

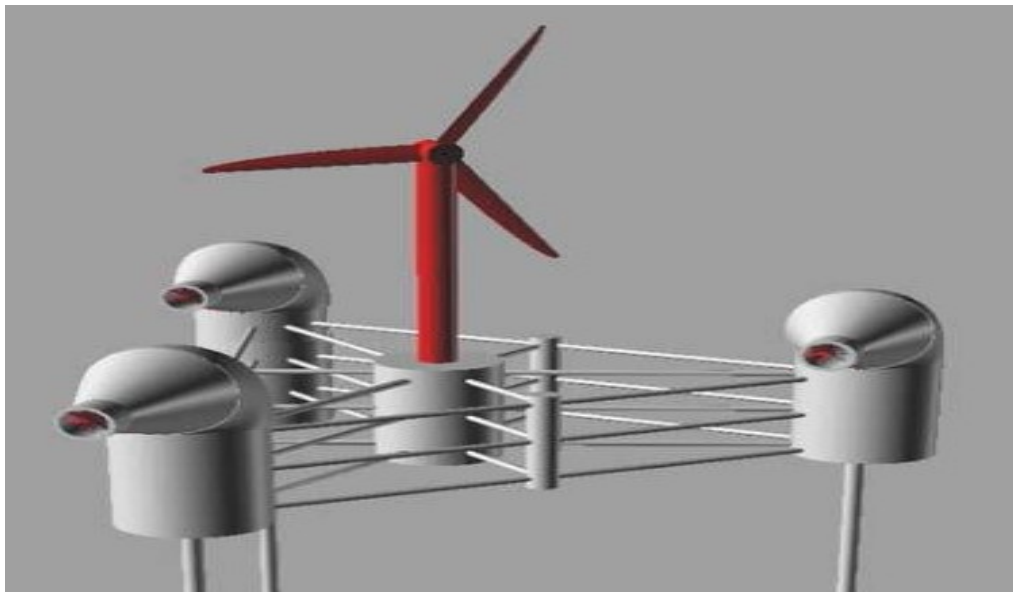


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

«ΠΛΩΤΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗΣ ΥΔΑΤΙΝΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ
ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΟΙΚΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Α. ΜΑΚΡΗ

Επιβλέπων Καθηγητής
Σ.Α Μαυράκος

Αθήνα, Μάρτιος 2017

*Στις γυναίκες της ζωής μου,
Μαίρη, Αφένδρα και Δέσποινα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ολοένα αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός σε συνάρτηση με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν ανεβάσει κατακόρυφα τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη. Η ταυτόχρονη αλόγιστη χρήση των υπάρχουσών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι βλαβερές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον μας κάνουν να στρεφόμεστε σε άλλες μορφές ενέργειας όπως η Αιολική, η Κυματική, η Ηλιακή. Τα οφέλη αυτών των εναλλακτικών πηγών, οι οποίες είναι γνωστές και ως «πράσινες ενέργειες» είναι πολλά και αφορούν κυρίως στον οικονομικό και οικολογικό τομέα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική ανάπτυξη των χερσαίων αιολικών πάρκων, τόσο στην Ελλάδα όσο και στην Ευρώπη. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο και δωρεάν. Όμως, το σημαντικό αιολικό δυναμικό των θαλασσών μας κάνει να στραφούμε και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, παρά το σχετικά μεγάλο κόστος εγκατάστασής τους. Σε κάθε περίπτωση τα οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ενδελεχής μελέτη συστοιχίας κυλίνδρων σε ελευθέρως πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη τρίγωνη, τετράγωνη και πεντάγωνη διάταξη. Οι ανωστικοί κύλινδροι των εξεταζόμενων πλωτών κατασκευών, οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί στις κορυφές κάθε διάταξης, αποτελούνται από συσκευές Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού (Oscillating Water Column) για την ανάκτηση της κυματικής ενέργειας και είναι εδρασμένες σε TLP (Tension Leg Platform) - κατασκευή με κατακόρυφους κλάδους αγκύρωσης, υπό σταθερή προένταση. Στο κέντρο βάρους της πλωτής κατασκευής είναι εγκατεστημένο κυλινδρικό σώμα πάνω στο οποίο έχει τοποθετηθεί ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 5MW, για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η αριθμητική επεξεργασία των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος (H.A.M.V.A.B.), για την κατασκευή μιας πλωτής εξέδρας με βέλτιστη ενεργειακή

παραγωγή αλλά και με επαρκή υδροδυναμική αλλά και στατική συμπεριφορά σε έντονες συνθήκες θαλασσών.

ABSTRACT

The continuous increases of world population in addition to the rapid evolution of technology have increased the global requirements in power sources. At the same time, the unreasonable use of the existing non renewable power sources and the harmful repercussions to the environment make us turn to alternative power sources such as wind energy, wave energy and solar energy. These alternative power sources, known also as “green energy” have multiple financial and environmental benefits.

Over the past years there has been an increase in the development of wind-energy parks all over Europe, but also in Greece. Wind energy is today an attractive solution to the problem of the production of electric energy. The “fuel” is plenty and costless. However, the vast wind energy potential of the seas, make us turn to overseas wind-energy parks, despite their relatively higher cost of installation.

In this thesis, a detailed study has been performed, regarding an array of cylinders in free floating condition as well as in moored condition for triangle, rectangular and pentagon configuration. The floating cylinders of the floating constructions under study, that have been installed on top of every configuration, consist of Oscillating Water Column devices for the recovery of the wave energy and are based on TLP (Tension Leg Platform) constructions with vertical anchor branches, under stable prestressing. In the centre of the centre of gravity of the floating construction there is a supporting cylinder for the wind turbine, for the exploitation of the wind energy.

The purpose of this thesis is the arithmetic processing of the theoretical results with the use of the calculating programme (H.A.M.V.A.B.), for the construction of a floating platform with optimal energy production but with sufficient hydrodynamic and static performance in intense sea conditions.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπυρίδωνα Α. Μαυράκο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Η ολοκλήρωση αυτής θα ήταν σχεδόν αδύνατη αν δεν υπήρχε η καθοδήγηση του Δημητρίου Κονισπολιάτη, Δρ ΕΜΠ και Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, με τον οποίο είχαμε μία αγαστή συνεργασία από την κατανόηση του θέματος μέχρι και την εκπόνηση της εργασίας, και ο οποίος υπήρξε πολύτιμος αρωγός σε κάθε δυσκολία που παρουσιαζόταν.

Θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω τον κ. Θωμά Μαζαράκο, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ., Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Μηχανικό του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης για την καίρια συμβολή του σε δύσκολες φάσεις της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Θανάση και Αφένδρα, για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την απρόσκοπτη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, όπως επίσης και τα αδέρφια μου Κατερίνα και Δημήτρη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύζυγό μου Μαίρη για την αστείρευτη υπομονή, την έμπρακτη υποστήριξή της κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, καθώς και για την γενικότερη ηθική στήριξη και συμπαράστασή της.

Κεφάλαιο 1. Ενεργειακές Πηγές	10
1.1. Μη Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	10
1.1.1. Γαϊάνθρακες	10
1.1.2. Πετρέλαιο	11
1.1.3. Φυσικό Αέριο	12
1.1.4. Πυρηνική Ενέργεια	13
1.2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	14
1.2.1. Το Δυναμικό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	16
1.2.2. Αιολική Ενέργεια	17
1.2.3. Ηλιακή Ενέργεια	19
1.2.4. Υδροηλεκτρική Ενέργεια	21
1.2.5. Παραγωγή Ενέργειας από τη Θάλασσα	22
1.2.5.1. Θαλάσσια Κύματα	22
1.2.5.2. Παλίρροια	23
1.2.5.3. Θερμοκρασιακές Διαφορές Νερού της Θάλασσας	26
1.2.6. Γεωθερμική Ενέργεια	26
1.2.7. Ενέργεια από Βιομάζα	27
Κεφάλαιο 2. Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες	28
2.1. Εισαγωγή στις Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες	28
2.2. Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια	30
2.3. Σχεδιασμός και Προγραμματισμός	31
2.3.1. Βασικά κριτήρια σχεδίασης	31
2.4. Φορτία	34
2.5. Κατασκευή και Εγκατάσταση	35
2.6. Αρχή Λειτουργίας Ανεμογεννητριών	37
2.7. Κατασκευές Έδρασης σε Ρηχό Νερό	39
2.7.1. Μεταλλικοί Πύργοι – Steel Jacket	39
2.7.2. Βαρύτητας - Gravity based	41
2.7.3. Μονού Πυλώνα – Monopile	42
2.7.4. Τριπλού Πυλώνα – Tripile	43
2.7.5. Τρίποδου – Tripod	44
2.7.6. Με εδράσεις κενού / Αναρροφήσεως – Suction / bucket	45
2.8. Λειτουργία και Διαχείριση	47
2.8.1. Παροπλισμός	48
Κεφάλαιο 3. Πλωτές Ανεμογεννήτριες	49
3.1. Ιστορική Αναδρομή	49
3.2. Κατασκευές Spar – Boy	53
3.3. Κατασκευές Barge	54
3.4. Κατασκευές TLP (Tension Leg Platform)	55

Κεφάλαιο 4. Τεχνολογίες Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας	57
4.1. Ιστορική Αναδρομή	57
4.2. Κύματα και Θαλάσσιο Κυματικό Δυναμικό	58
4.2.1. Κυματικό Δυναμικό στην Ελλάδα	60
4.3. Συσκευές Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας	62
4.3.1. Κατηγοριοποίηση με βάση το βάθος της εγκατάστασης	62
4.3.2. Κατηγοριοποίηση με βάση τη μέθοδο μετατροπής	63
4.3.2.1. Παλινδρομούσα στήλη νερού – Oscillating Water Column	63
4.3.2.2. Συσκευές Μακρόστενης Μορφής -Attenuator	64
4.3.2.3. Σημειακοί Απορροφητήρες – Point Absorbers	65
4.3.2.4. Συσκευές Υπερπήδησης το νερού – Overtopping Device	66
4.3.2.5. Βυθισμένες Συσκευές διαφοράς πίεσης – Submerged pressure differential	67
4.3.2.6. Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης – Oscillating Wave Surge Converter	67
4.3.2.7. Άλλες συσκευές	68
Κεφάλαιο 5. Θεωρητικό Μέρος – Μαθηματικό Μοντέλο	69
5.1. Αρχές και Μέθοδοι Σχεδίασης Πλωτών Κατασκευών	69
5.2. Περιγραφή των Συνθηκών του Περιβάλλοντος	70
5.2.1. Πεδίο Ανέμου	71
5.2.2. Θαλάσσια Ρεύματα	72
5.2.3. Θαλάσσιοι Κυματισμοί	74
5.3. Φορτίσεις Πλωτών Κατασκευών	81
5.3.1. Φορτία από Θαλάσσιους Κυματισμούς	82
5.3.2. Επίδραση Δυνάμεων Αναφορικά με το Είδος της Κατασκευής	83
5.4. Μαθηματική Ανάλυση Πλωτών Συσκευών Ταλαντευόμενης Υδάτινης Στήλης για την Ανάκτηση Κυματικής Ενέργειας στην Ανοικτή Θάλασσα	87
5.4.1. Διατύπωση Προβλήματος Δυναμικού	87
5.4.2. Προσδιορισμός Συντελεστών Fourier	102
5.4.3. Παροχή Αέρα στον Ανεμοστρόβιλο	105
5.4.4. Υδροδυναμικές Δυνάμεις και Ροπές	107
5.4.5. Εξισώσεις Κίνησης – Πίεσης	111
5.4.6. Απορροφούμενη Ισχύς	117
Κεφάλαιο 6. Αριθμητικά Αποτελέσματα	119
6.1. Τρίγωνη Κατασκευή	121
6.1.1. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά της Πλωτής Ημιβυθιζόμενης Κατασκευής	121

6.1.2.	Περίπτωση 1 – Μεταβολή της Διάκεντρον των Εσωτερικών Ανωστικών Κυλίνδρων χωρίς την Εγκατάσταση Α/Γ	123
6.1.3.	Περίπτωση 2 – Μεταβολή του Βυθίσματος του Εξωτερικού Μανδύα των Ανωστικών Κυλίνδρων χωρίς την Εγκατάσταση Α/Γ	129
6.1.4.	Περίπτωση 3 – Μεταβολή της Ακτίνας του Εξωτερικού Μανδύα των Ανωστικών Κυλίνδρων χωρίς την Εγκατάσταση Α/Γ	134
6.1.5.	Περίπτωση 4 – Μεταβολή του Βυθίσματος του Κεντρικού Κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ χωρίς την Εγκατάσταση Α/Γ	140
6.1.6.	Περίπτωση 5 – Μεταβολή της Ακτίνας των Εσωτερικών Ανωστικών Κυλίνδρων χωρίς την Εγκατάσταση Α/Γ	145
6.1.7.	Περίπτωση 6 – Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου	150
6.1.8.	Περίπτωση 7 – Διαφορετική Γωνία Πρόσπτωσης Κυματισμού	155
6.2.	Σύγκριση Τετράγωνης και Πεντάγωνης Κατασκευής με Τρίγωνη	175
6.2.1.	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Πλωτών Ημιβυθιζόμενων Κατασκευών.	175
6.2.2.	Συγκριτικά Αποτελέσματα Τρίγωνης, Τετράγωνης και Πεντάγωνης Κατασκευής	178
	Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα	188
7.1.	Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα	188
7.2.	Προτάσεις	192
	Βιβλιογραφία - Πηγές	193

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Πηγή ενέργειας ή ενεργειακή πηγή ονομάζουμε τους φυσικούς πόρους που μας δίνουν Ενέργεια^[1]. Οι πηγές αυτές χωρίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε) και σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (μη Α.Π.Ε). Οι Α.Π.Ε. δεν εξαντλούνται ποτέ και υπάρχουν σε αφθονία στο περιβάλλον. Παραδείγματα αυτών είναι η Αιολική και η Ηλιακή Ενέργεια, ενώ αντίθετα οι μη Α.Π.Ε. κάποια στιγμή αναμένεται να εξαντληθούν.

1.1. ΜΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται από φυσικές διαδικασίες, εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα^[2]. Στις μη Α.Π.Ε. περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά και ως ορυκτά καύσιμα. Βέβαια, η φύση δεν σταματά να δημιουργεί ούτε άνθρακα ούτε πετρέλαιο. Αν αναλογισθούμε όμως ότι η ανθρωπότητα καταναλώνει ημερησίως τόση ποσότητα ορυκτών καυσίμων όση μπορεί η φύση να δημιουργήσει σε χίλια περίπου χρόνια, αντιλαμβανόμαστε πλέον την έννοια της ανανεωσιμότητας. Ο όρος μη Α.Π.Ε. αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες:

- Γαιάνθρακες
- Πετρέλαιο
- Φυσικό αέριο
- Πυρηνική Ενέργεια

1.1.1 ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ

Οι γαιάνθρακες, γνωστοί και ως ορυκτοί άνθρακες, βρίσκονται στο υπέδαφος, μπορούν γενικά να εξορυχθούν εύκολα και είναι ευρέως διαδεδομένοι στη χρήση τους. Η θερμική ενέργεια που αποδίδεται μέσω της καύσης τους είναι ουσιαστικά η ηλιακή ενέργεια που είχαν αρχικά δεσμεύσει οι φυτικοί οργανισμοί κατά την ανάπτυξή τους, πριν εγκλωβιστούν δηλαδή στο υπέδαφος και μετατραπούν σε κάρβουνο μέσω διάφορων διεργασιών και αντιδράσεων. Τα αποθέματα τους συνήθως συναντώνται αρκετά μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης, όμως δεν

αποκλείεται η περίπτωση των επιφανειακών αποθεμάτων, τα οποία εξ ορισμού εντοπίζονται κοντά στην επιφάνειά της ^[3].

Σήμερα χρησιμοποιούμε τους γαιάνθρακες κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και η συγκεκριμένη διεργασία χαρακτηρίζεται από χαμηλή απόδοση, το 41% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την καύση τους ^[4]. Είναι ξεκάθαρο ότι πρόκειται για μια αρκετά φθηνή πηγή ενέργειας. Όμως η εξόρυξη και η διαδικασία που χρειάζεται για να αποδώσουν την ενέργειά τους, έχουν προκαλέσει διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα. Κατά το έργο της επιφανειακής εξόρυξης δημιουργούνται τεράστιες τρύπες στο έδαφος, ενώ συσσωρεύονται εκατομμύρια τόνοι χρώματος με τη μορφή λόφων, καταστρέφοντας όχι μόνο αισθητικά τη φύση αλλά και ρυπαίνοντας με τον υπεράριθμο όγκο μικροσωματιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Επίσης, αξίζει να αναφέρουμε την ανάγκη χρήσης μεγάλου όγκου νερού για τον καθαρισμό του γαιάνθρακα ως ακόμα ένα σοβαρό πρόβλημα που προκαλεί η χρήση τους, καθώς δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων. Τέλος, στα μειονεκτήματα της χρήσης γαιανθράκων συμπεριλαμβάνεται η συμβολή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς κατά την καύση παράγεται τέφρα, αιθάλη, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια θείου και αζώτου που ευθύνονται για το σχηματισμό της όξινης βροχής.

Πίνακας 1.1: Ποσοστό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Γαιάνθρακες^[3]

ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ					
Νότιος Αφρική	94%	Πολωνία	93%	Κίνα	81%
Αυστραλία	76%	Ισραήλ	71%	Καζακστάν	70%
Ινδία	68%	Τσεχία	62%	Μαρόκο	57%
Ελλάδα	55%	ΗΠΑ	49%	Γερμανία	49%

1.1.2 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

Το πετρέλαιο, που πολλές φορές αποκαλείται μαύρος χρυσός λόγω των τεράστιων οικονομικών απολαβών που αποφέρει, είναι ένα παχύρρευστο, μαύρο, βαθύ καφετί ή πρασινωπό υγρό ορυκτό, και αποτελεί τη σπουδαιότερη φυσική πηγή ενέργειας.^[5] Αντλείται, από διάφορα γεωλογικά στρώματα, μέσα στα οποία εγκλωβίστηκε κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων χρόνων. Σημαντικότερες

πετρελαιοπαραγωγές χώρες είναι οι ΗΠΑ, το Μεξικό, η Βενεζουέλα, το Ιράν, το Ιράκ, το Κουβέιτ, η Σαουδική Αραβία, η Ρωσία. Η διύλιση, δηλαδή η διαδικασία επεξεργασίας του πετρελαίου, είναι απαραίτητη πριν τη χρήση του. Από αυτή την επεξεργασία, η οποία λαμβάνει χώρα σε ειδικές εγκαταστάσεις που ονομάζονται διυλιστήρια, προκύπτουν τα διάφορα προϊόντα του όπως το ντίζελ, η βενζίνη, η κηροζίνη, το φωτιστικό πετρέλαιο, το προπάνιο, η νάφθα και η άσφαλτος. Η κύρια χρήση των προϊόντων του πετρελαίου συναντάται κυρίως στις μεταφορές οι οποίες εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από αυτό, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για εξυπηρέτηση σκοπών θέρμανσης.

Το πετρέλαιο αποτελεί την πιο σημαντική πηγή ενέργειας από τη δεκαετία του 1950 έως σήμερα, λόγω της μεγάλης ενεργειακής του πυκνότητας, της εύκολης σχετικά μεταφοράς του αλλά και της δυνατότητας πολλών χρήσεών του. Όμως είναι μια πηγή ενέργειας με περιορισμένο αριθμό αποθεμάτων. Τέλος, οι αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης του εμφανίζονται τόσο κατά την άντληση και τη μεταφορά του, όσο και ως αποτελέσματα της καύσης του, κατά την οποία εκλύονται διάφοροι ρύποι, όπως αιθάλη, οξειδία του θείου και του αζώτου, μόλυβδος και κυρίως διοξείδιο του άνθρακα με αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

1.1.3 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Το φυσικό αέριο είναι ένα μείγμα αέριων υδρογονανθράκων που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (85- 98%) και σε μικρότερες ποσότητες αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Εντοπίζεται σε μεγάλα βάθη, σε υπόγειες κοιλότητες και σχεδόν πάντα συνδυάζεται με την εύρεση πετρελαίου, πάνω από το οποίο υπάρχει^[6]. Σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου υπάρχουν στη Ρωσία, η οποία διαθέτει και τα περισσότερα αποθέματα, στη Μέση Ανατολή, στην Αμερική, στην Αφρική αλλά και στην Ευρώπη.

Το φυσικό αέριο αν και κατατάσσεται στην κατηγορία των ορυκτών καυσίμων, όπως οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο, χαρακτηρίζεται ως το «ευγενέστερο» εξ αυτών, καθώς απαρτίζεται από μικρού μοριακού βάρους υδρογονάνθρακες και περιέχει μικρές ποσότητες θείου και στερεών σωματιδίων. Επομένως, όταν καίγεται παράγει λιγότερους ρύπους σε σύγκριση με τους γαιάνθρακες και το πετρέλαιο. Επιπλέον, η αέρια κατάστασή του επιτρέπει πλήρη ανάμειξη με τον

αέρα κατά την καύση, χαρακτηριστικό το οποίο υποβοηθά την τέλεια καύση με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αιθάλη στα καυσαέρια. Έτσι, όλο και περισσότερο προτιμάται ως καύσιμο στη βιομηχανία, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στις μεταφορές, για σκοπούς θέρμανσης κ.ο.κ, εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων που έχει έναντι των άλλων ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση του και είναι σχετικά οικονομικότερο από το πετρέλαιο.

Εάν εστιάσουμε λίγο στις εφαρμογές του, που συνεχώς επεκτείνονται σε παγκόσμιο επίπεδο, θα δούμε ότι ουσιαστικά πρόκειται για το καύσιμο του 21ου αιώνα και σύμφωνα με τους ειδικούς είναι αυτό το οποίο θα συμβάλει ουσιαστικά στη λύση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού προβλήματος. Παρόλα αυτά δεν παύει και αυτό να είναι μια μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

1.1.4 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η πυρηνική ενέργεια είναι η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα απαρτίζουν. Απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και, εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες, η εκλυόμενη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών^[7].

Παρά το γεγονός ότι η πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, μεγάλη σταθερότητα εφοδιασμού, απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα και το χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν έχει καταφέρει ακόμα να γίνει αποδεκτή ως μια ασφαλής πηγή ενέργειας. Η κοινή γνώμη ανησυχεί για την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών εργοστασίων, κυρίως για τον ενδεχόμενο κίνδυνο ατυχημάτων, παρόλο που υπάρχουν εγγυήσεις ότι ο βαθμός ασφαλείας είναι υψηλός και προβλέπεται ότι στο μέλλον θα είναι υψηλότερος, λόγω της σημαντικής προόδου που έχει επιτευχθεί τόσο από τεχνολογικής όσο και από θεσμικής πλευράς στα θέματα ασφαλείας.

Ακόμα ένα κρίσιμο πρόβλημα της αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας είναι η ασφαλής διαχείριση των ραδιενεργών πυρηνικών καταλοίπων/αποβλήτων, παρότι

τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανισθεί πυρηνικοί αντιδραστήρες νέου τύπου μικρής ισχύος και με μικρές ποσότητες αποβλήτων ^[7].

Σήμερα το 33% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση προέρχεται από την πυρηνική ενέργεια, ενώ είναι χαρακτηριστική η περίπτωση της Γαλλίας όπου ποσοστό σχεδόν το 80% της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από πυρηνική ενέργεια^[7].

1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

Οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων είναι γνωστές σήμερα ως «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» (ΑΠΕ). Παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα και παρατηρούμε ότι τα τελευταία χρόνια η ανθρωπότητα, έπειτα από την αλόγιστη χρήση των μη ΑΠΕ και των επιπτώσεων που είχαν αυτές τόσο στο περιβάλλον όσο και στην οικονομία, να στρέφεται και πάλι σε ενεργειακές πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στο περιβάλλον. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν αφήνει ενεργειακά κατάλοιπα ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών, που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους^[8].

Πριν την πετρελαϊκή κρίση του 1974 και μέχρι τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία δεν υπήρχε το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών. Δεν είναι λίγες οι χώρες για τις οποίες οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, μειώνοντας έτσι το βαθμό εξάρτησής τους από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και την ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, οι χώρες αυτές, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι^[8]:

- Αιολική ενέργεια: η κινητική ενέργεια του αέρα που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω Ανεμογεννητριών.

- **Ηλιακή Ενέργεια:** η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών. Πιο σπάνιες είναι οι περιπτώσεις που η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική όχι απευθείας αλλά με την συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών μέσω ηλιακών συλλεκτών ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τη θέρμανση νερού ή χώρων. Ειδικά σε χώρες όπως η Ελλάδα με εκτεταμένη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του έτους, είναι συνήθης η ύπαρξη οικιακού ηλιακού θερμοσίφωνα.

- **Υδραυλική Ενέργεια:** πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Αφορά τα Υδροηλεκτρικά όπου γίνεται συνήθως εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθηκείσεως (πχ φράγματα).

- **Ενέργεια της Θάλασσας:** διακρίνεται στην Ενέργεια από Παλίρροιες, στην Ενέργεια από κύματα και στην Ενέργεια από Ωκεανούς.

- **Γεωθερμική ενέργεια:** η ενέργεια (θερμότητα) που δίνουν τα εσωτερικά στρώματα της γης και γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.

- **Ενέργεια της Βιομάζας:** η ενέργεια που δίνουν τα πάσης φύσεως γεωργικά και δασικά υπολείμματα όταν λαμβάνουν χώρα κατάλληλες θερμοχημικές επεξεργασίες.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ήδη αναφέρθηκε, πρακτικά είναι ανεξάντλητες και δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Έτσι, τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησής τους. Επίσης, λόγω της συνεχούς αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης και σε συνδυασμό με τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η παγκόσμια κοινότητα στρέφεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών προς εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το ενδιαφέρον αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις η τεχνολογία των Α.Π.Ε. όχι μόνο είναι οικονομικά εφικτή αλλά και αρκετά αποδοτική^[9].

1.2.1 ΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το μέγεθος του παγκόσμιου δυναμικού της ηλιακής ενέργειας γίνεται εύκολα κατανοητό εάν λάβουμε υπ' όψιν ότι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η Γη είναι σχεδόν 7.000 φορές περισσότερη από την τρέχουσα παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Θεωρητικά, αν ήταν δυνατή η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε συνολική περιοχή 700km x 700km η τρέχουσα παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να καλυφθεί. Ωστόσο, από τη στιγμή που λαμβάνουμε υπόψη μας οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες το δυναμικό από τεχνικής πλευράς δεν αντιστοιχεί στο πραγματικά διαθέσιμο δυναμικό. Επίσης, απαιτείται χρόνος για να αναπτυχθούν οι κατάλληλες υποδομές και η τεχνογνωσία.

Εξίσου ίδιου μεγέθους είναι το παγκόσμιο δυναμικό αιολικής ενέργειας. Ας αναλογιστούμε το θεωρητικό παράδειγμα ότι σε τοποθεσίες με μέση ταχύτητα ανέμου τουλάχιστον 5 m/s σε ύψος 10 μέτρων, ανέρχεται σε σύνολο τουλάχιστον 500,000 TWh/y ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος. Αυτό ισοδυναμεί σε 35 φορές περισσότερη ενέργεια από την παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα.

Με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας, δεν απαιτείται καύση ορυκτών καυσίμων. Οι σταθμοί παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας εκπέμπουν μόνο περίσσεια ατμού και πολύ λίγα ίχνη αερίων (1,000 με 2,000 φορές λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από ότι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα), καταλαμβάνουν περιορισμένη επιφάνεια σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων, και οι προχωρημένες τεχνικές άντλησης ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις της διάνοιξης πηγαδιών. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι επίσης πιο «διαθέσιμη», καθώς οι συμβατικοί σταθμοί παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά το 65-75% του έτους, σε αντιδιαστολή με το 90% του έτους που την παράγουν οι σταθμοί παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας. Ενώ οι γεωθερμικοί πόροι δεν είναι διάσπαρτοι ομοιόμορφα, οι αντλίες γεωθερμικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν οπουδήποτε.

Σύμφωνα με στοιχεία, παγκοσμίως η υδροηλεκτρική ενέργεια συμβάλλει κατά 19% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το

16% όλης της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται στις ΗΠΑ προέρχεται από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Αυτό είναι μόνο το 30% από αυτό που θα μπορούσε να επιτευχθεί, αν αναπτύσσονταν όλες οι προσφερόμενες δυνατότητες^[10].

Το δυναμικό παραγωγής ενέργειας από βιομάζα είναι τεράστιο. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η βιομάζα θα μπορούσε να αποδώσει 9% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας και 24% των ενεργειακών αναγκών μέχρι το 2020. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση της βιομάζας σε συνδυασμένα συστήματα παραγωγής θερμότητας και ενέργειας είναι η πλέον αποδοτική λύση^[9].

Παρατηρείται λοιπόν η ανάγκη της εξάπλωσης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας αφού κάτι τέτοιο θα αποτελέσει σημαντική συμβολή στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την αλόγιστη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας. Παράλληλα, θα υπάρξει μείωση των εκπομπών αερίων η οποία είναι η κύρια αιτία αλλαγής του κλίματος. Η κλιματική αλλαγή συνιστά καίρια απειλή για το φυσικό περιβάλλον με πολλαπλές επιπτώσεις, όπως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, οι υψηλότερες ακραίες θερμοκρασίες, οι ξηρασίες και οι πιο ραγδαίες και συχνές καταιγίδες.

Ταυτόχρονα οι ΑΠΕ αποτελούν μια ευκαιρία για τις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες που σήμερα εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Μια δραστηριότητα εκμετάλλευσης ΑΠΕ ανοίγει περισσότερες θέσεις εργασίας τοπικά και είναι πολύ λιγότερο επιρρεπής στη διαφθορά και στις κρίσεις. Τέλος, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας δεν ανοίγουν μόνο προοπτικές για την περιβαλλοντικά συμβατή αναδιάρθρωση της ενεργειακής αλυσίδας αλλά συμβάλλουν επίσης στην εκτόνωση εντάσεων στην παγκόσμια αγορά ενέργειας, και κατ' επέκταση σε πολιτική και οικονομική ασφάλεια^[9].

1.2.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, το αιολικό δυναμικό ενός τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες όταν οι άνεμοι πνέουν με μεγαλύτερη από τη μέση ετήσια ταχύτητα 5.1 m/sec σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το έδαφος. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν τέτοιοι άνεμοι της μέσης ετήσιας

ταχύτητας^[11]. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την "πρώτη" περίοδο ωριμότητας, καθώς μπορεί να ανταγωνιστεί τις συμβατικές μορφές ενέργειας.

Είναι γνωστό ότι για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ανέμων σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες. Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην κίνηση των πτερυγίων της, τα οποία περιστρέφονται όταν φυσά δυνατός άνεμος. Η κίνηση αυτή μεταδίδεται σε ένα άξονα περιστροφής που με τη βοήθεια ενός συστήματος προσανατολισμού, βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Η κινητική ενέργεια του άξονα περιστροφής μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα από μια γεννήτρια. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος της είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt.

Συνήθως οι ανεμογεννήτριες απαντώνται σε συστοιχίες οι οποίες ονομάζονται αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα βρίσκονται εγκατεστημένα και λειτουργούν σε περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού και το σύνολο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο. Υπάρχει, όμως, η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα για την κάλυψη ή τη συμπλήρωση ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένων κατοικιών, αγροκτημάτων κ.ο.κ. Στις περιπτώσεις αυτές προκύπτει η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας με την εγκατάσταση μπαταριών.

Οι εντυπωσιακοί ρυθμοί με τους οποίους αναπτύσσεται η αιολική βιομηχανία δεν αφήνουν αμφιβολία ότι είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία. Με το πέρασμα των ετών οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα, έχουν καταστήσει δυνατή την αθόρυβη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών, την αύξηση του μεγέθους τους καθώς και τη μείωση του κόστους εγκατάστασής τους. Επίσης, ολοένα και περισσότερο αναπτύσσονται τεχνολογίες για εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στη θάλασσα, για ελαφρύτερες κατασκευές και για γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Τέλος, η χρήση ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος και τα διάσπαρτα μεγάλα

αιολικά πάρκα αναμένεται ότι θα αυξήσουν σημαντικά τη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Δανίας, που σήμερα καλύπτει σχεδόν το 25% των αναγκών της σε ηλεκτρισμό με αιολική ενέργεια, ενώ ο εθνικός στόχος της χώρας αυτής είναι να καλύπτει το 50% των αναγκών της με αιολική ενέργεια ως το 2030. Ο Ευρωπαϊκός Σύνδεσμος Αιολικής Ενέργειας (EWEA) εκτιμά ότι η εγκατάσταση αιολικών θα αγγίξει τα 180GW το 2020^[12].

Εικόνα 1.1: Το μεγαλύτερο χερσαίο αιολικό πάρκο στον κόσμο. Καλιφόρνια, Η.Π.Α^[13]



1.2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος χρησιμοποίησε την ακτινοβολία του ήλιου είτε άμεσα, για παράδειγμα την ξήρανση τροφών και στέγνωμα ρούχων, είτε έμμεσα μέσω της γεωργίας για την παραγωγή σιτηρών. Αποτελεί λοιπόν την κυριότερη πηγή ενέργειας για τη γη εδώ και εκατοντάδες χρόνια.

Η ηλιακή ακτινοβολία μετά την μετατροπή της σε θερμική ενέργεια, όπως έχει αναφερθεί ήδη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας (θέρμανση χώρου και νερού) και ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατροπή συντελείται μέσω φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων, η εκτεταμένη περιγραφή της λειτουργίας τους όμως δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας. Ενδεικτικά, θα γίνει μια μικρή αναφορά στην πολλά υποσχόμενη και συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων που μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, αντλώντας ηλιακή ακτινοβολία. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι δυνατό να αλλάξει τις

ιδιότητες ορισμένων υλικών παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζουμε τη διαδικασία κατά την οποία το ηλιακό φως που προσπίπτει σε έναν ημιαγωγό δύο στρωμάτων και δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ τους. Η τάση αυτή μπορεί να ενεργοποιήσει μια, ανάλογης τάσης και ισχύος, συσκευή ή να διανεμηθεί στο ηλεκτρικό σύστημα^[14].

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, η ηλιακή ενέργεια δεν αφήνει ενεργειακά κατάλοιπα στο περιβάλλον ενώ η αθόρυβη λειτουργία της χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάρκεια ζωής με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Τα συστήματα μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας εύκολα μπορούν να ενσωματωθούν στην αρχιτεκτονική των κτηρίων και σε περιοχές όπου είναι αδύνατο ή ασύμφορο να μεταφερθεί ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο.

Παρ' όλα αυτά όμως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα κοστίζει πολύ περισσότερο από αυτήν που παράγεται από τη χρήση άλλων ανανεώσιμων ή συμβατικών πηγών ενέργειας. Τέλος, το κόστος κατασκευής τους θεωρείται αρκετά υψηλό.

Πίνακας 1.2.: Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Ηλιακής ενέργειας^[14]

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Μηδενική ρύπανση. • Αθόρυβη λειτουργία. • Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (μέχρι και 30 χρόνια). • Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. • Μπορούν να ενσωματωθούν στην αρχιτεκτονική των κτηρίων. • Έχουν μέγιστη παραγωγή την περίοδο μεγάλης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. • Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου είναι αδύνατο ή ασύμφορο να μεταφερθεί ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο. 	<ul style="list-style-type: none"> • Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα κοστίζει πολύ περισσότερο από αυτήν που παράγεται από τη χρήση άλλων ανανεώσιμων ή συμβατικών πηγών ενέργειας. • Υψηλό κόστος κατασκευής. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται αποθήκευση (αυτόνομα) υπάρχει το επιπρόσθετο κόστος των μπαταριών των οποίων η διάρκεια ζωής δεν υπερβαίνει ποτέ τη χρήσιμη ζωή των πλαισίων, δημιουργώντας επιπρόσθετο κόστος συντήρησης και αντικατάστασής τους.

1.2.4 ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Είναι γνωστό ότι το νερό κάνοντας τον "κύκλο του" στη φύση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε κινητική, όταν από περιοχές με μεγάλο υψόμετρο ρέει προς χαμηλότερες περιοχές^[15]. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιήθηκε από τα αρχαία χρόνια, ενώ σήμερα η χρήση της έχει σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Με τη βοήθεια κάποιων υδροηλεκτρικών έργων όπως ο υδροταμιευτήρας, το φράγμα, ο κλειστός αγωγός πτώσεως, ο υδροστρόβιλος, η ηλεκτρογεννήτρια ή η διώρυγα φυγής, εκμεταλλευόμαστε την ενέργεια του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται στην κατανάλωση μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται δεν είναι αυτόνομη ούτε και η κύρια πηγή ενέργειάς μας, αλλά χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές, συνήθως σε ώρες αιχμής.

Υπάρχουν πολλές μορφές ενέργειας που έχουν σχέση με το νερό:

- Υδροηλεκτρική ισχύς, που παράγεται από νερό που πέφτει.
- Παλιρροϊκή ισχύς που παράγεται από παλίρροιες, οι οποίες σημειώνονται λόγω της βαρυτικής έλξεως της Σελήνης και του Ηλίου.
- Ισχύς από κύματα, που προκαλούνται από την κίνηση νερού προς τις ακτές λόγω του ανέμου.

Σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς, γαιανθράκων ή πετρελαίου, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις ζητηθεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, μέσω των υδροταμιευτήρων υπάρχει η δυνατότητα να ικανοποιηθούν και άλλες ανάγκες όπως ύδρευση και άρδευση. Σε γενικές γραμμές πρόκειται για μια καθαρή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Υπάρχει όμως μεγάλο κόστος στην κατασκευή φραγμάτων και εξοπλισμού των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ενώ μία τέτοια κατασκευή είναι πολύ παρεμβατική απέναντι στο περιβάλλον και καθιστά έντονη την περιβαλλοντική αλλοίωση στην περιοχή του ταμιευτήρα. Η διεθνής πρακτική σήμερα προσανατολίζεται στην κατασκευή μικρών φραγμάτων, αλλά όπως είναι ξεκάθαρο, η εφαρμογή τους είναι δυνατή μόνο σε χώρες με άφθονα νερά και σημαντικές βροχοπτώσεις.

Εικόνα 1.2: Το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο στον κόσμο στην Κίνα^[16]



1.2.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

Η θάλασσα καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της γης και είναι μια τεράστια αποθήκη κινητικής ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια της^[17]:

- τα κύματα,
- τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες),
- τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού.

1.2.5.1 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ

Παρ' όλο ότι τα κύματα είναι μια ισχυρή πηγή ενέργειας δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν για να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλα ποσά. Αυτό έχει ως συνέπεια, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας ηλεκτρικού ρεύματος κυμάτων να είναι σπάνιοι. Η αποτελεσματικότερη μέθοδος παραγωγής ενέργειας από τα κύματα λειτουργεί όπως μια μηχανή κυμάτων πισίνας, παρόλο που υπάρχουν διάφορες μέθοδοι. Έτσι, σε μια πισίνα, ο αέρας διοχετεύεται μέσα και έξω από μια μηχανή, η οποία κάνει το νερό να πραγματοποιεί κίνηση πάνω-κάτω, προκαλώντας κύματα. Παρομοίως, σε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος κυμάτων, η άφιξη των κυμάτων προκαλεί άνοδο και πτώση του νερού εντός του θαλάμου του σταθμού, το οποίο αναγκάζει τον αέρα να κινείται μέσα και έξω από μια τρύπα στην κορυφή του θαλάμου. Σε αυτή τη τρύπα τοποθετείται μία τουρμπίνα, η οποία γυρίζει με την κίνηση του αέρα μέσα-έξω, με αποτέλεσμα η

τουρμπίνα να λειτουργεί ως γεννήτρια^[18]. Το μειονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι ότι ο κινούμενος αέρας μπορεί να είναι πολύ θορυβώδης, εκτός και εάν εγκατασταθεί στο στρόβιλο σιγαστήρας. Υπάρχει όμως και η άποψη ότι ο θόρυβος δεν αποτελεί τόσο μεγάλο πρόβλημα, δεδομένου ότι τα κύματα προκαλούν αρκετό θόρυβο από μόνα τους. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την ταχύτητα του κύματος, το ύψος, το βάθος και τη ροή κάτω από το πλησιάζον κύμα, παράγοντας κατά συνέπεια την ενέργεια αποτελεσματικότερα και φθηνότερα από τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνολογίες. Εκτενέστερη αναφορά θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.2.5.2 ΠΑΛΙΡΡΟΙΑ

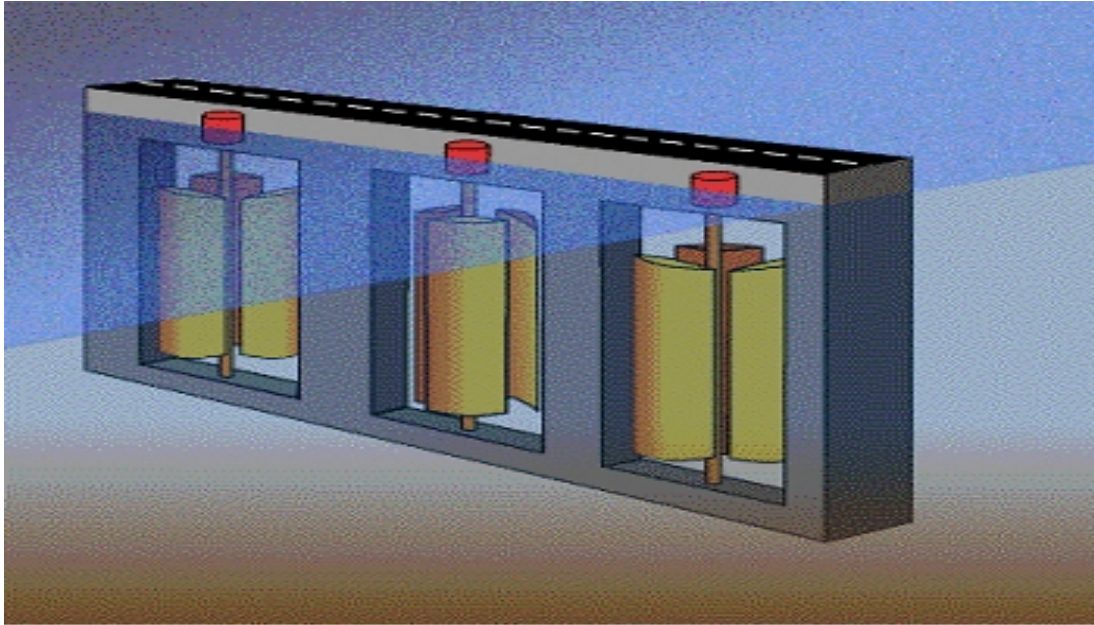
Εδώ και δεκαετίες υπάρχει ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της παλιρροϊκής δύναμης μέσω των παλιρροϊκών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Παλιρροϊκός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής είναι ένας ηλεκτρικός σταθμός ισχύος που μετατρέπει την ενέργεια των παλιρροιών της θάλασσας σε ηλεκτρική ενέργεια, με το να εκμεταλλεύεται τη διαφορά στάθμης του ύδατος κατά τη πλημμυρίδα και την άμπωτη.

