάλυσης, βρίσκεται εκεί όπου η παράγωγος της συνάρτησης της μηδενίζεται. Από την σχέση (6.54β) λαμβάνουμε:

$$\frac{dP_R}{d|P_k|} = \frac{dP_e}{d|P_k|} - \frac{dP_r}{d|P_k|} = \frac{1}{2} |Q_{e,k}| \cos(\gamma_k) - |P_k| G_{kk} = 0 \Rightarrow \boxed{|P_k|_{opt} = (|Q_{e,k}| / 2G_{kk}) \cos(\gamma_k)} \quad (6.57)$$

Παραπάνω λαμβάνουμε την τιμή της πίεσης η οποία μας δίνει την μέγιστη τιμή της ισχύος. Αντικαθιστώντας την (6.57) στην (6.54β) λαμβάνουμε την σχέση για την *μέγιστη τιμή της μέσης συνολικής απορροφούμενης ισχύος*:

$$\text{Μέγιστη απορροφούμενη ισχύς: } \boxed{P_{R(max)} = (|Q_{e,k}|^2 / 8G_{kk}) \cos^2(\gamma_k)} \quad (6.58)$$



Διάγραμμα 14 : Η συνάρτηση της συνολικής απορροφούμενης ισχύος, συναρτήσει της δυναμικής πίεσης. Στο σχήμα φαίνεται και η ισχύς διέγερσης (διακεκομμένη γραμμή), καθώς και η μέγιστη τιμή της ισχύος.

Επίσης αντικαθιστώντας την (6.57) στις (6.55γ) και (6.56γ) αντίστοιχα λαμβάνουμε τις *μέγιστες τιμές της ισχύος διέγερσης και ισχύος ακτινοβολίας* αντίστοιχα:

$$\text{Μέγιστη ισχύς διέγερσης: } P_{e(opt)} = (|Q_{e,k}|^2 / 4G_{kk}) \cos^2(\gamma_k) \quad (6.59)$$

$$\text{Μέγιστη ισχύς ακτινοβολίας: } P_{r(opt)} = (|Q_{e,k}|^2 / 8G_{kk}) \cos^2(\gamma_k) \quad (6.60)$$

Από τις (6.58), (6.59) και (6.60) προκύπτει ότι:

$$P_{R(max)} = (1/2)P_{e(opt)} = P_{r(opt)} \quad (6.61)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η συνολική απορροφούμενη ισχύς του συστήματος είναι ίση με την ισχύ ακτινοβολίας. Εάν επιπλέον το μέτρο της δυναμικής πίεσης είναι διπλάσιο από την τιμή που δίνεται από την σχέση (6.58), δηλαδή εάν ισχύει:

$$|P_k| = 2|P_k|_{opt} = (|Q_{e,k}| / G_{kk}) \cos(\gamma_k) \quad (6.57\beta)$$

Τότε, αντικαθιστώντας την (6.57β) στις σχέσεις (6.54β), (6.55γ) και (6.56γ) προκύπτουν οι σχέσεις:

$$P_R = 0 \quad P_e = 2P_{e(opt)} = 2P_{R(max)} \quad P_r = 4P_{r(opt)} = 4P_{R(max)} \quad (6.62)$$

Τέλος εάν επιπλέον θεωρήσουμε πως το σύστημα βρίσκεται σε συντονισμό, πράγμα που σημαίνει πως η διαφορά φάσης ανάμεσα στην δυναμική πίεση και την παροχή όγκου διέγερσης του ρευστού είναι μηδέν: $\gamma_j = 0$, τότε οι σχέσεις (6.57), (6.58), (6.59) και (6.60) γίνονται:

$$\text{Τιμή πίεσης για την μέγιστη ισχύ κατά τον συντονισμό: } |P_k|_{OPT} = |Q_{e,k}| / 2G_{kk} \quad (6.57\beta)$$

$$\text{Μέγιστη ισχύς κατά τον συντονισμό: } P_{R(MAX)} = |Q_{e,k}|^2 / 8G_{kk} \quad (6.58\beta)$$

$$\text{Μέγιστη ισχύς διέγερσης κατά τον συντονισμό: } P_{e(OPT)} = |Q_{e,k}|^2 / 4G_{kk} \quad (6.59\beta)$$

$$\text{Μέγιστη ισχύς ακτινοβολίας κατά τον συντονισμό: } P_{r(OPT)} = |Q_{e,k}|^2 / 8G_{kk} \quad (6.60\beta)$$

6.3.1 Άεργος Ισχύς και φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας

Στην περίπτωση ενός εξαναγκασμένου αρμονικού ταλαντωτή (βλ. [32] κεφ 2, §2.3.1) ισχύουν τα εξής:

Η μεταδιδόμενη σύνθετη (ή μιγαδική) ισχύς ή καθαρή ισχύς (apparent power) από την εξωτερική δύναμη στον αρμονικό ταλαντωτή, δίνεται με την βοήθεια των σχέσεων (6.49) και (6.50):

$$P = \frac{1}{2} F u^* = \frac{1}{2} Z u u^* = \frac{1}{2} Z |u|^2 = \frac{1}{2} R |u|^2 + i \frac{1}{2} X |u|^2 \quad (6.63)$$

Το πρώτο μέλος της (6.63) είναι το πραγματικό μέρος της ισχύος, δηλαδή η μέση απορροφούμενη ισχύς ή η ενεργός ισχύς (active power) : $P_R = \text{Re}\{P\}$ και η οποία μας δόθηκε από την (6.49) παραπάνω. Το δεύτερο μέλος της (6.63) είναι το φανταστικό μέρος $\text{Re}\{P\}$ και αναπαριστά το πλάτος της στιγμιαίας άεργης ισχύος (reactive power):

$$P(t) = -2\omega(W_k - W_p) \cos(2\omega t - 2\varphi) = -\frac{X}{2} |u|^2 \cos(2\omega t - 2\varphi) \quad (6.64)$$

Η (6.64) μας δείχνει ξεκάθαρα πως το πλάτος της άεργου ισχύος σχετίζεται με την διαφορά της κινητικής από την δυναμική ενέργεια:

$$W_k - W_p = \frac{X}{4\omega} |u|^2 \quad (6.65)$$

Στην περίπτωση του συντονισμού, δηλαδή στην περίπτωση που η συχνότητα ταλάντωσης της εξωτερικής δύναμης ω , γίνει ίση με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή ω_o , τότε η μέγιστη δυναμική ενέργεια γίνεται ίση με την μέγιστη κινητική ενέργεια (καθώς αυτές μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με τον χρόνο) και άεργος ισχύς μηδενίζεται. Κατ' επέκταση, με την βοήθεια της (6.64), παρατηρούμε πως και η άεργος μηχανική αντίσταση X μηδενίζεται.

Επιστρέφουμε τώρα στην περίπτωση της Π.Σ.Υ. Στην σχέση (6.56γ) είδαμε πως η αγωγιμότητα ακτινοβολίας G_{kk} (βλ. §6.2) σχετίζεται με την ισχύ ακτινοβολίας η οποία παράγεται από την ταλαντευόμενη Π.Σ.Υ. Αντίστοιχα λοιπόν με τον εξαναγκασμένο αρμονικό ταλαντωτή η φανταστική συνιστώσα της αγωγιμότητας ακτινοβολίας B_{kk} αναπαριστά την άεργο ισχύ του ταλαντευόμενου συστήματος και κατ' επέκταση μπορεί να συσχετισθεί με την διαφορά ανάμεσα στην δυναμική και κινητική ενέργεια ($W_p - W_k$) του ακτινοβολούμενου κυματισμού σε μια περιοχή κοντά στην Π.Σ.Υ, ο οποίος αποτελεί και το αποτέλεσμα της διακύμανσης της πίεσης P_k (βλ. [62] κεφ. 7, §7.1.2):