Πολλές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί κατά το πέρασμα των χρόνων αλλά σήμερα γνωρίζοντας ότι η παλίρροια ανεβαίνει κάθε δώδεκα ώρες, με συνέπεια τα ρεύματα να φθάνουν στη μέγιστη ταχύτητά τους τέσσερις φορές κάθε ημέρα, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές τεχνολογίες με σκοπό την εκμετάλλευση της ενέργειας αυτών των ρευμάτων: οι παλιρροϊακοί φράκτες και οι παλιρροϊακοί στρόβιλοι^[19].

Οι παλιρροϊακοί φράκτες δεν είναι τίποτα άλλο από φράγματα που εμποδίζουν εντελώς ένα κανάλι. Όμως στην περίπτωση που η επέκτασή τους φτάνει πέρα από το στόμιο μιας εκβολής, παρεμβαίνουν τόσο στο περιβάλλον ώστε να είναι καταστροφικοί. Παρ' όλα αυτά, από τη δεκαετία του '90 ήδη, θεωρείται ως η πιο βιώσιμη επιλογή για την παραγωγή μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας σε κανάλια μεταξύ μικρών νησιών ή μεταξύ ηπειρωτικής χώρας και νησιού. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός ενός παλιρροϊκού φράκτη, ο οποίος περιλαμβάνει τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές, μπορεί

να κρατηθεί πάνω από το νερό. Επίσης, μπορούμε να αυξήσουμε την τρέχουσα ταχύτητα μέσω των στροβίλων εάν μειώσουμε τη διατομή του καναλιού.

Εικόνα 1.3: Παλιρροϊκοί φράκτες^[20]



Ο κύριος ανταγωνιστής των παλιρροϊκών φρακτών είναι οι παλιρροϊκοί στρόβιλοι. Η μορφή τους θυμίζει υποβρύχια τουρμπίνα ενώ τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν συγκρινόμενα με τον παλιρροϊκό φράκτη είναι πολλά. Πρώτα απ' όλα είναι λιγότερο παρεμβατικοί και καταστρεπτικοί όσον αφορά στο περιβάλλον, αφού επιτρέπουν στις μικρές βάρκες την διόδό τους στην περιοχή. Επίσης, οι υλικές απαιτήσεις τους είναι πολύ χαμηλότερες από τον παλιρροϊκό φράκτη. Οι παλιρροϊκοί στρόβιλοι τείνουν να είναι αποδοτικότεροι σε περιοχές όπου τα παράκτια ρεύματα κινούνται με ταχύτητα 2-2.5 m/s. Έχει παρατηρηθεί ότι τα πιο αργά ρεύματα τείνουν να είναι αντισυμβατικά ενώ τα μεγαλύτερα δημιουργούν πολλή πίεση στον εξοπλισμό. Καθώς τα παλιρροϊκά ρεύματα χαρακτηρίζονται από μια αξιοπιστία και προβλεψιμότητα, γνώρισμα που τους δίνει πλεονέκτημα συγκρινόμενα με τα αιολικά και ηλιακά συστήματα, είναι ικανά να παρέχουν μια ενεργειακή πυκνότητα τέσσερις φορές μεγαλύτερη από τον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι ένας στρόβιλος διαμέτρου 15m θα παραγάγει τόση ενέργεια όσο ένας ανεμόμυλος διαμέτρου 60m. Τέλος, η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων βρίσκεται

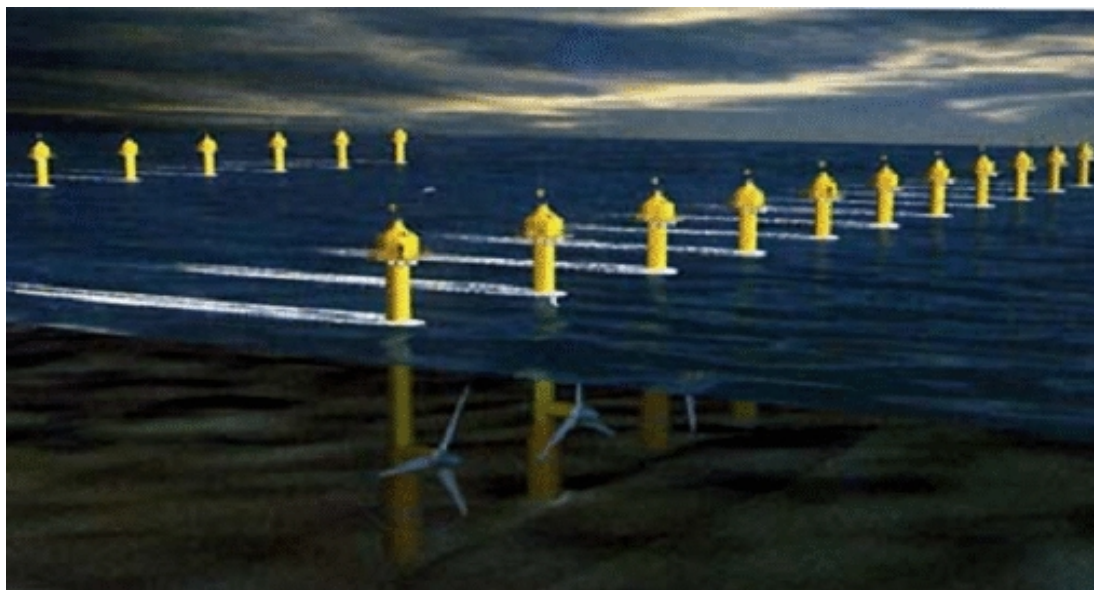
κρυμμένη κάτω από την ίσαλο γραμμή ενώ οι καλωδιώσεις τοποθετούνται κατά μήκος του βυθού, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα^[21].

Γενικά, βέβαια, τα πλεονεκτήματα από την ενέργεια των κυμάτων είναι πολλά με σημαντικότερο αυτό της φιλικότητας προς το περιβάλλον, καθώς κατά τη λειτουργία της μονάδας δεν δημιουργούνται απόβλητα. Αναλυτικότερα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 1.3: Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα ενέργειας κυμάτων^{[18],[19]}

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΥΜΑΤΩΝ	
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Η ενέργεια είναι δωρεάν καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα είδος καύσιμης ύλης. • Δεν είναι ακριβή η λειτουργία και η συντήρηση των μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσω των θαλάσσιων κυμάτων • Είναι φιλικά προς το περιβάλλον καθώς κατά τη λειτουργία της μονάδας δεν παράγονται απόβλητα • Δίνεται η δυνατότητα παράγωγης ενός μεγάλου ποσού ενέργειας • Αποθέματα της πρώτης ύλης (νερό) υπάρχουν σε αφθονία σε παγκόσμια κλίμακα δεδομένου ότι το 75% της επιφάνειας του πλανήτη μας είναι υδάτινο. • Σύντομο χρονικό διάστημα από το στάδιο της έρευνας μέχρι την εγκατάσταση και τη λειτουργία μίας τέτοιας μονάδας. • Προστατεύουν την ακτή στην οποία βρίσκονται, πράγμα πολύ χρήσιμο σε λιμάνια • Δεν δημιουργούν προβλήματα στις μετακινήσεις των ψαριών (εκτός από τα παλιρροϊκά φράγματα) • Η κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία προστατευμένων υδάτινων περιοχών οι οποίες είναι ελκυστικές για διάφορα είδη ψαριών και υδρόβιων πουλιών. 	<ul style="list-style-type: none"> • Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη δύναμη των κυμάτων, καθώς άλλες φορές παίρνουμε μεγάλα πόσα ενέργειας και άλλες φορές μηδενικά. Αντίστοιχα, η στη παλίρροια εξαρτάται από την κίνηση των υδάτων • Απαιτείται προσεκτική επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης της μονάδας, καθώς θα πρέπει στην πρώτη περίπτωση να έχουμε δυνατά κύματα ενώ στη δεύτερη θα πρέπει να εμφανίζονται τα φαινόμενα της παλίρροιας και της άμπωτης • Πολλές από τις εγκαταστάσεις είναι θορυβώδεις • Οι εγκαταστάσεις πρέπει να κατασκευάζονται με ειδικό τρόπο ώστε να αντέχουν στις δύσκολες καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπίσουν • Το κόστος μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας στη στεριά είναι πολύ υψηλό.

Εικόνα 1.4: Παλιρροιακό στρόβιλο^[21]



1.2.5.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΝΕΡΟΥ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Ακόμα μια ενέργεια η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί είναι η θερμική ενέργεια των ωκεανών, στην περίπτωση που εκμεταλλευτούμε τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα^[22]. Η τεχνολογία μετατροπής της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιεί σε πρώτη φάση το θερμό νερό για να ζεστάνει σε ειδικό θάλαμο μια ποσότητα υγρού που έχει χαμηλό σημείο βρασμού, όπως η αμμωνία ή ένα μείγμα αμμωνίας και νερού. Όταν το μείγμα αυτό βράσει, το αέριο που απελευθερώνεται δημιουργεί αρκετή πίεση ώστε να οδηγήσει έναν αεριοστρόβιλο ο οποίος παράγει την ενέργεια. Στη συνέχεια το αέριο αυτό παγώνει καθώς διέρχεται μέσα από το ψυχρό νερό του πυθμένα του ωκεανού.

1.2.6 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ενέργεια που βρίσκεται υπό μορφή θερμότητας, κάτω από την επιφάνεια της γης ονομάζεται γεωθερμική. Αποτελεί μια σημαντική Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας που βρίσκει χρήση στην ψύξη και στη θέρμανση. Συναντάται στο εσωτερικό της Γης υπό μορφή νερών, ατμών, αερίων ή μειγμάτων αερίων ή ακόμα και ως ενέργεια από τα πετρώματα.

Η γεωθερμική ενέργεια βρίσκει ποικίλες εφαρμογές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο αριθμό δραστηριοτήτων. Σε πολλές από αυτές γίνεται αξιοποίηση της θερμότητας των ρευστών, χωρίς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτές περιλαμβάνονται η θέρμανση χώρων (κτηρίων, εγκαταστάσεων), αγροτικές χρήσεις (θέρμανση θερμοκηπίων, ξήρανση αγροτικών προϊόντων, υπεδάφια θέρμανση, θέρμανση κτηνοτροφικών και πτηνοτροφικών μονάδων), υδατοκαλλιέργειες, βιομηχανικές χρήσεις (π.χ. αφαλάτωση νερού, επεξεργασία γάλακτος, χώνευση βιολογικής λάσπης, ανάκτηση πετρελαίου, ξήρανση ξυλείας) και λουτροθεραπεία (ιαματικά λουτρά, πισίνες)^[23].

1.2.7 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ

Οποιοδήποτε υλικό προερχόμενο από ζωντανούς οργανισμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας ονομάζεται βιομάζα. Τέτοια είναι το ξύλο ή άλλα δασικά προϊόντα, αγροτικά υπολείμματα, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων, αστικά απόβλητα κλπ. Η βιομάζα αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και είναι γνωστή στον άνθρωπο εδώ και πάρα πολλά χρόνια ^[24].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεδομένων των περιβαλλοντικών αλλαγών που υφίσταται ο πλανήτης αλλά και των υψηλών τιμών άλλων καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, η εκμετάλλευση της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας είναι ικανή να ικανοποιήσει άμεσα την παγκόσμια απαίτηση για ανανεώσιμες και καθαρές μορφές ενέργειας αλλά και την αναγκαιότητα εξασφάλισης νέων ενεργειακών πηγών, καθώς αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μορφή ΑΠΕ. Σε αντίθεση με μια χερσαία ανεμογεννήτρια, για την κατασκευή θαλάσσιων ανεμογεννητριών απαιτείται εφαρμοσμένη μηχανική όσον αφορά στην υποδομή, την τοποθέτηση, την ηλεκτρική σύνδεση και τη χρήση υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Εάν αναλογιστούμε ότι η δύναμη και η ταχύτητα των θαλάσσιων ανέμων είναι συγκριτικά μεγαλύτερη από αυτήν των ανέμων στη στεριά, είναι εύκολο να κατανοήσουμε γιατί τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αύξηση του αριθμού τόσο των μελετών όσο και της τοποθέτησης των θαλάσσιων ανεμογεννητριών.

Αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό θα λέγαμε ότι αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Το όνομά της προέρχεται από τον Αίολο, ο οποίος σύμφωνα με την ελληνική μυθολογία ήταν ο θεός του ανέμου. Δεν εκπέμπει ή δεν προκαλεί καθόλου ρύπους και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μηδαμινές συγκριτικά με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Για αυτό χαρακτηρίζεται ήπια μορφή ενέργειας ενώ κατατάσσεται στις καθαρές πηγές. Η εκμετάλλευσή της ξεκινάει από την αρχαιότητα και φτάνει ως τις μέρες μας^[25].

Όταν, μετά τις απαραίτητες μετρήσεις και μελέτες κριθεί μια περιοχή ως κατάλληλη για αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού, τοποθετείται μια συστοιχία ανεμογεννητριών, η οποία συνηθίζεται να ονομάζεται αιολικό πάρκο. Επίσης, πριν την εγκατάσταση οποιασδήποτε μονάδας ΑΠΕ θα πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί η ανάλογη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Αυτό είναι απαραίτητο, διότι οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή θανατώσεις πουλιών, συνηθέστερα στα αποδημητικά είδη, καθώς τα ενδημικά

συνηθίζουν την παρουσία των μηχανών και τις αποφεύγουν. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος που θα επέλθει στην περιοχή, αφού για να αποπερατωθεί ένα τέτοιο έργο θα πρέπει να κοπούν δέντρα ή γενικώς να καταστραφεί μέρος της γης. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας και την αυστηρότερη επιλογή του τόπου εγκατάστασης τα παραπάνω προβλήματα, αλλά και ο θόρυβος από τη λειτουργία των μηχανών, έχουν σχεδόν λυθεί.

Πίνακας 2.1.: Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Αιολικής ενέργειας^[25]

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα (δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέριους ρύπους, παρέχει προστασία έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων). • Ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. • Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας. • Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κάθε χώρας. • Δημιουργεί θέσεις απασχόλησης στην περιφέρεια. • Σύστημα παραγωγής ενέργειας με μικρές απώλειες. • Ανεξάρτητη από κεντρικά δίκτυα διανομής. • Χρήση μεγαλύτερων σε ισχύ Α/Γ για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας όπου το δυναμικό του ανέμου είναι ισχυρότερο, σταθερότερο και με μικρότερη τύρβη σε σχέση με αυτό των παράκτιων εγκαταστάσεων. • Απουσία εδαφικών και περιβαλλοντικών περιορισμών • Αποφυγή οπτικής όχλησης και θορύβου σε περίπτωση εγκατάστασης σε απομακρυσμένη από την ξηρά τοποθεσία. 	<ul style="list-style-type: none"> • Το ποσοστό των πουλιών που σκοτώνονται ετησίως από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες είναι ασήμαντο (0.5%) σχετικά με το αυτό που οφείλεται σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (60%). Πάντως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση τυχόν προστατευόμενες περιοχές και να εξετάζεται η τοποθέτηση συστήματος υπερήχων • Η απρόβλεπτη διακύμανση ενέργειας που δίνουν οι αιολικές μηχανές • Σχετικά υψηλό κόστος έρευνας του αιολικού δυναμικού και εγκατάστασης της μηχανής. • Δυσκολία προσβασιμότητας και υψηλό κόστος για την συντήρηση και επισκευή της κατασκευής. • Συχνότερη συντήρηση καθώς εκτός ότι επιδέχονται φορτίσεις από τον άνεμο, υπόκεινται και σε υδροδυναμική φόρτιση από κύματα και θαλάσσια ρεύματα.

2.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η κατασκευή αιολικών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άνεμο σε υδάτινο περιβάλλον και όχι στην ξηρά, ονομάζεται υπεράκτια αιολική ενέργεια (offshore wind turbine). Τέτοιες κατασκευές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε περιοχές ρηχών υδάτων, όπως λίμνες, φιόρδ και προστατευμένες παράκτιες περιοχές, αλλά και σε περιοχές βαθέων υδάτων, όπου γίνεται χρήση πλωτών σωμάτων στήριξης ανεμογεννητριών ^[26].

Σήμερα έχουμε στραφεί στη δημιουργία θαλάσσιων αιολικών πάρκων κυρίως γιατί η περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια προέρχεται από τη θάλασσα. Ο άνεμος πάνω από την ανοιχτή θάλασσα δεν συναντά εμπόδια και η μόνη περίπτωση απώλειας ενέργειας είναι λόγω της τριβής του με την επιφάνεια της θάλασσας (δημιουργία κυμάτων). Με βάση αυτό το γεγονός, εύκολα γίνεται κατανοητό ότι οι ταχύτητες των ανέμων πάνω από την ανοιχτή θάλασσα είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτών της ξηράς. Επίσης, η περιβαλλοντική επιβάρυνση αυτών των περιοχών από τα χερσαία αιολικά πάρκα, εδώ δεν υφίσταται καθώς έχουμε απουσία εδαφικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Η θάλασσα είναι απέραντη, διαθέσιμη και συνεχής. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα η εγκατάσταση να γίνει εκτός της πορείας μεταναστευτικών πουλιών, μειώνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τον κίνδυνο θανάτωσής τους. Εάν το υπεράκτιο αιολικό πάρκο εγκατασταθεί σε επαρκή απόσταση από την ξηρά, καταφέρνουμε να αποφύγουμε την οπτική όχληση αλλά και το θόρυβο. Οι Α/Γ των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορούν να λειτουργήσουν και ως τεχνητοί ύφαλοι για τα θαλάσσια είδη. Βέβαια, αυτό μπορεί να συμβεί μακροπρόθεσμα αφού πρόσκαιρα, ενδέχεται να αποτελέσουν εμπόδιο στον τομέα της αλιείας ή να προκαλέσουν διαταραχή του υποθαλάσσιου συστήματος ειδικά κατά την περίοδο της εγκατάστασής τους ^{[26] [27] [28]}.

Οπότε τίθεται το ερώτημα εάν τα πλεονεκτήματα από τη λειτουργία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορούν να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα που προκύπτουν. Χρειάζεται, βέβαια, υψηλό επενδυτικό κεφάλαιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη σχεδιασμού των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, την περιπλοκότητα κατασκευής τους, την έδραση/θεμελίωση και τον παροπλισμό τους. Επιπλέον, ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι δυσκολότερα προσβάσιμο από

ότι ένα χερσαίο, κάτι που αυξάνει τις εργασίες και τις δαπάνες συντήρησης και, ενδεχομένως, το χρόνο διακοπής λειτουργίας των μηχανών. Τέλος, οι υπεράκτιες Α/Γ πρέπει να αντέχουν συνθήκες φόρτισης όπως η υδροδυναμική φόρτιση από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα^[29].

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους βιομηχανικούς κλάδους με πρωτοπόρο την Ευρώπη. Προβλέπεται από την EWEA ότι το 2020 και το 2030 θα λειτουργούν στην ΕΕ υπεράκτια αιολικά συνολικής ισχύος 40 GW και 150 GW, τα οποία θα αντιπροσωπεύουν το 30% και το 60% του αιολικού δυναμικού που θα εγκαθίσταται ετησίως και θα ικανοποιούν το 4% και το 14% της κατανάλωσης ηλεκτρισμού στην ΕΕ, παράγοντας ηλεκτρισμό αρκετό για να τροφοδοτούνται 39 εκατομμύρια και 145 εκατομμύρια νοικοκυριά, αντιστοίχως. Για το 2050, η πρόβλεψη είναι: ισχύς των υπεράκτιων 460 GW και συνολική συνεισφορά των αιολικών 50% στην παραγωγή ηλεκτρισμού^[30].

2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

2.3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου και αυτά αφορούν στις ταχύτητες ανέμου, στην κλίμακα τεχνολογίας, στην απόσταση των ανεμογεννητριών, στο βάθος και στη μορφολογία του πυθμένα, στην πρόσβαση για συντήρηση, στην οπτική όχληση, στο θόρυβο, επιπτώσεις στο οικοσύστημα και θεσμικούς περιορισμούς^[31].

Ταχύτητες Ανέμου

Πρώτα απ' όλα πρέπει να εντοπιστούν από το φορέα ανάπτυξης του πάρκου τοποθεσίες τέτοιες στις οποίες πνέουν άνεμοι με τις πλέον κατάλληλες μέσες ταχύτητες^[31]. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες απαιτούν μία ταχύτητα ανέμου 4-5 m/s για την εκκίνησή τους, όμως συνιστάται για την παραγωγή ηλεκτρισμού για μεγαλύτερη χρονική περίοδο καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους, να γίνεται η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε τόπους όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 7 m/s ή μεγαλύτερη. Αυτό είναι απαραίτητο για τη μείωση του συνολικού

κόστους ανά κιλοβατώρα (kWh).

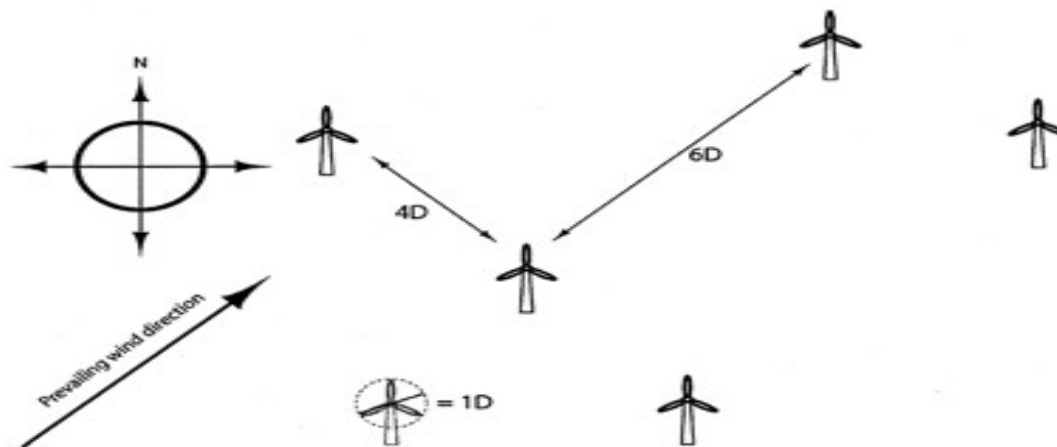
Κλίμακα Τεχνολογίας

Για να υπάρξει οικονομική απόδοση ενός υπεράκτιου έργου, πρέπει να χρησιμοποιούνται σε γενικές γραμμές μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος πολλών MW, παρ' όλο που το μέγεθος των σύγχρονων ανεμογεννητριών κυμαίνεται από τις μικρές μηχανές που αποδίδουν ισχύ λίγων εκατοντάδων W έως τις πολύ μεγάλες μηχανές ονομαστικής ισχύος πέντε MW ή περισσότερο. Γενικά προτιμάται ένα αιολικό πάρκο το οποίο αποτελείται από μεγάλες ανεμογεννήτριες παρά από πολλές μικρές. Υπάρχει η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να εγκαθίστανται ως μονάδες ή ως συστοιχίες απαρτιζόμενες από πολλές μηχανές με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αναχαιτιζόμενης επιφάνειας του ανέμου. Στην περίπτωση των μεγάλων υπεράκτιων αιολικών πάρκων, μπορούν να υπάρχουν δυναμικότητες αρκετών GW.

Απόσταση Ανεμογεννητριών

Για να αποφευχθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης με αποτέλεσμα αφενός την ελάττωση της παραγωγής και αφετέρου την ελάττωση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών λόγω αυξημένης φόρτισής τους, λαμβάνουμε υπόψη τις επιπτώσεις από τη δημιουργία όμορου μεταξύ των ανεμογεννητριών και αποδεχόμαστε μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ αυτών. Δεδομένου ότι μια ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική, ο άνεμος έχει προσπεράσει ήδη την ανεμογεννήτρια και έχει λιγότερη ενέργεια απ' ότι πριν φτάσει σε αυτή. Κατά συνέπεια, μια ανεμογεννήτρια θα ρίχνει πάντα μια σκιά ανέμου στην υπήνεμη πλευρά της^[32]. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών καθορίζεται ανάλογα με την διάμετρο των πτερυγίων τους, την εκτιμώμενη ή συνήθη κατεύθυνση του ανέμου ή και τις όποιες ιδιαιτερότητες του κάθε αιολικού πάρκου.

Εικόνα 2.1: Παράδειγμα διάταξης ανεμογεννητριών με επικρατούντες ανέμους νοτιοδυτικής κατεύθυνσης^[32]



Βάθος και μορφολογία πυθμένα

Είναι πολύ σημαντικό να προηγηθεί εδαφική και σεισμική μελέτη της εγκατάστασης της Α/Γ καθώς οι επιλογές που υπάρχουν για τις κατασκευές έδρασης είναι περιορισμένες και επηρεάζουν εξαιρετικά το συνολικό κόστος. Επομένως, το βάθος και η φύση του βυθού της θάλασσας είναι παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται.

Πρόσβαση για συντήρηση

Εξίσου σημαντική είναι η μελέτη που θα καθορίσει την απόσταση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας από την ακτή και στους σταθμούς εξυπηρέτησης, αφού μια λάθος μελέτη μπορεί να επηρεάσει τόσο το χρόνο όσο και το κόστος της κατασκευής του αιολικού πάρκου, καθώς και τις εργασίες συντήρησης. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσουν στην ανάγκη κατασκευής πλωτών εγκαταστάσεων συντήρησης, ιδίως για τα μεγάλα αιολικά πάρκα.

Οπτική όχληση

Αν και δεν είναι τόσο σημαντικός παράγοντας όπως στα χερσαία πάρκα, μπορεί και εδώ να υπολογίζεται η ζώνη του οπτικού αντίκτυπου υπό τη μορφή χάρτη. Η απόσταση που θα έχει η περιοχή εγκατάστασης από την ακτή πρέπει να είναι ^[33]:

$$L > \sqrt{(2HR)}$$

L: η απόσταση από την ακτή,

R :η ακτίνα της γης

H: το ύψος του δρομέα

Θόρυβος

Αποτελεί έναν λιγότερο σημαντικό παράγοντα, δεδομένου ότι ο θόρυβος που δημιουργείται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί. Παρ' όλα αυτά, τα επίπεδα του θορύβου μπορούν να υπολογιστούν και να εξεταστούν, έτσι ώστε το πάρκο να είναι συμβατό με τα αποδεκτά επίπεδα ήχου όπως ορίζονται από την εθνική νομοθεσία, κυρίως για την επιρροή τους στη θαλάσσια ζωή.

Επιπτώσεις στο οικοσύστημα

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, το αιολικό πάρκο ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στο οικοσύστημα, καθώς μπορεί να ταραξεί την μέχρι τώρα ζωή των ψαριών, των θαλάσσιων θηλαστικών και των πτηνών που βρίσκονται στην περιοχή αλλά μακροπρόθεσμα μπορεί να λειτουργήσει ως ένας τεχνητός ύφαλος, δημιουργώντας θαλάσσια ζωή γύρω του^[34].

Θεσμικοί περιορισμοί

Οι διάφοροι περιορισμοί που ισχύουν διαφέρουν από χώρα σε χώρα αλλά στο γενικευμένο σύνολό τους αφορούν στην τοποθέτηση των υπεράκτιων κατασκευών όπως η εμπορική ναυτιλία, η αλιεία και αναπαραγωγή ψαριών, η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, οι προστατευόμενες περιοχές, η εθνική άμυνα, η αισθητική παρέμβαση. Φυσικά, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ναυσιπλοΐα, η αλιεία και οι δρόμοι του θαλάσσιου εμπορίου αφού, ανάλογα με το μέγεθος του αιολικού πάρκου, είναι πιθανό να επηρεάζονται τα δρομολόγια των εμπορικών πλοίων.

2.4 ΦΟΡΤΙΑ

Για την κατασκευή μιας υπεράκτια ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα μια λεπτομερής και αναλυτική μελέτη, στην οποία θα υπολογίζονται όλα τα πιθανά φορτία τα οποία μπορεί να δεχτεί η ίδια η κατασκευή. Τα φορτία αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα φορτία περιβάλλοντος και τα φορτία κατασκευής^[35].

Τα περιβαλλοντικά φορτία που ασκούνται στην κατασκευή και μπορεί να

διαφέρουν σε μέγεθος και κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου και τα οποία σχετίζονται με τις λειτουργίες και την κανονική χρήση της κατασκευής είναι τα φορτία ανέμου, τα υδροδυναμικά φορτία που παράγονται από κύματα και ρεύματα (συμπεριλαμβανομένων των δυνάμεων αντίστασης και αδράνειας), τα σεισμικά φορτία, τα φορτία παραγόμενα από ρεύματα, τα παλιρροιακά φαινόμενα, η θαλάσσια ανάπτυξη και τα φορτία λόγω χιονιού και πάγου.

Τα φορτία κατασκευής είναι φορτία που εμφανίζονται με την ύπαρξη της κατασκευής και των φορτίων που επάγονται πάνω της κατά την εκπλήρωση της αποστολής της. Αυτά είναι τα φορτία λόγω βάρους της κατασκευής, τα φορτία λόγω βάρους του εξοπλισμού, τα δυναμικά ή στατικά φορτία κατά τη διάρκεια εκτέλεσης εργασιών και οι αντιδράσεις στη δράση των λειτουργικών φορτίων (π.χ. άντωση).

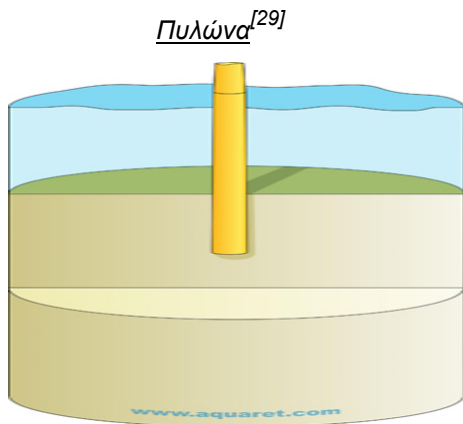
2.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Αρχικά οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις πρέπει να είναι ήδη τοποθετημένες στη θέση εγκατάστασης για να μπορέσει να ξεκινήσει η συναρμολόγηση της Α/Γ. Τα περισσότερα συστατικά τμήματα κατασκευάζονται στην ξηρά, συμπεριλαμβανομένης της ατράκτου, η οποία όμως συναρμολογείται εξ ολοκλήρου πριν τη μεταφορά της στο σημείο εγκατάστασης. Όλα τα άλλα συστατικά τμήματα μεταφέρονται και στη συνέχεια συναρμολογούνται επί τόπου, αφού έχουν ολοκληρωθεί και κατασκευαστεί με ασφάλεια οι εδράσεις. Αφού μεταφερθούν όλα τα τμήματα (η μονταρισμένη άτρακτος, ο πύργος, η πλήμνη και τα πτερύγια του ρότορα) αρχίζει η συναρμολόγηση κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στα χερσαία αιολικά πάρκα. Ο πύργος, ο οποίος μπορεί να αποτελείται από 2 ή περισσότερα τεμάχια, ανυψώνεται και στερεώνεται στις δομές έδρασης. Σειρά έχει η άτρακτος και τα πτερύγια ^[29].

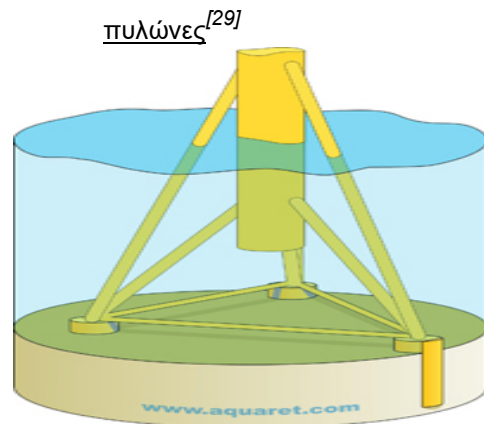
Η κύρια διαφορά μεταξύ των υπεράκτιων και των χερσαίων σχεδίων ανεμογεννητριών είναι η έδραση ή αλλιώς θεμελίωση. Λόγω του βάθους και του υλικού του θαλάσσιου πυθμένα οι υπεράκτιες Α/Γ απαιτούν διαφορετικούς τύπους κατασκευών έδρασης από τις χερσαίες που απαιτούν μεγάλες κατασκευές

έδρασης από σκυρόδεμα. Παραδείγματα βασικών αρχών έδρασης παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Όπως φαίνεται, στις κατασκευές έδρασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών συγκαταλέγονται οι μονοί πυλώνες, τα τρίποδα, οι θεμελιώσεις βαρύτητας από σκυρόδεμα και οι πλωτές δομές έδρασης.

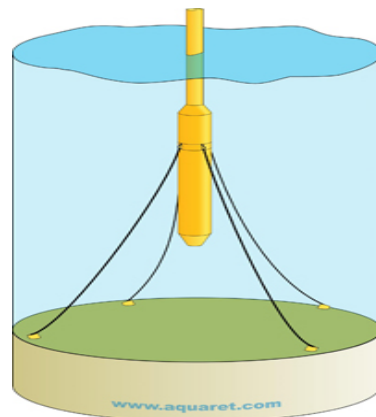
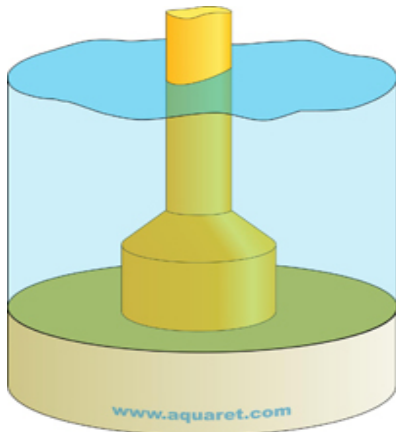
Εικόνα 2.2 :Κατασκευή έδρασης μονού



Εικόνα 2.3 :Κατασκευή έδρασης με πολλούς



Εικόνα 2.4 : Κατασκευές που βασίζονται έδρασης^[29] Εικόνα 2.5: Πλωτή κατασκευή έδρασης^[29]



Οι δυσκολίες όμως προκύπτουν κατά τη μεταφορά των συστατικών τμημάτων στο σημείο εγκατάστασης. Από τη στιγμή που οι βάσεις έδρασης είναι έτοιμες να στηρίξουν τον πύργο και τις άλλες συνιστώσες, πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικά πλοία, ακόμα και φορηγίδες, για να καταστεί δυνατή η μεταφορά των συστατικών τμημάτων. Επίσης, ακόμα πιο εξειδικευμένος εξοπλισμός, ο οποίος περιλαμβάνει γερανούς και άλλα ανυψωτικά μηχανήματα, απαιτείται για να ολοκληρωθεί και η τελική συναρμολόγηση. Κατασκευές αγκυροβολίας είναι απαραίτητες μόνο στην περίπτωση των πλωτών ανεμογεννητριών.

2.6 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

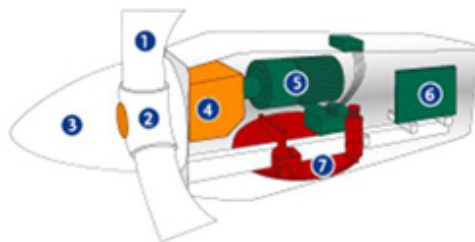
Στη συνέχεια θα περιγραφεί η αρχή λειτουργίας των Α/Γ η οποία είναι αρκετά απλή. Η πνοή του ανέμου δίνει ώθηση περιστροφής στον ρότορα (δρομέα) που, με τη σειρά του, περιστρέφει τον κύριο άξονα. Ο κύριος άξονας είναι συνδεδεμένος στην πλήμνη του ρότορα. Η κίνηση του άξονα του ρότορα μεταδίδεται στη γεννήτρια, μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων, η οποία παράγει ηλεκτρισμό^[29]. Έχουν υπάρξει σχεδιάσεις Α/Γ τόσο κατακόρυφου άξονα όσο και οριζόντιου. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εγκαταλείφθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990 λόγω της αεροδυναμικής τους ανεπάρκειας, καθώς το εύρος της γωνίας προσβολής μεταξύ του ανέμου και των πτερυγίων του ρότορα είναι πολύ μεγάλο^[36].

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να εφαρμοστούν με πολλές και διαφορετικές αρχές σχετικά με τη λειτουργία τους και για αυτό διακρίνονται σε αρκετές κατηγορίες. Υπάρχουν προσήνεμες ανεμογεννήτριες με τα πτερύγια αντίκρου στον άνεμο και υπήνεμες ανεμογεννήτριες στις οποίες συμβαίνει το αντίθετο, καθώς ο άνεμος ρέει από το πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας προς τους δρομείς. Άλλη μια κατηγοριοποίηση των Α/Γ γίνεται ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης της ισχύος τους σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Μια τέτοια κατηγορία είναι οι ανεμογεννήτριες ρύθμισης μέσω αποκόλλησης της ροής (stall-regulated). Αυτές χαρακτηρίζονται από τη σταθερή γωνία βήματος των πτερυγίων του ρότορα. Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, τα πτερύγια σταδιακά παθαίνουν απώλεια στήριξης και έτσι ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες μεταβλητού βήματος στις οποίες, αντί της χρήσης μιας σταθερής γωνίας δρομέα, μεταβάλλεται η γωνία προκειμένου να ρυθμιστεί η ισχύς της ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 2.2.: Τύποι ανεμογεννητριών^[36]

ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Πανεμόνιο • Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο • Μηχανές τύπου Savonius • Μηχανές τύπου Lafond • Μηχανές τύπου Darrieus • Προφυλαγμένες μηχανές • Μηχανές με κινούμενα πτερύγια • Μηχανές Tornado 	<ul style="list-style-type: none"> • Ανεμόμυλος • Αργές αιολικές μηχανές • Γρήγορες αιολικές μηχανές • Μονόπτερες αιολικές μηχανές • Μηχανές με εγκάρσιες επιφάνειες • Μηχανές με χωνί διάχυσης

Εικόνα 2.6.: Τυπική απράκτου Α/Γ^[37]

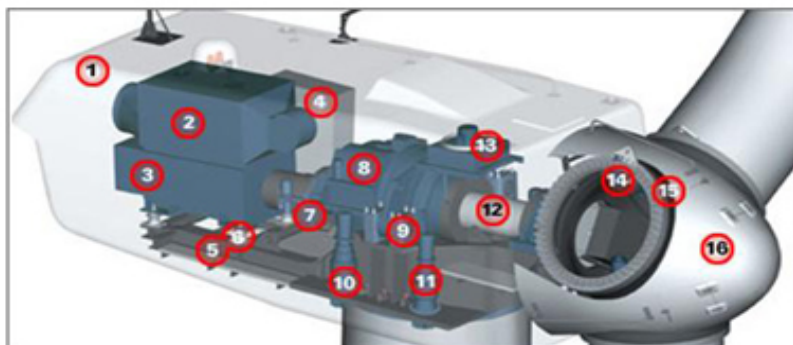


1 Blade 2 Hub 3 Spinner 4 Gearbox
5 Generator 6 Controller 7 Yaw bearing

Kentish Flats wind farm website



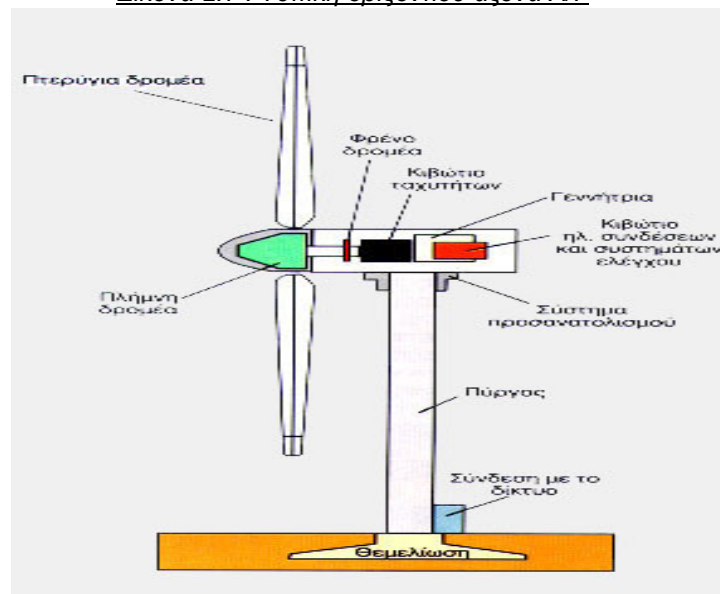
Horns Rev wind farm website



1. Nacelle
2. Heat Exchanger
3. Generator
4. Control Panel
5. Main Frame
6. Impact Noise Insulation
7. Hydraulic Parking Brake
8. Gearbox
9. Impact Noise Insulation
10. Yaw Drive
11. Yaw Drive
12. Rotor Shaft
13. Oil Cooler
14. Pitch Drive
15. Rotor Hub
16. Nose Cone

GE wind energy website

Εικόνα 2.7 : Τυπική οριζοντίου άξονα Α/Γ^[37]



2.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΣΕ ΡΗΧΟ ΝΕΡΟ

2.7.1 ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ - STEEL JACKET

Τα έξι βασικά κατασκευαστικά στάδια της διαδικασίας κατασκευής ενός μεταλλικού πύργου ή μιας θαλάσσιας πλατφόρμας επί πασσάλων είναι τα εξής^[38]:

1. συναρμολόγηση του φορέα στην ξηρά
2. φόρτωση - στερέωση σε πλωτό μέσο, και μεταφορά (ή ρυμούλκηση) στη θέση εγκατάστασης
3. εκφόρτωση και ανύψωση
4. πόντιση
5. έδραση στο θαλάσσιο πυθμένα
6. κατασκευή της μόνιμης θεμελίωσης.

Η έδραση των φορέων αυτών γίνεται συνήθως με μόνιμους πασσάλους, ενώ για την προσωρινή θεμελίωσή τους στον πυθμένα χρησιμοποιούνται προσωρινοί πάσσαλοι ή επιφανειακές θεμελιώσεις. Η συναρμολόγησή τους γίνεται με συγκόλληση των μεταλλικών μελών τους και λαμβάνει χώρα στη ξηρά και στη συνέχεια μεταφέρονται στην θέση εγκατάστασης τους με πλωτά μέσα. Εκεί

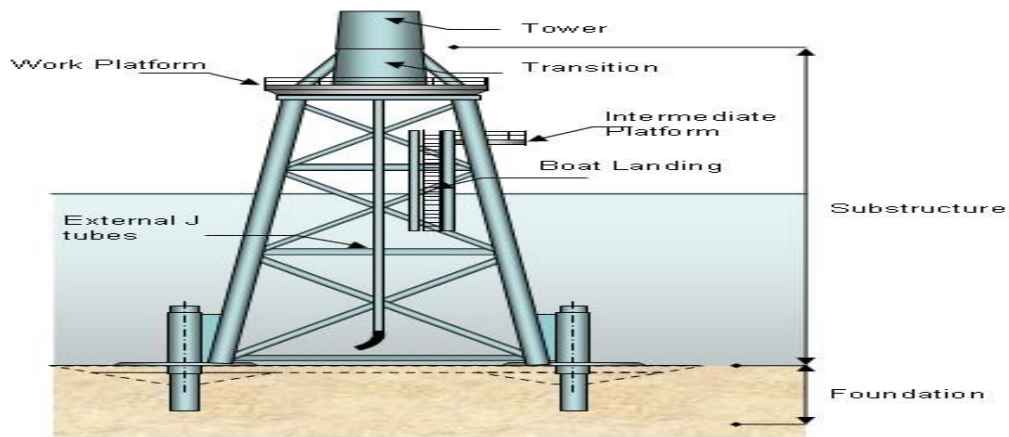
ποντίζονται και εδράζονται προσωρινά στον θαλάσσιο πυθμένα μέχρι την κατασκευή της μόνιμης έδρασης. Εάν τα κύρια μέλη του φορέα είναι σχετικά μικρής διαμέτρου, οι πάσσαλοι της μόνιμης θεμελίωσης κατασκευάζονται εξωτερικά του μεταλλικού πύργου μέσω μόνιμων βραχιόνων στήριξης προσαρτημένων στη βάση των κατακόρυφων μελών του πύργου.

Η μέθοδος κατασκευής και ο τύπος των πασσάλων εξαρτάται κυρίως από το υλικό και το βάθος του πυθμένα θεμελίωσης. Στην περίπτωση βαθιών εδαφικών αποθέσεων χρησιμοποιούνται μεταλλικοί εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι, ενώ φρεατοπάσσαλοι, δηλαδή πάσσαλοι με διάτρηση και επιτόπου σκυροδέτηση χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις βραχώδους υποβάθρου. Συνδυασμός των δύο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το βραχώδες υπόβαθρο καλύπτεται από επιφανειακές εδαφικές αποθέσεις. Κατά τη διαδικασία της προσωρινής τοποθέτησης στον θαλάσσιο πυθμένα, ο μεταλλικός πύργος συνηθίζεται να στηρίζεται στα λεγόμενα mudmats τα οποία είναι ενισχυμένες μεταλλικές πλάκες ικανές να μεταφέρουν με ασφάλεια τα φορτία της ανωδομής στο έδαφος της έδρασης. Εναλλακτικά, ο μεταλλικός πύργος μπορεί να εδρασθεί προσωρινά πάνω σε «προ- εγκατεστημένους» προσωρινούς πασσάλους. Ο μεταλλικός πύργος παραμένει ισοσταθμισμένος μέχρι την κατασκευή των μόνιμων πασσάλων θεμελίωσης και την μόνιμη σύνδεση του με αυτούς, για να αποφευχθεί η ανάπτυξη καμπτικής έντασης στον φορέα^[38].

Οι (μόνιμοι) πάσσαλοι κατασκευάζονται με συμβατικά μηχανήματα μέσω των κύριων μελών του μεταλλικού πύργου, ή μέσω μόνιμων εξωτερικών βραχιόνων προσαρτημένων στη βάση τους. Η μόνιμη σύνδεση των πασσάλων με τον μεταλλικό πύργο εξασφαλίζεται με πλήρωση του δακτυλίου μεταξύ του κάθε πασσάλου και του αντίστοιχου μέλους του φορέα με τσιμέντωση, ενώ η διατμητική αντοχή στη σύνδεση ενισχύεται με σπείρες σιδηροπλισμού που έχουν συγκολληθεί στην εσωτερική παρειά του μέλους του μεταλλικού πύργου. και δρουν ως διατμητικά κλειδιά. Έτσι, επιτυγχάνεται η μεταφορά του φορτίου από τον φορέα στους πασσάλους, και στη συνέχεια διά της πλευρικής τριβής από τους πασσάλους στο έδαφος θεμελίωσης. Αποτελούνται από κύρια κοίλα μέλη τα οποία συνθέτουν έναν πλαισιακό φορέα και από ενδιάμεσα δευτερεύοντα στοιχεία.

Χρησιμοποιούνται για βάθη από 20m έως και 50m και μπορούν να υποστηρίξουν ανεμογεννήτριες 2MW έως 5MW.

Εικόνα 2.8: Κατασκευή στήριξης μεταλλικού πύργου^[38]



2.7.2 ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ- GRAVITY BASED

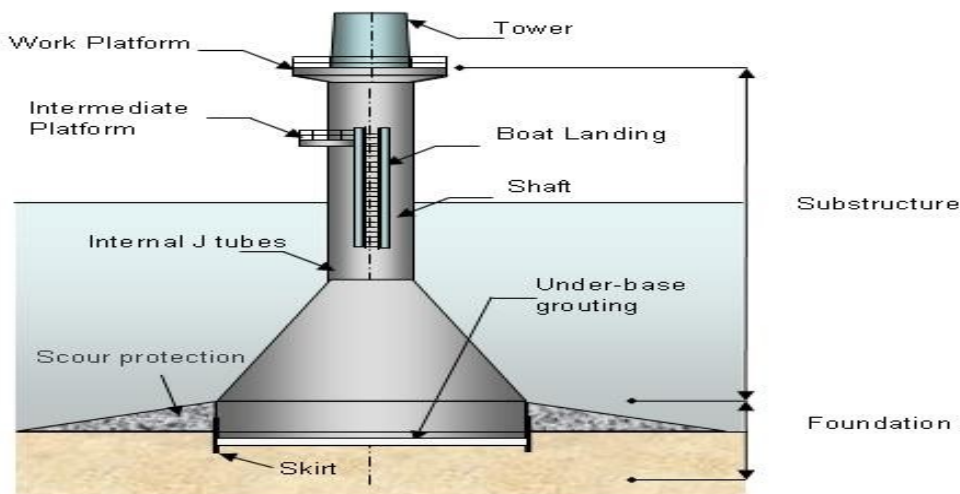
Η αρχή της έδρασης βαρύτητας βασίζεται στη χρήση της δύναμης της βαρύτητας. Οι κατασκευές βάσης βαρύτητας αποτελούνται από κιβώτια σκυροδέματος ή χάλυβα. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα θαλάσσια αιολικά πάρκα έχουν χρησιμοποιήσει τις θεμελιώσεις βαρύτητας από σκυρόδεμα. Μια νέα τεχνολογία, αντί του ενισχυμένου σκυροδέματος χρησιμοποιεί έναν κυλινδρικό σωλήνα από χάλυβα που τοποθετείται πάνω στο επίπεδο κιβώτιο χάλυβα στον πυθμένα της θάλασσας. Η κατασκευή βαρύτητας από χάλυβα είναι ελαφρύτερη από του σκυροδέματος. Όταν ολοκληρωθεί η έδραση της κατασκευής πρέπει να έχει μάζα γύρω στα 10^6 kg, η κατασκευή χάλυβα έχει μάζα $8 \cdot 10^4$ kg με 10^5 kg για βάθος νερού 4 m και 10 m ^[38].

Το σχετικά μικρό βάρος επιτρέπει στα πλωτά μέσα την γρήγορη μεταφορά και έδραση των κατασκευών, χρησιμοποιώντας τον ίδιο γερανό που χρησιμοποιείται για την ανέγερση των τουρμπινών. Οι εδράσεις βαρύτητας γεμίζουν με ορυκτό ολιβίνης (olivine), ένα πολύ πυκνό μέταλλευμα, το οποίο δίνει το απαραίτητο βάρος στη θεμελίωση για να αντέξει στην πίεση του κυματισμού και του πάγου.

Το πλεονέκτημα της λύσης των κιβωτίων χάλυβα είναι ότι κατασκευάζονται στην ξηρά. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους πυθμένα, αν

και απαιτείται προετοιμασία των πυθμένων αυτών. Ο πυθμένας γύρω από τη βάση της θεμελίωσης θα πρέπει κανονικά να προστατευθεί από τη διάβρωση με την τοποθέτηση ογκόλιθων ή βράχων γύρω από τις άκρες της βάσης. Ο παράγοντας που καθορίζει την καταλληλότητα της βάσης και του βάρους της θεμελίωσης δεν είναι η τουρμπίνα, αλλά οι δυνάμεις πίεσης που της ασκούνται από το κυματισμό και τον πάγο. Εγκαθίστανται σε βάθη από 0m έως 25m και μπορούν να υποστηρίξουν ανεμογεννήτριες έως και 5MW.

Εικόνα 2.9: Κατασκευή στήριξης βαρύτητας^[38]



2.7.3 ΜΟΝΟΥ ΠΥΛΩΝΑ – ΜΟΝΟΡΙΛΕ

Η έδραση μονού πυλώνα είναι απλή. Αποτελείται από έναν πυλώνα χάλυβα με διάμετρο μεταξύ 3 m και 4.5 m, μάζας από 100 ως 400 t. Ο πυλώνας οδηγείται από 3.5 D μέχρι 8 D (όπου D είναι η διάμετρος του μονού πυλώνα) μέσα στον πυθμένα της θάλασσας ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος (Πίνακας 2.3)^[38].

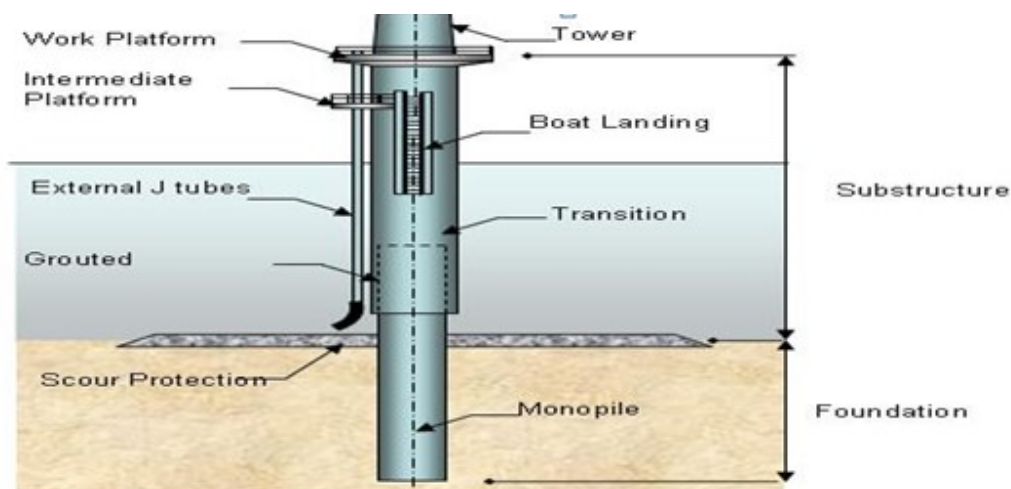
Πίνακας 2. 3 :Μήκος στερέωσης της κατασκευής θεμελίωσης μονού πυλώνα για διαφορετικούς θαλάσσιους πυθμένες (Lehmann, 2007)

ΤΥΠΟΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ	ΜΗΚΟΣ ΣΤΕΡΕΩΣΗΣ
Μέσος όρος	6 D
Συνεκτικός πηλός (Stiff clay)	3.5 D- 4.5D
Μαλακή ιλύ (Soft silt)	7 D-8 D

Η συγκεκριμένη έδραση δεν χρειάζεται ουσιαστικά καμία προετοιμασία του πυθμένα, αλλά το υλικό του θα πρέπει να είναι άμμος ή αμμοχάλικο προκειμένου να αποφευχθεί η ακριβή εργασία της γεώτρησης. Αν ένας μεγάλος ογκόλιθος παρεμβάλλεται κατά την διάρκεια της έδρασης, είναι δυνατό να τρυπηθεί από το τρυπάνι και να ανατιναχθεί με εκρηκτικές ύλες. Το μέγιστο βάθος νερού, μέχρι το οποίο η εγκατάσταση θεμελίωσης μονού πυλώνα είναι λογική, φαίνεται να είναι τα 25 m.

Το ενδιάμεσο μεταβατικό κομμάτι που υπάρχει μεταξύ του πύργου και της έδρασης, χρησιμεύει ώστε να αφομοιώνει τις ανοχές από την κλίση του πυλώνα και να μειώσει το χρόνο συναρμολόγησης του πύργου στο υπεράκτιο περιβάλλον. Ο χαλύβδινος σωλήνας μεταφέρει με τη βοήθεια της κάθετης και παράπλευρης γήινης πίεσης όλα τα φορτία στο έδαφος. Οι κατασκευές μονού πυλώνα τοποθετούνται σε βάθη που κυμαίνονται από 0m έως 30m και μπορούν να υποστηρίξουν Α/Γ 1MW έως 2MW.

Εικόνα 2.10 : Κατασκευή στήριξης μονού πυλώνα^[38]



2.7.4 ΤΡΙΠΛΟΥ ΠΥΛΩΝΑ-TRIPILE

Ακολουθούν τη λογική σχεδίασης των κατασκευών μονού πυλώνα, με τη διαφορά ότι ο πύργος στηρίζεται, όχι σε ένα, αλλά σε τρεις πασσάλους που εισχωρούν κάθετα στον πυθμένα της θάλασσας. Πάνω από το νερό υπάρχει ένα μεταβατικό κομμάτι που συνδέει τους τρεις πυλώνες και πάνω σε αυτό τοποθετείται ο πύργος της ανεμογεννήτριας. Αυτού του είδους η κατασκευή δίνει

μεγαλύτερη σταθερότητα στην ανεμογεννήτρια και μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερα φορτία και γρηγορότερα στον πυθμένα. Τοποθετούνται από 20m έως 40m βάθος ^[39].

Εικόνα 2.11 : Κατασκευή στήριξης τριπλού πυλώνα^[39]

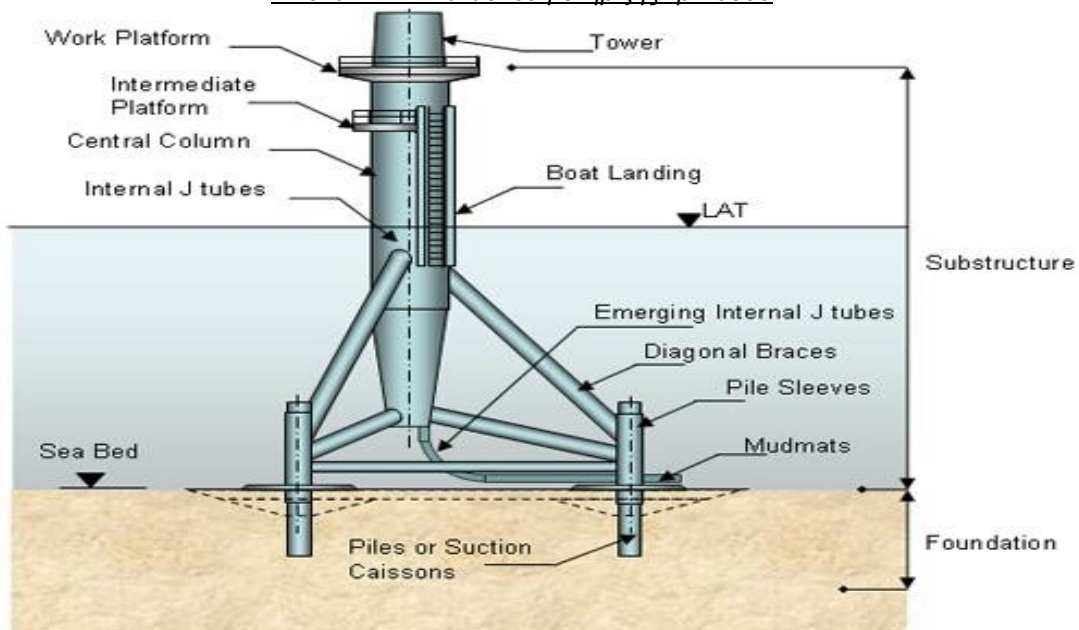


2.7.5 ΤΡΙΠΟΔΟΥ-TRIPOD

Η έδραση τρίποδα βασίζεται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από οικονομικά συμφέρουσες χαλύβδινες κατασκευές jackets τριπόδων με μικρό βάρος, που εγκαταστάθηκαν σε παράκτιες περιοχές που χρησιμοποιεί η βιομηχανία πετρελαίου. Ένα πλαίσιο χάλυβα συνδέεται με τον πύργο της ανεμογεννήτριας και μεταφέρει τις δυνάμεις από τον πύργο στους τρεις πυλώνες χάλυβα (Εικόνα 2.12) ^[38].

Η διάμετρος των θεμελιωμένων πυλώνων που αγκυρώνονται στο βυθό από την οδήγηση των πυλώνων, με διάτρηση και δονήσεις, ισοδυναμεί περίπου με 0.9 m. Ανάλογα με τους αντίστοιχους τύπους υποστρώματος, το επιθυμητό βάθος διείδυσης στον πυθμένα ποικίλλει μεταξύ 10 και 20 m. Επιπλέον, απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση. Οι εδράσεις τρίποδα είναι καταλληλότερες για βάθη νερού που υπερβαίνουν τα 20 m. Ο κύριος λόγος είναι ότι για βάθη μικρότερα των 7 m, τα θαλάσσια σκάφη μπορεί να συγκρουστούν στο πλαίσιο χάλυβα της θεμελίωσης. Η κατασκευή αυτή δίνει καλή ευστάθεια και ακαμψία στην Α/Γ. Είναι κατάλληλη για βάθη από 20m έως 50m.

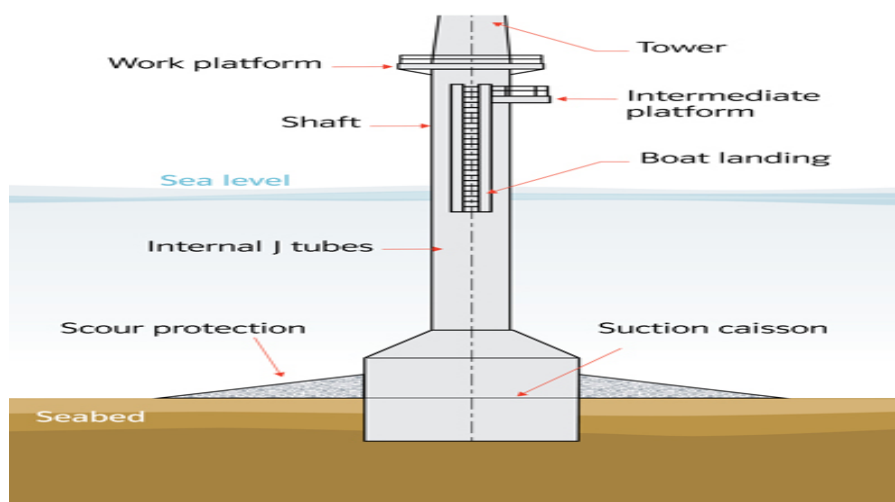
Εικόνα 2.12 : Κατασκευή στήριξης τριπόδου^[38]



2.7.6 ΜΕ ΕΔΡΑΣΕΙΣ ΚΕΝΟΥ / ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΕΩΣ-SUNCTION / BUCKET

Οι κατασκευές αυτές συγκαταλέγονται στην κατηγορία του μονού πυλώνα, αλλά διαφέρει ο τρόπος θεμελίωσής τους. Αποτελούνται από ένα κύριο, χαλύβδινο άξονα κωνικής μορφής, με το κάτω μέρος του να αποτελείται από κοιλότητες, δημιουργώντας διαμερίσματα περιμετρικά του άξονα. Όταν εγκαθίσταται, και το κάτω άκρο του κωνικού άξονα ακουμπά τον πυθμένα, αντλείται το νερό από την εσωτερική κοιλότητα προς τα έξω. Έτσι, εμφανίζεται μια διαφορά πίεσης η οποία δημιουργεί μια δύναμη προς τα κάτω. Μόλις γίνει η εγκατάσταση της κατασκευής αφαιρούνται οι αντλίες και κάθε έξοδος σφραγίζεται με βαλβίδες. Η συμπεριφορά αυτών των κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός βάσης βαρύτητας και θεμελίωσης πασσάλων. Η διαφορά αυτών των κατασκευών από όλες τις υπόλοιπες είναι πως δεν χρειάζεται να γίνει διάτρηση ή κάποια ειδική προετοιμασία του εδάφους. Επίσης, μπορεί να μετακινηθεί ή να αφαιρεθεί εύκολα αφήνοντας νερό να κατακλύσει τα διαμερίσματα δημιουργώντας διαφορά πίεσης που έχει σαν αποτέλεσμα την ανωστική δύναμη. Τοποθετείται σε βάθη από 0m-25^[38].

Εικόνα 2.13 : Κατασκευή στήριξης με εδράσεις κενού^[38]



Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα όλων των τύπων των κατασκευών έδρασης σε ρηχό νερό.

Πίνακας 2. 4 :Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των κατασκευών έδρασης

ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΔΡΑΣΗΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Βάση βαρύτητας (Gravity base)	<ul style="list-style-type: none"> Κατασκευή στην ξηρά Χρησιμοποίηση σ' όλους τους τύπους πυθμένων της θάλασσας. Οικονομικά αποδοτικότερη κατασκευή στα ρηχά νερά 	<ul style="list-style-type: none"> Προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας Δαπανηρό σε περιοχές με μεγάλη διάβρωση Πολύ βαρύτερα και ακριβότερα για βάθη μμεγαλύτερα των 10 m
Μονού πυλώνα (Monopile)	<ul style="list-style-type: none"> Δεν είναι απαραίτητη η προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας. Η διάβρωση δεν είναι πρόβλημα 	<ul style="list-style-type: none"> Δεν είναι κατάλληλο για πυθμένα θάλασσας σκληρού υποστρώματος Η εφαρμογή του περιορίζεται μέχρι το βάθος των 25 m
Τρίποδα (Tripod)	<ul style="list-style-type: none"> Καταλληλότερα για βάθη μεγαλύτερα των 20 m. Δεν χρειάζεται μεγάλη προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας 	<ul style="list-style-type: none"> Δεν είναι κατάλληλο για βάθη μικρότερα των 6 m και 7 m Ακατάλληλο για πυθμένα θάλασσας με ογκόλιθους Δυσκολία μεταφοράς
Jacket	<ul style="list-style-type: none"> Οικονομικότερη εγκατάσταση μέχρι τα βάθη των 50 ή 60 m 	<ul style="list-style-type: none"> Προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας Μη εγκατάσταση σε μεγάλα βάθη λόγω παρουσίας υδρογονανθράκων

2.8 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ

Λειτουργία του αιολικού πάρκου

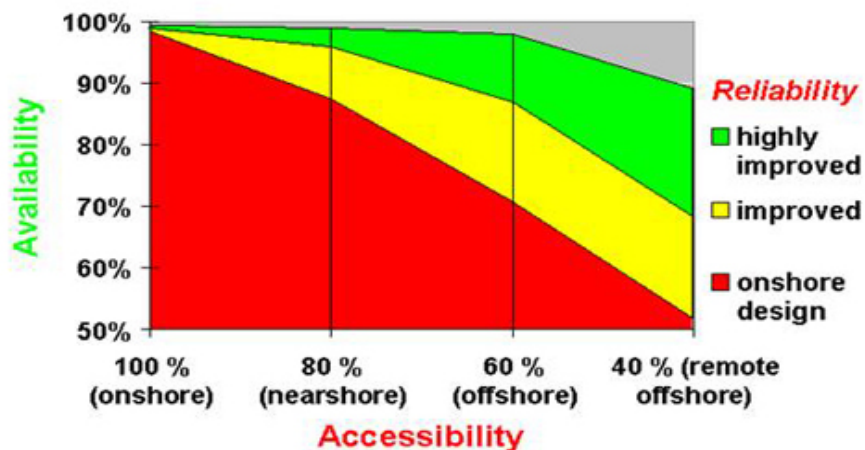
Η καθημερινή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA)^[40]. Το σύστημα αυτό συνδέει όλα τα συστατικά μέρη (δηλ. ανεμογεννήτριες, μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς) του αιολικού πάρκου σε έναν κεντρικό Η/Υ που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων ανεμογεννητριών.

Συντήρηση του αιολικού πάρκου

Η διαδικασία συντήρησης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί τεχνογνωσία παρόμοια με αυτή των χερσαίων ανεμογεννητριών λόγω του ότι χρησιμοποιούν παρόμοιες συνιστώσες^[41]. Ωστόσο, οι συνιστώσες είναι συνήθως μεγαλύτερου μεγέθους στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Το παρακάτω σχήμα επιδεικνύει το πόσο σημαντική είναι η ύπαρξη αξιόπιστων ανεμογεννητριών, ιδίως για τις απομακρυσμένες υπεράκτιες τοποθεσίες, που μερικές φορές απέχουν 14-20 χλμ. από την ακτή.

Εικόνα 2.14 : Σπουδαιότητα ύπαρξης αξιόπιστων ανεμογεννητριών^[41]



Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται έτσι ώστε να απαιτούνται περιοδικοί έλεγχοι μία έως τρεις φορές κατ' έτος. Οι περιοδικοί έλεγχοι συντήρησης διαφέρουν ασφαλώς ανάλογα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και την τεχνολογία που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Η μη προγραμματισμένη συντήρηση μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος συντήρησης (δηλ. τις δαπάνες λειτουργίας και διαχείρισης, συνεπώς και το κόστος ανά κιλοβατώρα).

2.8.1 ΠΑΡΟΠΛΙΣΜΟΣ

Κανένα έργο ή αιολικό πάρκο δεν έχει ολοκληρώσει τον προβλεπόμενο κύκλο ζωής των 25 ετών. Ο παροπλισμός του έργου περιλαμβάνει την απομάκρυνση των διατάξεων και των θεμελιώσεων από τη θάλασσα προκειμένου να επανέλθει η περιοχή στην κατάσταση που ήταν πριν από το έργο, πράγμα που αποτελεί προϋπόθεση στα περισσότερα έργα. Αν και η απομάκρυνση των διατάξεων δεν είναι δύσκολη, πιο περίπλοκη αναμένεται να είναι η απομάκρυνση των κατασκευών έδρασης. Οι εδράσεις μονού πυλώνα ή πολλών πυλώνων, οι οποίες συνήθως γίνονται με πασσαλόπηγμα μέσα στον πυθμένα της θάλασσας, συνεπάγονται μια περίπλοκη διαδικασία για την απομάκρυνσή τους. Επίσης, η δαπάνη για τις κατασκευές που βασίζονται στη βαρύτητα είναι πολύ μεγάλη λόγω του τεράστιου βάρους τους.

Είναι πιθανή η εκ νέου χρησιμοποίηση των κατασκευών έδρασης για την τοποθέτηση άλλων ανεμογεννητριών στην ίδια περιοχή, εφόσον αυτές κριθούν κατάλληλες για τις τεχνολογίες που θα είναι διαθέσιμες κατά το χρόνο του παροπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΠΛΩΤΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η στροφή της ανθρώπινης κοινότητας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έφερε τεράστιες εξελίξεις στο θέμα των ανεμογεννητριών. Η ιδέα ενός υπεράκτιου πλωτού αιολικού πάρκου δόθηκε το 1972 από τον καθηγητή του M.I.T. William E. Heronemus^[42]. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνιση τους οι πλωτές ανεμογεννήτριες. Πρόκειται για ανεμογεννήτριες οι οποίες βρίσκονται τοποθετημένες σε πλωτές κατασκευές. Οι πλωτές ανεμογεννήτριες επιτρέπουν να παραχθεί ενέργεια σε θαλάσσιες περιοχές όπου το βάθος δεν επιτρέπει την τοποθέτηση πύργων, και επιπλέον εκμεταλλεύονται την δύναμη του ανέμου, ο οποίος είναι πιο ισχυρός πάνω από την θάλασσα, αφού η ροή του δεν επηρεάζεται από το ανάγλυφο της περιοχής. Το 2009 εγκαταστάθηκε με επιτυχία η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια στα ανοιχτά των νορβηγικών ακτών, στη Βόρεια Θάλασσα. Ανήκει στη μεγάλη νορβηγική εταιρεία παραγωγής ενέργειας StatoilHydro και ονομάζεται Hywind (Εικ.3.1). Η ανεμογεννήτρια είναι εγκατεστημένη δέκα χιλιόμετρα μακριά από το νησί Καρμόι, στα νοτιοδυτικά της Νορβηγίας, έχει ύψος 65 μέτρα, βάρος 5.300 τόνων και ισχύ 2.3 MW. Το κόστος για την κατασκευή της, το οποίο είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο για μια επίγεια συμβατική ανεμογεννήτρια, έφτασε τα 46 εκατ. Ευρώ. Η γαλλική εταιρεία Technip και η γερμανική Siemens συνέβαλαν στην ανάπτυξη της γεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί σε νερά με βάθος μεταξύ 120 και 700 μέτρων, δηλαδή σε πολύ μεγάλη απόσταση από τη στεριά. Βρίσκεται πάνω σε μια επιπλέουσα πλατφόρμα, που στερεώνεται στο βυθό με τρία χοντρά καλώδια, ενώ η πλατφόρμα γεμίζει με νερό και πέτρες για μεγαλύτερη σταθερότητα. Το 2011, σε απόσταση 215 μιλίων από την ακτή Αγκουσαντούρα στα ανοιχτά της Πορτογαλίας, εγκαταστάθηκε η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια WindFloat ισχύος 2MW, η οποία συναρμολογήθηκε στη στεριά και τοποθετήθηκε στη θάλασσα χωρίς να χρειαστεί να μεταφερθεί στο σημείο εγκατάστασης βαρύς εξοπλισμός. Η κοινοπραξία που ανέλαβε το έργο τόνισε ότι η πλωτή ανεμογεννήτρια WindFloat, που κατασκευάστηκε από τη Vestas, ανοίγει νέους

δρόμους για την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού στη θάλασσα, που είναι πολύ υψηλότερο συγκριτικά με τις χερσαίες περιοχές. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε αντίθεση με την πλωτή ανεμογεννήτρια WindFloat, οι συμβατικές τεχνολογίες δεν είναι ακόμα σε θέση να εκμεταλλεύονται τόσο ισχυρούς και σταθερούς ανέμους, ενώ μεταφέρονται με ειδικά πλοία σε εξέδρες που έχουν ήδη στηθεί.

Εικόνα 3.1 :Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια^[42]



Εικόνα 3.2 :Ανεμογεννήτρια WindFloat^[42]



Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών δοκιμάζουν μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες με υψηλές ταχύτητες ακροπτερυγίων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος. Οι μηχανές με ονομαστική ισχύ πολλών MW μπορεί να αποτελέσουν το μέλλον της αιολικής ενέργειας, αφού το σημαντικότερο εμπόδιο για την υπεράκτια αιολική ενέργεια υπήρξε το κόστος κεφαλαίου του αιολικού πάρκου. Με την κατασκευή μεγαλύτερων μηχανών είναι δυνατόν να μειωθεί το κόστος κεφαλαίου καθώς και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά KW/h.

Οι κατασκευαστές τώρα αναπτύσσουν γεννήτριες άμεσης οδήγησης (direct drive), πράγμα που καταργεί το κιβώτιο ταχυτήτων από την άτρακτο. Με τον

τρόπο αυτό, λόγω της απουσίας κιβωτίου ταχυτήτων, βελτιώνεται η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών καθώς και η αξιοπιστία τους. Εξάλλου έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αναστροφείς ή άλλα μέσα μετασχηματισμού της ισχύος για να παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας των στροβίλων σε μεταβλητές ταχύτητες, να αποσπάται περισσότερη αιολική ισχύς και να αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας.

Αντικείμενο συστηματικής έρευνας αποτελούν οι δυνατότητες βελτίωσης στις κατασκευές έδρασης προκειμένου να καταστεί δυνατή η χρήση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε βαθύτερα ύδατα και σε δύσκολες συνθήκες βυθού. Η πλωτή στήριξη είναι η σημαντικότερη κατασκευή έδρασης που ερευνάται.

Μια πλωτή κατασκευή υποστήριξης Α/Γ διαφέρει από μια σταθερή, λόγω του ότι η στήριξη προέρχεται από το νερό και όχι από το έδαφος. Αποτελείται από μια επιπλέουσα πλατφόρμα και το σταθερό σύστημα που συγκρατείται. Η επαφή, ωστόσο, με το έδαφος γίνεται μέσω γραμμών αγκύρωσης που κρατούν την πλατφόρμα προσδεμένη στην θέση της.

Ο πλωτήρας πρέπει να παρέχει άνωση που θα μπορεί να υποστηρίξει το βάρος της Α/Γ και να καταστέλλει σε ικανοποιητικό βαθμό τις κινήσεις πρόνευσης (pitch), περιστροφής (roll), και κατακόρυφης ταλάντωσης (heave).

Μια πλωτή κατασκευή μπορεί να συναρμολογηθεί στην ξηρά με δυνατότητα εγκατάστασης σε βάθη μεγαλύτερα των 50 μέτρων. Μάλιστα επιτρέπεται η τοποθέτηση τόσο μακριά από τις ακτές ώστε να επωφελείται ισχυρότερων και σταθερότερων ανέμων. Χαρακτηρίζεται πιο φιλική προς το περιβάλλον γιατί μπορεί να απομακρυνθεί και να αποσυναρμολογηθεί χωρίς να αφήσει κατάλοιπα στην περιοχή. Επίσης, μειώνεται σημαντικά το συνολικό βάρος της κατασκευής άρα και το κόστος.

Ωστόσο υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί, με κυριότερο αυτό της απόστασης από την ακτή. Λόγω του ότι η κατασκευή βρίσκεται μακριά από την στεριά και λόγω των πιθανών δυσμενών θαλάσσιων συνθηκών, η βελτιστοποίηση και αξιοπιστία των πλωτών κατασκευών είναι μείζον ζήτημα. Επίσης, η προσβασιμότητα για εργασίες συντήρησης ή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Η ενέργεια βρίσκεται μακριά από τη στεριά άρα και μακριά από τον καταναλωτή. Τέλος, οι

περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη θαλάσσια πανίδα και χλωρίδα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν μπορούν να αναφερθούν με σιγουριά, καθώς δεν έχουν προλάβει να ληφθούν πειραματικές τιμές δεν έχουν προλάβει να ληφθούν από τις προσφάτως εγκατεστημένες πλωτές Α/Γ^[43].

Η αγκυροβόληση των πλωτών πλατφόρμων γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Είτε με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης (catenary moorings) είτε με συρματόσχοινα υπό προένταση (taut-leg moorings).

Όμως με τους συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης η κάθετη δύναμη στην άγκυρα είναι ανεπαρκής για να εξασφαλίσει ότι η πλατφόρμα δε θα ανατραπεί, κυρίως όταν το βάρος της Α/Γ και οι οριζόντιες δυνάμεις ασκούνται σε μεγάλη απόσταση από το κέντρο άνωσης.

Αντιθέτως, η αγκύρωση με τεντωμένα συρματόσχοινα πλεονεκτεί στο γεγονός ότι μπορεί να εξασφαλίσει περισσότερη ευστάθεια, καθώς έχει τη δυνατότητα να βυθίζει κάτω από το επίπεδο της θάλασσας ένα μεγάλο μέρος της κατασκευής. Επίσης, μπορεί να έχει εφαρμογή σε μεγαλύτερα βάθη έναντι της αλυσοειδούς αγκύρωσης που προτιμάται σε σχετικά ρηχά νερά.

Αναλόγως των δυνάμεων που δέχεται η κατασκευή, το βάθος εγκατάστασης και την κατάσταση του πυθμένα χρησιμοποιούνται άγκυρες ώστε να σταθεροποιηθεί η κατασκευή μέσω των γραμμών αγκύρωσης. Αυτές διακρίνονται στις εξής κατηγορίες^[44]:

- Άγκυρες βαρύτητας (gravity- based anchor)
- Άγκυρες που εμφυτεύονται καθώς σύρονται (drag- embedded anchor)
- Άγκυρες πάσσαλοι (driven pile anchor)
- Άγκυρες αναρρόφησης (suction anchor)
- Άγκυρες που εμφυτεύονται με τορπίλη (torpedo embedded anchor)
- Άγκυρες οδηγούμενες από στύλο όπου απαιτείται η διάνοιξη οπής (drilled and grouted pile)

Υπάρχουν διαφορετικού τύπου πλωτές κατασκευές, οι οποίες προέρχονται από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες κατασκευής και το περιβάλλον εγκατάστασής τους.

Ωστόσο, οι πλωτές Α/Γ μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε πλωτήρες μιας Α/Γ,

είτε σε πλωτήρες πολλών Α/Γ. Σε αυτού του είδους τα πλωτά συστήματα ο πλωτήρας φέρει περισσότερες από μια Α/Γ, ώστε να παρέχεται ευστάθεια και να μοιράζονται το κόστος αγκύρωσης. Όμως, δέχονται μεγάλα φορτία κυματισμού και παρουσιάζουν υψηλό κόστος στήριξης.

Αντίθετα, ο πλωτήρας μιας Α/Γ εμφανίζει περισσότερα πλεονεκτήματα καθώς είναι πιο απλός στο σχεδιασμό του, μπορεί να τυποποιηθεί η κατασκευή του, παρουσιάζει σημαντικό έλεγχο της περιστροφικής του κίνησης και έχει και χαμηλότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις. Το μόνο μειονέκτημα του είναι πως απαιτεί ξεχωριστό κόστος για το σύστημα αγκύρωσης του.

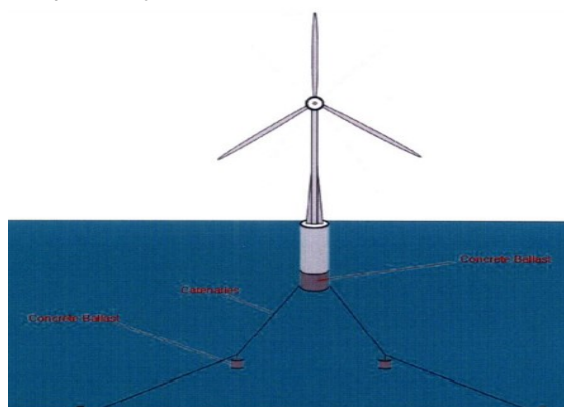
3.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ SPAR-BOY

Αυτού του είδους οι κατασκευές αποτελούνται από ένα μεγάλο κυλινδρικό σωλήνα ο οποίος βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση και επιπλέει λόγω των μεγάλων ποσοτήτων αέρα που υπάρχουν στην κορυφή του και του έρματος που φέρει στο κάτω μέρος του, για να χαμηλώσει το κέντρο βάρους του κάτω από το κέντρο πλευστότητας και αγκυροβολείται είτε με συμβατικούς κλάδους είτε με συρματόσχοινα υπό προένταση^[45]. Το πλεονέκτημα τους σε σχέση με άλλες πλωτές κατασκευές είναι η μικρή τους ίσαλος και έτσι δεν είναι τόσο ευαίσθητες σε κινήσεις που οφείλονται σε κυματισμούς. Το μόνο μειονέκτημά τους είναι πως γέρνουν ελαφρά λόγω των φορτίων που δέχονται από τον άνεμο και τα κύματα, φαινόμενο το οποίο απαλείφεται με αύξηση του έρματος.