$$\boxed{W_p - W_k = \frac{B_{kk}}{4\omega} |P_k|^2} \quad (6.66)$$

Στην §6.1 είδαμε πως όταν ένα βυθισμένο σώμα δεν κινείται του ασκείται μόνο η δύναμη διέγερσης \vec{F}_e , ενώ όταν επιπλέον εκτελεί ταλάντωση λόγω των προσπιπτόντων κυματισμών του ασκείται και η δύναμη ακτινοβολίας \vec{F}_r . Επιπλέον όμως του ασκείται και η **υδροστατική δύναμη πλευστότητας** (hydrostatic buoyancy fore) \vec{F}_b η οποία οφείλεται στην μεταβολή της υδροστατικής πίεσης $P_{k0} = -\rho g z_k$ η οποία δίνεται από την (6.1). Δηλαδή η βυθισμένη επιφάνεια του σώματος δέχεται μια μεταβαλλόμενη υδροστατική πίεση διότι το σώμα πάλλεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (heave). Η \vec{F}_b αντιστοιχεί στην γραμμική δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου ενός αρμονικού ταλαντωτή και δίνεται με την βοήθεια της σχέσης (βλ. [62] κεφ. 5, §5.9 & §5.9.1):

$$\vec{F}_b = -S_b \vec{s} \quad (6.67)$$

Η σταθερά S_b ονομάζεται **αντίσταση πλευστότητας** (buoyancy stiffness) και αποτελεί έναν πίνακα από συντελεστές αναλογικότητας ανάμεσα στην δύναμη \vec{F}_b και την μετατόπιση του συστήματος \vec{s} . Στην απλούστερη περίπτωση η S_b είναι ένας σταθερός συντελεστής αναλογικότητας ο οποίος αντιστοιχεί στην σταθερά Hook του ελατηρίου του αρμονικού ταλαντωτή.

Στην περίπτωση τώρα ενός πλωτού κατακόρυφου κυλίνδρου ακτίνας α και βυθίσματος l , με $l \gg \alpha$, η αντίσταση πλευστότητας είναι ίση με: $S_b = \rho g S_k = \rho g \pi \alpha^2$ (6.68)

Όπου: $S_k = \pi\alpha^2$ είναι το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου. (6.68β)

Αντίστοιχα η μάζα του κυλίνδρου είναι ίση με: $m = S_k \rho l = \pi\alpha^2 \rho l$ (6.69)

Η **ιδιοσυχνότητα** του κυλίνδρου δίνεται από την σχέση: $\omega_o = \sqrt{\frac{S_b}{m + m_{33}}}$ (6.70)

Όπου η ποσότητα $m_{33} = \mu_{33} m$ είναι η προστιθέμενη μάζα $m_{j',j}$ της (6.23) η οποία οφείλεται στην κατακόρυφη συνιστώσα $j' = 3$ της ασκούμενης δύναμης ακτινοβολίας η οποία έχει σαν συνέπεια την κατακόρυφη κίνηση $j = 3$ της Π.Σ.Υ. Η αδιάστατη ποσότητα μ_{33} ονομάζεται **συντελεστής προστιθέμενης μάζας** και εξαρτάται από τις ποσότητες: $k\alpha, l/a$ και kh . Στην περίπτωση που εξετάζουμε ισχύει [111]:

$$m_{33} = 0,167(2\alpha)^3 \rho = 0,64 \left(\frac{2\pi}{3}\right) \alpha^3 \rho \quad (6.71)$$

Επί πλέον εάν θεωρήσουμε πως ο κύλινδρος βρίσκεται σε μεγάλο βάθος νερού $kh \gg 1$ τότε ισχύει $m_{33} \rightarrow 0$ και η ιδιοσυχνότητα του κυλίνδρου δίνεται από την σχέση:

$$\omega_o = \sqrt{S_b/m} = \sqrt{g/l} \quad (6.70\beta)$$

Οι σχέσεις (6.68), (6.69), (6.70), (6.70β) και (6.71) ισχύουν και για μια κυλινδρική κατακόρυφη Π.Σ.Υ με ακτίνα α και βύθισμα l , στην περίπτωση που ισχύουν: $l \gg \alpha$ ή/και $kh \gg 1$. Η διαφορά είναι πως η αντίσταση πλευστότητας σχετίζεται με την διακύμανση της εσωτερικής παλλόμενης στήλης ύδατος και όχι με την διακύμανση του βυθίσματος ενός παλλόμενου στερεού σώματος.

Γνωρίζουμε τώρα πως καθώς η Π.Σ.Υ σταματάει την κίνηση της, δηλαδή καθώς η συχνότητα ταλάντωσης της τείνει στο μηδέν: $\omega \rightarrow 0$, η κινητική ενέργεια του συστήματος τείνει επίσης στο μηδέν: $W_k \rightarrow 0$. Σε αυτήν την περίπτωση η δυναμική ενέργεια μειώνεται στην υδροστατική τιμή της W_{p0} .

Η μέση δυναμική ενέργεια στην γενική περίπτωση ενός εξαναγκασμένου αρμονικού ταλαντωτή δίνεται από την σχέση:

$$W_p = \frac{1}{4} S |x|^2 \quad (6.72)$$

Στην περίπτωση της Π.Σ.Υ η μέση δυναμική ενέργεια δίνεται αντίστοιχα από την σχέση:

$$W_p = \frac{1}{4} S_k |\eta_k|^2 \quad (6.73)$$

Όπου: η_k είναι η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας εντός του θαλάμου εισαγωγής της Π.Σ.Υ την οποία υπολογίσαμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου και δίνεται από την (6.5).

Καθώς λοιπόν η Π.Σ.Υ σταματάει την κίνηση της και κατ επέκταση η δυναμική ενέργεια τείνει στην υδροστατική τιμή της W_{p0} , η σχέση (6.5) για την ελεύθερη επιφάνεια γίνεται:

$$\eta_k \rightarrow \eta_{k0} = -\frac{1}{\rho g} \cdot P_k, \quad z=z_k \quad (6.5\beta)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (6.71) και (6.5β) προκύπτει ότι:

$$W_{p0} = \frac{1}{4} S_b |\eta_{k0}|^2 \quad \text{ή} \quad W_{p0} = \frac{1}{4\rho^2 g^2} S_b |P_k|^2 \quad (6.73\beta)$$

Οπότε καθώς η Π.Σ.Υ σταματάει την κίνηση της η σχέση (6.66) μας δίνει:

$$W_p = W_{p0} \rightarrow \frac{B_{kk}}{4\omega} |P_k|^2 \quad \text{ή} \quad B_{kk} \rightarrow 4\omega \frac{W_{p0}}{|P_k|^2} = \frac{\omega S_b}{\rho^2 g^2} = \frac{\omega S_k}{\rho g} \quad (6.74)$$

Παρατηρώντας την σχέση (6.74) συμπεραίνουμε πως η υδροστατική αντίσταση πλευστότητας (hydrostatic stiffness) περιλαμβάνεται στον όρο B_{kk} , δηλαδή την φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας (radiation susceptance) που εισάγαμε στο §6.2.

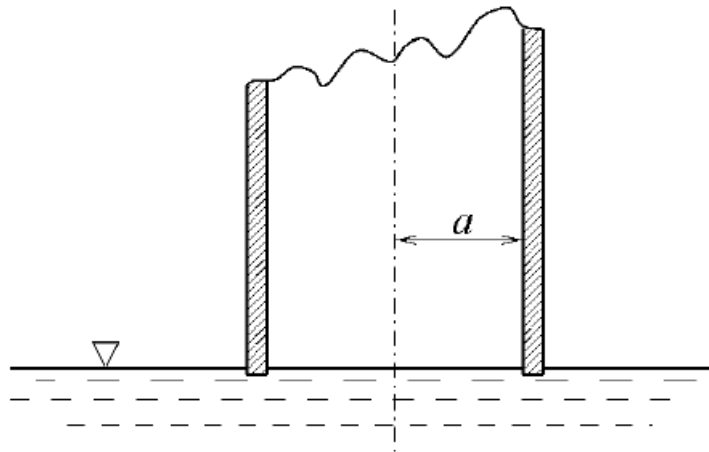
Καθώς λοιπόν η συχνότητα ταλάντωσης της Π.Σ.Υ αρχίζει να αυξάνει, η δυναμική ενέργεια δέχεται συνεισφορές και από τον προσπίπτοντα κυματισμό, ο οποίος συνεπάγεται την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας η οποία τώρα δίνεται από την (6.5) και πάλι. Επί πλέον η κινητική ενέργεια γίνεται και πάλι μετρήσιμη και αποκτά σημασία.