Εικόνα 3.3: Πλωτή κατασκευή τύπου Spar-buoy^[46]



Εικόνα 3.4 : Στήριξη ανεμογεννήτριας τύπου Spar-buoy^[47]

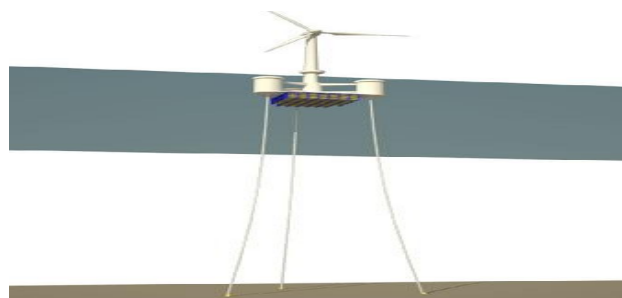


3.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ BARGE

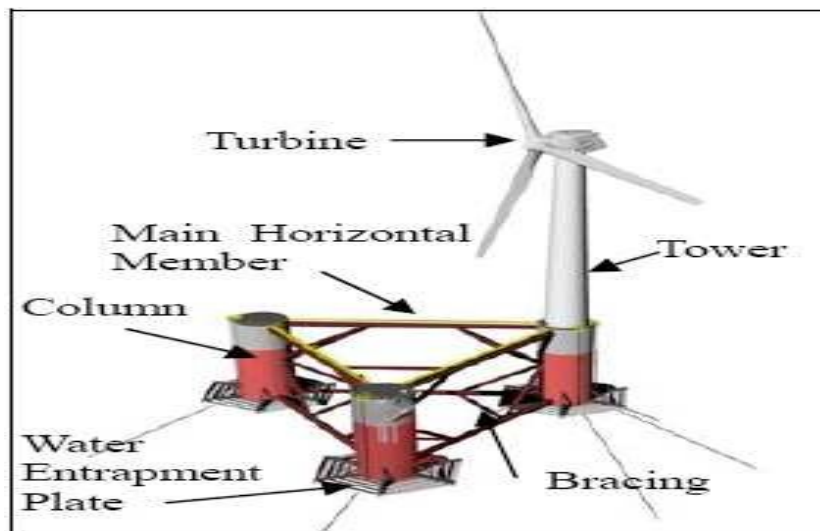
Οι κατασκευές αυτές είναι γνωστές ως ημιβυθισμένες πλατφόρμες. Αποτελούνται από μια φορηγίδα η οποία αγκυρώνεται με συμβατικούς κλάδους. Τα ανωτέρω συμβάλλουν στο να περιορίσουν τις κινήσεις του πλωτήρα. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως κατασκευάζονται και συναρμολογούνται πλήρως στην ξηρά και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο εγκατάστασής τους^[46].

Η πλατφόρμα αποτελείται από τρεις κατακόρυφες κυκλικές κολόνες αλληλοσυνδεμένες με οριζόντια σωληνοειδή μέλη και bracing. Οι κολόνες είναι σκληρού περιβλήματος κατασκευές με δοκούς δακτύλιο και κάθετα ενισχυτικά ελάσματα. Μία πλάκα παγίδευσης-νερού (water-entrapment plate) βρίσκεται στη βάση των κολόνων και εκτείνεται οριζόντια προς τα έξω. Είναι κατασκευασμένη από σκληρές πλάκες με ακτινωτά ενισχυτικά ελάσματα στερεωμένα στη βάση των κολόνων και υποστηρίζεται από τις κάθετες ενισχύσεις (bracing) συνδέοντας το εξωτερικό άκρο της πλάκας με τις κολόνες. Η πλάκα παγίδευσης-νερού αυξάνει στην πλατφόρμα την πρόσθετη-μάζα και την απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης. Αποτελεί, έτσι, βασικό συστατικό υδροδυναμικής απόδοσης της πλατφόρμας. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας τοποθετείται σε μια από τις κολόνες. Τα πτερύγια του ρότορα και η άτρακτος είναι σταθερά στην κορυφή του πύργου. Το ύψος της πλήμνης είναι 80m πάνω από τη μέση στάθμη του νερού. Η πλατφόρμα είναι αγκυρωμένη στο βυθό της θάλασσας με τέσσερις έως έξι γραμμές αγκύρωσης. Υπάρχει μια πολύ μικρή γέφυρα μεταξύ των κολόνων που χρησιμοποιείται για συντήρηση ορισμένου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, ο οποίος είναι πρακτικότερο να ρυθμιστεί και να συντηρηθεί στο κατάστρωμα της γέφυρας παρά στο εσωτερικό του πύργου.

Εικόνα 3.5: Πλωτή κατασκευή τύπου Barge^[47]



Εικόνα 3.6: Βασικά τμήματα πλωτής κατασκευής τύπου Barge^[47]



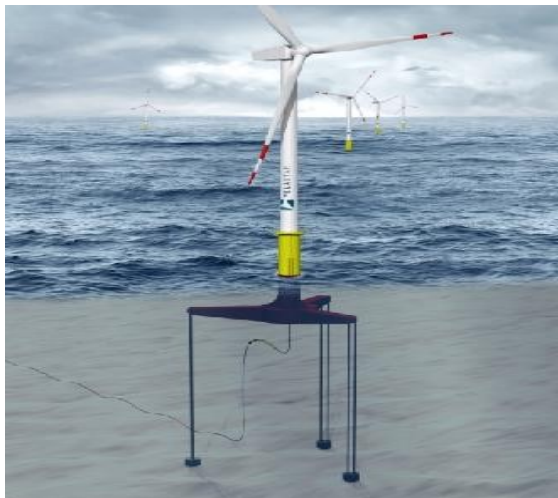
3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ TLP (TENSION LEG PLATFORM)

Οι TLP είναι πλωτές κατασκευές αγκυρωμένες υπό κατακόρυφη προένταση με χαλύβδινους τένοντες που ομαδοποιούνται σε κάθε γωνία της δομής τους. Χαρακτηριστικό αυτού του είδους πρόσδεσης είναι ότι οι τένοντες έχουν σχετικά υψηλή αξονική ακαμψία μειώνοντας τις κατακόρυφες κινήσεις. Διατηρούνται λίγο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για να δημιουργείται μικρή ίσαλος επιφάνεια ώστε να περιορίζονται τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται από τα κύματα. Η πλατφόρμα είναι μόνιμα αγκυρωμένη σε κλάδους αγκύρωσης, μεμονωμένα ή ομαδοποιημένα προσδεδεμένους στα άκρα της κατασκευής, οι οποίοι ονομάζονται «πόδια» προέντασης (tension leg). Χαρακτηριστικό του σχεδιασμού αυτών των κλάδων αγκύρωσης είναι ότι έχουν σχετικά υψηλή αξονική ακαμψία (χαμηλή ελαστικότητα), ώστε να περιορίζονται τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται από τα κύματα.

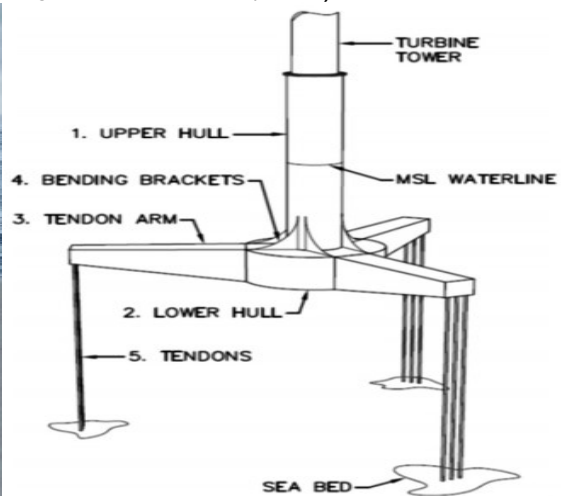
Στον τομέα των πλωτών ανεμογεννητριών μελέτες έχουν δείξει ότι οι TLP κατασκευές παρουσιάζουν καλή υδροδυναμική συμπεριφορά και είναι αποτελεσματικές ως προς τον περιορισμό έντονων κινήσεων προνευτασμού και διατοιχισμού της πλωτής ανεμογεννήτριας και σε δύσκολες συνθήκες θαλασσών^[45]. Μπορούν να φέρουν ανεμογεννήτρια ισχύος έως και 5 MW, ενώ είναι δυνατή η τοποθέτησή τους σε νερό βάθους έως και 200 μέτρων^{[49].[50]}.

Όπως σε κάθε περίπτωση έτσι και εδώ η κατασκευή θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη με αρκετά μεγάλη προσοχή. Σε αντίθετη περίπτωση, οι κλάδοι αγκύρωσης της TLP ενδέχεται να υποστούν απώλεια προέντασης με αποτέλεσμα να ανατραπεί η γάστρα. Η τυχόν διαγωγή της κατασκευής ή η τάση περιστροφής λόγω μεταβολών της κατεύθυνσης του ανέμου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό μια διάταξης τύπου TLP^[51].

Εικόνα 3.7 : Πλωτή κατασκευή τύπου TLP^[52]



Εικόνα 3.8 : Απεικόνιση της διάταξης Tension Leg Turbine Platform (TLTP)^[53]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ενέργεια της θάλασσας χωρίζεται σε κυματική και παλιρροϊκή ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει. Συγκεκριμένα, η κυματική ενέργεια αποτελεί ένα μετασχηματισμό της αιολικής ενέργειας ενώ η παλιρροϊκή ενέργειά της προέρχεται από την βαρυτική έλξη την οποία ασκεί η Σελήνη στην Γη. Ανάλογα με την ενέργεια που θέλουμε να εκμεταλλευτούμε υπάρχουν και διαφορετικοί μηχανισμοί. Στην παρούσα φάση θα ασχοληθούμε με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, της ενέργειας δηλαδή που μεταφέρουν στην επιφάνειά τους τα κύματα.

Η πρώτη γνωστή προσπάθεια εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας καταγράφηκε το 1799 και έγινε από τον Girard και τον γιό του στο Παρίσι^[54] και αφορούσε μία εγκατάσταση που εκμεταλλευόταν τα ωκεάνια κύματα. Η επόμενη προσπάθεια έλαβε και αυτή χώρα στην Γαλλία, συγκεκριμένα στην πόλη του Μπορντώ, το 1910 από τον Bochaux-Praceique. Σκοπός αυτής της εγκατάστασης ήταν να δίνει σε ένα σπίτι την απαραίτητη ενέργεια τόσο για φωτισμό όσο και για άλλες εργασίες. Εξ όσων γνωρίζουμε η εγκατάσταση ήταν τύπου “Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού” ή “Oscillating Water Column”^[55].

Όμως, η σύγχρονη προσέγγιση εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας έγινε για πρώτη φορά από το Yoshio Masuda, ο οποίος πρωτοπόρησε με τα πειράματά του τη δεκαετία του 1940-1950. Με την χρήση εκατοντάδων μηχανισμών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για φώτα ναυσιπλοΐας έλεγξε τις τότε διάφορες προσεγγίσεις γύρω από την κυματική ενέργεια. Ανάμεσα στις εκατοντάδες προσεγγίσεις που έλεγξε ήταν και αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την γωνιακή κίνηση που πραγματοποιείται στους συνδέσμους μιας αρθρωτής σχεδίας, η οποία και προτάθηκε από τον Masuda το 1950. Αυτή είναι και η προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε ένα από τα πιο δημοφιλή σύγχρονα προγράμματα, αυτό του Pelamis. Μέχρι και το 1973, όταν και ξεκίνησε η πετρελαϊκή κρίση δεν υπήρχε κάποιο άλλο οργανωμένο ενδιαφέρον. Τότε όμως,

και λόγω της κρίσης αυτής, πολλά πανεπιστημιακά τμήματα άρχισαν να ενδιαφέρονται ξανά για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ^[56].

Κατά την δεκαετία του 1980 όμως, όταν και η τιμή του πετρελαίου ελαττώθηκε, μειώθηκε και η χρηματοδότηση της έρευνας για την κυματική ενέργεια και έτσι μειώθηκε και η έρευνα γύρω από αυτόν τον τομέα. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, και λόγω της ανάγκης για παραγωγή πιο καθαρής ενέργειας, για την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής, έχει υπάρξει μια αναζωπύρωση γύρω από την έρευνα της κυματικής ενέργειας αλλά και γενικά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πολλές ευρωπαϊκές χώρες, μάλιστα ορισμένες εδώ και πολλές δεκαετίες, απασχολούνται ερευνητικά πάνω στον τομέα της Κυματικής Ενέργειας. Ειδικά οι χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό, δηλαδή με ακτές ανοιχτές προς τον Ατλαντικό Ωκεανό, προσβλέπουν να καλύψουν ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών τους αναγκών από σταθμούς κυματικής ενέργειας. Από την άλλη χώρες με εκμεταλλεύσιμο αλλά μέτριας στάθμης κυματικό δυναμικό έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές νησιά ή να εκμεταλλευθούν αυτό το είδος ενέργειας σε συμπαραγωγή με συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ.

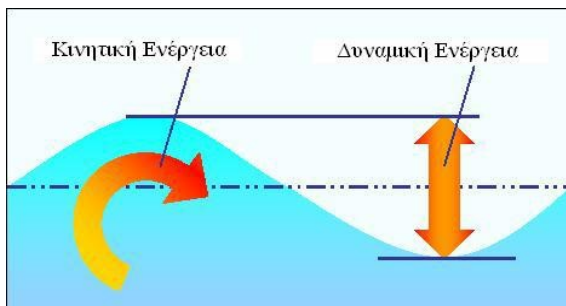
4.2 ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Η επιφάνεια της θάλασσας φαίνεται να βρίσκεται συνέχεια σε κίνηση, με διαρκείς αναταράξεις. Καταστάσεις που προξενούν περιοδικές κινήσεις των μορίων του νερού είναι ο άνεμος, οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της πυκνότητας καθώς επίσης και οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις της Γης με τον Ήλιο και τη Σελήνη. Όμως, τα κύματα που σχηματίζονται από τον άνεμο παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ενεργειακή εκμετάλλευση καθώς έχουν την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση.

Το εξαιρετικά σημαντικό με τα ανεμογενή κύματα είναι ότι λειτουργούν ως ένα είδος φυσικής αποθήκευσης αιολικής ενέργειας στο νερό, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από το σημείο δημιουργίας έχοντας ελάχιστες απώλειες. Η κινητική ενέργεια ενός γραμμικού κύματος είναι ίση με τη δυναμική του ενέργεια. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι τα θαλάσσια κύματα περιέχουν δύο μορφές ενέργειας. Την κινητική ενέργεια των στοιχείων του νερού

που ακολουθούν κυκλική τροχιά, και τη δυναμική ενέργεια των ανυψωμένων στοιχείων του νερού.

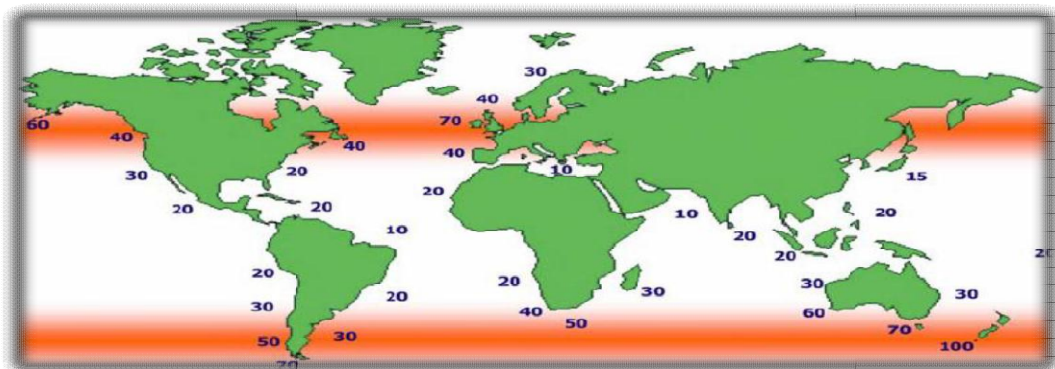
Εικόνα 4.1: Μορφές Ενέργειας Κυμάτων^[57]



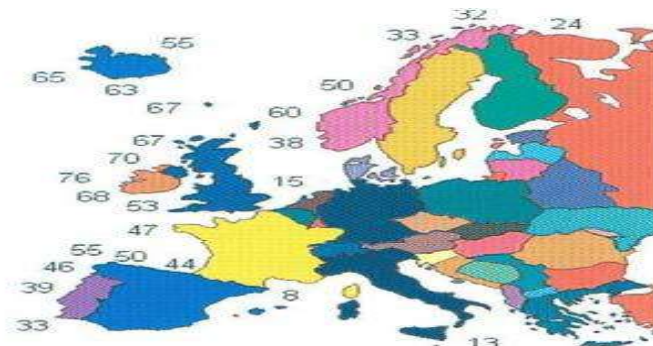
Η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια αλληλεπίδρασης με τα κύματα προσδιορίζει κάποια χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως η ταχύτητα διάδοσης, η περίοδος και το μήκος κύματος καθώς και το διάστημα μορφοποίησής τους. Επίσης, ένα κύμα μπορεί να επηρεαστεί από το βάθος και τη μορφολογία του πυθμένα, που ανάλογα μπορεί να εστιάζει ή να διασκορπίζει τον κυματισμό αλλά ακόμα και από τα θαλάσσια ρεύματα. Για τους λόγους αυτούς, όπως συμβαίνει και με το δυναμικό κάθε ΑΠΕ, το παγκόσμιο κυματικό δυναμικό κατανέμεται διαφορετικά ανά τον κόσμο.

Το υψηλότερο δυναμικό εντοπίζεται στην εύκρατη ζώνη και συγκεκριμένα μεταξύ του 30ου και 60ου παραλλήλου και στα δύο ημισφαίρια, περιοχές στις οποίες πνέουν ισχυροί δυτικοί άνεμοι. Η κυματική ενέργεια, καθώς και η ηλεκτρική που μπορεί να παραχθεί από αυτή, μετριέται σε kW ανά μέτρο μετώπου κύματος (kW/m) ή σε TWh ανά έτος. Έτσι με βάση και τα παρακάτω σχήματα βλέπουμε ότι υψηλά ποσά κυματικού δυναμικού, μέχρι και της τάξεως των 70 kW/m, έχουν οι δυτικές ευρωπαϊκές ακτές, οι ακτές του Καναδά και των ΗΠΑ, καθώς και οι νότιες ακτές της Αυστραλίας και της Νότιας Αμερικής. Στη Μεσόγειο το κυματικό δυναμικό είναι αισθητά μικρότερο.

Εικόνα 4.2: Παγκόσμιο κυματικό δυναμικό σε kW/m^[57]



Εικόνα 4.3: Ευρωπαϊκό κυματικό δυναμικό σε kW/m^[58]



4.2.1 ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα των πολυάριθμων νησιών, διαθέτει την μεγαλύτερη ακτογραμμή ανάμεσα στις χώρες τις Ευρώπης. Το Αιγαίο Πέλαγος διαθέτει το υψηλότερο θαλάσσιο ενεργειακό δυναμικό της Μεσογείου με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος της τάξης των 4-11 kW/m. Εντοπίζονται επίσης, θαλάσσιες περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας (“hot spots”), λόγω φαινομένων ανάκλασης και περίθλασης των κυμάτων. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, υπολογίζεται στις 5-9 TWh ανά έτος, ποσό που αντιστοιχεί περίπου στο 10% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας (61 TWh για το έτος 2010). Το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά το ποσοστό συμμετοχής ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να συμβάλει αποτελεσματικά στην ενεργειακή αυτονομία μεγάλου αριθμού νησιών.

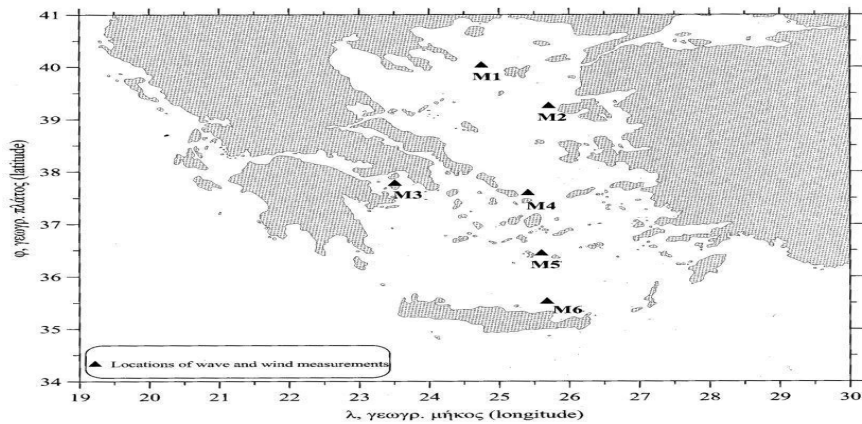
Για τις Ελληνικές θάλασσες μια πρώτη εκτίμηση του κυματικού δυναμικού μπορεί να γίνει από τα δεκαετή κυματικά δεδομένα του συστήματος Ποσειδών, που

δημοσιεύονται στον 'Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών'. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δίκτυο πλωτήρων που συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα ανά τρεις ώρες. Με βάση αυτό το σύστημα προκύπτουν οι πίνακες 4.1 και 4.2 για τα αντίστοιχα σημεία του χάρτη (εικόνα 4.4 και 4.5). Στο τέλος δίδεται ο χάρτης της μέσης ετήσιας κατανομής σημαντικού ύψους κύματος, μέγεθος ανάλογο της ενέργειας κύματος.

Πίνακας 4.1: Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού Σημεία Πλωτήρων σε kW/m^[59]

Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού (kW/m) Σημεία Πλωτήρων					
M1	M2	M3	M4	M5	M6
3.55	2.22	0.25	4.49	2.90	3.57

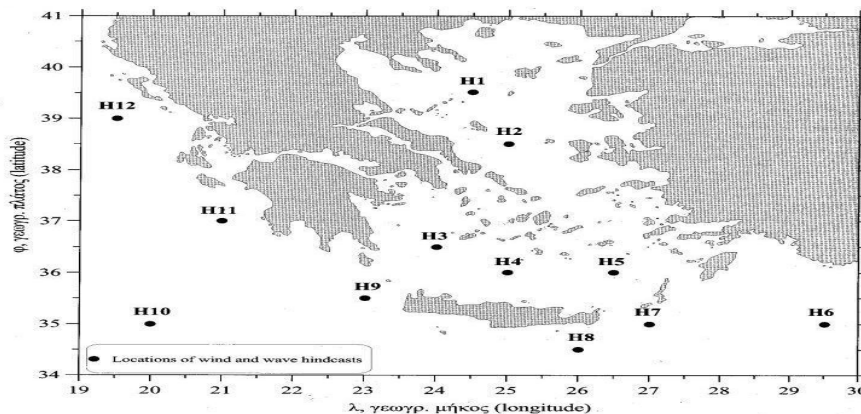
Εικόνα 4.4: Σημεία Πλωτήρων^[59]



Πίνακας 4.2: Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού Σημεία Αριθμητικής Επεξεργασίας σε kW/m^[59]

Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού (kW/m) Σημεία Αριθμητικής Επεξεργασίας											
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
3.08	3.96	3.52	3.83	4.59	6.08	6.46	4.63	6.92	7.72	5.45	5.31

Εικόνα 4.5: Σημεία Αριθμητικής Επεξεργασίας^[59]



4.3 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε, οι υπό μελέτη τεχνολογίες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας είναι πολλές και δεν υπάρχει μια επικρατέστερη στην οποία να έχουν επικεντρωθεί οι έρευνες.

Ωστόσο, παρά το μεγάλο πλήθος, οι συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν κυρίως με δύο τρόπους: Είτε σύμφωνα με τη θέση και το βάθος για το οποίο κατασκευάζονται για να λειτουργήσουν, είτε με την μέθοδο που εφαρμόζεται για την απόσπαση της κυματικής ενέργεια ^[60,61,62].

4.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι πιο γενική και περιλαμβάνει τρεις ζώνες τοποθέτησης, την χερσαία, την παράκτια και την υπεράκτια.

1) Συσκευές χερσαίας ζώνης (onshore). Οι τεχνολογίες είναι ενσωματωμένες στην ακτογραμμή με βάθος συνήθως μικρότερο των 15 μέτρων, κάτι που τους προσδίδει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Δεν απαιτούν αγκυροβολήσεις, ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά, λόγω της θέσης τους κοντά στην στεριά, χάνουν σημαντική ισχύ και η εγκατάσταση τους γενικά περιορίζεται από την γεωλογία της ακτογραμμής. Η πιο συνηθισμένη τεχνολογία σε αυτή την ζώνη είναι η τύπου ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (OWC) στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

2) Συσκευές παράκτιας ζώνης (nearshore). Το βάθος δεν υπερβαίνει τα 25 μέτρα και η συσκευή βρίσκεται σχετικά κοντά στην ακτή (περίπου 500 μέτρα). Οι συσκευές αυτές έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις συσκευές χερσαίας ζώνης, ενώ ταυτόχρονα συναντούν μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό από αυτό που υπάρχει στην ακτογραμμή. Συνήθως αναπτύσσονται ειδικές δομές που εδράζονται στον πυθμένα.

3) Συσκευές υπεράκτιας ζώνης (offshore). Σε αυτή την ζώνη εγκαθίστανται πλωτά συστήματα που απαιτούν αγκύρωση. Το βάθος κυμαίνεται από 25-75 μέτρα για συσκευές μικρού βυθίσματος και πάνω από 75 μέτρα για συσκευές μεγάλου βυθίσματος. Σε αυτά τα βάθη οι απώλειες κύματος λόγω τριβής με τον

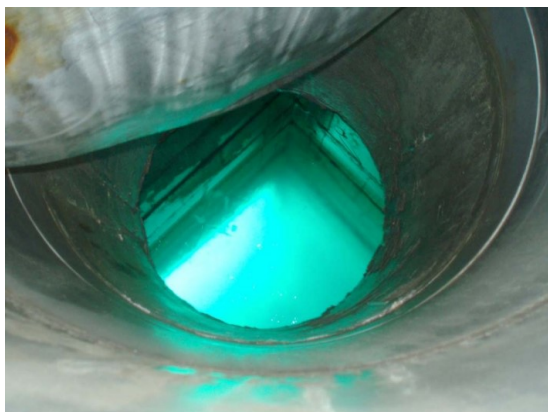
βυθό είναι ελάχιστες και το κυματικό δυναμικό φτάνει τα υψηλότερα επίπεδα. Επίσης δεν υπάρχουν προβλήματα χώρου και οπτικής όχλησης. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης είναι πολύ υψηλό. Τέλος υπάρχει και ο κίνδυνος ολοκληρωτικής απώλειας της συσκευής σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.

4.3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ

4.3.2.1 ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΟΥΣΑ ΣΤΗΛΗ ΝΕΡΟΥ (OSCILLATING WATER COLUMN)

Η Ταλαντευόμενη Στήλη Νερού (OWC) αποτελεί μία από τις βασικές τεχνολογίες για την εξαγωγή χρήσιμης μηχανικής ενέργειας από τα κύματα της θάλασσας. Λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή του μανόμετρου τύπου U, όπου η ταλάντωση οδηγείται από τα κύματα της θάλασσας. Ουσιαστικά είναι μια ημιβυθισμένη κενή εσωτερικά κατασκευή που μοιάζει με θάλαμο. Ο θάλαμος αυτός είναι ανοικτός προς την μεριά της θάλασσας και έχει το άνω τμήμα του ανοίγματος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Στο εσωτερικό του, πάνω από την επιφάνεια του νερού, έχει μια στήλη αέρα. Τα κύματα κινούν παλινδρομικά τη στήλη του νερού στο εσωτερικό του θαλάμου η οποία με τη σειρά της συμπιέζει και εκτονώνει την υπερκείμενη στήλη αέρα. Όταν η στήλη νερού ανέρχεται ο εγκλωβισμένος αέρας οδηγείται προς την ατμόσφαιρα μέσω ενός αεροστρόβιλου. Όταν η στήλη κατέρχεται, αναρροφάται αέρας από την ατμόσφαιρα μέσω του ίδιου αεροστρόβιλου, που στρέφεται γενικά προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την φορά κίνησης του αέρα. Η ροπή από την περιστροφική κίνηση του αεροστρόβιλου χρησιμοποιείται για την κίνηση μια γεννήτριας και στη συνέχεια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσκευές αυτές ως αρχικό σκοπό είχαν την εγκατάστασή τους στην ακτή σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές. Στη συνέχεια όμως δοκιμάστηκαν πλείουσες συσκευές αυτής της τεχνολογίας για εγκατάσταση στην ανοικτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση στον πυθμένα. Το σύστημα που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία αποτελεί ταλαντευόμενη Στήλη Νερού (OWC).

Εικόνα 4.6: Συσσκευή Wavegen^[63]



Εικόνα 4.7: Συσσκευή Oceanlinx^[64]



Εικόνα 4.8 : Συσσκευή Ocean Energy Buoy^[65]



4.3.2.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΑΚΡΟΣΤΕΝΗΣ ΜΟΡΦΗΣ (ATTENUATOR)

Εξ' ορισμού πρόκειται για συσκευές οι οποίες έχουν μεγάλο μήκος και είναι πλωτές, με μικρή μετωπική επιφάνεια. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην παράλληλη και επαπτόμενη κίνηση τους με την επιφάνεια του κύματος. Οι κινήσεις που συμβαίνουν κατά μήκος της μηχανής μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιλεκτικά ώστε να παραχθεί ενέργεια μέσω ενός υδραυλικού, κατά κύριο λόγο, μηχανισμού. Λόγω της μικρής του μετωπικής επιφάνειας ο μηχανισμός attenuator καταπονείται από μικρότερες δυνάμεις.

Εικόνα 4.9: Το πρωτότυπο Pelamis^[66]



4.3.2.3 ΣΗΜΕΙΑΚΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗΡΕΣ (POINT ABSORBERS)

Είναι συνήθως αξονοσυμμετρικά, πλωτά συστήματα με διαστάσεις μικρότερες του ενός τρίτου του μέσου μήκους κύματος. Το γεγονός ότι πρόκειται για αξονοσυμμετρικά συστήματα, σημαίνει ότι είναι λιγότερο ευπαθή στην κατεύθυνση προσέγγισης του μετώπου κύματος και σε ακραίες φορτίσεις. Μπορεί να είναι είτε πλωτές αγκυροβολημένες μονάδες είτε να εδράζονται στον πυθμένα. Τις περισσότερες φορές εκμεταλλεύονται κυρίως την παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα κατά την κατακόρυφη διέγερσή του, μετατρέποντάς την μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική ή γραμμική κίνηση για τη λειτουργία γεννήτριας. Το σχετικά μικρό μέγεθός τους, κάνει πιο εύκολη τη λειτουργία περισσότερων συστημάτων υπό κοινό υποθαλάσσιο καλώδιο για δημιουργία πάρκου επιθυμητής ονομαστικής ισχύος. Τα πιο ευρέως γνωστά παραδείγματα εφαρμογής αυτής της προσέγγισης είναι τα Wave Star, OPT, Wavebob, Fred Olsen & Co, Manchester bobber.

Εικόνα 4.10 :Συσκευή Wave Star^[67]



Εικόνα 4.11: Συσσκευή OPT^[68]



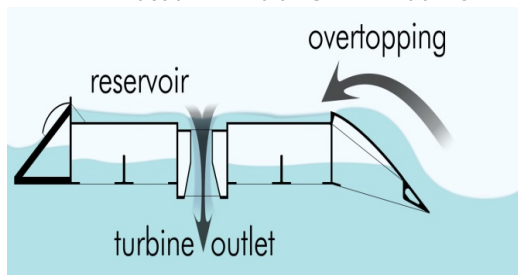
Εικόνα 4.12: Συσσκευή Wavebob^[69]



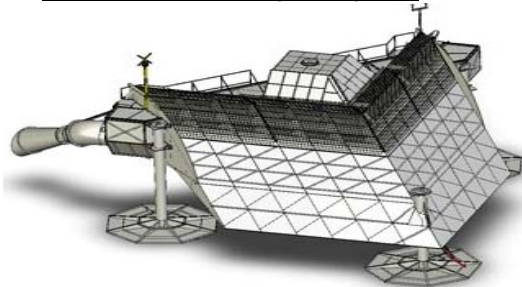
4.3.2.4 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ (OVERTOPPING DEVICE)

Πρόκειται για πλωτές ή σταθερές δεξαμενές, οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας. Η διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων χαμηλής πίεσης και το νερό καταλήγει ξανά στη θάλασσα. Ουσιαστικά η συσκευή εκμεταλλεύεται την δυναμική ενέργεια του νερού όπως γίνεται, σε μεγαλύτερη βέβαια κλίμακα, και σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό. Μπορούν να τοποθετηθούν και στην ακτογραμμή, αλλά και στην παράκτια και υπεράκτια ζώνη. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το Wave Dragon, το Waveplane, το Seawaveslot.

Εικόνα 4.13: Αρχή λειτουργίας Overtopping device^[70] Εικόνα 4.14: Συσσκευή Wave dragon^[71]



Εικόνα 4.15: Συσσκευή Waveplane^[72]



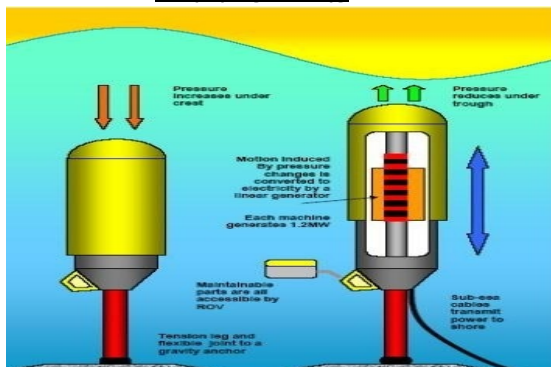
Εικόνα 4.16: Συσσκευή Seawaveslot^[73]



4.3.2.5 ΒΥΘΙΣΜΕΝΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΠΙΕΣΗΣ (SUBMERGED PRESSURE DIFFERENTIAL)

Αυτό το σύστημα αφορά σε ένα συγκεκριμένο είδος το οποίο είναι παράκτιο, στηριζόμενο στο βυθό και βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η πίεση κάτω από την επιφάνεια διαφοροποιείται, και εν συνεχεία μεταφέρεται στον μηχανισμό, λόγω της αλλαγής της πίεσης που συμβαίνει στην επιφάνεια με αφορμή την κίνηση του κύματος. Στον μηχανισμό, γίνεται η συμπίεση του αέρα, ο οποίος στην συνέχεια οδηγείται σε στρόβιλο για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Κατασκευή αυτού του τύπου αποτελεί το Archimedes Wave Swing (AWS) που είναι εγκατεστημένο από το 2005 ανοιχτά των ακτών της Πορτογαλίας.

Εικόνα 4.17: Αρχή λειτουργίας συσκευής διαφοράς πίεσης^[74]



Εικόνα 4.18: Συσκευή AWS απόδοσης 2MW^[74]

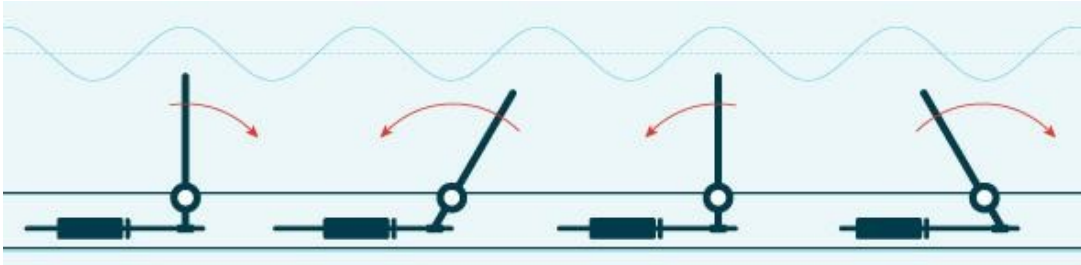


4.3.2.6 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ (OSCILLATING WAVE SURGE CONVERTER)

Οι συσκευές αυτές τις περισσότερες φορές στηρίζονται στο βυθό αλλά ενδέχεται να είναι και ημιβυθισμένες. Προσλαμβάνουν την ενέργεια από την οριζόντια κίνηση των στοιχείων του νερού, μέσω ενός βραχίονα που παλινδρομεί σαν εκκρεμές, στηριγμένος σε περιστρεφόμενη άτρακτο, η οποία είναι κάθετη στην κίνηση τόσο του νερού όσο και του βραχίονα. Επιπλέον, οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν εμβολοφόρο αντλία. Παράδειγμα αυτού του είδους είναι το σύστημα Oyster το οποίο εδράζεται στον πυθμένα και χρησιμοποιεί μια διάταξη τύπου πτερυγίου. Η παλινδρομική κίνηση του πτερυγίου θέτει σε κίνηση ένα έμβολο που αντλεί το νερό από τη θάλασσα στην ξηρά. Στη συνέχεια, το υψηλής πίεσης νερό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω ενός στρόβιλου τύπου Pelton.

Τα πιο γνωστά project που ακολουθούν την συγκεκριμένη σχεδίαση είναι τα Oyster, Waveroller, Langlee System και Neptune Triton.

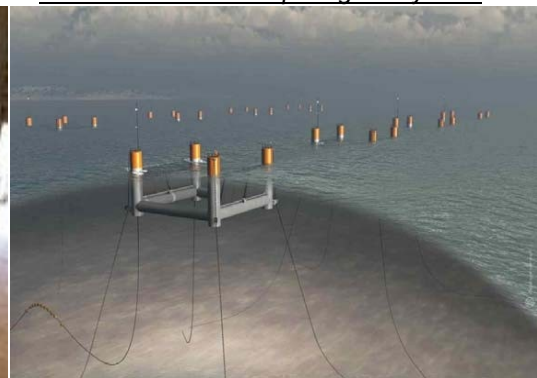
Εικόνα 4.19: Αρχή λειτουργίας OWSC^[75]



Εικόνα 4.20: Συσκευή Oyster^[76]



Εικόνα 4.20: Συσκευή Langlee System^[77]



4.3.2.7 ΑΛΛΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Πρόκειται κυρίως για πιο σύγχρονες τεχνολογίες οι οποίες δεν κατατάσσονται σε κάποια κατηγορία λόγω της αρκετά διαφορετικής σχεδίασής τους, όπως για παράδειγμα κάποια συστήματα περιστρεφόμενων μαζών ή εύκαμπτες κατασκευές που αλλάζουν σχήμα και όγκο και που αποτελούν τμήμα του συστήματος μετατροπής της ενέργειας

Εικόνα 4.21: Τεχνολογία Anasconda. Μακρόστενος εύκαμπτος σωλήνας που εκμεταλλεύεται τις παλινδρομικές Διογκώσεις^[78]



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

5.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η πλειονότητα των πλωτών κατασκευών, και ιδιαίτερα οι διάφορες μορφές και τα είδη που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σύνθετες κατασκευές με αποτέλεσμα η διαστασιοποίηση τους, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης της κατασκευής, να εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες.

Η ασφάλεια της κατασκευής μπορεί να εξασφαλισθεί, όταν, με τα εκτιμηθέντα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή, τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της απόκρισής της (κινήσεις, παραμορφώσεις, τάσεις) και τα κριτήρια σχεδίασης, μπορεί να προσδιορισθεί με επαρκή αξιοπιστία η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής και περιβάλλοντος μέσα στο οποίο λειτουργεί καθ' όλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της. Η συμπεριφορά της κατασκευής τόσο σε συνθήκες λειτουργίας όσο και στις ακραίες αναμενόμενες περιβαλλοντολογικές συνθήκες είναι καθοριστική για την εκτίμηση της συνολικής μελέτης.

Οι αρχές σχεδίασης για τις πλωτές θαλάσσιες κατασκευές περιγράφονται με επάρκεια στις προδιαγραφές των διάφορων νηογνυμών, τις υποδείξεις των οργανισμών και συναφών φορέων καθώς και στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία.

Για την εξέταση των οικονομικών απαιτήσεων μιας κατασκευής είναι απαραίτητο να γίνει για τη διαστασιοποίηση της εγκατάστασης τόσο γενικός όσο και λεπτομερής υπολογισμός. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και στις δύο περιπτώσεις στο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της πλατφόρμας, ώστε να προσομοιάζεται ικανοποιητικά η συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής.

Τα κύρια βήματα κατά τη διαδικασία μελέτης και σχεδίασης μιας offshore εγκατάστασης μπορούν να ταξινομηθούν γενικά ως εξής^{[79], [80]}:

- 1) Προσδιορισμός των περιβαλλοντολογικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας.

- 2) Προσδιορισμός των φορτίων που επάγονται στην κατασκευή από το περιβάλλον και της απόκρισής της σε αυτά.
- 3) Εκλογή και εφαρμογή μεθόδου για στατική και δυναμική αντοχή της κατασκευής.
- 4) Εκλογή των κριτηρίων σχεδίασης.
- 5) Εκλογή υλικών.
- 6) Λεπτομερής κατασκευαστική σχεδίαση που θα περιλαμβάνει και τη διαδικασία παραγωγής.
- 7) Καθορισμός των απαιτήσεων συντήρησης και ελέγχου.

Στο σχέδιο της τελικής σχεδίασης η κατασκευή πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για ασφάλεια και λειτουργικότητα με τρόπο που να είναι οικονομικά αποδεκτός.

5.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η αξιόπιστη σχεδίαση μιας πλωτής κατασκευής προϋποθέτει γνώση από τα πρώτα ήδη στάδια της μελέτης των περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της. Στοιχεία που επάγουν στην κατασκευή ή επιδρούν στην εν γένει λειτουργία της είναι ο άνεμος, τα θαλάσσια ρεύματα, οι θαλάσσιοι κυματισμοί, καθώς επίσης η γεωμορφολογία του πυθμένα ή σε σπανιότερες περιπτώσεις η σεισμογένεια της περιοχής λειτουργίας εφόσον πρόκειται για σταθερές θαλάσσιες κατασκευές ^{[79]. [80]}.

Οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες περιγράφονται κυρίως με τη βοήθεια στοιχείων που προκύπτουν μετά από μακροχρόνιες μετρήσεις ή παρατηρήσεις στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας κατασκευής. Παρακάτω θα αναφερθούν εν συντομία οι κυριότερες μέθοδοι για την περιγραφή του ανέμου, των θαλασσίων ρευμάτων και των θαλασσίων κυματισμών.

Για την αξιόπιστη σχεδίαση μιας θαλάσσιας πλωτής κατασκευής απαιτούνται στοιχεία τόσο για τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που θα επικρατούν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας της (operational condition) όσο και για εκείνες τις ακραίες καταστάσεις που αναμένονται να εμφανισθούν στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής και που θα προκαλέσουν τις μεγαλύτερες καταπονήσεις ή θα επιδράσουν αρνητικά στη λειτουργία της. Η σχεδίαση της

πλατφόρμας θα πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει και στην επενέργεια των ακραίων αυτών περιβαλλοντολογικών καταστάσεων (survival conditions).

5.2.1 ΠΕΔΙΟ ΑΝΕΜΟΥ

Για τον προσδιορισμό των φορτίων που επάγονται σε μια θαλάσσια κατασκευή από τον άνεμο πρέπει να γνωρίζουμε την καθ' ύψος κατανομή της μέσης ταχύτητας του \bar{V}_{tz} . Συνέπεια της πνοής (gust) του ανέμου γίνεται η ακόλουθη παραδοχή για τη στιγμιαία τιμή της ^[79]:

$$V = \bar{V}_{tz} + v' \quad (5.2.1.1)$$

όπου:

- \bar{V}_{tz} : μέση τιμή της ταχύτητας
- v' : στατιστική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής V.

Το μέγεθος \bar{V}_{tz} είναι συνάρτηση της καθ' ύψος απόστασης του θεωρούμενου σημείου από την επιφάνεια της θάλασσας και του χρονικού διαστήματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της μέσης τιμής.

Εφ' όσον δεν υπάρχουν για την περιοχή λειτουργίας της κατασκευής αξιόπιστες μετρήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος εκθετικός νόμος:

$$\bar{V}_{tz} = a\bar{V}_{1hr10} \left(\frac{z}{10} \right)^\beta \quad (5.2.1.2)$$

όπου:

- \bar{V}_{tz} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος z και για χρονικό διάστημα t.
- \bar{V}_{1hr10} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος δέκα μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα μίας ώρας.
- α, β : σταθερές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Μ' αυτές λαμβάνονται υπόψη αποκλίσεις που προκύπτουν στη μέση τιμή όταν ο μέσος χρόνος μέτρησης δεν συμπίπτει με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της \bar{V}_{1hr10} .

Πίνακας 5.1: Συντελεστές α,β της σχέσης^[79]

Συντελεστής	Μέσος χρόνος μέτρησης					
	1hr	10min	1min	15sec	5sec	3sec
α	1.000	1.060	1.180	1.260	1.310	1.330
β	0.150	0.130	0.113	0.106	0.102	0.100

Όταν χρησιμοποιείται η στοχαστική διαδικασία προσδιορισμού των φορτίων από τον άνεμο θα πρέπει να γνωρίζουμε το φάσμα της κατανομής του. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, που ισχύουν και για τους θαλάσσιους κυματισμούς, ο άνεμος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διαδικασία κατά Gauss. Στο πεδίο των συχνοτήτων μια τέτοια διαδικασία περιγράφεται πλήρως όταν είναι γνωστό το φάσμα κανονικής κατανομής της ενέργειάς της. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Νορβηγικού Νηογνώμονα το τελευταίο δίνεται από τη σχέση :

$$fS(f) = 4k\bar{V}_{1hr10} \frac{\tilde{f}}{(2 + \tilde{f})^{\frac{5}{6}}} \quad (5.2.1.3)$$

όπου:

- \tilde{f} : αδιάστατη συχνότητα ($\tilde{f} = f \cdot L / \bar{V}_{1hr10}$)
- S: πυκνότητα φάσματος (m^2 / Hz)
- f: συχνότητα (Hz)
- L: μέγεθος κλίμακας (m). Συνήθως λαμβάνουμε $L=1800m$
- k: συντελεστής τριβής που εξαρτάται από την κατάσταση της θάλασσας και ισούται με 0.0020 ή 0.0015 για κυματώδη ή ταραγμένη κατάστασή της αντίστοιχα
- \bar{V}_{1hr10} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος δέκα μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα μίας ώρας.

5.2.2 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Για τον προσδιορισμό της καθ' ύψος διανομής της ταχύτητας των θαλασσίων ρευμάτων τα θεωρούμε συνήθως σαν υπέρθεση ρεύματος που δημιουργείται από το πεδίο ανέμου και ρεύματος που προκαλείται από παλίρροιες. Για τα πρώτα, τα ρεύματα αέρα, θεωρούμε γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας τους από το βάθος

ενώ για τα δεύτερα, τα ρεύματα παλίρροιας, αποδεχόμαστε αντίστοιχα εκθετική εξάρτηση. Με τις σχέσεις αυτές μπορούμε να γράψουμε ^[79]:

$$\boxed{V_{\text{ρευμ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) + V_{\text{ανεμ}}(z)} \quad (5.2.2.1)$$

$$\boxed{V_{\text{παλ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) \left(\frac{d+z}{d} \right)^{1/7}, z \leq 0} \quad (5.2.2.2)$$

$$\boxed{V_{\text{ανεμ}}(z) = V_{\text{ανεμ}}(z) \left(\frac{d_0+z}{d_0} \right)^{1/7}, -d_0 \leq z \leq 0} \quad (5.2.2.3)$$

$$\boxed{V_{\text{ανεμ}}(z)=0, z < -d_0} \quad (5.2.2.4)$$

όπου:

- $V_{\text{ρευμ}}(z)$: η συνολική ταχύτητα του ρεύματος σε απόσταση z από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.
- $V_{\text{παλ}}(z)$: η ταχύτητα του ρεύματος παλίρροιας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.
- $V_{\text{ανεμ}}(z)$: ταχύτητα ρεύματος προκαλούμενου από τον άνεμο στην ελεύθερη επιφάνεια.
- d : το βάθος του νερού μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια.
- d_0 : βάθος αναφοράς για ρεύματα προκαλούμενα από τον άνεμο ($d_0=50\text{m}$). Κάτω από το βάθος αυτό θεωρείται μηδενική η ταχύτητά τους.
- z : απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια, θετική με κατεύθυνση προς τα πάνω.

Για της διάφορες περιοχές της Γης υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των ταχυτήτων των ρευμάτων που προκαλούνται από παλίρροιας. Αντίθετα σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων για τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκαλούνται από τον άνεμο δεχόμαστε ότι στην επιφάνεια της ανοικτής θάλασσας ισχύει η σχέση :

$$\boxed{V_{\text{ανεμ}} = 0.02\bar{V}_{1\text{hr}10}} \quad (5.2.2.5)$$

5.2.3 ΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η ταυτόχρονη δράση δυνάμεων απομακρύνσεως των σωματιδίων της θάλασσας από τη θέση ηρεμίας και δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές τους θέσεις, σε συνδυασμό με την μεγάλη κινητικότητα των σωματιδίων, προκαλεί κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλαντώσεως στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό.

Ένα σύστημα από μάζες και ελατήρια εμφανίζει ιδιοσυχνότητες τόσες όσοι είναι και οι βαθμοί ελευθερίας του. Η επιφάνεια της θάλασσας είναι συνεχές μέσο με άπειρους βαθμούς ελευθερίας και ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Πάνω στην επιφάνεια του νερού μπορούμε κατά συνέπεια να βρούμε κυματισμούς οποιασδήποτε συχνότητας (αν εξαιρέσουμε την περίπτωση όπου το ρευστό δεν είναι απέρατο, οπότε και οι οριακές συνθήκες θέτουν περιορισμούς στη μορφή των κυμάτων) ^[79].

Ο λόγος για τον οποίο βρίσκουμε επιφανειακά κύματα μέσα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων οφείλεται αφ' ενός μεν στο ότι και οι δυνάμεις που τα προκαλούν βρίσκονται σε ορισμένο εύρος αφ' ετέρου δε στο γεγονός ότι η ταχύτητα απορρόφησης ενέργειας λόγω συνεκτικότητας είναι πολύ μεγαλύτερη σε κύματα υψηλών συχνοτήτων απ' ότι σε αντίστοιχα χαμηλών ^[79].

Βασικές εξισώσεις κατά την εξέταση της κίνησης ασυμπίεστου ρευστού είναι:

- Εξισώσεις Navier-Stokes

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (5.2.3.1)$$

όπου:

- \vec{V} το διάνυσμα της ταχύτητας (u,v,w)
- p : η πίεση
- μ : συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας
- ρ : η πυκνότητα
- \vec{F} : οι εξωτερικά επιβεβλημένες δυνάμεις (ανά μονάδα μάζας)

- Η εξίσωση συνέχειας

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (5.2.3.2)$$

Για να συγκρίνουμε τη σχετική σημασία κάθε όρου στην εξίσωση του Navier-Stokes θα μετασχηματίσουμε σε αδιάστατη μορφή, υποθέτοντας ημιτονοειδή περιοδική μεταβολή δηλαδή θα θέσουμε $t_1 = \omega t$, $\vec{V} = V_0 V_1 = \omega a \vec{\zeta}_1$, και $(x, y, z) = \lambda(x_1, y_1, z_1)$ όπου:

- a : Το πλάτος της κίνησης
- ζ_1 : Η μετατόπιση
- λ : Το μήκος κύματος
- ω : Η συχνότητα περιοδικής μεταβολής.

Στη περίπτωση αυτή οι όροι της εξίσωσης (5.2.3.1) $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$, $(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}$ και $\frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V}$ θα είναι ανάλογοι με τις ποσότητες $\rho \omega^2 a$, $\rho \omega^2 a^2 / \lambda$ και $\mu \omega a / \lambda^2$ έτσι ώστε:

$$\frac{(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}}{\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} = \frac{a}{\lambda} \quad \text{και} \quad \frac{\frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V}}{\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} = \frac{\mu}{\rho} \frac{1}{\omega \lambda^2} = \frac{\nu}{\omega \lambda^2}$$

όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Η κινηματική συνεκτικότητα του νερού είναι πολύ μικρή ($0,11 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) έτσι ώστε για κύματα όπου $\omega = 0$ (1) rad/sec και $\lambda = 0$ (30-300 m), οι δυνάμεις λόγω συνεκτικότητας είναι αμελητέες. Στη συνέχεια θα δούμε πως και ο δεύτερος όρος παραλείπεται στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας με την προϋπόθεση ότι $a \ll \lambda$.

Ο λόγος $\frac{(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}}{\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} = \frac{a}{\lambda}$ δικαιολογεί αυτή την παραδοχή. Η παράλειψη των

δυνάμεων συνεκτικότητας δικαιολογείται μόνο στην περίπτωση της απουσίας σώματος από το πεδίο ροής. Στην αντίθετη περίπτωση η οριακή συνθήκη θα πρέπει να ικανοποιείται στην επιφάνεια του σώματος.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη διατύπωση του γενικού οριακού προβλήματος για τα κύματα βαρύτητας παραλήφθηκαν οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Οι δυνάμεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία σε δύο περιπτώσεις:

(α) κατά τον σχηματισμό των κυμάτων λόγω του ανέμου, δεδομένου ότι τα πρώτα κύματα που εμφανίζονται είναι κύματα επιφανειακής τάσης και

(β) κατά την εκτέλεση πειραμάτων. Στην περίπτωση αυτή για κύματα μικρού μήκους τα αποτελέσματα μπορεί να μην ισχύουν λόγω ύπαρξης των δυνάμεων επιφανειακής τάσης, που δεν εμφανίζονται στο φυσικό πρότυπο.

Αν θεωρήσουμε υγρό χωρίς συνεκτικότητα τότε οι εξισώσεις κίνησης των Navier-Stokes (5.2.3.1) ανάγονται σε αυτές του Euler. Εφ' όσον δε η κίνηση του ρευστού είναι και αστρόβιλη τότε υπάρχει δυναμικό ροής ϕ τέτοιο, ώστε ^[79]:

$$\vec{V} = \vec{\nabla} \cdot \Phi \quad (5.2.3.3)$$

Οπότε η εξίσωση συνέχειας (5.2.3.2) μετασχηματίζεται στην εξίσωση του Laplace:

$$\Delta \Phi = 0 \Leftrightarrow \nabla^2 \Phi = 0 \quad (5.2.3.4)$$

Στην περίπτωση αυτή η ολοκλήρωση των εξισώσεων του Euler οδηγεί στην εξίσωση του Bernoulli :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{p}{\rho} = \text{σταθ.} \quad (5.2.3.5)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να θέσουμε τις οριακές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί το ζητούμενο δυναμικό της ροής Φ . Αυτές θα είναι:

- Κινηματική συνθήκη του πυθμένα (Κ.Σ.Π.)^[79]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (5.2.3.6)$$

όπου \vec{n} : το κάθετο διάνυσμα στο θεωρούμενο σημείο του πυθμένα.

Η συνθήκη αυτή εκφράζει το αδιαπέρατο του πυθμένα από τα μόρια του ρευστού.

- Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Κ.Σ.Ε.Ε.)

Αν θεωρήσουμε ότι η άγνωστη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται από τη σχέση $z = \zeta(x, y, t)$ τότε η μαθηματική διατύπωση της Κ.Σ.Ε.Ε. είναι:

$$\frac{D}{Dt} (z - \zeta) = 0 \quad (5.2.3.7)$$

ή

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V}\vec{\nabla} \quad (5.2.3.8)$$

προκύπτει

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, z = \zeta(x, y, t) \quad (5.2.3.9)$$

Που σημαίνει ότι το μόριο του ρευστού στην επιφάνεια παραμένει σε αυτή καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησής της.

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Δ.Σ.Ε.Ε.) ^[79]

Η συνθήκη αυτή εκφράζει μαθηματικά το γεγονός ότι η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = \text{σταθ.}, z = \zeta(x, y, t) \quad (5.2.3.10)$$

και για σταθερά ίση με το μηδέν (χωρίς να χάσουμε από τη γενικότητα) τότε η (5.2.3.10) γίνεται :

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g \zeta = 0, z = \zeta(x, y, t) \quad (5.2.3.11)$$

Παρατηρήσεις:

- Οι οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μη γραμμικές.
- Είναι άγνωστο το όριο $z = \zeta(x, y, t)$ στο οποίο ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες.
- Το πρόβλημα δεν επιδέχεται κλειστή λύση.
- Πρέπει να ακολουθηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι για τη γραμμικοποίηση των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια.
- Για τη γραμμικοποίηση θεωρούμε ότι το ύψος του κύματος H είναι συνήθως μικρό σε σχέση με το μήκος λ . Κατά συνέπεια και ο λόγος $\frac{H}{2\lambda} = \epsilon \ll 1$. Η παράμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη σε σειρές διαταραχών όλων των μεγεθών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα όπως θα διατυπωθεί παρακάτω ^[79].

1. Σειρές για το δυναμικό:

$$\Phi(x,y,z;t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \Phi^{(n)}(x,y,z,t) \quad (5.2.3.12)$$

2. Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta(x,y;t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \zeta^{(n)}(x,y;t) \quad (5.2.3.13)$$

όπου $\Phi^{(n)}$ και $\zeta^{(n)}$ οι n-οστοί όροι της ανάπτυξης.

Ο όρος μηδενικής τάξης για το δυναμικό ισούται με μηδέν, ενώ για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δεν υφίσταται όπως θα επεξηγηθεί στη συνέχεια. Θεωρώντας τους n πρώτους όρους των αναπτύξεων αυτών έχουμε τη λύση του προβλήματος n-στης τάξης. Για να αποφύγουμε τη δυσκολία ικανοποίησης των οριακών συνθηκών (5.2.3.9) και (5.2.3.11) στο άγνωστο όριο $z=\zeta(x,y,t)$ αναπτύσσουμε τα εμφανιζόμενα στις συνθήκες αυτές μεγέθη του δυναμικού των παραγώγων του σε σειρές Taylor περί τη θέση $z=0$ που αντιστοιχεί στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού, θεωρώντας ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\zeta(x,y,t)$ είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος.

Έτσι έχουμε :

$$\Phi|_{z=\zeta} = \Phi|_{z=0} + \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (5.2.3.14)$$

Και τις παραγώγους:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (5.2.3.15)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (5.2.3.16)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial z^3} \Big|_{z=0} + \dots \quad (5.2.3.17)$$

Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνουμε υπόψη μας κατά τη διατύπωση των οριακών συνθηκών τη μη γραμμικότητα και τα εμφανιζόμενα μεγέθη υπολογίζονται στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού. Εισάγοντας τις (5.2.3.12) έως (5.2.3.17) στις μη γραμμικές οριακές συνθήκες (5.2.3.9) και (5.2.3.11) και διατάσσοντας τους εμφανιζόμενους όρους κατά δυνάμεις του ε αντίστοιχα, έχουμε:

- Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Κ.Σ.Ε.Ε.)

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y} \right] + O(\varepsilon^3) = 0, z=0 \quad (5.2.3.18)$$

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Δ.Σ.Ε.Ε.)

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g \zeta^{(1)} \right] + \varepsilon^2 \left[g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] + O(\varepsilon^3) = 0, z=0 \quad (5.2.3.19)$$

Επειδή οι εξισώσεις αυτές θα πρέπει να ισχύουν για όλα τα ε πρέπει όλοι οι συντελεστές των δυνάμεων του ε να ισούνται με μηδέν. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν η κινηματική και δυναμική n-τάξης που θα ικανοποιούν οι n-στοί όροι της ανάπτυξης (5.2.3.12) στην ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι προκύπτουν:

Πρόβλημα 1^{ης} τάξης (n=1)

- Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} = 0, z=0 \quad (5.2.3.20)$$

- Δυναμική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g \zeta^{(1)} = 0, z=0 \quad (5.2.3.21)$$

Πρόβλημα 2^{ης} τάξης (n=2)

- Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y}, z=0 \quad (5.2.3.22)$$

- Δυναμική συνθήκη

$$g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0, z=0 \quad (5.2.3.23)$$

Από τη διατύπωση των οριακών συνθηκών (5.2.3.22) και (5.2.3.23) είναι προφανές ότι για την εύρεση της προσεγγιστικής λύσης 2^{ης} τάξης απαιτείται η προηγούμενη γνώση, εκείνη της 1^{ης} τάξης. Γενικά οι σχέσεις (5.2.3.22) και (5.2.3.23) για τη n-στη τάξη μπορούν να γραφούν στη μορφή:

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(n)}}{\partial t} = G^{(n-1)}, z = 0 \quad (5.2.3.24)$$

και

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial t} + g\zeta^{(n)} = F^{(n-1)}, z = 0 \quad (5.2.3.25)$$

όπου οι συναρτήσεις $G^{(n-1)}$ και $F^{(n-1)}$ είναι συνδυασμός των λύσεων 1^{ης}, 2^{ης}, (n-1) τάξης. Οι συναρτήσεις $\Phi^{(n)}$ που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του ζητούμενου δυναμικού της ροής Φ με σειρά διαταραχών θα πρέπει να ικανοποιούν:

1. Τις οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια (5.2.3.24) και (5.2.3.25) .
2. Τη συνθήκη στον πυθμένα (5.2.3.6)
3. Την εξίσωση Laplace (5.2.3.4)

δηλαδή για τον n-στο όρο της σειράς θα πρέπει:

$$\Delta \Phi^{(n)} = 0 \quad \text{στο πεδίο ροής} \quad (5.2.3.26)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial \vec{n}} = \vec{\nabla} \Phi^{(n)} \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{στον πυθμένα} \quad (5.2.3.27)$$

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ-ΑΠΛΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σα λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις εξ. (5.2.3.20), (5.2.3.21), (5.2.3.26), (5.2.3.27) για n=1. Η λύση του προβλήματος μας δίνει τα εξής αποτελέσματα για πεπερασμένο βάθος νερού ^[79]:

- Για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta^{(1)}(x; y; t) = \frac{H}{2} \cos[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t] \quad (5.2.3.28)$$

- Για το δυναμικό του πεδίου ροής:

$$\Phi^{(1)}(x; y; z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t] \quad (5.2.3.29)$$

όπου:

- k : ο αριθμός κύματος που ισούται με $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- λ : το μήκος κύματος
- ω : η κυκλική συχνότητα του κύματος που συνδυάζεται με τον αριθμό κύματος k μέσω της σχέσης $\omega^2 = kg \tanh(kd)$
- d : το βάθος του νερού
- θ : η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση προχώρησης του μετώπου κυματισμού με τον άξονα x .

Σε περίπτωση σύμπτωσης των δύο διευθύνσεων οι εξ. (5.2.3.28), (5.2.3.29) που περιγράφουν απλό αρμονικό κυματισμό κινούμενο κατά τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα x , γίνονται:

$$\zeta^{(1)}(x;t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (5.2.3.30)$$

$$\Phi^{(1)}(x;z;t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (5.2.3.31)$$

Αναφέρουμε και τη μιγαδική παράσταση των μεγεθών $\zeta^{(1)}$ και $\Phi^{(1)}$ που είναι πολύ συνηθισμένη σε προβλήματα ναυτικής υδροδυναμικής.

$$\zeta^{(1)}(x;t) = \operatorname{Re} \left[\frac{H}{2} e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]} \right] \quad (5.2.3.32)$$

$$\Phi^{(1)}(x;z;t) = \operatorname{Re} \left[-i \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]} \right] \quad (5.2.3.33)$$

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ακόμη ότι στην περίπτωση απλού αρμονικού κύματος οι τροχιές των μορίων του ρευστού είναι κλειστές και κατά συνέπεια δεν εμφανίζεται μεταφορά μάζας.

5.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ένα από τα βασικότερα βήματα για την μελέτη μιας πλωτής κατασκευής είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων (φορτίων) που ασκούνται πάνω σε αυτή. Τα φορτία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν εξής^[80]:

1. Λειτουργικά φορτία (functional loads), όπως το βάρος της κατασκευής, το βάρος του εξοπλισμού, τα στατικά αλλά και τα δυναμικά φορτία που οφείλονται στην εκτέλεση εργασιών και των δυνάμενων άντωσης.

2. Φορτία από τη δράση του περιβάλλοντος (environmental loads), τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που έχουν άμεση δράση και σε αυτά που έχουν έμμεση δράση. Τα φορτία που έχουν άμεση δράση στην κατασκευή δημιουργούνται από τον άνεμο, τα θαλάσσια ρεύματα, τους θαλάσσιους κυματισμούς, τους σεισμούς κ.ο.κ ενώ έμμεση δράση έχουν τα φορτία τα οποία προέρχονται από τις αγκυρώσεις, τις κινήσεις της κατασκευής, τις θερμοκρασιακές μεταβολές κ.ο.κ. Από άποψη διαστασιολόγησης και μελέτης τα σημαντικότερα φορτία που επάγονται στην κατασκευή είναι αυτά από τους θαλάσσιους κυματισμούς τα οποία και θα αναλυθούν παρακάτω.

5.3.1 ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Τα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή παρουσία θαλάσσιων κυματισμών, οφείλονται στα φαινόμενα αντίστασης (drag), λόγω αποκόλλησης της ροής, στα αδρανειακά φαινόμενα (inertia), δηλαδή λόγω της μεταβολής της πίεσης του περιβάλλοντος ρευστού που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επιτάχυνση της ροής αλλά και στα φαινόμενα περίθλασης (diffraction), εξαιτίας της παραμόρφωσης του πεδίου ροής λόγω παρουσίας του σώματος^[80].

Οι δυνάμεις που προκαλούνται από τους διάφορους μηχανισμούς και ενεργούν στην κατασκευή είναι οι δυνάμεις αντίστασης (drag forces), οι οποίες οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής αλλά και οι αδρανειακές δυνάμεις (fluid inertia forces). Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους^[79]:

- Δυνάμεις Froude-Kryloff

Ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Η βασική παραδοχή για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία της κατασκευής δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής. Ο υπολογισμό τους, γίνεται ολοκλήρωση της πίεσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κυματισμού στη βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής.

- Δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation forces)

Εάν θεωρηθεί πως η κατασκευή είναι κινούμενη, τότε το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία κυματισμών και κατ' επέκταση η δημιουργία ενός δυναμικού ροής που επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στις δυνάμεις Froude-Kryloff και περίθλασης.

- Δυνάμεις περίθλασης (diffraction forces)

Σε αυτή την περίπτωση δυνάμεων, λαμβάνεται υπόψη η παρουσία της κατασκευής και η παραμόρφωση που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής. Εάν θεωρηθεί πως το σώμα είναι ακίνητο, τότε στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού προστίθεται και το δυναμικό περίθλασης, το οποίο οφείλεται στην παραμόρφωση της ροής. Το άθροισμα αυτών, δίνει τις δυνάμεις περίθλασης.

- Άλλες δυνάμεις

Οι δυνάμεις λόγω θαλασσίων κυματισμών είναι μη γραμμικές από τη φύση τους. Υποδιαιρούνται σε δυνάμεις πρώτης τάξης που προκύπτουν από την επίλυση του γραμμικού προβλήματος καθώς και στις δυνάμεις δεύτερης και ανώτερης τάξης.

5.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Λόγω της ύπαρξης πολλών διαφορετικών γεωμετριών και διαστάσεων θαλάσσιων κατασκευών καθώς και διαφορετικών συνθηκών εγκατάστασης, είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση τους ώστε να εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη διαδικασία για την υδροδυναμική ανάλυση κάθε κατηγορίας. Ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει με κριτήριο το μέγεθος της κατασκευής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του κύματος.

Σε μια πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τη σχετική βαρύτητα των δυνάμεων που προαναφέρθηκαν και εύρεσης των περιοχών καθοριστικής σημασίας έκαστης, εξετάζεται στα πλαίσια της διαστατικής ανάλυσης η περίπτωση κατακόρυφου κυλίνδρου, εδραζόμενου στον πυθμένα.

Υποθέτοντας ότι προσπίπτει αρμονικό κύμα στον κύλινδρο, η δύναμη που ασκείται πάνω σε αυτόν μπορεί να εκφραστεί με μια συναρτησιακή σχέση που αφ' ενός μεν να λαμβάνει υπόψη της τα χαρακτηριστικά του αρμονικού κύματος και τα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλίνδρου, αφ' ετέρου τα αδρανειακά φαινόμενα καθώς και φαινόμενα τριβής και βαρύτητας.

Αν το κύμα περιγράφεται πλήρως από τριάδες τιμών, ας πούμε την (H,λ,d), τότε η δύναμη που ασκείται σε κυλινδρικό σώμα θα δίνεται από τη συναρτησιακή σχέση ^[79]:

$$F = f(D, d, \rho, g, H, \lambda, \mu) \quad (5.3.2.1)$$

όπου:

- D: η διάμετρος του κυλίνδρου
- d: το βάθος του νερού
- ρ: η πυκνότητα του νερού
- g: η επιτάχυνση της βαρύτητας
- H: το ύψος του κύματος
- λ: το μήκος του κύματος
- μ: η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού.

Εφαρμόζοντας το θεώρημα π της μηχανικής ομοιότητας, η σχέση αδιαστατοποιείται ως εξής:

$$\frac{F}{\rho g \pi H \frac{D^2}{8}} = f\left(\frac{2\pi D}{\lambda}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{gD^3}}\right) \quad (5.3.2.2)$$

Παρατηρούμε πως ο λόγος $\frac{\mu}{\rho \sqrt{gD^3}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}}$ (ν: κινηματική συνεκτικότητα)

ισούται με τον λόγο του αριθμού Froude προς τον αριθμό Reynolds.

Ο αριθμός Froude προσδιορίζεται ως ^[79]:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{c}{\sqrt{gD}} \quad (5.3.2.3)$$

Ο αριθμός Reynolds προσδιορίζεται ως ^[79]:

$$Re = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Τριβής}} = \frac{cD}{\nu} \quad (5.3.2.4)$$

Διαιρώντας μεταξύ τους, τους συντελεστές:

$$\frac{Fr}{Re} = \frac{\text{Δυνάμεις Τριβής}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{v}{\sqrt{gD^3}} \quad (5.3.2.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχει συνδυασμένη επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, τριβής και των αδρανειακών δυνάμεων. Προκύπτει ότι αυξανόμενης της διαμέτρου του κυλίνδρου, αυξάνει και η σχετική σημασία των δυνάμεων βαρύτητας έναντι εκείνων της τριβής. Αντικαθιστώντας την τιμή της ταχύτητας μετατόπισης c του απλού αρμονικού κύματος, $c = \sqrt{\frac{g \tanh(kd)}{k}}$ στην έκφραση για τον αριθμό Froude, προκύπτει:

$$Fr = \left[\frac{g \tanh(kd)}{k D g} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{\tanh(kd)}{kD}}$$

Για νερό απείρου βάθους, όπου $\tanh(kd) \equiv 1$:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} \equiv \frac{1}{\sqrt{kD}}$$

Όσο η διάμετρος του σώματος D είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος λ , παρατηρούμε ότι τα αδρανειακά φαινόμενα είναι σημαντικότερα έναντι των φαινομένων βαρύτητας. Άρα, για μικρές τιμές του kD μπορούν να παραβλεφθούν οι δυνάμεις περίθλασης. Όταν όμως το kD είναι μεγάλο, τα φαινόμενα βαρύτητας είναι πιο σημαντικά από τα αδρανειακά φαινόμενα.

Για ρηχό νερό, όπου $\tanh(kd) \equiv kd$:^[79]

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} \equiv \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Παρατηρήσεις:

1. Τα φαινόμενα βαρύτητας αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για μεγάλες τιμές της διαμέτρου D , ή για μικρές τιμές του βάθους του νερού d , ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ .

2. Οι οριακές τιμές των παραμέτρων kd ή αντίστοιχα και $\frac{d}{D}$, πέρα από τις οποίες θα λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα της παραμόρφωσης της ροής θα αναφερθούν στη συνέχεια. Η δε θεωρητική τους κάλυψη απαιτεί προσδιορισμό του πεδίου ροής στα πλαίσια της θεωρίας δυναμικού. Αν χρησιμοποιήσουμε σαν τριάδα περιγραφής του αρμονικού κύματος ($u(z)$, T , d), με $\bar{u}(z) = \omega \left(\frac{H}{2} \right)$ τότε η συναρτησιακή σχέση για τη δύναμη είναι:

$$F = f(D, d, \rho, \bar{u}(z), T, \mu)$$

$$\left(\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2(z) D d} \right) = f \left(\frac{\bar{u}(z) T}{D}, \frac{\bar{u}(z) D}{\mu}, \frac{d}{D} \right)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την σταθερά Keulegan- Carpenter $N_{KC} = \frac{\bar{u} T}{D}$ που είναι αδιάστατο μέγεθος και τον αριθμό Reynolds $Re = \frac{\bar{u}(z) T}{\nu}$, καταλήγουμε στην επόμενη εξίσωση:

$$\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 D d} = f(N_{KC}, Re, \frac{d}{D})$$

Αν θελήσουμε να εισάγουμε και την τραχύτητα k του κυλίνδρου, φθάνουμε σε άλλη συναρτησιακή σχέση που είναι απαραίτητη για μη λείους κυλίνδρους:

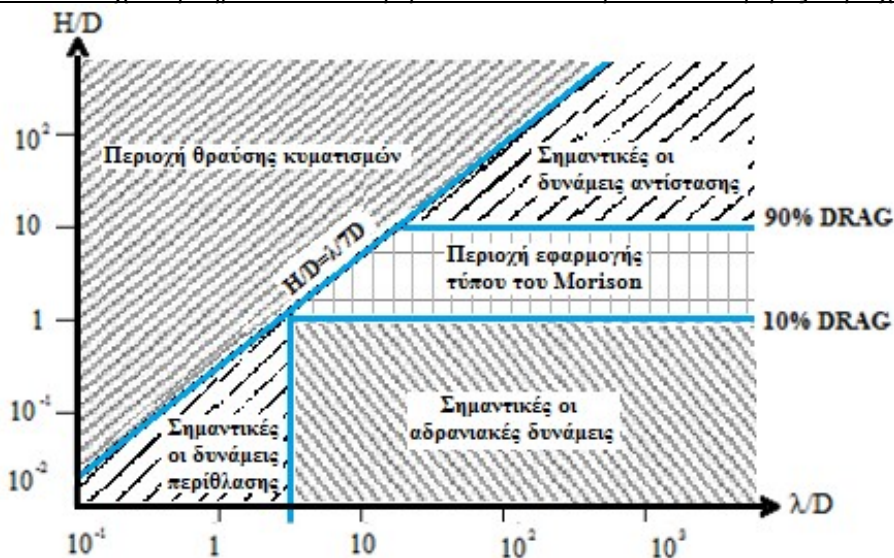
$$\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 D d} = f(N_{KC}, Re, \frac{d}{D}, \frac{k}{D})$$

Στο σχήμα που ακολουθεί(5.1) φαίνεται κατά περιοχές η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων (αδρανειακών, βαρύτητας, αντίστασης) για την περίπτωση του κατακόρυφου κυλίνδρου. Όπως φαίνεται στο σχήμα για τιμές του $\frac{H}{D} > 10$ το φορτίο που δέχεται η κατασκευή οφείλεται κατά 90% τουλάχιστον σε δυνάμεις αντίστασης και το πολύ 10% σε αδρανειακές δυνάμεις, ενώ αντίστοιχα

στο κάτω όριο που βρίσκεται για $\frac{H}{D} < 1$ οι ποσότητες αυτές αντιστρέφονται και συγκεκριμένα ένα 10% το πολύ είναι δυνάμεις αντίστασης ενώ το υπόλοιπο 90% τουλάχιστον είναι από αδρανειακές δυνάμεις.

Πάντως είναι πολύ δύσκολο να πούμε πότε για την κατασκευή οι δυνάμεις αντίστασης γίνονται καθοριστικές σε σχέση με τις αντίστοιχες αδρανειακές. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνεται και το όριο του Michell- Havelock, το γνωστό $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{7}$ πέρα από το οποίο εμφανίζεται θραύση κυματισμών για βαθύ νερό.

Σχήμα 5.1: Η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων σε διάφορες περιοχές^[79]



5.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΩΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗΣ ΥΔΑΤΙΝΗΣ ΣΤΗΛΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΟΙΚΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

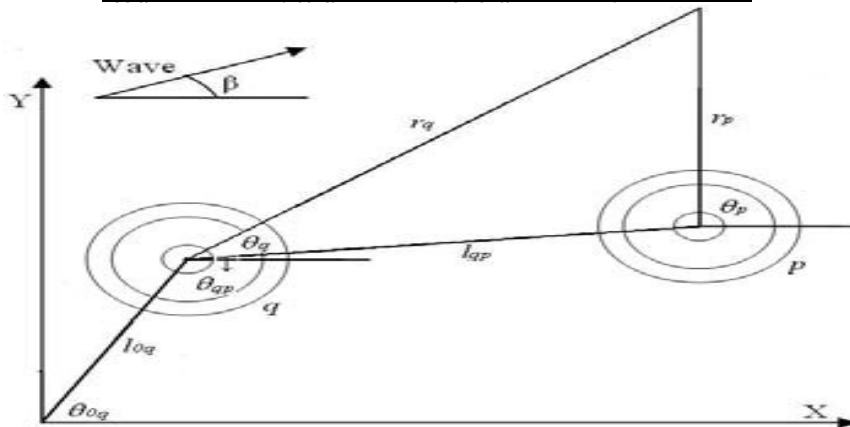
5.4.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Ένας αρμονικός κυματισμός πλάτους $H/2$, συχνότητας ω και αριθμού κύματος k που διαδίδεται σε νερό βάθους d , προσπίπτει σε ομάδα N και τυχαίας μορφής κατακόρυφων αξονομετρικών συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (OWC).

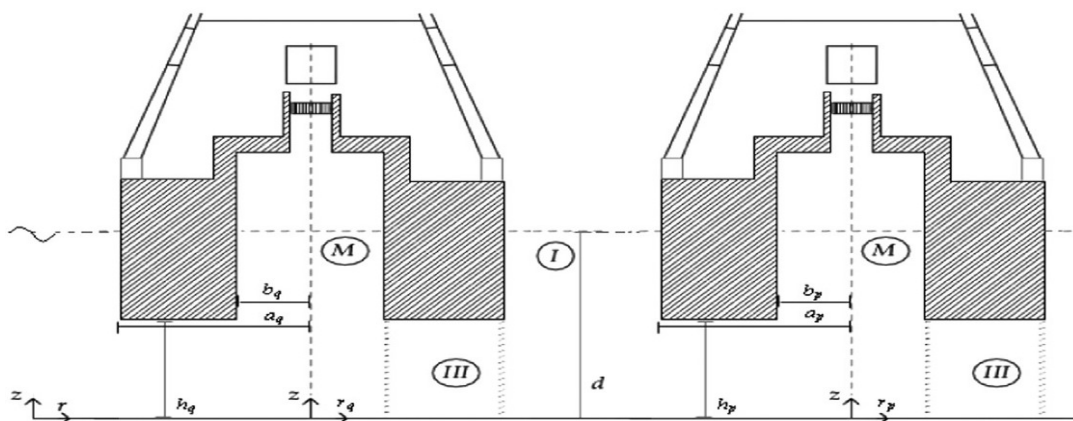
Υποθέτουμε μικρό πλάτος κυματισμών και μη συνεκτική αστρόβιλη ροή ώστε να ισχύει η δυναμική γραμμική θεωρία. Χρησιμοποιείται καρτεσιανό σύστημα

συντεταγμένων O-XYZ με την αρχή των αξόνων στον πυθμένα και τη φορά του κατακόρυφου άξονα Oz προς τα πάνω. Θεωρούμε μια συστοιχία N κάθετων αξονομετρικών συσκευών που το καθένα επιπλέει αυτόνομα. Λόγω της γεωμετρίας των σωμάτων ορίζονται τα επιμέρους N κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων (r_q, ϑ_q, z) , $q=1, 2, \dots, N$ με αρχή τον πυθμένα της θάλασσας και κατακόρυφο άξονα πάνω στο νοητό άξονα της q συσκευής, με διεύθυνση προς τα πάνω (Σχήματα 5.3, 5.4). Η απόσταση μεταξύ των κατακόρυφων αξόνων κάθε O.W.C. είναι L. Οι εξωτερικές και εσωτερικές ακτίνες κάθε θαλάμου της συσκευής είναι a_q και b_q , αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ του πυθμένα της θάλασσας και της κάτω επιφάνειας κάθε O.W.C είναι h_q (Σχήματα 5.3, 5.4). Στην περίπτωση εξεταζόμενης συσκευής με ύπαρξη ομοκεντρικού κυλινδρικού σώματος (Σχήμα 5.4) η ακτίνα του εσωτερικού ομόκεντρου κυλίνδρου είναι c_q και η κατακόρυφη απόσταση της κάτω επιφάνειάς του με τον πυθμένα είναι $h_{1,q}$.

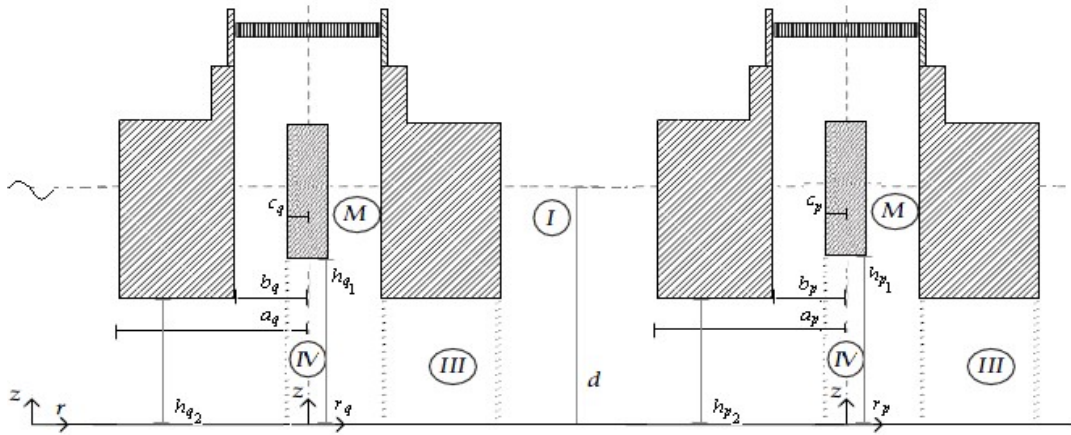
Σχήμα 5.2: Επεξηγηματικό σκαρίφημα διατάξεων O.W.C.^[81]



Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση συστοιχίας O.W.C χωρίς ομοκεντρικό κύλινδρο.^[82]



Σχήμα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση συστοιχίας O.W.C με ομοκεντρικό κύλινδρο^[81]



Η ροή του ρευστού γύρω από την q συσκευή, όπου $q=1,2,\dots,N$ εκφράζεται διαμέσου της συνάρτησης του δυναμικού:

$$\Phi^q(r_q, \vartheta_q, z, t) = \text{Re} \left\{ \varphi^q(r_q, \vartheta_q, z) e^{-i\omega t} \right\} \quad (5.4.1.1)$$

Επομένως το ολικό δυναμικό της ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από τη συσκευή q περιγράφεται ως εξής^[83]:

$$\varphi^q(r_q, \vartheta_q, z) = \varphi_D^q(r_p, \vartheta_p, z) + \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^6 x_{j0}^p \varphi_j^{qp}(r_p, \vartheta_p, z) + \sum_{p=1}^N p_{in0}^p \varphi_p^{qp}(r_p, \vartheta_p, z) \quad (5.4.1.2)$$

όπου:

1) Το δυναμικό περίθλασης $\varphi_D^q(r_p, \vartheta_p, z)$ μπορεί να εκφραστεί βάσει της γραμμικής θεώρησης ως υπέρθεση του δυναμικού ταχύτητας του προσπίπτοντος αρμονικού κυματισμού φ_0^q και του δυναμικού διάθλασης του κυματικού πεδίου φ_7^q :

$$\varphi_D^q = \varphi_0^q + \varphi_7^q$$

2) Το δυναμικό κίνησης ακτινοβολίας φ_j^{qp} που δημιουργείται γύρω από τη συσκευή q λόγω της εξαναγκασμένης ταλάντωσης της συσκευής p κατά τη διεύθυνση j με μοναδιαία ταχύτητα πλάτους $\dot{x}_j^p = \text{Re} \left\{ x_{j0}^p e^{-i\omega t} \right\}$.