Τέλος αναφέραμε την περίπτωση συντονισμού για μια παλλόμενη στήλη ύδατος η οποία δίνεται από τις σχέσεις (6.70) και (6.70β) - μετονομάζοντας το S_b σε S_k . Επιπλέον είπαμε πως στην περίπτωση του συντονισμού ενός αρμονικού ταλαντωτή ισχύει: $W_k = W_p$ ή/και $X=0$. Αντίστοιχα στην περίπτωση της Π.Σ.Υ στον συντονισμό ισχύει: $W_k = W_p$ και με την βοήθεια της (6.66) παρατηρούμε πως επιπλέον ισχύει: $B_{kk} = 0$. Άρα όταν η Π.Σ.Υ βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού, δηλαδή όταν η διαφορά φάσης ανάμεσα στην δυναμική πίεση και την παροχή όγκου διέγερσης του ρευστού είναι μηδέν, η αποδοχή ακτινοβολίας (radiation admittance) είναι πραγματικός αριθμός: $Y_{kk} = G_{kk}$

6.4 Η κυλινδρική αξονοσυμμετρική Π.Σ.Υ

Θεωρούμε μια Π.Σ.Υ η οποία είναι κυλινδρική, κυκλικής διατομής ακτίνας a , η οποία έχει λεπτά τοιχώματα και είναι ελάχιστα βυθισμένη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Ο κύλινδρος αποτελεί τον θάλαμο εισαγωγής της Π.Σ.Υ όπου περιέχει ατμοσφαιρικό αέρα. Λόγω του ότι ο κύλινδρος είναι ελάχιστα βυθισμένος, μας δίνει την δυνατότητα να θεωρήσουμε τις δυνάμεις περίθλασης λόγω του προσπίπτοντα κυματισμού ως αμελητέες. Το ότι τα τοιχώματα είναι λεπτού πάχους μας δίνουν την δυνατότητα να θεωρήσουμε και την μάζα του ως αμελητέα. Τέλος τοποθετούμε το σύστημα συντεταγμένων μας με τον άξονα z να είναι συγγραμμικός με τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου, η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην επιφάνεια ηρεμίας της θάλασσας. Ο κυματισμός προσπίπτει στην Π.Σ.Υ από τα αρνητικά x και με φορά προς τα θετικά, οπότε η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας και το δυναμικό Froude-Kryloff δίνονται από τις σχέσεις:

$$(6.27\beta): \eta_0(x) = \eta_f = Ae^{-ikx} \quad \text{και} \quad (6.26): \Phi_0(x, y, z) = -\frac{g}{i\omega} \cdot \eta_0(x, y) \cdot e(kz)$$



Εικόνα 91: Η κυλινδρική αξονοσυμμετρική Π.Σ.Υ

Η παροχή όγκου διέγερσης (excitation volume flow) υπολογίζεται από την (6.36) ως εξής:

$$Q_{e,k} = \iint_{S_k} \frac{\partial(\Phi_0 + \Phi_d)}{\partial z} dS = \iint_{S_k} \frac{\partial\Phi_0}{\partial z} dS \quad (6.75)$$

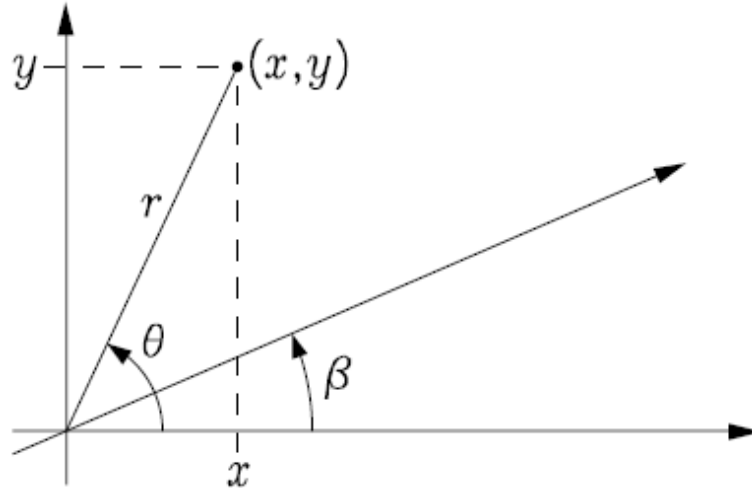
$$\text{Από τις (6.26) και (6.27β) προκύπτει: } \frac{\partial\Phi_0}{\partial z} = -\frac{g}{i\omega} \cdot A \cdot e'(kz) e^{-ikx} \quad (6.76)$$

Υπενθυμίζουμε πως στην §2.3.4 υπολογίσαμε την κατακόρυφη ιδιοσυνάρτηση:

$$(2.48): e(kz) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} = \frac{e^{k(z+h)} + e^{-k(z+h)}}{e^{kh} + e^{-kh}} = \frac{1 + e^{-2k(z+h)}}{1 + e^{-2kh}} e^{kz}$$

$$(2.48\delta): \left. \frac{dZ(z)}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{de(kz)}{dz} \right|_{z=0} = k \cdot e(0) \cdot \tanh(kh) = k \cdot \tanh(kh)$$

Επίσης καθώς αναφερόμαστε σε κυλινδρική συμμετρία, θα μετασχηματίσουμε και τις συντεταγμένες μας: $(x, z) = (r \cos \theta, z)$. Όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζει η συντεταγμένη r με τον άξονα x .



Εικόνα 92: Οι κυλινδρικές συντεταγμένες στο επίπεδο (x, y) και η γωνία β του προσπίπτοντος κυματισμού

Οπότε οι (6.75) και (6.76) μετασχηματίζονται αναλόγως:

$$(6.75\beta): Q_{e,k} = \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Phi_0}{\partial z} r dr d\theta \quad (6.76\beta): \frac{\partial \Phi_0}{\partial z} = -\frac{g}{i\omega} \cdot A \cdot e'(kz) e^{-ikr \cos \theta}$$

Εφόσον η αρχή των αξόνων βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, θα κάνουμε χρήση της σχέσης (2.48δ) και θα υπολογίσουμε την παροχή όγκου διέγερσης:

$$Q_{e,k} = -\frac{g}{i\omega} \cdot A \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} e'(kz) \Big|_{z=0} e^{-ikr \cos \theta} r dr d\theta = -\frac{gk}{i\omega} \cdot A \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} \tanh(kh) e^{-ikr \cos \theta} r dr d\theta \quad (6.75\gamma)$$

Υπενθυμίζουμε και την εξίσωση διασποράς για ενδιάμεσο βάθος νερού, που υπολογίστηκε στο §2.3.5, (2.53): $\omega^2 = kg \tanh(kh)$. Οπότε η σχέση μας γίνεται:

$$Q_{e,k} = i\omega A \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} e^{-ikr \cos \theta} r dr d\theta \quad (6.75\delta)$$

Θεωρούμε γνωστά τα ολοκληρώματα [32]:

$$\int_0^{2\pi} e^{ix \cos t} dt = 2\pi J_0(x) \quad , \quad \int_0^x t J_0(t) dt = x J_1(x) \quad (6.77)$$

Όπου: $J_0(x)$, $J_1(x)$ είναι οι συναρτήσεις Bessel 1^{ου} είδους, μηδενικού και πρώτου βαθμού αντίστοιχα. Οπότε με την βοήθεια των (6.77) η παροχή όγκου διέγερσης για έναν αξονοσυμμετρικό κύλινδρο γίνεται:

$$\boxed{Q_{e,k} = \frac{i\omega}{k} \cdot 2\pi\alpha \cdot J_1(k\alpha) \cdot A} \quad (6.78)$$

Επί πλέον με χρήση της (6.36β) μπορούμε να υπολογίσουμε και τον συντελεστή παροχής όγκου διέγερσης (excitation-volume-flow coefficient):

$$\boxed{q_{e,k} = \frac{Q_{e,k}}{A} = \frac{i\omega}{k} \cdot 2\pi\alpha \cdot J_1(k\alpha)} \quad (6.79)$$

Ακόμη μπορούμε να υπολογίσουμε την αγωγιμότητα ακτινοβολίας (radiation conductance) $G_{kk} = \text{Re}\{Y_{kk}\}$ με την βοήθεια της σχέσης (βλ. [32] κεφ. 7, §7.1.5):

$$G_{kk} = \frac{k}{16\pi J} \int_{-\pi}^{\pi} |Q_{e,k}(\beta)|^2 d\beta \quad (6.80)$$

Όπου β είναι η γωνία που σχηματίζει ο προσπίπτον κυματισμός με τον άξονα x (2.46γ). Στην περίπτωση μας ο προσπίπτον κυματισμός είναι ανεξάρτητος της γωνίας β καθώς το σώμα μας είναι αξονοσυμμετρικό, η παραπάνω σχέση γίνεται λοιπόν (βλ. [32] κεφ. 6, §5.4.3):

$$G_{kk} = \frac{k}{8J} |Q_{e,k}|^2 \quad (6.81)$$

Όπου (2.104β): $J = \frac{\rho g^2}{4\omega} \cdot D(kh) \cdot |A|^2$ είναι η ροή ενέργειας ανά μέτρο μετώπου κύματος ενός προσδεύοντα (κατά τα θετικά x) αρμονικού κυματισμού. Με την βοήθεια των (2.104β) και (6.78), η σχέση (6.81) λαμβάνει την μορφή:

$$G_{kk} = \frac{k}{2 \frac{\rho g^2}{\omega} \cdot D(kh) \cdot |A|^2} \cdot \left| \frac{i\omega}{k} \cdot 2\pi\alpha \cdot J_1(k\alpha) \cdot A \right|^2 = \frac{\omega k}{2\rho g^2 \cdot D(kh) \cdot |A|^2} \cdot \frac{\omega^2 4\pi^2 \alpha^2 |A|^2}{k^2} J_1^2(k\alpha)$$

$$\boxed{G_{kk} = \frac{2\omega^3 \pi^2 \alpha^2}{\rho g^2 k D(kh)} \cdot J_1^2(k\alpha)} \quad (6.82)$$

Η σχέση (6.82) δίνει την αγωγιμότητα ακτινοβολίας για έναν προσδεύον αρμονικό κυματισμό σε νερό ενδιαμέσου βάθους. Υπενθυμίζουμε πως ο όρος $D(kh)$ είναι η συνάρτηση βάθους που υπολογίσαμε στην §2.3.6 και δίνεται από την σχέση:

$$(2.57): D(kh) = \left[1 + \frac{2kh}{\sin(2kh)} \right] \tanh(kh)$$

Για μεγάλο βάθος νερού ο πίνακας 2 (βλ. 2.3.7) μας δίνει $D(kh) = 1$, ενώ ισχύει και η σχέση (2.65): $\omega^2 = kg$. Με αυτά τα δεδομένα η αγωγιμότητα ακτινοβολίας σε μεγάλα βάθη νερού γίνεται:

$$\boxed{G_{kk} = \frac{2\omega}{\rho g} \cdot \pi^2 \alpha^2 J_1^2(k\alpha)} \quad (6.82\beta)$$

Υπενθυμίζουμε πως οι συναρτήσεις Bessel 1^{ου} είδους είναι οι λύσεις της διαφορικής εξίσωσης Bessel [29]. Ο γενικός τους τύπος είναι:

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{n+2k} \quad (6.83)$$

Οι συναρτήσεις Bessel 1^{ου} είδους, μηδενικού και πρώτου βαθμού έχουν τύπους:

$$J_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k} = 1 - \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64} - \frac{x^6}{2304} + \dots \quad (6.83\beta)$$

$$J_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(1+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{1+2k} = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{16} + \frac{x^5}{384} - \frac{x^7}{18.432} + \dots \quad (6.83\gamma)$$

Για να καταλάβουμε τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της καμπύλης των συναρτήσεων Bessel 1ου είδους, μπορούμε να πούμε πως ανεξαρτήτως βαθμού έχουν όλες την μορφή:

$$J_n(x) \sim \sqrt{2/\pi x} \sin(x + \varphi) \quad \text{όπου: } x \gg 1 \quad (6.84)$$

Δηλαδή πρόκειται για αποσβεννύμενες ημιτονοειδείς συναρτήσεις με νόμο απόσβεσης: $1/\sqrt{x}$. Με βάση την (6.83γ) μπορούμε να πούμε πως ισχύει:

$$\frac{2}{k\alpha} J_1(k\alpha) = \frac{2}{k\alpha} \left[\frac{k\alpha}{2} - \frac{(k\alpha)^3}{16} + \frac{(k\alpha)^5}{384} - \frac{(k\alpha)^7}{18.432} + \dots \right] = 1 - \frac{(k\alpha)^2}{8} + \frac{(k\alpha)^4}{192} - \frac{(k\alpha)^6}{9.216} + \dots \quad (6.85)$$

Δηλαδή για μήκος προσπίπτοντος κύματος το οποίο είναι μεγάλο, τουλάχιστον πολύ μεγαλύτερο από την ακτίνα α του κυλίνδρου: $k\alpha \ll 1$, η (6.85) μας δίνει:

$$(2/k\alpha)J_1(k\alpha) \rightarrow 1 \quad (6.85\beta)$$

Οπότε η παροχή όγκου διέγερσης που δίνεται από την (6.78) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$Q_{e,k} = i\omega A \pi \alpha^2 \cdot (2/k\alpha) \cdot J_1(k\alpha) \Rightarrow \boxed{Q_{e,k} \approx i\omega A \pi \alpha^2} \quad (6.78\beta)$$

Από την (2.76) γνωρίζουμε πως η κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου ταχυτήτων ενός προοδεύοντα κυματισμού είναι:

$$(2.76): \hat{u}_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = ig \frac{k}{\omega} \cdot e(kz) \cdot (\eta_f + \eta_b) = i\omega \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} (\eta_f + \eta_b)$$

Επειδή ο κυματισμός διαδίδεται μόνο κατά τα θετικά x ισχύει η σχέση (6.27β) και $\eta_b = 0$:

$$\hat{u}_z = i\omega \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \eta_f = i\omega A \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} e^{-ikx}$$

Για μεγάλα μήκη κύματος $kh \rightarrow 0$ ο πίνακας 2 στο §2.3.7 μας δίνει: $\hat{u}_z = i\omega A e^{-ikx}$ (6.86)

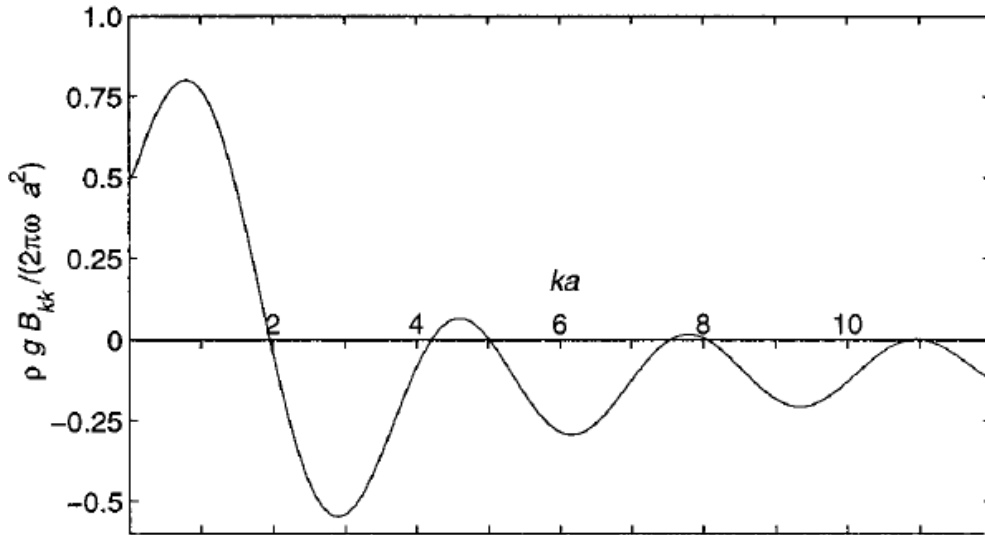
Η παραπάνω σχέση μας πληροφορεί πως ο όρος $i\omega A$ που συναντάμε και στην (6.78β) πρόκειται για το μιγαδικό πλάτος της κατακόρυφης συνιστώσας του πεδίου ταχυτήτων του κυματισμού στην περίπτωση μεγάλου μήκους κύματος. Αυτό είναι λογικό γιατί η παροχή είναι ουσιαστικά η ταχύτητα του ρευστού πολλαπλασιαζόμενη με το εμβαδόν της διατομής πa^2 του κυλίνδρου.