3) Το δυναμικό πίεσης ακτινοβολίας φ_p^{qp} γύρω από τη συσκευή q λόγω της ταλαντευόμενης πίεσης του αέρα $p_{in}^p = \text{Re} \left\{ p_{in0}^p e^{-i\omega t} \right\}$ στο θάλαμο της p συσκευής.

Τα δυναμικά αυτά $\varphi_j^\ell (\ell \equiv \alpha, \alpha\rho; j = D, 1, 2, \dots, 6, P; \rho, \alpha = 1, 2, \dots, N)$ αποτελούν λύσεις

της εξίσωσης Laplace $\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} = 0$, σε όλο το πεδίο

ροής και ικανοποιούν τις εξής οριακές συνθήκες:

1) Η οριακή συνθήκη ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά του θαλάμου ταλάντωσης της συσκευής α ($z=d$).

Για συσκευές χωρίς ομοκεντρικό κύλινδρο

$$\omega^2 \varphi_j^\ell - g \frac{\partial \varphi_j^\ell}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{όταν } r_q \geq a_q, \ell = \alpha, j = D; \text{ ή } \ell \equiv \alpha\rho; j = 0, \dots, 7, P \\ 0 & \text{όταν } 0 \leq r_q \leq b_q; \ell \equiv \alpha; j = D \text{ ή } \ell = \alpha\rho, j = 0, 1, \dots, 7 \\ -\delta_{\alpha\rho} i\omega / \rho & \text{όταν } 0 \leq r_q \leq b_q; \ell \equiv \alpha\rho; j = P \end{cases}$$

Για συσκευές με ομοκεντρικό κύλινδρο:

$$\omega^2 \varphi_j^\ell - g \frac{\partial \varphi_j^\ell}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{όταν } r_q \geq a_q, \ell = \alpha, j = D; \text{ ή } \ell \equiv \alpha\rho; j = 1, \dots, 6, P \\ 0 & \text{όταν } c_q \leq r_q \leq b_q; \ell \equiv \alpha; j = D \text{ ή } \ell = \alpha\rho, j = 0, 1, \dots, 6 \\ -\delta_{\alpha\rho} i\omega / \rho & \text{όταν } c_q \leq r_q \leq b_q; \ell \equiv \alpha\rho; j = P \end{cases}$$

2) Οριακή συνθήκη πυθμένα ($z=0$).

$$\frac{\partial \varphi_j^\ell}{\partial z} = 0 \text{ όπου } \ell = \alpha, j = 7; \text{ ή } \ell = \alpha\rho, j = 1, 2, \dots, 6, P$$

3) Οριακή συνθήκη βρεχόμενης επιφάνειας για το πρόβλημα περιθλάσης και πίεσης ακτινοβολίας.

$$\frac{\partial \varphi_j^\ell}{\partial n^p} = 0 \text{ όπου } \ell = \alpha, j = D; \text{ ή } \ell = \alpha\rho, j = P$$

4) Οριακή συνθήκη βρεχόμενης επιφάνειας για το πρόβλημα κίνησης ακτινοβολίας.

$$\frac{\partial \varphi_j^{\alpha\rho}}{\partial n^p} = -i\omega \delta_{\alpha\rho} n_j^\alpha \text{ όπου } j = 1, 2, \dots, 6$$

και $\frac{\partial}{\partial n^{(p)}}$ υποδηλώνει την παράγωγο του μοναδιαίου διανύσματος n^α πάνω στην επιφάνεια S_0 της συσκευής με κατεύθυνση προς το ρευστό, και ο όρος n_j^α εκφράζει τις γενικευμένες συνιστώσες της και ορίζονται ως

$\vec{n}^q = (n_1^q, n_2^q, n_3^q)$ και $\vec{r}^q \times \vec{n}^q = (n_4^q, n_5^q, n_6^q)$ όπου \vec{r}^q είναι η θέση του διανύσματος σε σχέση με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων, το οποίο έχει φορά προς τα έξω ως προς τη μέση βρεχόμενη επιφάνεια $S^{(q)}$ του p σώματος και δ_{pq} σύμβολο Kronecker:

- $\delta_{pq} = 1$ για $p=q$
- $\delta_{pq} = 0$ για $p \neq q$

Το δυναμικό της ταχύτητας του αδιατάρακτου συστήματος προσπιπτόντων κυματισμών ϕ_o^q , που διαδίδεται με γωνία β (Σχήμα 5.2) ως προς το θετικό άξονα των x , μπορεί να εκφραστεί με κυλινδρικές συντεταγμένες για το q σώμα ως εξής^[84]:

$$\phi_o^q(r_q, \vartheta_q, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{o,m}^{(q)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q} \quad (5.4.1.3)$$

με
$$\frac{1}{d} \Psi_{o,m}^{(q)}(r_p, z) = \frac{e^{ik^l_{oq} \cos(\vartheta_{oq} - \beta)} Z_0(z)}{dZ'_0(d)} J_m(kr_q) e^{-im\beta}$$

Όπου:

- $J_m(kr_q)$: η m τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους
- $Z_0(z) = N_0^{-1/2} \cosh(kz)$
- $N_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right]$
- $Z'_0(d)$ η παράγωγος για $z=d$

Η συχνότητα ω και ο αριθμός κύματος k συνδέονται μέσω της εξίσωσης διασποράς:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd)$$

Το ολικό δυναμικό της ταχύτητας της ροής μεμονωμένης συσκευής q εκφράζεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως υπέρθεση των παρακάτω δυναμικών:

1) Δυναμικό περίθλασης στην συσκευή q

$$\phi_D^{qq}(r_q, \vartheta_q, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{D,m}^{(k)(q)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q} \quad (5.4.1.4)$$

2) Δυναμικό κίνησης ακτινοβολίας στην συσκευή ρ λόγω μετατόπισης της κατά την j διεύθυνση

$$\Phi_{Rj}^{qq}(r_q, \vartheta_q, z) = -i\omega \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{Rj,m}^{(k)(q,q)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q} \quad (5.4.1.5)$$

3) Δυναμικό πίεσης ακτινοβολίας στην συσκευή q λόγω της εσωτερικής της πίεσης του αέρα εντός της συσκευής

$$\Phi_P^{qq}(r_q, \vartheta_q, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{P,m}^{(k)(q,q)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q} \quad (5.4.1.6)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και k (k=I, III, M, IV) οι σχετικές περιοχές του ρευστού όπως φαίνονται στα σχήματα (5.3, 5.4).

Το ολικό δυναμικό ταχύτητας γύρω από τη συσκευή q προκύπτει από την υπέρθεση του αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού με τις περιθλάσεις διαφόρων τάξεων οι οποίες οφείλονται τόσο στη ρ συσκευή όσο και στα υπόλοιπα σώματα της διάταξης. Επιπλέον τα δυναμικά της ταχύτητας της ροής πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη συνέχειας της ροής και της παραγώγου της στο όριο

παρακείμενων περιοχών $\frac{\partial\Phi_j^{qq}}{\partial z}$ όπως φαίνονται στα σχήματα (5.3, 5.4). Αυτό έχει

ως αποτέλεσμα:

Για συσκευές χωρίς ομοκεντρικό κύλινδρο

$$\Psi_{P,m}^{III,\ell}(b_q, z) = \Psi_{P,m}^{M,\ell}(b_q, z) \quad \text{και} \quad \left. \frac{\Psi_{P,m}^{III,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} = \left. \frac{\Psi_{P,m}^{M,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} \quad (5.4.1.7)-(5.4.1.8)$$

$$\Psi_{P,m}^{I,\ell}(a_q, z) = \Psi_{P,m}^{III,\ell}(a_q, z) \quad \text{και} \quad \left. \frac{\Psi_{P,m}^{I,\ell}}{\partial r} \right|_{r=a_q} = \left. \frac{\Psi_{P,m}^{III,\ell}}{\partial r} \right|_{r=a_q} \quad (5.4.1.9)-(5.4.1.10)$$

Για συσκευές με ομοκεντρικό κύλινδρο

$$\Psi_{j,m}^{M,\ell} \Big|_{r=c_q} = \Psi_{j,m}^{IV,\ell} \Big|_{r=c_q} \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial\Psi_{j,m}^{M,\ell}}{\partial r} \right|_{r=c_q} = \left. \frac{\partial\Psi_{j,m}^{IV,\ell}}{\partial r} \right|_{r=c_q} \quad (5.4.1.11)-(5.4.1.12)$$

$$\Psi_{j,m}^{M,\ell} \Big|_{r=b_q} = \Psi_{j,m}^{III,\ell} \Big|_{r=b_q} \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial\Psi_{j,m}^{M,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} = \left. \frac{\partial\Psi_{j,m}^{III,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} \quad (5.4.1.13)-(5.4.1.14)$$

$$\boxed{\Psi_{j,m}^{III,\ell} \Big|_{r=a_q} = \Psi_{j,m}^{I,\ell} \Big|_{r=a_q}} \quad \text{και} \quad \boxed{\frac{\partial \Psi_{j,m}^{III,\ell}}{\partial r} \Big|_{r=a_q} = \frac{\partial \Psi_{j,m}^{I,\ell}}{\partial r} \Big|_{r=a_q}} \quad (5.4.1.15)-(5.4.1.16)$$

όπου $\ell \equiv q, qp; j = D, 0, 1 \dots 6, 7, P; q = 1, 2 \dots, N$

Το δυναμικό κίνησης ακτινοβολίας και το δυναμικό πίεσης ακτινοβολίας γύρω από τη συσκευή q λόγω ταλάντωσης ή ύπαρξης εσωτερικής πίεσης στο θάλαμο της p συσκευής εκφράζεται σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής:

$$\boxed{\varphi_{Rj}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = -i\omega \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{Rj,m}^{(q,p)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q}} \quad (5.4.1.17)$$

$$\boxed{\varphi_P^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{P,m}^{(q,p)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q}} \quad (5.4.1.18)$$

Για την επίλυση του προβλήματος περίθλασης, κίνησης ακτινοβολίας και πίεσης ακτινοβολίας, κατάλληλες εκφράσεις για τους όρους $\Psi_{D,m}^{(q)}$, $\Psi_{Rj,m}^{(q,p)}$, $\Psi_{P,m}^{(q,p)}$, σε κάθε μακροστοιχείο I, III, M, IV (Σχήματα 5.3, 5.4) μπορούν να δημιουργηθούν με τη μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών^{[85],[86],[87]}. Οι εκφράσεις αυτές, οι οποίες αποτελούν λύση της διαφορικής εξίσωσης Laplace σε κάθε πεδίο ροής, επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται η κινηματική οριακή συνθήκη στα οριζόντια τοιχώματα κάθε συσκευής, η γραμμικοποιημένη συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια και η κινηματική συνθήκη στον πυθμένα της θάλασσας. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ συστάδας συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης και μεμονωμένης συσκευής έγκειται στο γεγονός πως, στη συστάδα, ο προσπίπτων κυματισμός σε κάθε συσκευή δεν προέρχεται μόνο από τον απλό αρμονικό κυματισμό αλλά, επιπλέον, και από τις ανακλάσεις σε όλες τις συσκευές της διάταξης. Επομένως, κάθε συσκευή σκεδάζει – ακτινοβολεί κυματισμούς προς τα υπόλοιπα σώματα της διάταξης, τα οποία σκεδάζουν με τη σειρά τους κυματισμούς λόγω της ύπαρξής τους, δημιουργώντας μια ακολουθία διαταραχών. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος των πολλαπλών περιθλάσεων^{[84],[85],[89],[90]}.

Με τη μέθοδο των πολλαπλών περιθλάσεων έχει επιλυθεί εκτενώς πρόβλημα περίθλασης και κίνησης-ακτινοβολίας γύρω από διατάξεις πολλαπλών σωμάτων στις εργασίες [84],[91] και [92], επομένως δεν θα αναλυθεί περαιτέρω στην παρούσα εργασία. Ακολουθώντας τις εργασίες [82], [93], για την επίλυση του

προβλήματος πίεσης-ακτινοβολίας χρειάζεται να προσδιοριστεί συνάρτηση $\Psi_{P,m}^{(q,p)}$. Αρχικά θεωρούμε ότι η απομονωμένη συσκευή p ($p=1, 2, \dots, N$) της διάταξης, έχει εσωτερική πίεση μοναδιαίου πλάτους εντός του θαλάμου ταλάντωσης. Σε απόκριση αυτής της πίεσης, ακτινοβολείται δυναμικό μηδενικής τάξης ${}^0\varphi_{7P}^{pp}$ που δίνεται από την εξίσωση (5.4.1.6) και εκφράζεται σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων. Άρα το συνολικό δυναμικό ταχύτητας που ακτινοβολείται από το σύνολο της διάταξης των συσκευών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο των ανακλάσεων μεταξύ των αλληλεπιδρώντων συσκευών, λόγω ύπαρξης πίεσης στο θάλαμο κάθε μιας εξ αυτών, δίνεται από τη σχέση:

$$\sum_{p=1}^N {}^0\varphi_{7P}^{pp} \quad (5.4.1.19)$$

Το δυναμικό ακτινοβολίας μηδενικής τάξης αποτελεί μια πρώτης τάξης δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού ${}^1\varphi_{0P}^{qp}$ για κάθε ένα από τα υπόλοιπα σώματα, με εσωτερική πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Σε απόκριση αυτής της διέγερσης κάθε μία από τις υπόλοιπες συσκευές της διάταξης ακτινοβολούν ένα δυναμικό πρώτης τάξης σκέδασης ${}^1\varphi_{7P}^{qp}$ ($q=1, 2, \dots, N ; q \neq p$).

Οι αντίστοιχες συνολικές αλληλεπιδράσεις πρώτης τάξης γύρω από τη συσκευή q λόγω ύπαρξης πίεσης στο εσωτερικό της συσκευής p δίνεται από:

$${}^1\varphi_P^{qp} = {}^1\varphi_{0P}^{qp} + {}^1\varphi_{7P}^{qp} (q \neq p) \quad (5.4.1.20)$$

Η (5.4.1.20) θα πρέπει να ικανοποιεί την οριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας στο σύστημα αξόνων της q συσκευής. Καθώς οι υπόλοιπες συσκευές της διάταξης θεωρούνται ότι είναι ανοικτές στην ατμόσφαιρα, δεν ακτινοβολούν δυναμικό μηδενικής τάξης το οποίο συμβάλει στη διέγερση πρώτης τάξης της p συσκευής. Δηλαδή ${}^0\varphi_{7P}^{qp} = 0$ για $q=1, 2, \dots, N (q \neq p)$. Στη συνέχεια, οι κυματισμοί λόγω σκέδασης πρώτης τάξης που προέρχονται από τις υπόλοιπες συσκευές της διάταξης μπορούν να θεωρηθούν σαν κυματισμός πρόσπτωσης δεύτερης τάξης για την συσκευή q δηλαδή:

$${}^2\varphi_0^{qp} = \sum_{\ell=1}^N (1 - \delta_{\ell q}) {}^1\varphi_{7P}^{lp} \quad (5.4.1.21)$$

Η συσκευή q ακτινοβολεί κύμα δεύτερης τάξης ${}^2\varphi_{7P}^{q,p}$. Το συνολικό δυναμικό δεύτερης τάξης λόγω της ύπαρξης εσωτερικής πίεσης στην συσκευή q είναι:

$$\boxed{{}^2\varphi_P^{qp} = {}^2\varphi_{0P}^{qp} + {}^2\varphi_{7P}^{qp} \quad q \neq p} \quad (5.4.1.22)$$

Η παραπάνω σχέση ικανοποιεί την οριακή συνθήκη για τη συσκευή q με ατμοσφαιρική εσωτερική πίεση, αλλά ακόμα και όταν η συσκευή q συμπίπτει με τη συσκευή p , που έχει εσωτερική πίεση, επειδή η συνθήκη στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της θάλασσας για τη συσκευή p πληρείται μέσω της λύσης ${}^0\varphi_{7P}^{pp}$. Για όλα τα δυναμικά μεγαλύτερης τάξης ${}^s\varphi_P^{pp}$ $s \geq 1$ θα ισχύει ότι:

για συσκευή χωρίς ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα:

$$\boxed{\omega^2 \cdot {}^s\varphi_p^{pp} - g \frac{\partial {}^s\varphi_p^{pp}}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{όταν } r_p \geq a_p \\ 0 & \text{όταν } 0 \leq r_p \leq b_p \end{cases}} \quad (5.4.1.23)$$

για συσκευή με ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα:

$$\boxed{\omega^2 \cdot {}^s\varphi_p^{pp} - g \frac{\partial {}^s\varphi_p^{pp}}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{όταν } r_p \geq a_p \\ 0 & \text{όταν } c_p \leq r_p \leq b_p \end{cases}} \quad (5.4.1.24)$$

Με τον τρόπο αυτό συνεχίζουμε για τις αλληλεπιδράσεις s τάξης για κάθε συσκευή q της διάταξης ($q=1, 2, \dots, N$). Το ολικό δυναμικό s -τάξης γύρω από κάθε σώμα q της διάταξης ισούται με :

$$\boxed{{}^s\varphi_P^{qp} = {}^s\varphi_{0P}^{qp} + {}^s\varphi_{7P}^{qp}} \quad (5.4.1.25)$$

Το δυναμικό αυτό, ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες για τη συσκευή q με ατμοσφαιρική εσωτερική πίεση, στο σύστημα συντεταγμένων της q συσκευής, όταν το δυναμικό s -τάξης του προστίπτοντος κυματισμού ισούται με:

$$\boxed{{}^s\varphi_{0P}^{qp} = \sum_{\ell=1}^N (1 - \delta_{\ell q}) {}^{s-1}\varphi_7^{\ell p}} \quad (5.4.1.26)$$

Με το s να τείνει στο άπειρο και αθροίζοντας τις διάφορες τάξεις αλληλεπίδρασης, το συνολικό δυναμικό γύρω από την q συσκευή λόγω ύπαρξης πίεσης αέρα στην συσκευή p θα είναι:

$$\begin{aligned}
\varphi_P^{qp} &= \varphi_{0P}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) + \varphi_{7P}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = \\
&= \sum_{s=1}^{\infty} {}^s \varphi_{0P}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) + \delta_{qp} {}^0 \varphi_{7P}^{pp}(r_p, \vartheta_p, z) + \sum_{s=1}^{\infty} {}^s \varphi_{7P}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = \\
&= \sum_{s=1}^{\infty} \sum_{l=1}^N (1 - \delta_{lq}) {}^{s-1} \varphi_{7P}^{lp}(r_l, \vartheta_l, z) + \delta_{qp} {}^0 \varphi_{7P}^{pp}(r_p, \vartheta_p, z) + \sum_{s=1}^{\infty} {}^s \varphi_{7P}^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = \\
&= \delta_{pq} {}^0 \varphi_{7P}^{pp}(r_p, \vartheta_p, z) + \sum_{s=1}^{\infty} {}^s \varphi_P^{qp}(r_q, \vartheta_q, z)
\end{aligned} \tag{5.4.1.27}$$

Από την εξίσωση (5.4.1.27) είναι εμφανές πως η ταχύτητα δυναμικού φ_P^{qp} θα ικανοποιεί τις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο σύστημα συντεταγμένων της συσκευής q ($q=1, 2, \dots, N$). Όντως, σε περίπτωση που η συσκευή q συμπίπτει με τη συσκευή p , η συνθήκη στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της θάλασσας ικανοποιείται στο σύστημα αξόνων της p συσκευής από τον όρο ${}^0 \varphi_{7P}^{pp}$. Όλοι οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης (5.4.1.27) δεν επηρεάζουν την οριακή συνθήκη, καθώς επιλέχθηκαν ως λύσεις του προβλήματος με ανοικτό τον θάλαμο ταλάντωσης, για κάθε συσκευή της διάταξης. Αντίθετα, εάν η q συσκευή είναι ανοικτή, η οριακή συνθήκη εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της θάλασσας θα ικανοποιείται από τους όρους ${}^s \varphi_P^{qp}$ ενώ ο όρος ${}^0 \varphi_{7P}^{pp}$ θα απουσιάζει.

Με τον τρόπο αυτό το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό των άγνωστων δυναμικών ${}^s \varphi_P^{qp}$, τα οποία μέσω της εξίσωσης (5.4.1.25), εκφράζονται σαν υπέρθεση σκεδασμένων κυμάτων s τάξης, από τη συσκευή q ${}^s \varphi_{7P}^{qp}$ και $(s-1)$ τάξης κυμάτων που ανακλώνται από τις υπόλοιπες συσκευές της διάταξης ${}^{s-1} \varphi_{7P}^{lp}$ ($l=1, 2, \dots, N ; l \neq q$).

Κάθε τάξη των δυναμικών ${}^s \varphi_{7P}^{qp}$, με $s \geq 1$, μπορεί να περιγραφεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής:

$${}^s \varphi_P^{qp}(r_p, \vartheta_p, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{7P,m}^{(q,p)}(r_q, z) e^{im\vartheta_q} \tag{5.4.1.28}$$

και αντίστοιχα για την εξωτερική περιοχή της συσκευής q , δηλαδή $r_q \leq a_q, 0 \leq z \leq d$:

$${}^s \Psi_{7P,m}^{(q,p)}(r_q, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[F_{Pm,j}^{qp} \frac{K_m(a_j r_q)}{K_m(a_j a_q)} \right] Z_j(z) \tag{5.4.1.29}$$

όπου K_m είναι m τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους και $Z_j(z)$ είναι ορθοκανονικές συναρτήσεις στο $[0, d]$, που ορίζονται ως εξής:

- $Z_j(z) = N_j^{-\frac{1}{2}} \cos(a_j z)$ για $j \geq 1$

όπου:

- $N_j = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2a_j d)}{2a_j d} \right]$

Εδώ το k εκφράζει τον αριθμό κυμάτων και συνδέεται με τη συχνότητα ω μέσω της εξίσωσης διασποράς όπου a_j είναι οι πραγματικές λύσεις της εξίσωσης

$$\boxed{\frac{\omega^2}{g} + a_j \tanh(a_j d) = 0} \quad (5.4.1.30)$$

Οι s τάξης συντελεστές σκέδασης $F_{Pm,j}^{qp}$ λαμβάνονται μέσω της λύσης των αντίστοιχων τάξεων του προβλήματος περίθλασης και περιγράφονται από την ταχύτητα δυναμικού ${}^s\phi_P^{qp}$ στο σύστημα αξόνων της συσκευής q ($q=1, 2, \dots, N$). Εάν οι συντελεστές αυτοί προσδιοριστούν, το δυναμικό πίεσης ακτινοβολίας ${}^s\phi_P^{qp}$ μπορεί να υπολογιστεί κατάλληλα με αντικατάσταση της εξίσωσης (5.5.1.28) στην (5.4.1.25).

Ωστόσο, δεδομένου ότι καθένα από τα σκεδαζόμενα κύματα ${}^{s-1}\phi_{7P}^{\ell p}(r_\ell, \vartheta_\ell, z)$ ($l=1, 2, \dots, N$; $\ell \neq p$) εκφράζονται σε διαφορετικά τοπικά συστήματα συντεταγμένων. Με τη χρήση του προσθετικού θεωρήματος των Bessel συναρτήσεων, τα δυναμικά που εκφράζονται στο σύστημα αξόνων $(r_\ell, \vartheta_\ell, z)$ μπορούν να μετασχηματιστούν σε εκφράσεις σχετικές με (r_p, ϑ_p, z) . Οπότε έχουμε^[94]:

$$\boxed{K_\nu(a_j r_\ell) e^{i\nu\vartheta_\ell} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m K_{\nu-m}(a_j r_{\ell q}) I_m(a_j r_q) e^{i(\nu-m)\vartheta_{\ell q}} e^{im\vartheta_q} \text{ για } r_\ell \leq r_{\ell q}} \quad (5.4.1.31)$$

όπου I_m είναι η m τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους.

Η $I_{\ell q}$ ορίζεται στο σχήμα (5.2). Επίσης ισχύει^[95]:

$$\boxed{K_m(-ikr_q) = \frac{\pi}{2} i^{m+1} H_m(kr_q)} \quad \text{και} \quad \boxed{J_m(kr_q) = i^m I_m(-ikr_q) = i^m I_m(a_0 r_q)}$$

για την φανταστική ρίζα $a_0 = -ik.H_m$ εκφράζει την συνάρτηση Hankel, που ικανοποιεί τη συνθήκη ακτινοβολίας του Sommerfeld. Επομένως έχουμε:

$$H_\nu(kr_\ell)e^{i\nu\vartheta_\ell} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m H_{\nu-m}(k\ell_{\ell q})J_m(kr_q)e^{i(\nu-m)\vartheta_{\ell q}}e^{im\vartheta_q} \text{ για } r_\ell \leq \ell_{\ell q} \quad (5.4.1.32)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, όλοι οι όροι της s τάξης της ταχύτητας δυναμικού ${}^s\Phi_P^{qp}$ που περιγράφονται στην εξίσωση (5.4.1.25) εκφράζονται τώρα στις συντεταγμένες της συσκευής q σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$${}^s\Phi_P^{qp}(r_q, \vartheta_q, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} {}^s\Psi_{P,m}^{(q,p)}(r_q, z)e^{im\vartheta_q} \quad (5.4.1.33)$$

όπου στην εξωτερική περιοχή της συσκευής η συνάρτηση ${}^s\Psi_{P,m}^{(q,p)}$ δίνεται από:

$${}^s\Psi_{P,m}^{(q,p)}(r_q, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[{}^sG_{Pm,j}^{qp} \frac{I_m(a_j r_q)}{I_m(a_j a_q)} + {}^sF_{Pm,j}^{qp} \frac{K_m(a_j r_q)}{K_m(a_j a_q)} \right] Z_j(z) \quad (5.4.1.34)$$

όπου:

$${}^sG_{Pm,j}^{qp} = \sum_{i=1}^N (1 - \delta_{\ell q}) \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} i^{m+\nu} \frac{K_{\nu-m}(a_j \ell_{pq}) I_m(a_j a_q)}{K_\nu(a_j a_q)} {}^{s-1}F_{P\nu,j}^{(p)} e^{i(\nu-m)\vartheta_{\ell q}}, s \geq 2 \quad (5.4.1.35)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (5.5.1.33) αντιπροσωπεύει τη συμβολή του δυναμικού προσπίπτοντος κυματισμού s τάξης ${}^s\Phi_{0P}^{qp}$ στο δυναμικό ${}^s\Phi_P^{qp}$, ενώ ο τελευταίος όρος περιγράφει τον ακτινοβολούμενο κυματισμό της αντίστοιχης τάξης.

Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις (5.4.1.34) και (5.4.1.35) το συνολικό κυματικό πεδίο που δίνεται στην εξίσωση (5.4.1.27) μπορεί να διατυπωθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση για το εξωτερικό πεδίο I :

$$\Psi_{P,m}^{(q)(p)}(r_q, z) = \delta_{qp} \Psi_{P,m}^p(r_p, z) + \sum_{j=0}^{\infty} \left[G_{Pm,j}^{(q)(p)} \frac{I_m(a_j r_q)}{I_m(a_j a_q)} + F_{Pm,j}^{(q)(p)} \frac{K_m(a_j r_q)}{K_m(a_j a_q)} \right] Z_j(z) \quad (5.4.1.36)$$

όπου:

- $\Psi_{P,m}^p(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[G_{Pm,j}^p \frac{I_m(a_j r_p)}{I_m(a_j a_p)} + F_{Pm,j}^p \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j a_p)} \right] Z_j(z)$
- $G_{Pm,j}^v = \sum_{s=1}^{\infty} {}^sG_{Pm,j}^v,$

- $F_{Pm,j}^V = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s F_{Pm,j}^V, v = q, \varphi P$

- $F_{Pm,j}^V$: S τάξης συντελεστής σκέδασης που λαμβάνεται μέσω της λύσης του εκάστοτε δυναμικού.

Αντίστοιχα, επιλύοντας την εξίσωση Laplace, με τη μέθοδο των χωριζομένων μεταβλητών, μπορούν κατάλληλα να προσδιοριστούν τα δυναμικά ταχύτητας των εξισώσεων (5.4.1.4-5.4.1.6) σε κάθε σχετική περιοχή του ρευστού (I, III, IV, M) για συσκευή με ομόκεντρο κύλινδρο και αντίστοιχα (I, III, M) για συσκευή χωρίς ομόκεντρο κύλινδρο. Αυτές οι παραστάσεις που έχουν τη μορφή σειρών Fourier, ικανοποιούν τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες του κάθε στοιχείου. Η κατάλληλη έκφραση για την ${}^s \Psi_{D,m}^I, {}^s \Psi_{R,m}^I, {}^s \Psi_{P,m}^I$ στο μακροστοιχείο τύπου I δίνεται τις εξισώσεις (5.4.1.27) (5.4.1.28) (5.4.1.34). Οι s-τάξης συντελεστές παριστάνουν τους άγνωστους συντελεστές Fourier ${}^s F_{kj,m}^I$ στην εξωτερική περιοχή του σώματος q. Για τους τρεις τύπους μακροστοιχείων δίνονται οι ακόλουθες εκφράσεις των συναρτήσεων για συσκευές ομόκεντρο κύλινδρο στο εσωτερικό τους αλλά και χωρίς:

- Πεδίο ρευστού I $r_q \geq a_q, 0 \leq z \leq d$ [93] :

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{I,q}(r_q, z) = g_{j,m}^{I,q}(r_q, z) + \sum_{n=0}^{\infty} \left[F_{j,mn}^{I,q} \frac{K_m(a_n r_q)}{K_m(a_n a_q)} \right] Z_n(z), j=D, 1, \dots, 6, P \quad (5.4.1.37)$$

όπου:

- $g_{D,m}^{I,q}(r_q, z) = \left\{ J_m(kr_q) - \frac{J_m(ka_q)}{H_m(ka_q)} H_m(kr_q) \right\} \frac{Z_0(z)}{dZ_0'(d)}$
- $g_{1,1}^{I,q}(r_q, z) = g_{1,-1}^{I,q}(r_q, z) = g_{3,0}^{I,q}(r_q, z) = g_{5,1}^{I,q}(r_q, z) = g_{5,-1}^{I,q}(r_q, z) = g_{P,0}^{I,q}(r_q, z) = 0$
- $\delta_D = \delta_1 = \delta_3 = d, \delta_5 = d^2, \delta_P = 1$

- Πεδίο ρευστού III $b_q \leq r_q \leq a_q, 0 \leq z \leq h_q$ [93] :

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{III,q}(r_q, z) = g_{j,m}^{III,q}(r_q, z) + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n \left[F_{j,mn}^{III,q} R_{mn}^{III,q}(r_q) + F_{j,mn}^{*III,q} R_{mn}^{*III,q}(r_q) \right] \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right), j=D, 1, \dots, 6, P \quad (5.4.1.38)$$

όπου:

- $g_{D,m}^{III,q}(r_q, z) = g_{1,1}^{III,q}(r_q, z) = g_{1,-1}^{III,q}(r_q, z) = g_{P,0}^{III,q}(r_q, z) = 0$
- $g_{3,0}^{III,q}(r_q, z) = \frac{z^2 - (1/2)r_q^2}{2h_q d}$
- $g_{5,1}^{III,q}(r_q, z) = g_{5,-1}^{III,q}(r_q, z) = \frac{-r_q [z^2 - (1/4)r_q^2]}{2h_q d^2}$
- $R_{mn}^{III,q}(r_q) = \frac{K_m(\frac{n\pi b_q}{h_q})I_m(\frac{n\pi r_q}{h_q}) - I_m(\frac{n\pi b_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi r_q}{h_q})}{I_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi b_q}{h_q}) - I_m(\frac{n\pi b_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})}, m, n \neq 0$
- $R_{m0}^{III,q}(r_q) = \frac{\left(\frac{r_q}{b_q}\right)^m - \left(\frac{b_q}{r_q}\right)^m}{\left(\frac{a_q}{b_q}\right)^m - \left(\frac{b_q}{a_q}\right)^m}, m \neq 0, n=0; R_{00}^{III,q}(r_q) = \frac{\ln\left(\frac{r_q}{b_q}\right)}{\ln\left(\frac{a_q}{b_q}\right)}, m, n=0$
- $R_{mn}^{*III}(r_q) = \frac{I_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi r_q}{h_q}) - K_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})I_m(\frac{n\pi r_q}{h_q})}{I_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi b_q}{h_q}) - I_m(\frac{n\pi b_q}{h_q})K_m(\frac{n\pi a_q}{h_q})}, m, n \neq 0$
- $R_{m0}^{*III,q}(r_q) = \frac{\left(\frac{a_q}{r_q}\right)^m - \left(\frac{r_q}{a_q}\right)^m}{\left(\frac{a_q}{b_q}\right)^m - \left(\frac{b_q}{a_q}\right)^m}, m \neq 0, n=0; R_{00}^{*III,q}(r_q) = \frac{\ln\left(\frac{a_q}{r_q}\right)}{\ln\left(\frac{a_q}{b_q}\right)}, m, n=0$
- ε_n είναι το σύμβολο Neumann και $\varepsilon_0=1$ ενώ $\varepsilon_n=2$ $n \geq 1$
- Πεδίο ρευστού M $c_q \leq r_q \leq b_q, 0 \leq z \leq d$ με ύπαρξη ομοκεντρικού κυλίνδρου ^[93] :

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{M,q}(r_q, z) = g_{j,m}^{M,q}(r_q, z) + \sum_{i=0}^{\infty} (R_{mi}^{M,q}(r_q) F_{j,mi}^{M,q} + R_{mi}^{*M,q}(r_q) F_{j,mi}^{*M,q}) Z_i(z), j=D, \dots, 6, P \quad (5.4.1.39)$$

όπου:

- $g_{D,m}^{M,q}(r_q, z) = g_{1,1}^{M,q}(r_q, z) = g_{1,-1}^{M,q}(r_q, z) = g_{3,0}^{M,q}(r_q, z) = g_{5,1}^{M,q}(r_q, z) = g_{5,-1}^{M,q}(r_q, z) = 0, g_{P,0}^{M,q}(r_q, z) = 1$

- $R_{mi}^{M,q}(r_q) = \frac{I_m(a_i r_q) K_m(a_i c_q) - K_m(a_i r_q) I_m(a_i c_q)}{I_m(a_i b_q) K_m(a_i c_q) - I_m(a_i c_q) K_m(a_i b_q)}, R_{mi}^{M,q}(b_q) = 1, R_{mi}^{M,q}(c_q) = 0, m, i \neq 0$
- $R_{mi}^{*M,q}(r_q) = \frac{I_m(a_i b_q) K_m(a_i r_q) - K_m(a_i b_q) I_m(a_i r_q)}{I_m(a_i b_q) K_m(a_i c_q) - I_m(a_i c_q) K_m(a_i b_q)}, R_{mi}^{*M,q}(b_q) = 0, R_{mi}^{*M,q}(c_q) = 1, m, i \neq 0$

- Πεδίο ρευστού M $0 \leq r_q \leq b_q, 0 \leq z \leq d$ χωρίς την ύπαρξη ομόκεντρου κυλινδρικού στοιχείου:

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{M,q}(r_q, \vartheta_q, z) = g_{j,m}^{M,q}(r_q, z) + \sum_{i=0}^{\infty} F_{j,mi}^{M,q} \frac{I_m(a_i r)}{I_m(a_i b_q)} Z_i(z), \quad j = D, 1, \dots, 6, P \quad (5.4.1.40)$$

- Πεδίο ρευστού IV $0 \leq r_q \leq c_q, 0 \leq z \leq h_{1,q}$ [93] :

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{IV,q}(r_q, z) = g_{j,m}^{IV,q}(r_q, z) + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n R_{mn}^{IV,q}(r_q) F_{j,mn}^{IV,q} \cos\left(\frac{n\pi z}{h_{1,q}}\right), \quad j = D, 1, \dots, 6, P \quad (5.4.1.41)$$

- $g_{D,m}^{IV,q}(r_q, z) = g_{1,1}^{IV,q}(r_q, z) = g_{1,-1}^{IV,q}(r_q, z) = g_{P,0}^{IV,q}(r_q, z) = 0$
- $g_{3,0}^{IV,q}(r_q, z) = \frac{z^2 - (1/2)r_q^2}{2h_{1,q}d}$
- $g_{5,1}^{IV,q}(r_q, z) = g_{5,-1}^{IV,q}(r_q, z) = \frac{-r_q [z^2 - (1/4)r_q^2]}{2h_{1,q}d^2}$
- $R_{mn}^{IV,q}(r_q) = \frac{I_m\left(\frac{n\pi r_q}{h_{1,q}}\right)}{I_m\left(\frac{n\pi c_q}{h_{1,q}}\right)}, \quad m, n \neq 0$
- $R_{m0}^{IV,q}(r_q) = \left(\frac{r_q}{c_q}\right)^m, \quad m \neq 0, n=0; R_{00}^{IV,q}(r_q) = 1, \quad m, n=0$

5.4.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ FOURIER

Από τη συνθήκη συνέχειας του δυναμικού $\varphi_p^\ell (\ell \equiv q, q; q=1,2,\dots,N)$ για $r_q = b_q; r_q = a_q$ αλλά και από την παράγωγό της προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις^[82]:

$$\bullet \Psi_{P,m}^{III,\ell}(b_q, z) = \Psi_{P,m}^{M,\ell}(b_q, z) \quad (5.4.2.1)$$

$$\bullet \left. \frac{\Psi_{P,m}^{III,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} = \left. \frac{\Psi_{P,m}^{M,\ell}}{\partial r} \right|_{r=b_q} \quad (5.4.2.2)$$

$$\bullet \Psi_{P,m}^{I,\ell}(a_q, z) = \Psi_{P,m}^{III,\ell}(a_q, z) \quad (5.4.2.3)$$

$$\bullet \left. \frac{\Psi_{P,m}^{I,\ell}}{\partial r} \right|_{r=a_q} = \left. \frac{\Psi_{P,m}^{III,\ell}}{\partial r} \right|_{r=a_q} \quad (5.4.2.4)$$

Πολλαπλασιάζοντας όλους τους όρους των εξισώσεων (5.4.2.1) και (5.4.2.3) με $(1/h_q) \cos(\pi z/h_q)$ και λαμβάνοντας υπόψη πως ανήκουν στο κλειστό $[0, h_q]$, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\boxed{F_{P,m,n}^{*III,qp} = \delta_{qp} Q_{P,0,n}^* + \sum_{i=0}^{\infty} L_{n,i} F_{P,m,i}^{M,qp}} \quad \text{για } 0 \leq z \leq h_q, r=b_q \quad (5.4.2.5)$$

$$\boxed{F_{P,m,n}^{III,qp} = \sum_{i=0}^{\infty} F_{P,m,i}^{I,qp} L_{n,i}} \quad \text{για } 0 \leq z \leq h_q, r=a_q \quad (5.4.2.6)$$

όπου $L_{n,i}$ ορίζεται ως εξής:

➤ Για $i \geq 1, a_i \neq n\pi/h_q$ τότε:

$$L_{n,i} = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} Z_i(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = (-1)^n \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2a_i d)}{2a_i d} \right] \right]^{-1/2} \frac{a_i h_q}{(a_i h_q)^2 - (n\pi)^2} \sin(a_i h_q)$$

➤ Για $i = 0$, τότε:

$$L_{n,i} = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} Z_0(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = (-1)^n \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2kd)}{2kd} \right] \right]^{-1/2} \frac{kh_q}{(kh_q)^2 - (n\pi)^2} \sinh(kh_q)$$

➤ $i \geq 1, a_i = n\pi/h_q \neq 0$ τότε:

$$L_{n,i} = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} Z_i(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2a_i d)}{2a_i d} \right] \right]^{-1/2}$$

και $Q_{P,0,n}^*$, που είναι διάνυσμα στήλης ($M \times 1$) ορίζεται ως εξής:

$$Q_{P,0,n}^* = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = \begin{cases} 0, n \neq 0 \\ 1, n = 0 \end{cases}$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως πρέπει να ικανοποιούνται η συνθήκη συνέχειας των παραγώγων του δυναμικού για $r_q=b_q$; , $r_q=a_q$ όπως εκφράζονται στις εξισώσεις (5.4.2.2) και (5.4.2.4) αλλά και η οριακή συνθήκη βρεχόμενης επιφάνειας για το πρόβλημα κίνησης-ακτινοβολίας όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.4.1. Πολλαπλασιάζοντας όλους τους όρους των παραπάνω εξισώσεων με τη συνάρτηση $(1/d)Z_\mu(z)$ και ολοκληρώνοντας στο διάστημα $[0, h_q]$ και $[h_q, d]$ αντίστοιχα, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\sum_{i=0}^{\infty} F_{P,m,i}^{M,qp} A_{m,i}^M = \frac{h_q}{d} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n L_{n,i} (D_{m,n}^{III,qp} F_{P,m,n}^{III,qp} + D_{m,n}^{*III,qp} F_{P,m,n}^{*III,qp}) \quad \text{για } r=b_q \quad (5.4.2.7)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} (F_{P,m,i}^{I,qp} A_{m,i}^I + D_{m,i}^I) \delta_{i,\mu} = \frac{h_q}{d} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n L_{n,i} (A_{m,n}^{III,qp} F_{P,m,n}^{III,qp} + A_{m,n}^{*III,qp} F_{P,m,n}^{*III,qp}) \quad \text{για } r=a_q \quad (5.4.2.8)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.4.2.5) στην εξίσωση (5.4.2.7), προκύπτουν οι άγνωστοι συντελεστές Fourier στην M περιοχή σε σχέση με τους συντελεστές Fourier στην III περιοχή, όπως ορίζεται παρακάτω σε μορφή πινάκων:

$$\{F_{P,m,i}^{M,qp}\} = \frac{h_q}{d} [G_{i,i}^{qp}]^{-1} [L_{i,n}^{M,III}] [\varepsilon_n] [D_{m,n}^{III,qp}] \{F_{P,m,n}^{III,qp}\} + \frac{h_q}{d} [G_{i,i}^{qp}]^{-1} [L_{i,n}^{M,III}] [\varepsilon_n] [D_{m,n}^{*III,qp}] \quad (5.4.2.9)$$

όπου:

$[G_{i,i}^{qp}]$, τετραγωνικός πίνακας $N \times N$ και ίσος με:

$$[G_{i,i}^{qp}] = [A_{m,i}^M] - \frac{h_q}{d} [L_{i,n}^{M,III}] [\varepsilon_n] [D_{m,n}^{*III,qp}] [L_{n,i}^{III,M}]$$

$\{F_{P,m,i}^{M,qp}\}$ και $\{F_{P,m,n}^{III,qp}\}$, σύνθετα διανύσματα τα στοιχεία των οποίων είναι οι άγνωστοι συντελεστές Fourier στις περιοχές M και III γύρω από τη συσκευή q.

$[A_{m,i}^M]$, $(N \times N)$ διαγώνιος πίνακας που ισούται με:

$$A_{m,i}^M = a_i b_q \left. \frac{\partial I_m(a_i r_q)}{\partial r_q} \right|_{r=b_q} \frac{1}{I_m(a_i b_q)}$$

$[L_{i,n}^{M,III}]$, $(N \times M)$ πίνακας που προκύπτει από:

Για $i \geq 1$, $a_i \neq n\pi/h_q$ τότε:

$$L_{n,i} = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} Z_i(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = (-1)^n \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2a_i d)}{2a_i d} \right] \right]^{-1/2} \frac{a_i h_q}{(a_i h_q)^2 - (n\pi)^2} \sin(a_i h_q)$$

και $i \geq 1$, $a_i = n\pi/h_q \neq 0$ τότε:

$$L_{n,i} = \frac{1}{h_q} \int_0^{h_q} Z_i(z) \cos\left(\frac{n\pi z}{h_q}\right) dz = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2a_i d)}{2a_i d} \right] \right]^{-1/2}$$

$[\varepsilon_n]$, $(M \times M)$ διαγώνιος πίνακας που περιέχει το σύμβολο Neumann.

$[D_{m,n}^{III,qp}]$ και $[D_{m,n}^{*III,qp}]$, $(M \times M)$ διαγώνιοι πίνακες που ισούνται με:

$$D_{m,n}^{III,qp} = b_q \left. \frac{\partial R_{mn}^{III}}{\partial r} \right|_{r=b_q} \quad (5.4.2.10)$$

$$D_{m,n}^{*III,qp} = b_q \left. \frac{\partial R_{mn}^{*III}}{\partial r} \right|_{r=b_q} \quad (5.4.2.11)$$

όπου οι συντελεστές R και R^* παρουσιάζονται στην εξίσωση (5.4.1.38).

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.4.2.9) στην εξίσωση (5.4.2.5) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\left\{ F_{P,mn}^{III,qp} \right\} = \frac{h_q}{d} [G_{ij}^{qp}]^{-1} [L_{ni}^{III,M}] [\varepsilon_n] [D_{mn}^{II,qp}] \left\{ F_{P,mn}^{II,qp} \right\} + \left([I] + \frac{h_q}{d} [G_{ij}^{qp}]^{-1} [L_{in}^{III,M}] [\varepsilon_n] [D_{mn}^{III,qp}] \right) \left\{ Q_{P,0,n}^* \right\} \quad (5.4.2.12)$$

όπου $[I]$, μοναδιαίος πίνακας.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.4.2.6) στην εξίσωση (5.4.2.8) προκύπτουν οι άγνωστοι συντελεστές Fourier στην περιοχή I όπως ορίζεται παρακάτω σε μορφή πίνακα:

$$[E_{i,j}] \left\{ F_{P,m,i}^{I,qp} \right\} = \{B\} \quad (5.4.2.13)$$

όπου:

$$\{B\} = [D_{m,i}^I] - \frac{h_q}{d} [L_{in}^{I,III}] [\varepsilon_n] \left([A_{m,n}^{*III,qp}] + \frac{h_q}{d} [A_{m,n}^{III,qp}] [L_{ni}^{III,M}] [\varepsilon_n] [D_{m,n}^{*III,qp}] [G_{i,i}]^{-1} [L_{in}^{M,III}] \right) \left\{ Q_{P,0,n}^* \right\}$$

$$\{E_{i,j}\} = \frac{h_q}{d} \left([L_{in}^{I,III}] [\varepsilon_n] \left([A_{m,n}^{III,qp}] + \frac{h_q}{d} [A_{m,n}^{*III,qp}] [L_{ni}^{III,M}] [\varepsilon_n] [D_{m,n}^{III,qp}] [G_{i,i}]^{-1} [L_{in}^{M,III}] \right) \right) [L_{n,i}^{I,III}] - [A_{m,i}^I]$$

$[A_{m,n}^{III,qp}]$ και $[A_{m,n}^{*III,qp}]$, $(M \times M)$ διαγώνιοι πίνακες που ισούνται με:

$$A_{m,n}^{III,qp} = a_q \left. \frac{\partial R_{mn}^{III}}{\partial r} \right|_{r=a_q}$$

$$A_{m,n}^{*III,qp} = a_q \left. \frac{\partial R_{mn}^{*III}}{\partial r} \right|_{r=a_q}$$

$[A_{m,i}^I]$ και $[D_{m,i}^I]$, $(Q \times Q)$ διαγώνιοι πίνακες που ισούνται με:

$$A_{m,i}^I = a_i \alpha_q \left. \frac{\partial K_m(a_i r)}{\partial r} \right|_{r=a_q} \frac{1}{K_m(a_i \alpha_q)}$$

$$D_{m,i}^I = a_i \alpha_q G_{p,m,i}^{I,qp} \left(\left. \frac{\partial I_m(a_i r_q)}{\partial r_q} \right|_{r=a_q} \frac{1}{I_m(a_i \alpha_q)} - \left. \frac{\partial K_m(a_i r_q)}{\partial r_q} \right|_{r=a_q} \frac{1}{K_m(a_i \alpha_q)} \right)$$

Αντίστοιχα με τα παραπάνω προσδιορίζονται και οι συντελεστές Fourier, στην περίπτωση που η εξεταζόμενη συσκευή OWC περιέχει ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα, εντός του θαλάμου ταλάντωσης, Η διαφορά προκύπτει από την ύπαρξη του πεδίου IV κάτω από το ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα όπου θα έχουμε μετατροπή της οριακής συνθήκης της ελεύθερης επιφάνειας αλλά και των εκφράσεων δυναμικού αφού αλλάζουν τα διαστήματα των πεδίων ροής του ρευστού όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5.4.1.

5.4.3 ΠΑΡΟΧΗ ΑΕΡΑ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟ

Η παροχή εξαρτάται από την ταλαντευόμενη εσωτερική επιφάνεια του νερού στην q O.W.C συσκευή $q=1,2,\dots,N$, η οποία συμβολίζεται με

$Q^q(r_q, \vartheta_q, z; t) = \text{Re} [q^q(r_q, \vartheta_q, z) \cdot e^{-i\omega t}]$ όπου:

$$q^q = \iint_{S_i^q} u_z dS_i = \iint_{S_i^q} u_z(r_q, \vartheta_q, z = d) r_q dr_q d\vartheta_q = \iint_{S_i^q} \frac{\partial \varphi^q}{\partial z} r_q dr_q d\vartheta_q \quad (5.4.3.1)$$

Εδώ, u_z υποδηλώνει την κατακόρυφη ταχύτητα στην επιφάνεια του νερού και S_i την εσωτερική επιφάνεια του νερού στη συσκευή q .

Υποθέτοντας ότι στρόβιλος Wells, είναι τοποθετημένος σε έναν αγωγό μεταξύ του θαλάμου της συσκευής q και της ατμόσφαιρας και ότι χαρακτηρίζεται από σταθερά Λ^q τότε η συνολική παροχή αέρα ίση με ^{[83],[96]}:

$$Q^q(t) = \Lambda^q \cdot P_{in}^q(t) \quad (5.4.3.2)$$

Σύμφωνα με [97],[98] για τον στρόβιλο Wells, μπορούν να ληφθούν:

$$q^q = \left[\frac{KD}{\rho_a N} + (-i\omega) \frac{V_0}{\gamma P_a} \right] \cdot p_{in0}^q \quad (5.4.3.3)$$

όπου:

- K : σταθερά για μία δεδομένη γεωμετρία στροβίλου (ανεξάρτητη από το μέγεθος του στροβίλου ή την ταχύτητα περιστροφής της)
- D : διάμετρος του δρομέα
- N : ταχύτητα περιστροφής (ακτίνια ανά μονάδα χρόνου)
- ρ_a : πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
- P_a : ατμοσφαιρική πίεση
- V_0 : όγκος του θαλάμου αέρα
- γ : αδιαβατική σταθερά ίση με 1.4

Η συνολική παροχή αέρα q^q της συσκευής q , μπορεί να περιγραφεί από τρεις όρους όπως η απεικόνιση του δυναμικού ταχύτητας της ροής (βλέπε Εξίσωση 5.4.1.2), δηλαδή από την παροχή που σχετίζεται με το πρόβλημα περίθλασης q_D^q , με το πρόβλημα κίνησης ακτινοβολίας q_R^q και με το πρόβλημα πίεσης ακτινοβολίας q_P^q και λαμβάνεται ως εξής:

$$q^q = q_D^q + q_R^q + \sum_{p=1}^N p_{in0}^p \cdot q_P^{qp} \quad (5.4.3.4)$$

όπου:

$$q_R^q = \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^6 \dot{x}_{j0}^p \cdot q_{3,j}^p - \dot{x}_{30}^q S_i^q$$

Αντικαθιστώντας την (5.4.3.3) στην (5.4.3.4) είναι εύκολο να εκφράσουμε την (5.4.3.4) σε μορφή πίνακα για όλες τις συσκευές της διάταξης. Δηλαδή:

$$\boxed{\left[\lambda^N \right] \cdot \left[x_{j0}^N \right] + \left[B^N \right] \cdot \left[p_{in0}^N \right] = \left[q_D^N \right]} \quad (5.4.3.5)$$

όπου :

- $\left[q_D^N \right], \left[p_{in0}^N \right]$, διανύσματα ($N \times 1$) που αποτελούνται από την παροχή αέρα λόγω του προβλήματος περίθλασης καθώς και από τις τιμές της εσωτερικής πίεσης αέρα εντός κάθε συσκευής της διάταξης.
- $\left[B^N \right]$, τετραγωνικός πίνακας ($N \times N$).
- $\left[x_{j0}^N \right]$, πίνακας ($6N \times N$), ο οποίος αποτελείται από τις μετατοπίσεις κάθε μίας συσκευής της διάταξης.
- $\left[\lambda^N \right]$, πίνακας ($N \times 6N$).

Τα στοιχεία του τετραγωνικού πίνακα $\left[B^N \right]$ είναι $\delta_{q,p} \left(\frac{KD}{\rho_a N} + (-i\omega) \frac{V_0}{\gamma P_a} \right) - q_p^{qp}$ ενώ

του πίνακα $\left[\lambda^N \right]$ είναι $i\omega q_{3,j}^{qp} - i\omega S_i^q \delta_{q,p} \delta_{3,j}$ για κάθε συσκευή της διάταξης.

5.4.4 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΡΟΠΕΣ

Οι διάφορες δυνάμεις σε κάθε συσκευή, μπορούν να υπολογιστούν από την κατανομή της πίεσης όπως υπολογίζεται από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli^[99]:

$$\boxed{P(r_q, \vartheta_q, z; t) = -\rho \frac{\partial \Phi^q}{\partial t} = -i\omega \rho \varphi^q e^{-i\omega t}} \quad (5.4.4.1)$$

Όπου φ^q είναι το δυναμικό της ταχύτητας σε κάθε χώρο που καταλαμβάνει το ρευστό από τους I, III, M και IV (Σχήματα 5.3, 5.4). Οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε ένα σώμα ($p=1,2,\dots,N$) μπορούν να υπολογιστούν με ολοκλήρωση της πίεσης στη μέση βρεχόμενη επιφάνεια S_p από τις εξής εξισώσεις^[84]:

$$\boxed{F = \int_{S_p} p n dS} \quad (5.4.4.2)$$

και

$$M = \int_{S_p} \rho(\rho \times \eta) dS \quad (5.4.4.3)$$

όπου το η υποδηλώνει ένα διάνυσμα θέσης που εκτείνεται από το σημείο αναφοράς των δυνάμεων και ροπών σε ένα τοπικό σημείο στο S_p . Όμως από την γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli και έχοντας ορίσει το δυναμικό της ταχύτητας σε όλες τις περιοχές του ρευστού γύρω από κάθε σώμα της πολυσύνθετης διαμόρφωσης, η υδροδυναμική πίεση λαμβάνεται ίση με:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi^q}{\partial t} = -i\omega \rho \Phi e^{-i\omega t} \quad (5.4.4.4)$$

Επομένως η (5.5.4.2) γίνεται:

$$F = \int_{S,p} i\omega \rho \Phi e^{-i\omega t} n dS \quad (5.4.4.5)$$

Ολοκλήρωση των ανωτέρω (5.4.4.3-5.4.4.5) οδηγεί σε αναλυτικές εκφράσεις για τις διεγείρουσες φορτίσεις των κυματισμών που δρουν σε κάθε «βαθμίδα» της κατασκευής. Στην περίπτωση όπου τα εξεταζόμενα σώματα είναι ενωμένα μεταξύ τους πλέοντας σαν μια ενιαία κατασκευή, η συνολική υδροδυναμική φόρτιση της σύνθετης κατασκευής λαμβάνεται από την εξής σχέση^[84]:

$$F_{i,\text{total}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [B^{(i)}] [F_i^{(i)}] \quad (5.4.4.6)$$

όπου για N σώματα προκύπτουν οι δυνάμεις διέγερσης F_i (5.5.4.5) του εκάστοτε σώματος και B_i είναι οι συντεταγμένες του (μητρώο 6×6) ως προς το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων της κατασκευής.

$$[B^p] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z^p & y^p & 1 & 0 & 0 \\ z^p & 0 & -x^p & 0 & 1 & 0 \\ -y^p & x^p & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4.4.7)$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές αντίδρασης $f_{i,j}^{qp}$ που ασκούνται σε καθένα από τα q -σώματα στην κατεύθυνση i λόγω ταλάντωσης του σώματος p , $p=1,2,3,4$ στην κατεύθυνση j , μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$f_{i,j}^{qp} = \omega^2 \left(\alpha_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} b_{ij}^{qp} \right) x_{j0}^p = \omega^2 \pi_{ij}^{qp} x_{j0}^p \quad (5.4.4.8)$$

Οι ποσότητες α_{ij}^{qp} και b_{ij}^{qp} είναι οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης αντίστοιχα, πραγματικοί και εξαρτώμενοι από την συχνότητα ω .

Για την εκτίμηση των υδροδυναμικών παραμέτρων ολόκληρης της κατασκευής, θεωρούμενη σαν ενιαίο σώμα, πρέπει οι αντίστοιχες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε ανεξάρτητα κινούμενο σώμα της (5.4.4.8) να γραφούν κατάλληλα υπερτιθέμενες ως προς το σημείο αναφοράς της κίνησης, G , ολόκληρου του συστήματος. Για αυτόν τον σκοπό θα συμβολίσουμε με $x=(x_1, x_2, x_3)$ και $\vartheta=(x_4, x_5, x_6)$ τα διανύσματα γραμμικής μετάθεσης και περιστροφής του G . Η μετατόπιση και περιστροφή, x^p και ϑ^p , αντίστοιχα, του σημείου αναφοράς G_p του σώματος p , μπορούν να εκφραστούν ως προς το G ως εξής:

$$\begin{cases} x^p = x + \vartheta \times r^p \\ \vartheta^p = \vartheta \end{cases} \quad (5.4.4.9)$$

Εδώ το r^p υποδηλώνει το διάνυσμα θέσης του G_p σε σχέση με το G . Αντικαθιστώντας τα στοιχεία της (5.4.4.9) για x_{j0}^p , ($j=1,2,\dots, 5$), στην (5.4.4.8) και προσθέτοντας τις ιδιοσυναρτήσεις των μετακινήσεων των p σωμάτων που προκαλούν δυνάμεις στο q σώμα κατά τη διεύθυνση i , η συνολική δύναμη f_i^{qp} που ασκείται στο σώμα q κατά τη διεύθυνση i λόγω της κίνησης του σώματος p μπορεί να εκφραστεί με όρους των συνιστωσών κίνησης της όλης κατασκευής x_{j0} ($j=1,2,\dots,6$) ως εξής^[90]:

$$f_i^{qp} = \sum_{j=1}^6 f_{ij}^{qp} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 \left(\mu_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} \right) x_{j0} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 M_{ij}^{qp} x_{j0} \quad (5.4.4.10)$$

όπου M_{ij}^{qp} είναι στοιχεία του 6×6 μητρώου $[M^{qp}]$ που ορίζεται ως:

$$[M^{qp}] = [\pi^{qp}] [B^p]^T \quad (5.4.4.11)$$

Με $[\pi^{qp}]$ να είναι ένας τετραγωνικός πίνακας του οποίου τα στοιχεία δόθηκαν στην (5.4.4.8) και $[B^p]^T$ ο ανάστροφος μετασχηματισμένος πίνακας $[B^p]$ (5.4.4.7) για $p=i$.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης που εκφράστηκαν ως τώρα (5.4.4.9) είναι εκφρασμένες σε σχέση με το σημείο αναφοράς της κίνησης του q σώματος, G_p . Για να υπολογίσουμε όμως την συνεισφορά της f_i^{qp} στην συνολική δύναμη αντίδρασης ολόκληρης της κατασκευής, πρέπει η f_i^{qp} να γραφεί ως προς το σημείο αναφοράς G του συσσωματώματος. Συμβολίζοντας με F_i^{qp} τις αντίστοιχες δυνάμεις ($i=1,2,3$) και ροπές ($i=4,5,6$) λαμβάνουμε από την κλασσική μηχανική τα εξής:

$$\boxed{F_i^{qp} = f_i^{qp}} \quad \text{για } (i = 1,2,3) \quad (5.4.4.12)$$

και

$$\boxed{F_i^{qp} = f_i^{qp} + (r^q \times f_i^{qp})_i} \quad \text{για } (i = 4,5,6) \quad (5.4.4.13)$$

όπου $r^q = (x^q, y^q, z^q)$ είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου αναφοράς του σώματος q, G_p , ως προς το σημείο αναφοράς G της συνολικής κατασκευής και $f^{qp} = (f_1^{qp}, f_2^{qp}, f_3^{qp})$. Αντικαθιστούμε την (5.5.4.9) για f_i^{qp} στην (5.4.4.13) και χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό:

$$\boxed{\Pi_{ij}^{qp} = A_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} B_{ij}^{qp}} \quad (5.4.4.14)$$

για τις υδροδυναμικές παραμέτρους ως προς το σημείο G , όπου A_{ij}^{qp} και B_{ij}^{qp} είναι οι πρόσθετες μάζες και το δυναμικό απόσβεσης του σώματος q στην διεύθυνση i λόγω της κίνησης του σώματος p στην j διεύθυνση, λαμβάνουμε τα εξής:

$$\boxed{F_i^{qp} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 \Pi_{ij}^{qp} x_{j0}} \quad (5.4.4.15)$$

Τα στοιχεία Π_{ij}^{qp} του 6×6 τετραγωνικού πίνακα $[\Pi^{qp}]$ δίνονται ως εξής:

$$\boxed{[\Pi^{qp}] = [M^{qp}] [B^q] \approx [B^q] [\Pi^{qp}] [B^p]^T} \quad (5.4.4.16)$$

όπου το μητρώο $[B^i]$, ($i=p,q$) δίνεται από τον πίνακα στη σχέση (5.4.4.7). Χρησιμοποιώντας τη (5.4.4.16), οι υδροδυναμικές μάζες και το δυναμικό απόσβεσης ολόκληρης της κατασκευής λαμβάνονται από την άθροιση όλων των τιμών των p και q. Έτσι έχουμε:

$$\Pi_{ij} = \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^N \Pi_{ij}^{qp} \quad (5.4.4.17)$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές $f_{p,i}^{ql}$ λόγω πίεσης που ασκούνται σε οποιοδήποτε σώμα q , $q=1,2,3,4$ στην κατεύθυνση i λόγω ταλάντωσης του μετώπου πίεσης εσωτερικά του θαλάμου της συσκευής l , $l=1,2,3$, γράφονται στην ακόλουθη μορφή^[93]:

$$f_{p,i}^{ql} = (-e_i^{ql} + id_i^{ql}) p_{in0}^l \quad (5.4.4.18)$$

Όπου με e_i^{ql} και d_i^{ql} συμβολίζονται οι συντελεστές απόσβεσης πίεσης. Οι συνολικές υδροδυναμικές δυνάμεις μπορούν να υπολογιστούν για την όλη διάταξη με κατάλληλη υπέρθεση των αντίστοιχων δυνάμεων σε κάθε σώμα ως προς το σημείο αναφοράς κίνησης της ενιαίας κατασκευής, G ^[91]. Έτσι η συνολική δύναμη $f_{p,i}^{ql}$ λόγω πίεσης λαμβάνεται από την εξής σχέση:

$$F_{i,total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [B^{(i)}] [F_p^{(i)}] \quad (5.4.4.19)$$

όπου B_i οι συντεταγμένες του εκάστοτε σώματος p (μητρώο 6×6) ως προς το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων της κατασκευής G , όπως στη (5.4.4.7).

5.4.5 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ-ΠΙΕΣΗΣ

Σε κατάσταση ισορροπίας οι δυνάμεις που ασκούνται σε μία διάταξη που πλέει ελεύθερα χωρίς την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, περιγράφονται από το παρακάτω διαφορικό σύστημα των εξισώσεων κίνησης στο πεδίο συχνοτήτων^[99]:

$$\sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^6 (\delta_{p,q} m_{kj}^q + a_{kj}^{qp}) \cdot \ddot{x}_{j0}^p + b_{kj}^{qp} \cdot \dot{x}_{j0}^p + \delta_{p,q} c_{kj}^q \cdot x_{j0}^p + \sum_{p=1}^N (e_{pk}^{qp} - id_{pk}^{qp}) p_{in0}^p = f_k^q + \delta_{k,3} f_{MP}^q \quad (5.4.5.1)$$

$k = 1, 2, \dots, 6$

όπου:

- m_{kj}^q , στοιχείο της μάζας του πίνακα (6×6)
- a_{kj}^{qp} , πίνακας υδροδυναμικής μάζας λόγω εξαναγκασμένης ταλάντωσης της συσκευής p κατά j διεύθυνση εξαρτώμενος από τη συχνότητα (βλέπε εξίσωση (5.4.4.8))

- b_{kj}^{qp} , πίνακας απόσβεσης της συσκευής q κατά k διεύθυνση, λόγω εξαναγκασμένης ταλάντωσης της συσκευής p κατά j διεύθυνση εξαρτώμενος από τη συχνότητα (βλέπε εξίσωση (5.4.4.8))
- x_{j0}^p , διάνυσμα μετατόπισης έξι βαθμών ελευθερίας
- c_{kj}^q , στοιχείο της δυσκαμψίας του πίνακα (6 x 6)
- f_k^q , σύνολο των δυνάμεων διέγερσης και των ροπών που ασκούνται στην συσκευή q κατά k διεύθυνση
- $(e_{pk}^{qp} - id_{pk}^{qp})p_{in0}^p$, υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στην συσκευή q κατά k διεύθυνση λόγω ύπαρξης πίεσης εντός της συσκευής p
- f_{MP}^q , δύναμη που ασκείται στο θάλαμο της συσκευής της q λόγω της εσωτερικής πίεσης και είναι ίση με:

$$f_{MP}^q = S_i^q p_{in0}^q \quad (5.4.5.2)$$

όπου S_i^q είναι η εγκάρσια διατομή της εσωτερικής βρεχόμενης επιφάνειας της διατομής.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.4.4.18) και (5.4.5.2) στην (5.4.5.1) προκύπτει η παρακάτω:

$$\sum_{p=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^6 -\omega^2 (\delta_{p,q} m_{kj}^q + a_{kj}^{qp} + \frac{i}{\omega} b_{kj}^{qp}) + \delta_{p,q} c_{kj}^q \right\} x_{j0}^p + \left\{ -\frac{f_{pk}^{qp}}{p_{in0}^p} - \delta_{p,q} \delta_{k,3} S_i^q \right\} p_{in0}^p = f_k^q \quad (5.4.5.3)$$

$k = 1, 2, \dots, 6$

Και σε μορφή πίνακα μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

$$[\mu^N] \cdot [x_{j0}^N] + [C^N] \cdot [p_{in0}^N] = [f_D^N] \quad (5.4.5.4)$$

όπου:

- $[\mu^N] = \left(-\omega^2 \cdot \left[\delta_{p,q} m_{kj}^q + a_{kj}^{qp} + \frac{i}{\omega} b_{kj}^{qp} \right] + \delta_{p,q} c_{kj}^q \right)$, τετραγωνικός πίνακας (6N x 6N) για κάθε συσκευή της διάταξης
- $[C^N] = \left(-f_{pk}^{qp} / p_{in0}^p - \delta_{p,q} \delta_{k,3} S_c^q \right)$, πίνακας (6N x 6N) για κάθε συσκευή της διάταξης

- $\begin{bmatrix} f_D^N \end{bmatrix}$, διάνυσμα $(6N \times 1)$ που περιέχει τις δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε κάθε συσκευή της διάταξης
- $\begin{bmatrix} x_{j0}^N \end{bmatrix}$, πίνακας $(6N \times 1)$ που περιέχει τις κινήσεις σε έξι βαθμούς ελευθερίας όλων των συσκευών της διάταξης
- $\begin{bmatrix} p_{in0}^N \end{bmatrix}$, πίνακας $(N \times 1)$ που περιέχει τις τιμές της εσωτερικής πίεσης του αέρα σε κάθε συσκευή της διάταξης

Όταν η διάταξη πολλών σωμάτων θεωρείται σαν ενιαία πλέουσα κατασκευή, τότε το σύστημα των εξισώσεων κίνησης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (M_{i,j} + A_{i,j} + \frac{i}{\omega} B_{i,j}) + C_{i,j} \right] \cdot x_{j0} - F_{P,i} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.4.5.5)$$

όπου:

- $M_{i,j}$, στοιχείο της μάζας του πίνακα (6×6)
- $C_{i,j}$, στοιχείο της ακαμψίας του πίνακα (6×6)
- $A_{i,j}$, συντελεστής υδροδυναμικής μάζας (βλέπε εξίσωση (5.4.4.14))
- $B_{i,j}$, συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης (βλέπε εξίσωση (5.4.4.14))
- $F_{P,i}$, είναι η δύναμη που ασκείται στη συνολική εγκατάσταση λόγω ύπαρξης πίεσης αέρα εντός των συσκευών στην i διεύθυνση (βλέπε εξίσωση (5.4.4.19))
- F_i , σύνολο των δυνάμεων διέγερσης και των υδροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στη διάταξη κατά την i διεύθυνση
- x_{j0} , μεταφορική κίνηση όλου του συστήματος κατά την j διεύθυνση ως προς το σύστημα συντεταγμένων

Οι γραμμικές μεταφορικές κινήσεις αλλά και οι περιστροφικές κινήσεις του συστήματος, x_{j0} , μπορούν να εκφραστούν διαμέσου των αντίστοιχων κινήσεων της συσκευής p χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x_{10}^p = x_{10} + x_{50} Z^p - x_{60} Y^p$$

$$x_{20}^p = x_{20} - x_{40}z^p + x_{60}x^p$$

$$x_{30}^p = x_{30} + x_{40}y^p - x_{50}x^p$$

$$x_{40}^p = x_{40}, x_{50}^p = x_{50}, x_{60}^p = x_{60}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, (x^p, y^p, z^p) είναι οι συντεταγμένες του συστήματος αναφοράς των κινήσεων της p συσκευής σε σχέση με το σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Έτσι η μετατόπιση όλης της κατασκευής αλλά και η πίεση που ασκείται μέσα σε κάθε συσκευή της διάταξης, μπορεί να προσδιοριστεί από την επίλυση του διαφορικού συστήματος των εξισώσεων (5.4.3.5) και (5.4.5.5).

Το σύστημα αγκύρωσης είναι ένα από τα σημαντικά ζητήματα για την απορρόφηση ισχύος από κάθε συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η πλωτή κατασκευή που εξετάζεται αγκυρώνεται στον πυθμένα της θάλασσας με TLP τένοντα που είναι συνδεδεμένος με κάθε ανωστικό κυλινδρικό στοιχείο που αποτελούνται από συσκευές O.W.C. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις της κατασκευής, περιορίζονται λόγω της υψηλής προέντασης των τενόντων της αγκύρωσης, λόγω της υψηλής δυσκαμψίας που παρουσιάζουν οι τένοντες, η κατακόρυφη ταλάντωση (heave), ο διατοιχισμός (roll) και ο προευνασμός (pitch) είναι ασήμαντες. Οι δυνάμεις αγκύρωσης $f_{i,mooring}^T$, που ασκούνται στην κατασκευή κατά διεύθυνση i λαμβάνονται από^[93]:

$$f_{i,mooring}^T = C_{i,j,mooring} x_{j0}, \quad i,j=1,\dots,6 \quad (5.4.5.6)$$

όπου x_{j0} είναι η μετατόπιση όλης της κατασκευής κατά διεύθυνση j και $C_{i,j,mooring}$ είναι η σταθερά ακαμψίας της συσκευής και της γραμμής αγκύρωσης. Ο πίνακας της ακαμψίας της κατασκευής $C_{i,j,total}$, αποτελείται από τα παρακάτω τρία μέρη^[100]:

- Ακαμψία της γραμμής αγκύρωσης
- Υδροστατική επαναφορά ακαμψίας της διάταξης, υπό την επίδραση των τενόντων αλλά και της γεωμετρικής ακαμψίας.

Έτσι τα στοιχεία του τετραγωνικού πίνακα ακαμψίας, $C_{i,j,total}$, ορίζονται ως εξής:

$$C_{1,1} = C_{1,2} = \sum_{n=1}^M \frac{T_n}{L}, \quad C_{3,3} = \rho g A_{WL} + \frac{EA}{L} \quad (5.4.5.7)$$

$$C_{4,4} = \rho g I_{WLY} + Uz_B - Qz_G - \sum_{n=1}^M T_n z_n + \frac{EI_{xx}}{L} \quad (5.4.5.8)$$

$$C_{5,5} = \rho g I_{WLX} + Uz_B - Qz_G - \sum_{n=1}^M T_n z_n + \frac{EI_{yy}}{L} \quad (5.4.5.9)$$

$$C_{6,6} = \sum_{n=1}^M \frac{T_n}{L} (x_n^2 + y_n^2) \quad (5.4.5.10)$$

όπου:

- M: Πλήθος των τενόντων
- T_n : Δυνάμεις προέντασης του τένοντα
- A: Συνολική διατομή
- I_{xx} : Ροπές αδράνειας του τένοντα ως προς τον άξονα των x
- I_{yy} : Ροπές αδράνειας του τένοντα ως προς τον άξονα y
- x_n, y_n, z_n : Συντεταγμένες των σημείων προσάρτησης n τενόντων σε σχέση κέντρο βάρους της διάταξης
- L: Μήκος τένοντα
- A_{WL} : Βρεχόμενη επιφάνεια
- I_{WLY} : Ροπές αδράνειας της βρεχόμενης επιφάνειας ως προς τον άξονα x
- I_{WLX} : Ροπές αδράνειας της βρεχόμενης επιφάνειας ως προς τον άξονα y
- U: Άντωση κατασκευής
- Q: Βάρος κατασκευής
- z_B : Κατακόρυφες συντεταγμένες της άντωσης της διάταξης
- z_G : Κατακόρυφες συντεταγμένες του κέντρου βάρους της κατασκευής

Τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα $C_{i,j,\text{total}}$ ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 C_{1,2} &= C_{2,1} = C_{1,3} = C_{3,1} = C_{3,2} = 0 \\
 C_{4,1} &= C_{1,4} = C_{5,2} = C_{2,5} = C_{6,3} = C_{3,6} = 0 \\
 C_{5,1} &= C_{1,5} = C_{1,1}z_n, C_{4,2} = C_{2,4} = -C_{2,2}z_n \\
 C_{6,1} &= C_{1,6} = -C_{1,1}y_n, C_{4,3} = C_{3,4} = -C_{3,3}y_n \\
 C_{6,2} &= C_{2,6} = C_{2,2}x_n, C_{5,3} = C_{3,5} = -C_{3,3}x_n \\
 C_{5,4} &= C_{4,5} = -C_{3,3}x_n y_n \\
 C_{6,4} &= C_{4,6} = -C_{2,2}x_n z_n \\
 C_{6,5} &= C_{5,6} = -C_{1,1}y_n z_n
 \end{aligned}$$

όπου x_n, y_n, z_n είναι οι οριζόντιες και κάθετες συντεταγμένες η τένοντα TLP.

Στην περίπτωση όπου στην εξεταζόμενη πλωτή ενιαία κατασκευή εδράζεται ανεμογεννήτρια (Α/Γ) με ανάλυση στο πεδίο συχνότητας μπορεί να προβληθεί η συνεισφορά της Α/Γ στην κίνηση 6 βαθμών ελευθερίας του πλωτού σώματος^[101]. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση δυναμικού μοντέλου τύπου-Hamilton θεωρώντας το βάρος και το αεροδυναμικό φορτίο ως τους παράγοντες εξωτερικών δυνάμεων. Η θεωρία Blade Element Momentum (BEM) προσδιορίζει την αεροδυναμική φόρτιση ως συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας και των κινήσεων του πλωτήρα που μεταβάλλουν τις ενεργές γωνίες προσβολής των «λεπίδων» από τον άνεμο. Με γραμμικοποίηση όλων των όρων ως προς τη στατική θέση του πλωτήρα (μηδενικές κινήσεις), μπορούν να προσδιοριστούν τα μητρώα πρόσθετης μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας που συνεισφέρουν στην Α/Γ ως αδρανειακές, αεροδυναμικές και βαρυτικές φορτίσεις στην εξίσωση (5.4.5.5)^[102].

Η διερεύνηση της δυναμικής ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στο αγκυρωμένο πολλαπλό κατασκευαστικό σύστημα ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης(O.W.C) και Α/Γ στήλης οδηγεί στο ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων κίνησης που περιγράφουν το συνδυασμένο υδρο-αεροελαστικό πρόβλημα της διερευνώμενης κατασκευής στο πεδίο των συχνοτήτων^{[101], [103]}:

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (M_{i,j} + A_{i,j} + M^{\text{WT}} + \frac{i}{\omega} B_{i,j} + \frac{i}{\omega} B_{i,j}^{\text{WT}}) + C_{i,j} + C_{i,j}^{\text{WT}} + C_{\text{mooring}} \right] \cdot x_{j0} - F_{p,j} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

- $M_{i,j}$, Στοιχεία μητρώου της μάζας όλης της εγκατάστασης
- $C_{i,j}$: Στοιχεία μητρώου ακαμψίας όλης της εγκατάσταση
- $C_{i,j}^{WT}$: Ακαμψία που περιέχει τα φορτία βαρύτητας της Α/Γ
- $A_{i,j}$: Πρόσθετη μάζα εγκατάστασης
- $B_{i,j}$: Υδροδυναμική απόσβεση της εγκατάστασης
- M^{WT} : Μάζα που περιέχει τα αεροδυναμικά φορτία της Α/Γ
- $B_{i,j}^{WT}$: Απόσβεση που περιλαμβάνει τα γυροσκοπικά φορτία της Α/Γ
- $F_{P,i}$: Υδροδυναμικές δυνάμεις πίεσης αέρα εντός των συσκευών στην i διεύθυνση
- F_i : Δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στην διάταξη κατά i διεύθυνση
- x_{j0} : Μετατόπιση όλου του συστήματος κατά j διεύθυνση ως προς το σύστημα συντεταγμένων
- $C_{mooring}$: Ακαμψία λόγω συστήματος αγκύρωσης

5.4.6 ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ

Η ισχύς που απορροφάται από κάθε συσκευή OWC, ισούται με την ισχύ που απορροφάται διαμέσου της ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνεια εσωτερικά της συσκευής^[83]:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \overline{p_{in0}^q} \cdot q^q \right\} \quad (5.4.6.1)$$

ο όρος $\overline{p_{in0}^q}$ αντιπροσωπεύει τον σύνθετο όρο p_{in0}^q .

Η ικανότητα-εύρος απορρόφησης κυματικής ενέργειας δίνεται από την παρακάτω σχέση^[104]:

$$E_f = \frac{L_{pc}^q}{2b_q} = \frac{P^q}{2b_q P_w} \quad (5.4.6.2)$$

όπου P^q είναι η απορροφούμενη ισχύς από την q συσκευή και P_w η μέση κυματική ισχύς δηλαδή ο μέσος όρος της κυματικής περιόδου της κορυφής του πλάτους ενός αρμονικού κυματισμού, πλάτους $H/2$ και συχνότητας ω :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2} \right)^2 C_g \quad (5.4.6.3)$$

όπου C_g είναι το σύνολο της ταχύτητας των κυματισμών.

Το συνολικό εύρος απορροφούμενης ισχύος από διάταξη αποτελούμενη από N συσκευές OWC δίνεται από την παρακάτω σχέση^[105]:

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P^n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_f^n \quad (5.4.6.4)$$

Όπου P^n είναι η απορροφούμενη ισχύς από κάθε συσκευή OWC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ενδελεχής μελέτη συστοιχίας κυλίνδρων σε ελεύθερα πλεύουσα αλλά και αγκυρωμένη τρίγωνη, τετράγωνη και πεντάγωνη διάταξη. Οι ανωστικοί κύλινδροι των εξεταζόμενων πλωτών κατασκευών οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί στις κορυφές κάθε διάταξης, αποτελούνται από συσκευές Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού (Oscillating Water Column) για την ανάκτηση της κυματικής ενέργειας και είναι εδρασμένες σε TLP (Tension Leg Platform) κατασκευή με κατακόρυφους κλάδους αγκύρωσης, υπό σταθερή προένταση. Στο κέντρο βάρους της πλωτής κατασκευής είναι εγκατεστημένος κύλινδρος στήριξης ανεμογεννήτριας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Ο αεροστρόβιλος εντός των συσκευών OWC είναι τύπου Wells και η σταθερά του ίση με την ιδεατή (optimum) σταθερά ακίνητης στην πρόσπτωση του κύματος, μεμονωμένης συσκευής, ίδιας γεωμετρίας με τις εξεταζόμενες συσκευές^[97].

Σκοπός της διπλωματικής είναι η αριθμητική επεξεργασία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, για την κατασκευή μιας πλωτής εξέδρας με βέλτιστη ενεργειακή παραγωγή αλλά και με επαρκή υδροδυναμική αλλά και στατική συμπεριφορά.

Για τον υπολογισμό των φορτίων και των δυνάμεων που ασκούνται σε πλωτές κατασκευές υπό την επίδραση κυμάτων, έγινε χρήση υπολογιστικού προγράμματος προσομοίωσης. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το HAMVAB (Hydrodynamic Analysis of Multiple Vertical Axisymmetric Bodies), που έχει αναπτυχθεί στον τομέα Θαλασσιών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης του ΕΜΠ. Το πρόγραμμα παρέχει τις δυνάμεις και ροπές διέγερσης πρώτης τάξης, λόγω των κυματισμών και τις επαγόμενες κινήσεις σε πολλαπλά αλληλεπιδρώντα σώματα, συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις λαμβάνονται υπόψη για την επίλυση των προβλημάτων περίθλασης και ακτινοβολίας. Τα σώματα στη διάταξη, μπορούν να κινηθούν είτε ανεξάρτητα είτε όλα μαζί ως ένα σώμα. Στη διαδικασία επίλυσης μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν δυνάμεις επαναφοράς λόγω ελαστικών σχοινιών που είναι προσδεμένα στους κυλίνδρους. Οι μέσες χρονικά δευτεροτάξιες δυνάμεις έκπτωσης τόσο στη συνολική διάταξη που αποτελείται από πολλαπλά σώματα

αλλά και σε κάθε σώμα ξεχωριστά, υπολογίζονται κάνοντας χρήση απειροστών όγκων ελέγχου γύρω από κάθε μέρος της διάταξης.

Τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων υπολογίζονται συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά κάθε σώματος ξεχωριστά διαμέσου της θεώρησης των πολλαπλών ανακλάσεων (multiple-scattering physical procedure). Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κάθε σώματος εκτιμώνται με χρήση γενικευμένων συμμετρικών ιδιοσυναρτήσεων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το πεδίο ροής γύρω από το σώμα χωρίζεται σε περιοχές σε σχήμα δακτυλίων, σε γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις κατά Fourier.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι παρακάτω καταστάσεις- συστοιχίες διατάξεων για την εκλογή της βέλτιστης διάταξης, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή αποδοτικότητα των κατασκευών αλλά και τους οικονομοτεχνικούς παράγοντες που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την υλοποίηση αλλά και την πραγμάτωση ενός τεχνολογικού προγράμματος :

1. Τρίγωνη κατασκευή

- Μεταβολή της απόστασης των ανωστικών κυλίνδρων για ελεύθερα πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.
- Μεταβολή του βυθίσματος του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων για ελεύθερα πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.
- Μεταβολή της ακτίνας των ανωστικών κυλίνδρων για ελεύθερα πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.
- Μεταβολή του βυθίσματος του κυλίνδρου στήριξης της ανεμογεννήτριας για ελεύθερα πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.
- Μεταβολή ακτίνας των εσωτερικών κυλίνδρων των ανωστικών σωμάτων για ελεύθερα πλέουσα αλλά και αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.
- Μελέτη κατασκευής σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης κυματισμών.
- Μελέτη κατασκευής υπό την επήρεια διαφορετικών ταχυτήτων ανέμου.