Βάση της σχέσεως (6.40) με βάση την οποία ορίσαμε την αγωγιμότητα ακτινοβολίας G_{kk} , αλλά και των σχέσεων (6.82) και (6.82β), αντιλαμβανόμαστε πως ισχύει: $G_{kk} \geq 0$ (θεωρώντας βέβαια πως ισχύει: $D(kh) \geq 0$ επίσης). Ωστόσο οι (6.82) και (6.82β) μας δείχνουν πως η G_{kk} είναι μια συνάρτηση της εξίσωσης Bessel $1^{ου}$ είδους και $1^{ου}$ βαθμού $J_1(k\alpha)$, οπότε θα έχει και τις ίδιες ρίζες με αυτήν: Γνωρίζουμε πως η εξίσωση $J_1(k\alpha) = 0$ ισχύει για: $k\alpha|_1 = 3,832$, $k\alpha|_2 = 7,016$, $k\alpha|_3 = 10,173$ κτλ... Αυτές οι τιμές για το γινόμενο $k\alpha$ είναι και οι ρίζες, δηλαδή οι τιμές για τις οποίες μηδενίζεται η αγωγιμότητα ακτινοβολίας G_{kk} .

Η παραγωγή της φανταστικής αγωγιμότητας ακτινοβολίας (radiation susceptance) (6.43): $B_{kk} = \text{Im}\{Y_{kk}\}$ είναι λίγο πιο σύνθετη. Στο διάγραμμα 15 βλέπουμε το πώς εξελίσσεται η ποσότητα $\rho g B_{kk} / 2\pi\omega a^2$, συναρτήσει της ποσότητας $k\alpha$. Από την (6.74) γνωρίζουμε πως για σχετικά μικρές τιμές της συχνότητας ω , ισχύει:

$$B_{kk} \rightarrow 4\omega W_{p0} / |P_k|^2 = \frac{\omega S_b}{\rho^2 g^2} = \frac{\omega S_k}{\rho g} \Rightarrow \frac{\rho g B_{kk}}{\omega S_k} \rightarrow 1 \Rightarrow \frac{\rho g B_{kk}}{\omega \pi a^2} \rightarrow 1 \Rightarrow \frac{\rho g B_{kk}}{2\omega \pi a^2} \rightarrow \frac{1}{2} \quad (6.87)$$

Παρατηρούμε αρχικά πως η ποσότητα B_{kk} είναι θετική για χαμηλές τιμές της συχνότητας (ή και της ποσότητας $k\alpha$) και καθώς αυτή αυξάνεται, το B_{kk} γίνεται αρνητικό. Στην §6.3.1 είδαμε πως έχουμε συντονισμό του συστήματος όταν ισχύει: $B_{kk} = 0$. Η πρώτη τιμή συντονισμού, παρατηρώντας το διάγραμμα, βλέπουμε πως είναι η: $k\alpha = 1.96$



Διάγραμμα 15: Η φανταστική αγωγιμότητα ακτινοβολίας για μια κυλινδρική Π.Σ.Υ αμελητέας καταβύθισης [32]

$$\text{Έχουμε λοιπόν: } k\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\alpha = 1,96 \Rightarrow \frac{\alpha}{\lambda} = \frac{1,96}{2\pi} = 0,31 \Rightarrow \alpha = 0,31\lambda \approx \frac{1}{3}\lambda \quad (6.88)$$

Στην πρώτη τιμή του συντονισμού δηλαδή βλέπουμε πως η ακτίνα του κυλίνδρου είναι περίπου το ένα τρίτο του μήκους προσπίπτοντος κύματος.

Για να υπολογίσουμε την συχνότητα συντονισμού θα θεωρήσουμε πως βρισκόμαστε στην περίπτωση μεγάλου βάθους του νερού, άρα πως ισχύει η εξίσωση διασποράς που δίνεται από την σχέση (2.65): $\omega^2 = kg$

$$\text{Συντονισμό θα έχουμε όταν ισχύει: } \omega_0 = \sqrt{k_0 g} = \sqrt{\frac{k_0 \alpha}{\alpha} g} = \sqrt{\frac{1,96}{\alpha} g} = 1,4 \sqrt{\frac{g}{\alpha}} \quad (6.89)$$

Η προστιθέμενη μάζα μπορεί να υπολογισθεί με την βοήθεια της σχέσεως (6.70):

$$\omega_o = \sqrt{\frac{S_b}{m + m_{33}}} \Rightarrow \omega_o = \sqrt{\frac{S_b}{m_{33}}} \Rightarrow \omega_o^2 = \frac{S_b}{m_{33}} \Rightarrow m_{33} = \frac{S_b}{\omega_o^2} = \frac{\rho g \pi \alpha^2}{\omega_o^2} = \frac{\rho g \pi \alpha^2}{1,96 g / \alpha} = 0,51 \pi \alpha^3 \rho$$

$$m_{33} = 0,76 \frac{2\pi}{3} \alpha^3 \rho \approx \frac{3}{4} \cdot \frac{2\pi}{3} \alpha^3 \rho \quad (6.90)$$

Ο όρος $(2\pi/3)\alpha^3 \rho$ ισούται με την μάζα μιας σφαίρας ακτίνας α . Άρα η προστιθέμενη μάζα του κυλίνδρου αντιστοιχεί περίπου στα 3/4 αυτής της μάζας.

Τέλος, εάν θεωρήσουμε πως το σύστημα μας βρίσκεται σε συντονισμό, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη τιμή με την βοήθεια της σχέσης: (6.58β): $P_{R(MAX)} = |Q_{e,k}|^2 / 8G_{kk}$

- Θα υπολογίσουμε αρχικά την μέγιστη ισχύ για ενδιάμεσο βάθος νερού με την βοήθεια των σχέσεων (6.58β), (6.78) και (6.82):

$$P_{R(MAX)} = \frac{\omega^2}{k^2} \cdot 4\pi^2 \alpha^2 \cdot J_1^2(k\alpha) \cdot |A|^2 \left/ \frac{16\omega^3 \pi^2 \alpha^2}{\rho g^2 k D(kh)} \cdot J_1^2(k\alpha) \right. \Rightarrow \boxed{P_{R(MAX)} = \frac{\rho g^2 D(kh)}{4\omega k} |A|^2} \quad (6.91)$$

Με την βοήθεια της (2.104β) η παραπάνω σχέση λαμβάνει την μορφή: $\boxed{P_{R(MAX)} = \frac{J}{k}}$ (6.91β)

- Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την μέγιστη ισχύ για μεγάλο βάθος νερού με την βοήθεια των σχέσεων (6.58β), (6.78) και (6.82β):

$$P_{R(MAX)} = \frac{\omega^2}{k^2} \cdot 4\pi^2 \alpha^2 \cdot J_1^2(k\alpha) \cdot |A|^2 \left/ \frac{16\omega}{\rho g} \cdot \pi^2 \alpha^2 J_1^2(k\alpha) \right. \Rightarrow \boxed{P_{R(MAX)} = \frac{\rho g \omega}{4k^2} |A|^2} \quad (6.92)$$

Με την βοήθεια της (2.99δ), η (6.92) γίνεται και πάλι η (6.91β): $P_{R(MAX)} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T = \frac{J}{k}$

Τέλος θα κάνουμε μια αριθμητική εφαρμογή βάζοντας κάποιες τυπικές τιμές για τα βασικά μεγέθη του προβλήματος μας. Θεωρούμε πως ισχύουν: $\alpha = 4m, S_k = \pi\alpha^2 \approx 50m, T = 2\pi/\omega = 9s, |A| = 0,5m, \lambda = 2\pi/k = 126m, \rho = 1.025 kg/m^3$. Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν: $k\alpha = 0,20, J_1(k\alpha) = 0,099, k = 4,987 \cdot 10^{-2} m^{-1}, \omega = 0,798 s^{-1}$

- Η αγωγιμότητα ακτινοβολίας σε μεγάλα βάθη νερού δίνεται από την (6.82β):

$$G_{kk} = \frac{2\omega}{\rho g} \cdot \pi^2 \alpha^2 J_1^2(k\alpha) = \frac{2 \cdot 0,798 s^{-1}}{1.025 kg/m^3 \cdot 9,81 m/s^2} \cdot \pi^2 (4m)^2 \cdot (0,099)^2$$

$$\boxed{G_{kk} = 2,457 \cdot 10^{-4} m^5 s^{-1} N^{-1}}$$

- Η μιγαδική αγωγιμότητα ακτινοβολίας σε μεγάλα βάθη νερού δίνεται με την βοήθεια του διαγράμματος 15 από το οποίο προκύπτει η (6.87):

$$\frac{\rho g B_{kk}}{2\omega\pi\alpha^2} \approx \frac{1}{2} \Rightarrow B_{kk} \approx \frac{\omega\pi\alpha^2}{\rho g} = \frac{\pi \cdot 0,798 s^{-1} \cdot (4m)^2}{1.025 kg/m^3 \cdot 9,81 m/s^2} \Rightarrow \boxed{B_{kk} \approx 1,8 \cdot 10^{-3} m^5 s^{-1} N^{-1}}$$

Παρατηρούμε τώρα πως το B_{kk} είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από το G_{kk} .

- Η παροχή όγκου διέγερσης για έναν αξονοσυμμετρικό κύλινδρο δίνεται από την (6.78):

$$Q_{e,k} = \frac{i\omega}{k} \cdot 2\pi\alpha \cdot J_1(k\alpha) \cdot A = i \frac{0,798 s^{-1}}{4,987 \cdot 10^{-2} m^{-1}} \cdot 2\pi \cdot (4m) \cdot 0,099 \cdot 0,5m \Rightarrow \boxed{Q_{e,k} \approx 17,4 m^3/s}$$

- Η ισχύς που φέρει ο κυματισμός δίνεται από την (2.99δ):

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T = \frac{\rho g^2}{8\pi} A^2 T = \frac{1.025 \text{ kg/m}^3 \cdot (9,81 \text{ m/s}^2)^2}{8\pi} \cdot (0,5 \text{ m})^2 \cdot 9 \text{ s} \Rightarrow \boxed{J \approx 8,83 \text{ kW/m}}$$

- Η μέγιστη ισχύς που απορροφάται από την Π.Σ.Υ για την περίπτωση του συντονισμού δίνεται από την (6.91β):

$$P_{R(MAX)} = J/k = 8,83 \text{ kW/m} / 4,987 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1} \Rightarrow \boxed{P_{R(MAX)} \approx 177 \text{ kW}}$$

Γενικώς από το 2^ο κεφάλαιο και μετά έχουμε κάνει χρήση της γραμμικής θεωρίας δυναμικού για να περιγράψουμε το φαινόμενο των κυματισμών και να μοντελοποιήσουμε την λειτουργία της Π.Σ.Υ. Ακόμη έχουμε θεωρήσει πως το νερό είναι ιδανικό ρευστό, δηλαδή πως δεν παρουσιάζει φαινόμενα εσωτερικής τριβής (ιξώδους), ενώ έχουμε λάβει ως δεδομένο πως η ροή είναι δυναμική. Αυτή η ανάλυση είναι δυνατόν να προσεγγίσει μια πραγματική κατάσταση μόνο εάν θεωρήσουμε πως το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας $|\eta_f| = A$ του νερού που προσπίπτει στο τοίχωμα της Π.Σ.Υ, δεν ξεπερνάει την ακτίνα καμπυλότητας $\rho_b = 1/\alpha$ του κυλίνδρου.

Οπότε ο **αριθμός Keulegan-Carpenter**: $N = \pi \frac{|\eta_f|}{\rho_b}$ πρέπει να είναι μικρός και να ισχύουν:

$$|\eta_f| < \rho_b, \quad N < \pi$$

Εάν αντίθετα ισχύει: $N \geq \pi$, τότε θα εμφανιστούν φαινόμενα στροβιλισμού στην ροή και απώλειες ενέργειας λόγω του ιξώδους του νερού.

Ακόμη θεωρήσαμε πως ο κύλινδρος έχει πολύ λεπτά τοιχώματα και ότι είναι απειροελάχιστα βυθισμένος στο νερό, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Εάν θεωρήσουμε πως το πάχος του τοιχώματος του κυλίνδρου είναι περίπου 1 m και πως η ακτίνα καμπυλότητας είναι $\rho_b = 0,5 \text{ m}$, τότε η γραμμική θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εάν η παροχή δεν ξεπερνά τα: $Q_{e,k} \approx 20 \text{ m}^3/\text{s}$, πράγμα που με την σειρά του και με βάση την σχέση (6.58β) ότι η μέγιστη απορροφούμενη ισχύς κατά τον συντονισμό δεν μπορεί να ξεπεράσει τα: $P_{R(MAX)} \approx 250 \text{ kW}$.

Ένας τρόπος να αυξήσουμε αυτό το όριο της γραμμικής συμπεριφοράς είναι το να αυξήσουμε την ακτίνα καμπυλότητας στο κάτω άκρο του τοιχώματος της Π.Σ.Υ. Αυτό είναι κάτι που μπορεί να επιτευχθεί εάν η Π.Σ.Υ έχει κωνοειδές σχήμα.

Βιβλιογραφία

- [1] REN 21, «Global Status Report,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [2] Met Office, «<https://www.metoffice.gov.uk/>,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/weather/learn-about/climate/cop/our_changing_world-global_indicators_final_v1.0.pdf. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [3] «ESRL-Global Monitoring Division,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [4] National Snow & Ice Data Center, «<https://nsidc.org/>,» 10 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2018/10/>. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [5] Τ. Σουκισάν, *Σημειώσεις μαθήματος : "Εισαγωγή στις Α.Π.Ε από την θάλασσα"*, Αθήνα: ΕΛΚΕΘΕ, 2019.
- [6] International Energy Agency, «<https://www.iea.org/>,» 26 3 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/geco/>. [Πρόσβαση 18 7 2019].
- [7] S. Reed, «The New York Times,» 8 10 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nytimes.com/2018/10/08/business/energy-environment/orsted-deepwater-wind-energy.html>. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [8] European Commission, «https://ec.europa.eu/commission/index_en,» 2007, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en. [Πρόσβαση 19 7 2019].
- [9] European Environment Agency, «EEA Report,» 2014.
- [10] European Environmental Agency, «Air quality in Europe - 2016 Report,» 2016.
- [11] ΥΠΕΚΑ, «www.ypeka.gr,» 4 6 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=506&language=el-GR>. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [12] Carbon Tracker, «Energy Economics,» 22 1 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.carbontracker.org/reports/the-political-tipping-point/>. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [13] S. T., D. D., K. F., P. A., S. K., I. A., G. K. και M. S., «Marine Renewable Energy in the Mediterranean Sea: Status and Perspectives,» 2017.
- [14] Aquaret, «<http://www.aquaret.com/index.html>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.aquaret.com/indexf45c.html?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=194&lang=el. [Πρόσβαση 12 7 2019].

- [15] Qrsted, «Walney Offshore Wind Park,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://walneyextension.co.uk/>. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [16] «Planete-energies Solar Farm,» 11 7 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/huainan-largest-floating-solar-farm-world>. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [17] Wikipedia, «Tide,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%BB%CE%AF%CF%81%CF%81%CE%BF%CE%B9%CE%B1>. [Πρόσβαση 18 7 2019].
- [18] Π. Βασίλης, Τεχνολογίες Α.Π.Ε και παραδείγματα από τον διεθνή χώρο, Βέροια: Α.Π.Θ - Πολυτεχνική σχολή, 2012.
- [19] Wikipedia, «Ocean thermal energy conversion,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion. [Πρόσβαση 23 7 2019].
- [20] A. Felekis, «Power production by PRO - Feasibility study of an osmotic power plant 1 MW,» *Research Gate*, 6 2014.
- [21] D. F. Birol, «IEA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/renewables2018/>. [Πρόσβαση 24 7 2019].
- [22] Ocean Energy Systems – OES, «Annual Report,» 2018.
- [23] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. d. A. Martínez και I. Kortabarria, «<https://www.sciencedirect.com/>,» 11 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004541>. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [24] Γ. Αθανασούλης και Κ. Μπελιμπασάκης, Κυματικά Φαινόμενα στο θαλάσσιο περιβάλλον, Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.
- [25] «Ocean Physics and modeling group,» Syllabus – University of Athens - Division of Environmental Physics, [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.oc.phys.uoa.gr/courses/po_env.html. [Πρόσβαση 24 7 2019].
- [26] «<http://www.psarema-skafos.gr/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.psarema-skafos.gr/ell/product/%CE%9F%CE%B9-%CF%80%CE%AD%CE%BD%CF%84%CE%B5-%CF%84%CF%8D%CF%80%CE%BF%CE%B9-%CE%BA%CF%85%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD..> [Πρόσβαση 24 7 2019].
- [27] Θ. Φιλιππακοπούλου, Πιλοτική Μελέτη Επάκτιας Κατασκευής για Κυματική Ενέργεια σε Νησί του Αιγαίου, Αθήνα: Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε, 2018.
- [28] Σ. Μαυράκος, Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών, Αθήνα: Ε.Μ.Π, 1999.

- [29] Σ. Τραχανάς, *Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις*, Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 2008.
- [30] R. G. Dean και R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, 1984.
- [31] Σ. Τραχανάς, *Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις*, Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2008.
- [32] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems*, Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2002.
- [33] G. Thomas, R. Finney, M. Weir και F. Giordano, *Απειροστικός Λογισμός*, Ηράκλειο Κρήτης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2009.
- [34] H.J.Pain, *The physics of Vibrations and Waves*, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [35] Marine Power Systems, «Wave Energy Advantages,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://marinepowersystems.co.uk/>. [Πρόσβαση 25 8 2019].
- [36] A. Poullikkas, «Technology Prospects of Wave Power Systems,» *EJE&E*, pp. 47-69, 28 1 2014.
- [37] R. Waters, «Energy from Ocean Waves,» *Uppsala Universitet*, 2008.
- [38] A. -. F. S. Pecher, «Performance Evaluation of Wave Energy Converters,» *Aalborg University*, p. 17, 2012.
- [39] M. Gunnar, S. Barstow, A. Kabuth και T. Pontes, «Assessing the global wave energy potential,» *OMAE*, 6-11 6 2010.
- [40] N. Y. Sergiienko, «Three-Tether Wave Energy ConverterQ Hydrodynamic Modelling, Performance Assessment and Control,» *School of Mechanical Engineering, University of Adelaide, Australia*, pp. 11-39, 2 2018.
- [41] S. Astariz και G. Iglesias, «The economics of wave energy: A review,» *Elsevier*, pp. 397-408, 14 2 2015.
- [42] G.Iglesias και S. Astariz, «The economics of wave energy: A review,» 14 2 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000714>. [Πρόσβαση 15 8 2019].
- [43] E. C. f. M.-R. W. Forecasts., «<https://www.ecmwf.int/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>. [Πρόσβαση 24 8 2019].

- [44] L. L., C. A. και S. G., «Wave Energy resource Assengment in the mediterranean, the Italian Perspective,» pp. 50, 938-949, 2013.
- [45] A. F., L. V., M. G., R. A., F. V., S. G. και C. A., «Wave Climate Analysis for the Design of Wave Energy Harvesters in the Mediterranean Sea,» pp. 77, 125-141, 2015.
- [46] A. Clement, P. McCullen, A. Falcao, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Memonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjostrom, H. C. Sorensen και T. Thrope, «Wave energy in Europe: Current status and perspectives,» *Pergamon*, pp. 407-410, 2002.
- [47] B. G., M. L. και M. A., «Wave Energy Resource Assengment in the Mediterranean Sea on the Basis of a 35-year Hindcast,» pp. 94, 50-63, 2016.
- [48] T. Soukissian, N. Gizari και M. Chatzinaki, «Wave potential of the Greek seas,» *WIT Press, vol 143*, pp. 203-213, 2011.
- [49] Ν. Γκίζαρη, Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες, Αθήνα: ΕΜΠ, 2012.
- [50] S. T., G. N., F. D., P. A., K. G. και P. A., «Wind and Wave Potential in Offshore Locations of the Greek Seas,» σε *ISOPE*, Rhodes, Greece, 2012, pp. 525-532.
- [51] E. G., G. G., K. C., Z. G. και K. G., «10-year High Resolution Study of Wind, Sea Waves and Wave Energy Assengment in the Greek Offshore Areas,» 2016, pp. 90, 399-419.
- [52] I. Lopez, J. Andreu, S. Ceballos, I. d. A. Martinez και I. Kortabarria, «Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment,» *Elsevier*, pp. 414-415, 2013.
- [53] «EMEC- Wave Energy Converters,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>. [Πρόσβαση 3 9 2019].
- [54] H. Titah-Benbouzid και M. Benbouzid, «An Up-to-Date Technologies Review and Evaluation of Wave Energy Converters,» *IREE*, pp. 52-61, 2015.
- [55] «Ocean Power Technologies,» OPT, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.oceanpowertechnologies.com/#>. [Πρόσβαση 27 8 2019].
- [56] M. Mekhiche και K. Edwards, «Ocean Power Technologies Powerbuoy: System-Level Design, Deveopment and Validation Methodology,» σε *Proceeds of the 2nd Marine Energy Technology Symposium*, Seattle, WA, 2014.
- [57] W. Energy, Wavestar, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://wavestarenergy.com/>. [Πρόσβαση 2019 8 27].
- [58] Carnegie Clean Energy, «<https://www.carnegiece.com/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.carnegiece.com/technology/>.

- [59] J. Cruz, *Ocean Wave Energy*, Bristol: Springer, 2008.
- [60] «Nodding Duck,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://books.google.gr/books?id=9_bJmEOXKbkC&pg=PA387&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [61] «Nodding Duck Modelling,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://books.google.gr/books?id=AVmtOw6bLxgC&pg=PA142&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [62] J. Falnes, «A review of wave-energy extraction,» *Elsevier*, pp. 185-201, 3 9 2007.
- [63] L. Marquis, M. Karner, J. Kringelum, J. Chozas και N. Helstrup, «Introduction of Wavestar Wave Energy Converters at the Danish offshore wind power plant Horns,» *ICOE*, 2012.
- [64] M. Karner, J. F. Chozas, H. Sorensen και J. Kofoed, «Combined Production of a full-scale Wave Converter and a full-scale Wind Turbine - a Real Case Study,» *ICOE*, 2012.
- [65] W. Energy. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://wavestarenergy.com/>. [Πρόσβαση 1 9 2019].
- [66] G. Bevilacqua και B. Zanuttigh, «Overtopping Energy Converters: general aspects and stage of development». *DICAM - University of Bologna*.
- [67] B. Drew, A. R. Plummer και M. N. Sahinkaya, «A review of wave energy converter technology,» *Department of Mechanical Engineering, University of Bath, Bath, UK*, pp. 887-902, 26 2 2009.
- [68] J. Tedd, J. P. Knapp, W. Friis-Madsen και E. Sorensen, «Wave Dragon - prototype wave power production,» *Aalborg University*, 2006.
- [69] «Tapered Channel Wave Energy,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://taperedchannelwaveenergy.weebly.com/index.html>.
- [70] E. Carpintero Moreno, «Wave energy conversion based on multi-mode line absorbing systems,» *university of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering*, pp. 44-48, 2015.
- [71] M. Bonovas, Master Diploma Thesis " WECs over general bathymetry A novel approach for performance evaluation and optimization, Athens: NTUA, 2019.
- [72] «EMEC- The European Marine Energy Centre,» European Marine Energy Centre, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.emec.org.uk/>.
- [73] T. V. Heath, «A review of Oscillating Water Columns,» *The Royal Society*, pp. 235-245, 2011.
- [74] M. Takao και T. Setoguchi, «Air Turbines for Wave Energy Conversion,» *International Journal of Rotating Machinery*, 11 4 2012.

- [75] Wave Power Lab, «<http://wavepowerlab.weebly.com/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://wavepowerlab.weebly.com/blog/category/history#>. [Πρόσβαση 12 9 2019].
- [76] D. Evans, «The Oscillating Water Column Wave - energy Device,» *Department of Mathematics, University of Bristol*, pp. 423-433, 1978.
- [77] A. Falcao και L. Gato, *Comprehensive Renewable Energy - Chapter 8.05: Air Turbines*, Oxford: Elsevier, 2012.
- [78] J. Brooke, *Wave Energy Conversion*, Elsevier, 2003.
- [79] A. F. Falcao και J. C. Henriques, «OWC-WEC's and Air turbines: A review,» *Elsevier*, pp. 1391-1424, 2016.
- [80] D. L. O'Sullivan και A. W. Lewis, «Generator Selection and Comparative Performance in Offshore OWC Ocean WEC's,» *IEEE*, pp. 603-614, 6 2011.
- [81] T. Q. U. o. Belfast, «Islay LIMPET Wave Power Plant,» 2002.
- [82] C. Boake, T. Whittaker και M. Folley, «Overview and Initial Operational Experience of the LIMPET Wave Energy Plant,» *Queens University Belfast*, pp. 586-594, 31 5 2002.
- [83] Carbon Trust, «OWC-WEC Evaluation Report,» 2005.
- [84] wavEC, «Pico Plant,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.pico-owc.net/>.
- [85] F. Arena και A. Romolo, «On design and building of a U-OWC WEC in the Mediterranean Sea: A Case Study,» *OMAE*, 9-14 6 2013.
- [86] N. Delmonte, D. Barater, F. Giuliani, P. Cova και G. Buticchi, «Review of OWC Converters,» *IEEE*, pp. 1698-1710, 3 2016.
- [87] Δ. Καραγεωργίου και Σ. Δημήτριος, Μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την κυματική διάταξη ΟΕ ΒΥΟΥ, Καβάλα: ΤΕΙ Καβάλας-Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2012.
- [88] M. Torresi, S. M. Camporeale και G. Pascazio, «Experimental and numerical investigation on the performance of a Wells turbine prototype,» *Research Gate*, 2007.
- [89] Α. Αδραμερίνας, Σχεδιασμός και Υπολογιστική Προσομοίωση Βαθμίδας Αξονικού Συμπιεστή Χαμηλής Ταχύτητας, Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ, 2017.
- [90] Ε. Π. Φινδανής, «Εισαγωγή στις Στροβιλομηχανές».
- [91] B. Pereiras, F. Castro, e. M. Abdelatif και A. R. Miguel, «An improved radial impulse turbine for OWC,» *Elsevier*, pp. 1477-1484, 18 11 2010.
- [92] Κ. Βαφειάδης, Στροβιλομηχανές "Θεωρία Αεροτομών", Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής

Μακεδονίας, 2018.

- [93] Θ. Ι. Τσιρίκογλου και Μ. Α. Βλαχογιάννης, Ρευστοδυναμικές Μηχανές, Αθήνα: ΕΜΠ, 2015.
- [94] Α. Φατσής, *Τρίγωνα Ταχυτητων βαθμίδας αξονικού συμπιεστή*, ΤΕΙ Χαλκίδας.
- [95] M. Torresi, S. Camporeale και G. Pascazio, «Experimental and numerical investigation on the performance of a Wells turbine prototype,» *Research Gate*, 9 2007.
- [96] Z. Carija, L. Kranjcevic, V. Banic και M. Cavrak, «Numerical Analysis of Wells turbine for wave power conversion,» *University of Rijeka*, pp. 141-146, 17 7 2012.
- [97] Α. Κρίκας, Κ. Βαφειάδης και Α. Τουρλιδάκης, «Υπολογιστική και πειραματική μελέτη στροβίλου Wells,» σε *Πανελλήνιο συνέδριο για τα φαινόμενα μηχανικής ρευστών*, Πάτρα, 2016.
- [98] T. Setoguchi, S. Santhakumar, M. Takao, T. Kim και K. Kaneko, «A modified Wells turbine for wave energy conversion,» *Pergamon*, pp. 79-91, 20 12 2001.
- [99] T. Setoguchi, S. Raghunathan, M. Takao και K. Kaneko, «Air-Turbine with Self-Pitch-controlled blades for wave energy conversion,» *International Journal of Rotating Machinery*, pp. 233-238, 25 5 1997.
- [100] T. Ho Kim, S. Toshiaki, T. Manubu, K. Kaneko και S. Santhakumar, «Study of turbine with self-pitch-controlled blades for wave energy conversion,» *International Journal of Thermal Sciences*, pp. 101-107, 12 2 2001.
- [101] S. Raghunathan, «the Wells air turbine for wave energy conversion,» *Pergamon*, pp. 335-386, 17 1 1995.
- [102] L. Gato και R. Curran, «Performance of the Biplane Wells Turbine,» *ASME*, pp. 210-215, 8 1996.
- [103] Y. Cul και Z. Liu, «Effects of Solidity ratio on perofomance of OWC impulse turbine,» *Hindawi Publishing Corporation*, 1 12 2014.
- [104] T. Setoguchi, S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao και K. Kaneko, «A review of impulse turbines for wave energy conversion,» *Pergamon*, pp. 261-292, 24 8 2000.
- [105] D. Richards και F. Weiskopf, «Studies with and testing of the McCormick pneumatic wave energy turbine with some comments on PWECs systems,» σε *Utilization of Ocean Waves - WAve to Energy Conversion*, New York, ASCE, 1986, pp. 80-102.
- [106] T. Kim, K. Kaneko, T. Setoguchi και M. Inoue, «Aerodynamic performance of an impulse turbine with self-pitch-controlled guide vanes for wave power generator,» σε *1st KSME-JSME Thermal Fluid Engineering Conference*, 1988.

- [107] T.-H. Kim, M. Takao, T. Setoguchi, K. Kaneko και M. Inoue, «Performance comparison of turbines for wave power conversion,» *Elsevier*, pp. 681-689, 25 9 2000.
- [108] R. Gurran και L. Gato, «The energy conversion performance of several types of Wells turbine design,» *Journal of Power and Energy*, pp. 133-145, 1997.
- [109] A. F. Thakker και H. Khaleeq, «An investigation of the effects of Reynolds number on the performance of 0.6m impulse turbine for different hub to tip ratios,» σε *Chung JS (ed.) Proceedings of the 12th International Offshore Polar Engineering Conference, USA, 2002*, pp. 682-686.
- [110] wikipedia, «https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Admittance>. [Πρόσβαση 19 12 2019].
- [111] M. McCormick, *Ocean Wave Energy Conversion*, New York: Wiley, 1981.
- [112] Verisk Maplecroft, «www.maplecroft.com,» Verisk Maplecroft, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/verisk%20index.pdf>. [Πρόσβαση 17 7 2019].
- [113] REN 21, «Renewables 2019 - Global Status Report,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://ren21.net/gsr-2019/?gclid=CjwKCAjw67XpBRBqEiwA5RCocccGPjJtGz-q17uCOjicWe5a0RC87fc-4RKRm-G0dtYOASHxWXk8tshoCu9QQAvD_BwE. [Πρόσβαση 18 7 2019].
- [114] Wikipedia, «SeaGen,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/SeaGen>. [Πρόσβαση 21 7 2019].
- [115] World Energy Council, *World Energy Resources*, <https://www.marineenergywales.co.uk/wp-content/uploads/2016/01/World-Energy-Council-Marine-Energy-Resources-2016.pdf>, 2016.
- [116] Aquaret, «www.aquaret.com,» 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.aquaret.com/indexaba3.html?option=com_content&view=article&id=131&Itemid=274&lang=en. [Πρόσβαση 1 9 2019].
- [117] M. M. Aarre, «Wave Energy Pros and Cons,» <http://energyinformative.org/wave-energy-pros-and-cons/>, 2013.
- [118] Albatern, «Wave Energy,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://albatern.co.uk/wave-energy/>. [Πρόσβαση 25 8 2019].
- [119] A. Babajani, M. Jafari, P. Hafezisefat, M. Mirhosseini, A. Rezaia και L. Rosendahl, «Parametric study of a wave energy converter (Searaser) for Caspian Sea,» *Elsevier*, pp. 334-342, 2018.
- [120] M. A. Chatzigiannakou, I. Dolguntseva και M. Leijon, «Offshore Deployments of Wave Energy Converters by Seabased Industry AB,» *Marine Science and Engineering*, pp. 1-11, 25 3 2017.

- [121] A. F. de O. Falcao, «Wave Energy utilization: A review of the technologies,» *Elsevier*, pp. 899-918, 22 10 2009.
- [122] E. C. f. M.-R. W. Forecast, «<https://www.ecmwf.int/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ecmwf.int/en/about>. [Πρόσβαση 24 8 2019].
- [123] R. Gomes, J. Henriques, L. Gato και A. Falcao, «Multi-point aerodynamic optimization of the rotor blade sections of an axial-flow impulse air turbine for wave energy conversion,» *Elsevier*, pp. 570-580, 16 8 2012.