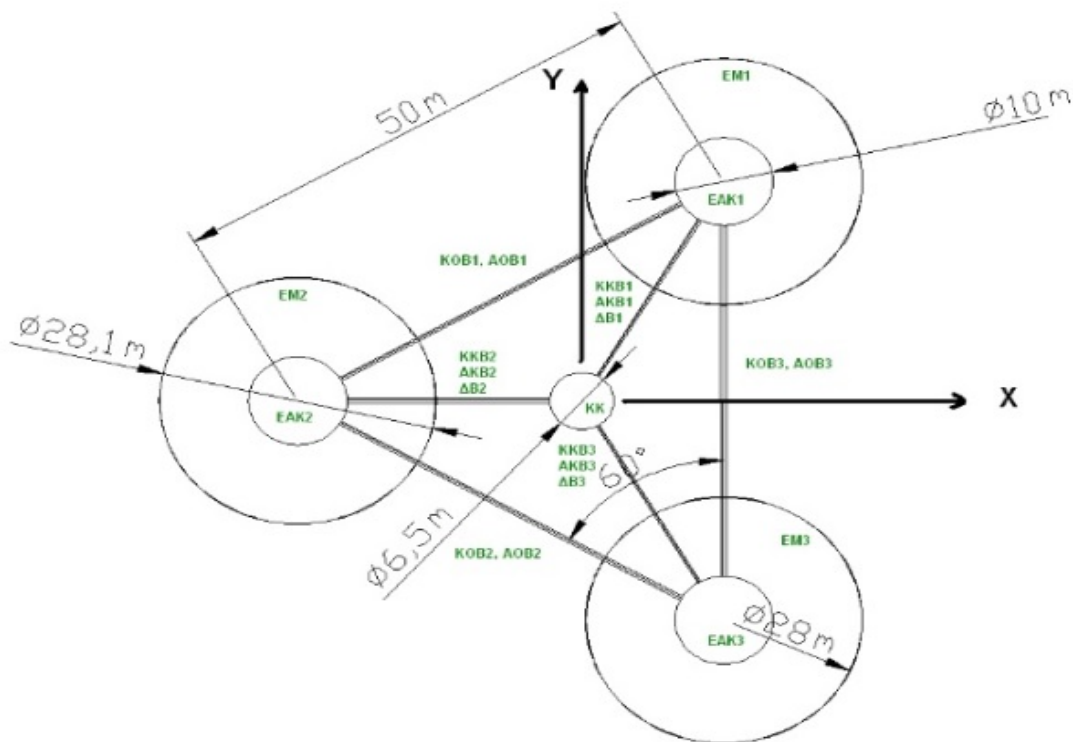
Σε κάθε μια από της παραπάνω καταστάσεις γίνεται η εκλογή της αποδοτικότερης κατασκευής, με την παραδοχή πως η συχνότητα των κυματισμών στα Ελληνικά χωρικά ύδατα είναι περίπου ίση με $\omega=1 \text{ rad/sec}$. Στη συνέχεια, έχοντας καταλήξει στην ορθή διαστασιολόγηση της κατασκευής, γίνεται σύγκριση της τρίγωνης διάταξης με την τετράγωνη αλλά και την πεντάγωνη διάταξη για ελεύθερα πλεύουσες αλλά και αγκυρωμένες συστοιχίες σε βάθη νερών 120 και 200 μέτρων.

6.1 ΤΡΙΓΩΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

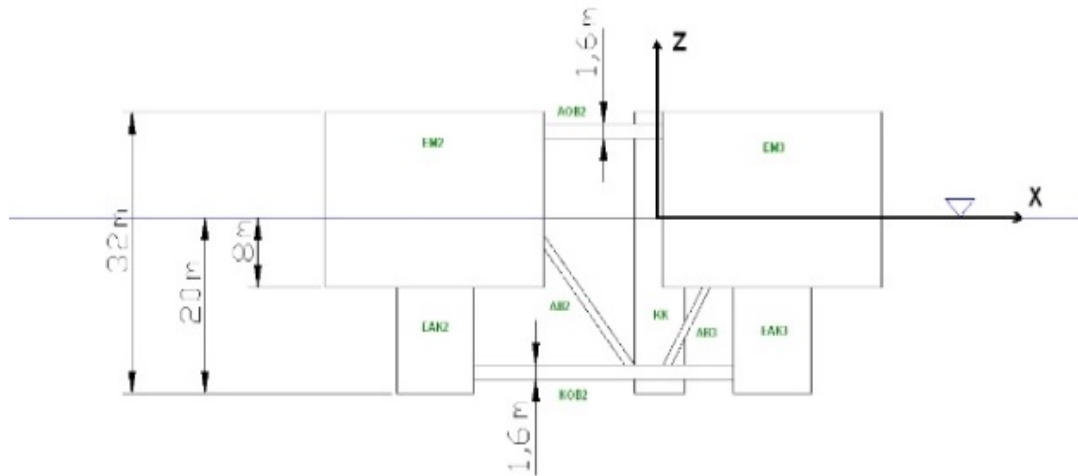
6.1.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΛΩΤΗΣ ΗΜΙΒΥΘΙΖΟΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στους παρακάτω πίνακες 6.1 και 6.2 δίδονται οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι της εξεταζόμενης διάταξης που απεικονίζονται στα σχήματα 6.1 και 6.2 όπως επίσης και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη πλωτής κατασκευής μαζί με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης.

Σχήμα 6.1 :Κάτοψη πλωτής ημιβυθιζόμενης κατασκευής



Εικόνα 6.2 : Πλάγια όψη πλωτής ημιβυθιζόμενης κατασκευής



Πίνακας 6.1 : Διαστάσεις του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου

ΩΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ (ΣΤΙΣ ΚΟΡΥΦΕΣ ΤΟΥ ΤΡΙΓΩΝΟΥ)	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ
Εσωτερικός ανωστικός κύλινδρος (ακτίνα)	5 m
Βύθισμα εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	20 m
Εξωτερικός μανδύας (Εσωτ./Εξωτ. Ακτίνα)	14 m / 14.05 m
Βύθισμα εξωτερικού μανδύα	8 m
Διάκεντρος εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων	50 m
Ύψος εξάλων εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	12 m
Συνολικό ύψος εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	32 m
Κεντρικός κύλινδρος στήριξης Α/Γ (ακτίνα)	3.25 m
Βύθισμα κεντρικού κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ	20 m
Διάμετρος κυλινδρικών στοιχείων δικτυώματος	1.6 m
Βύθισμα σχεδίασης	20 m
Ύψος εξάλων κεντρικού κυλίνδρου στήριξης Α/Γ (απόσταση βάσης του πύργου της Α/Γ από την ΕΕ)	10 m
Διάμετρος βραχιόνων σύνδεσης	1.6 m

Πίνακας 6.2 :Βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη πλωτής κατασκευής μαζί με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης

ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΙΓΩΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	
Μάζα κάθε συσκευής	1646.2 tn
Μάζα κεντρικού κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ	600.0 tn
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 1 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(-28.87, 0)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 2 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(14.43, -25)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 3 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(-14.43, -25)
Κέντρο μάζας της πλωτής κατασκευής (κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια)	4.05 m
Μάζα πλωτής κατασκευής με ενδεχόμενο έρμα	2.1836×10^6 kg
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο roll γύρω από το ΚΜ	1.5×10^9 kg·m ²
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο pitch γύρω από το ΚΜ	1.5×10^9 kg·m ²
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο yaw γύρω από το ΚΜ	2.7×10^9 kg·m ²
Προένταση κάθε τένοντα	10,800 kN
Συντελεστής επαναφοράς K_{xx} , K_{yy} κάθε τένοντα (βάθος νερού 120 m)	108 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{xx} , K_{yy} κάθε τένοντα (βάθος νερού 200 m)	60 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{zz} κάθε τένοντα (βάθος νερού 120 m)	3,722 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{zz} κάθε τένοντα (βάθος νερού 200 m)	2,067 kN/m

6.1.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΕΝΤΡΟΥ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α/Γ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, η βέλτιστη απόσταση της διακέντρου των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των

αρχείων εισαγωγής(inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Ελεύθερα πλεύουσα κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 40 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 50 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 60 m

ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 40 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 50 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 60 m

2) Αγκυρωμένη κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 40 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 50 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 60 m

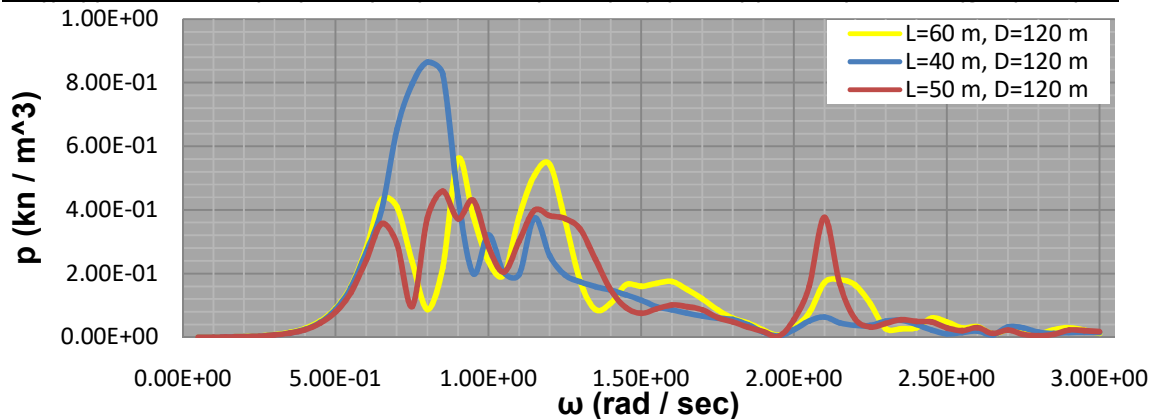
ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 40 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 50 m
- Διάκεντρος των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων L= 60 m

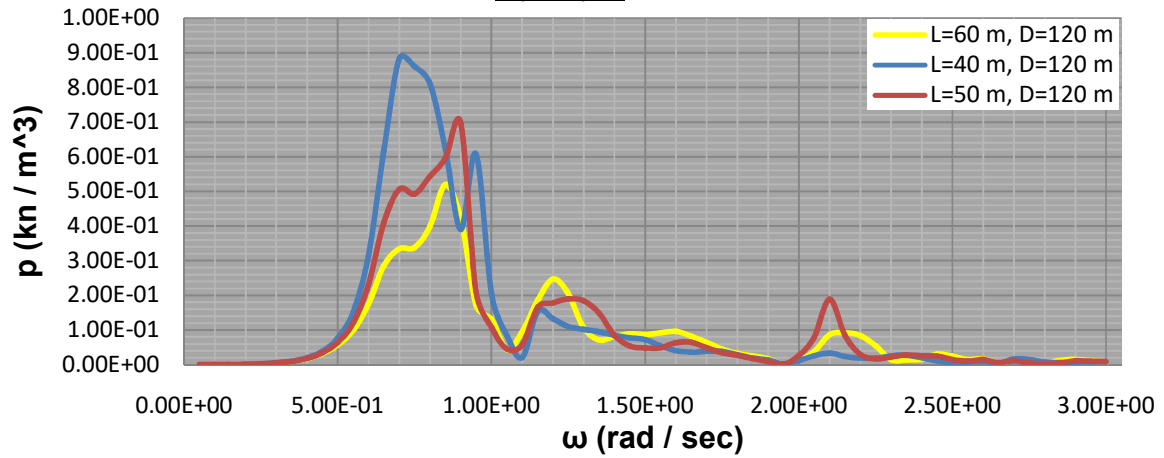
ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

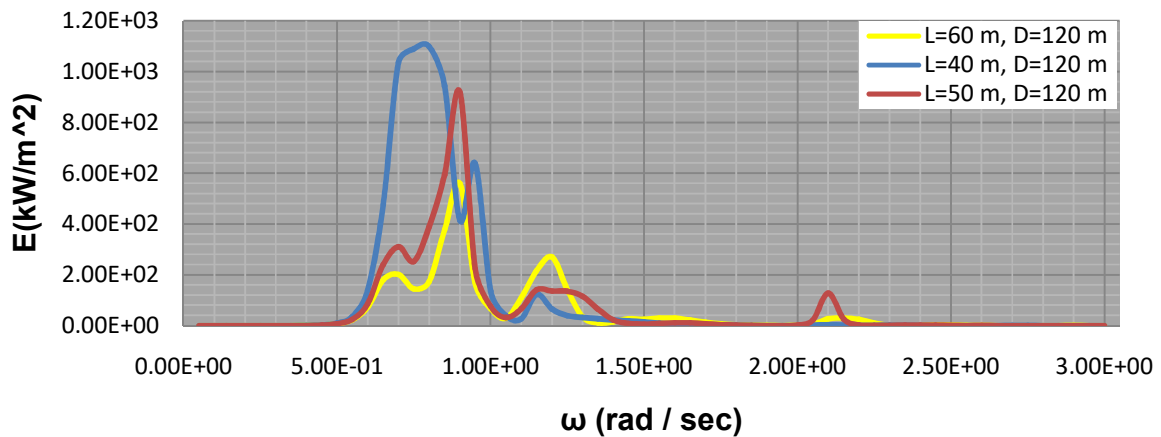
Διάγραμμα 6.1 :Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.2 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

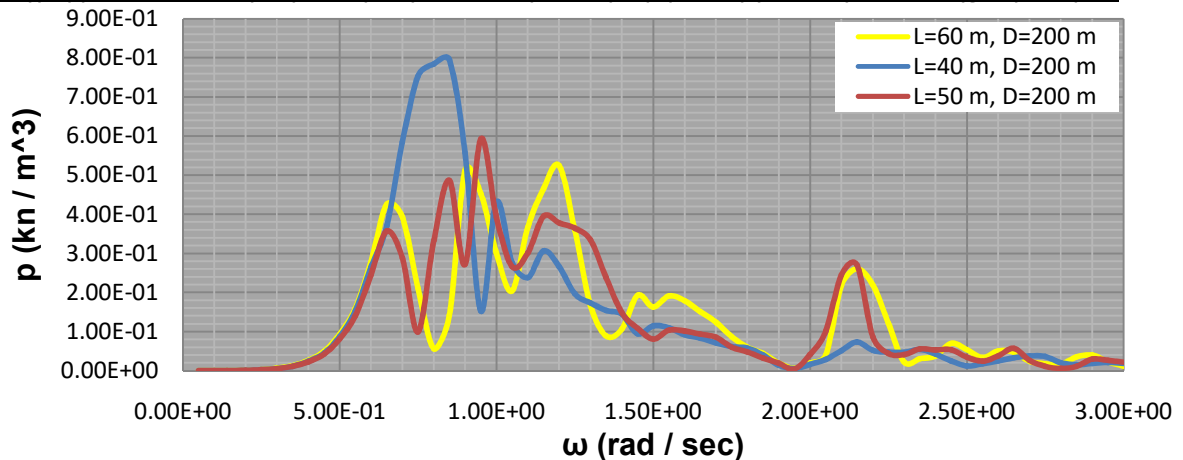


Διάγραμμα 6.3 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

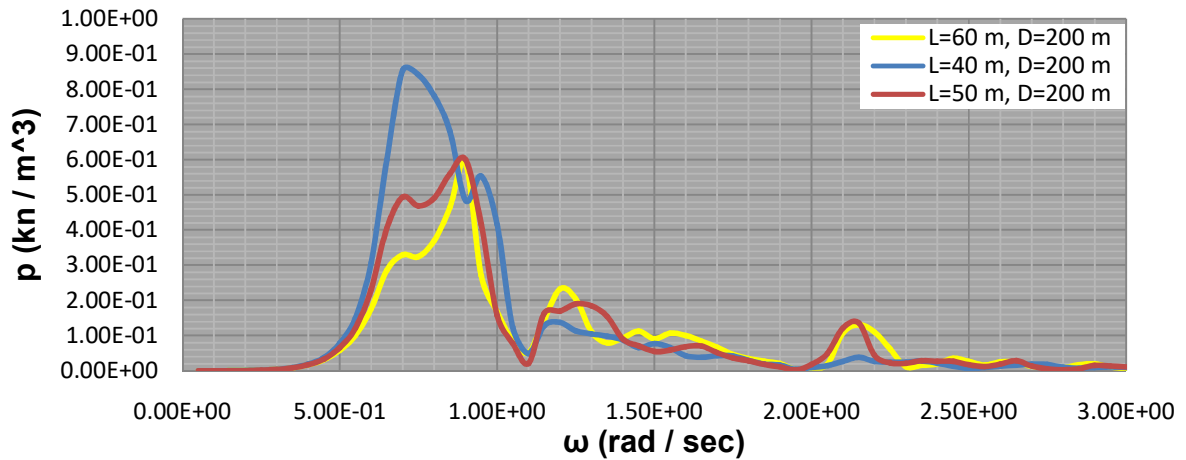


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

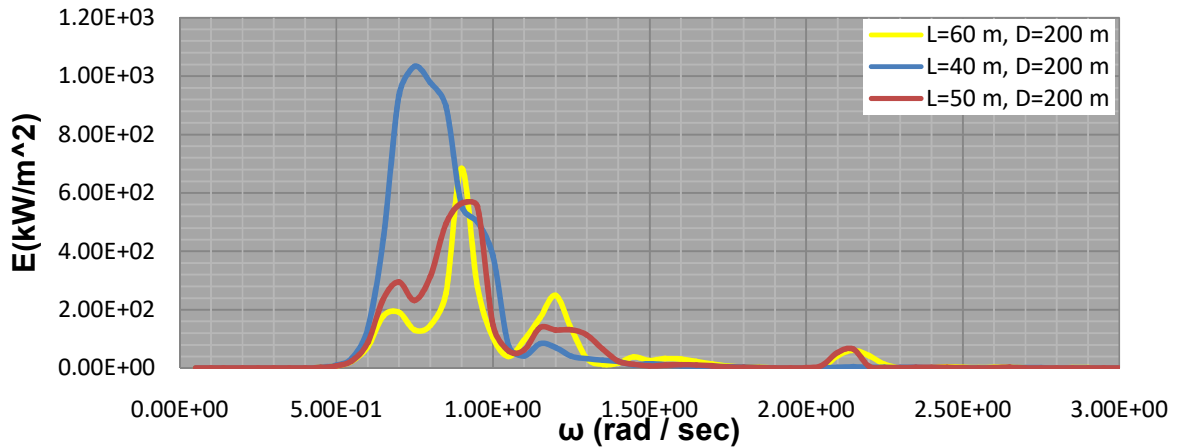
Διάγραμμα 6.4 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.5 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



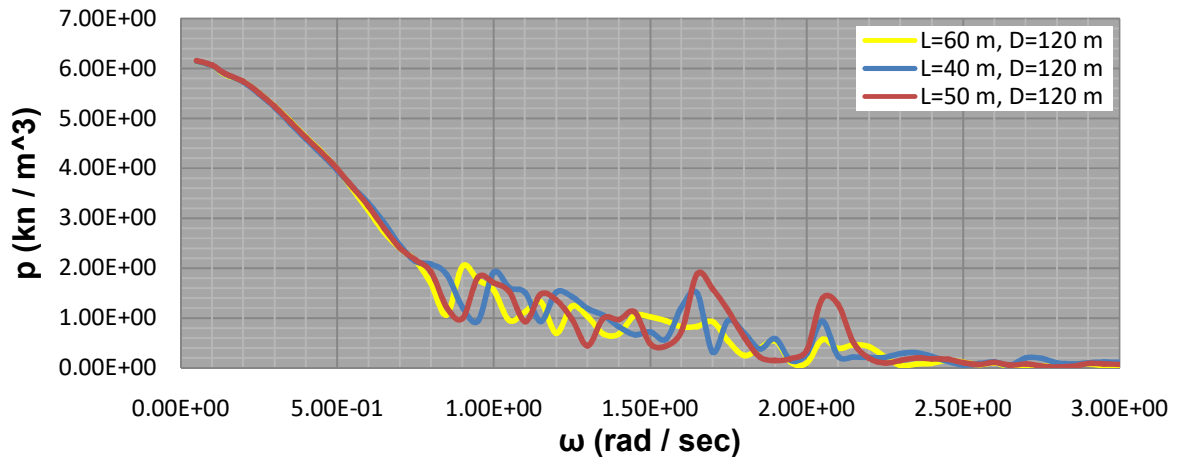
Διάγραμμα 6.6 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



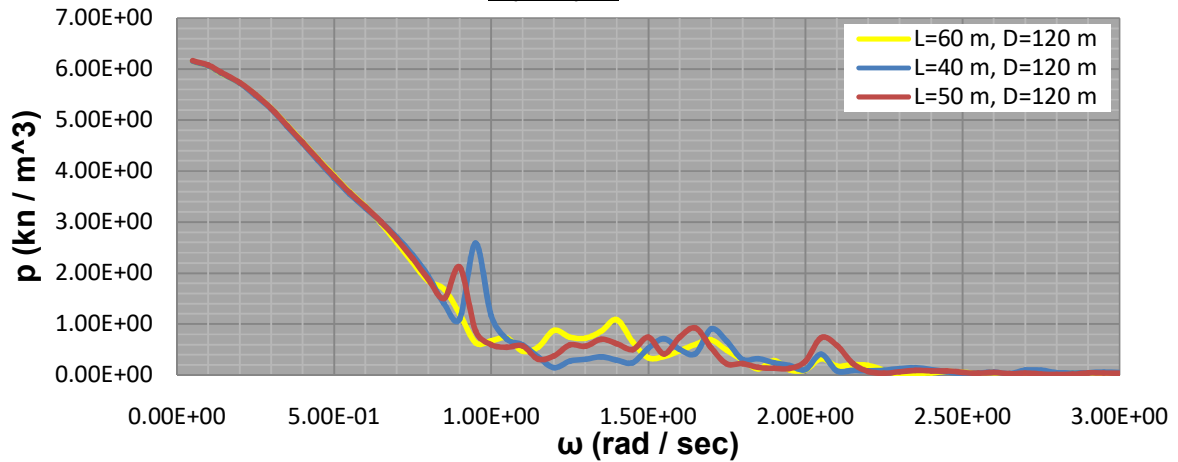
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

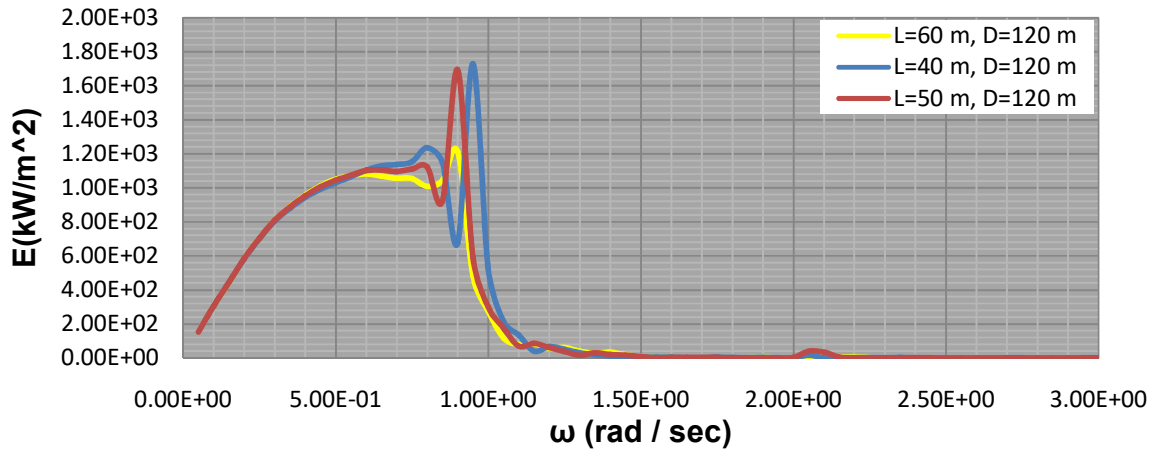
Διάγραμμα 6.7 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.8 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

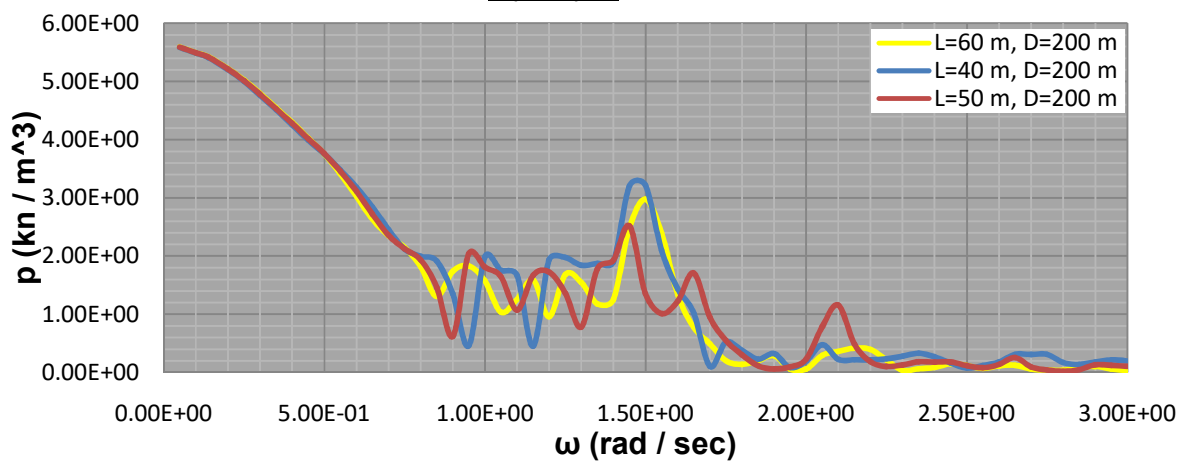


Διάγραμμα 6.9 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

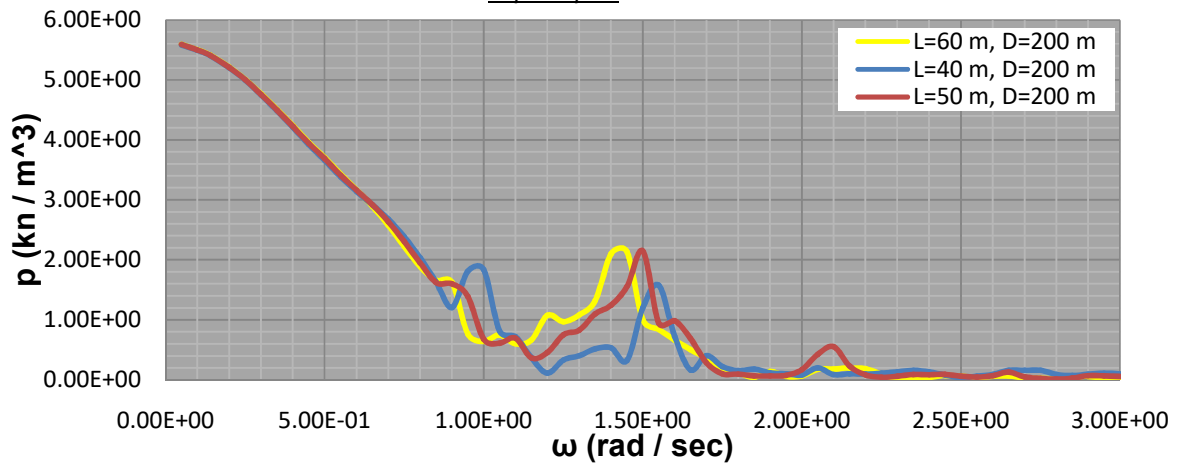


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

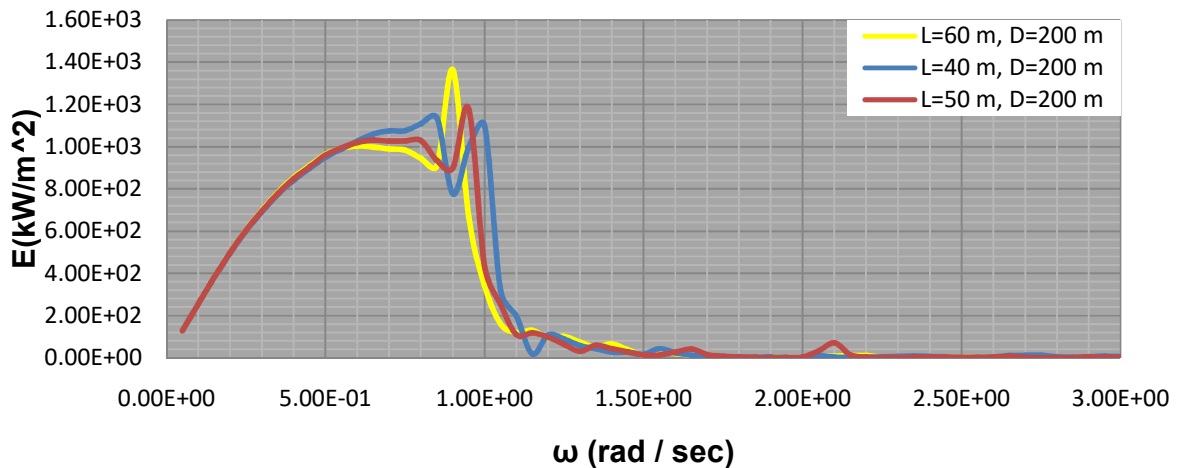
Διάγραμμα 6.10 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.11 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.12 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Από τα διαγράμματα 6.9 και 6.12 για αγκυρωμένη τρίγωνη πλωτή κατασκευή χωρίς την εγκατάσταση Α/Γ σε βάθη νερών 120 m και 200 m αντίστοιχα, παρατηρούμε πως για διάκεντρο των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $L=50$ m, η απορροφούμενη κυματική ισχύς παρουσιάζει μέγιστο και έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με αυτή για $L=40$ m και 60m κοντά στο πεδίο συχνοτήτων των κυματισμών των Ελληνικών χωρικών υδάτων (περίπου ίση $\omega=1$ rad/sec). Επομένως, η βέλτιστη απόσταση της διακέντρου των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων είναι ίση με $L=50$ m, όπου η ίδια θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα βήματα. Επιπρόσθετα παρατηρείται πως η απορροφούμενη κυματική ισχύς στην αγκυρωμένη πλωτή κατασκευή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν που πλέει ελεύθερα.

6.1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΑΝΔΥΑ ΤΩΝ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α/Γ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, το βέλτιστο βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των αρχείων εισαγωγής(inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Ελεύθερα πλέουσα κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 8 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 10 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 12 m

ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 8 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 10 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 12 m

2) Αγκυρωμένη κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 8 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 10 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 12 m

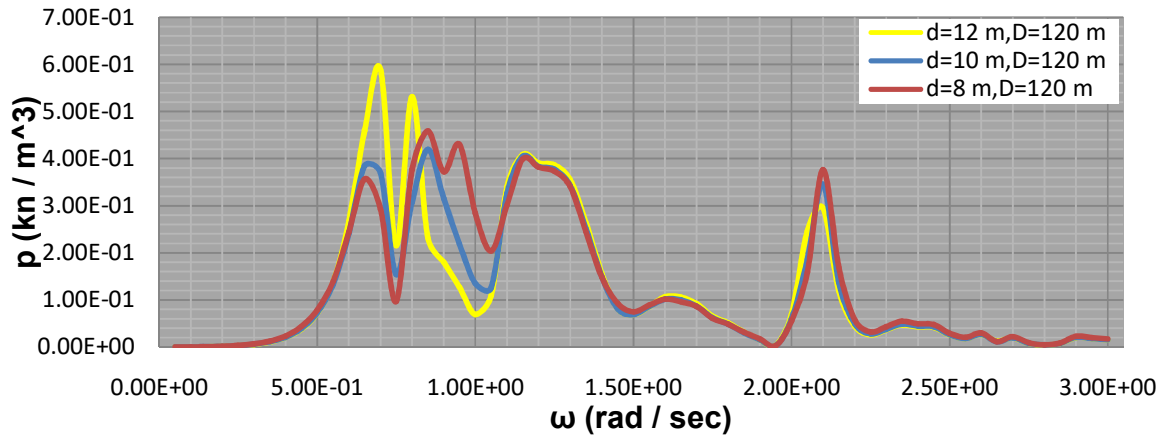
ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 8 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 10 m
- Βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων d= 12 m

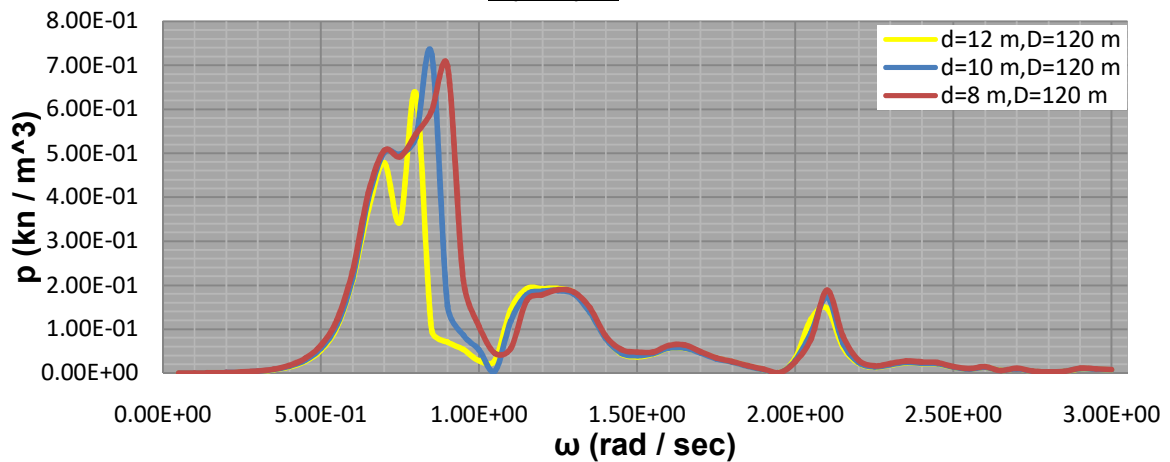
ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

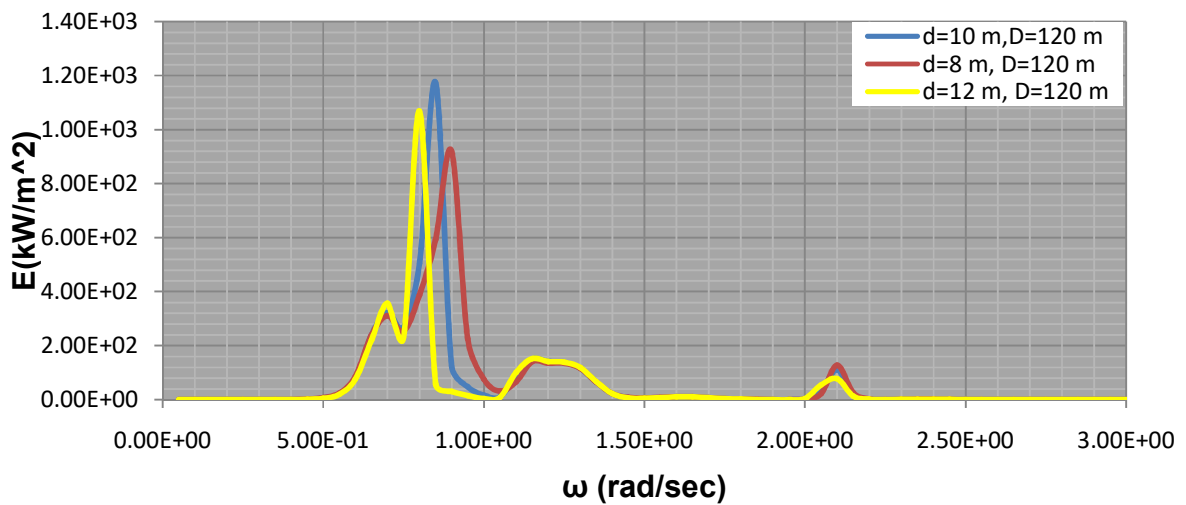
Διάγραμμα 6.13 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.14 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

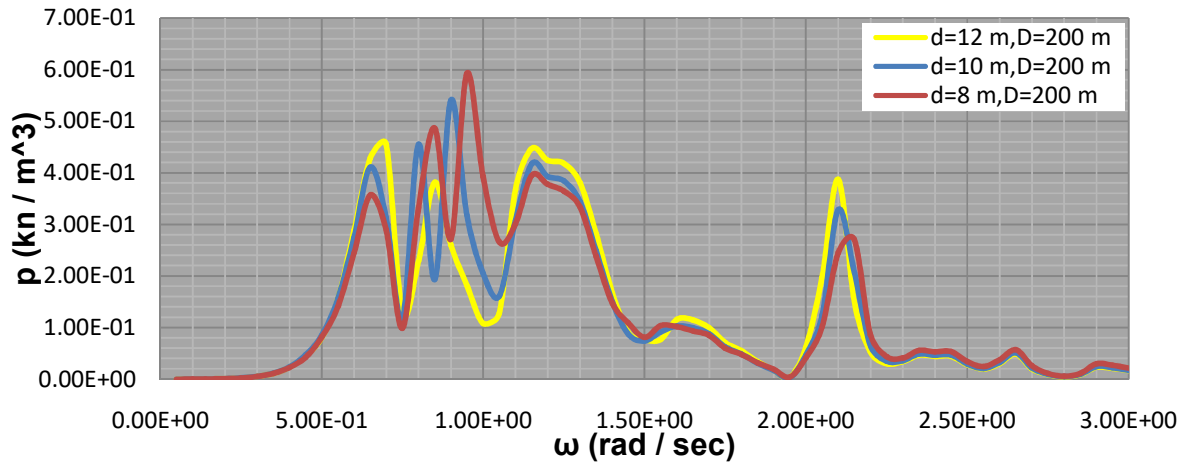


Διάγραμμα 6.15 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

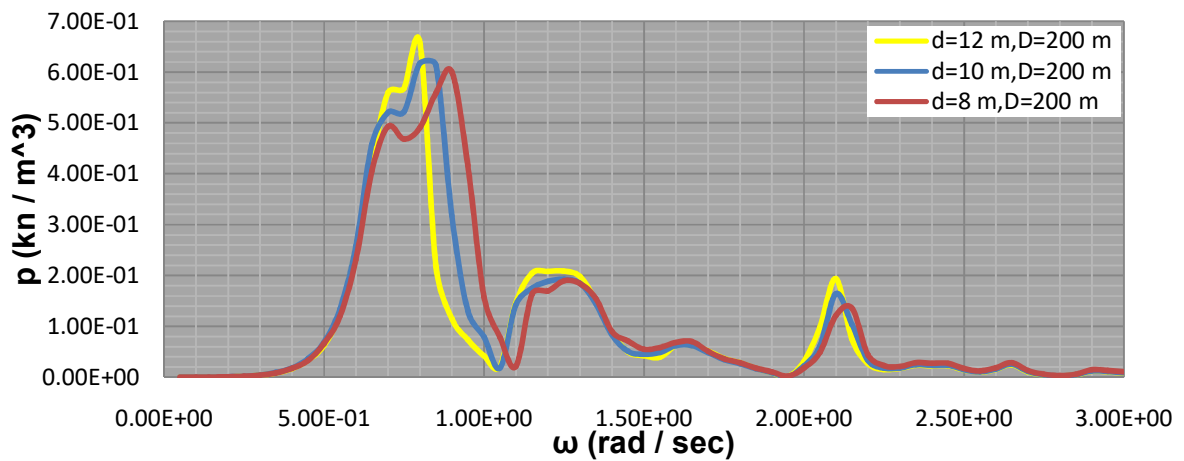


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

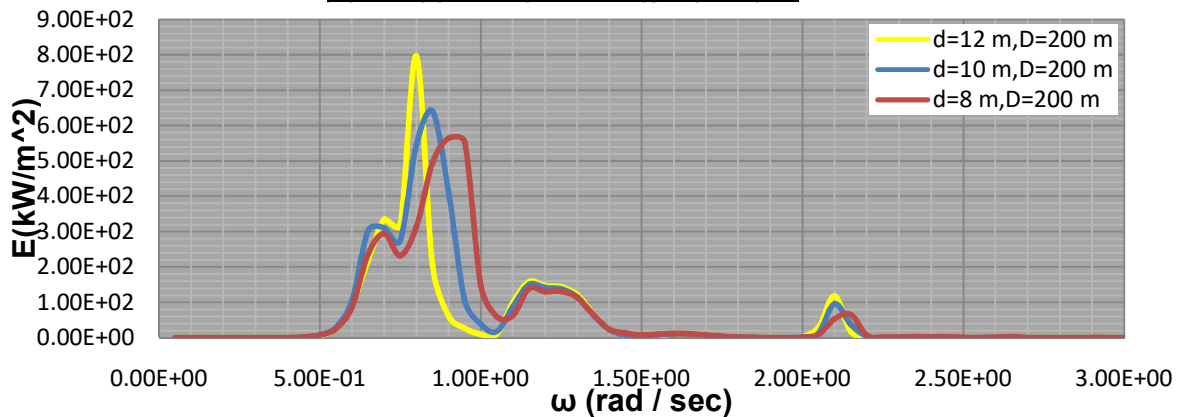
Διάγραμμα 6.16 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.17 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



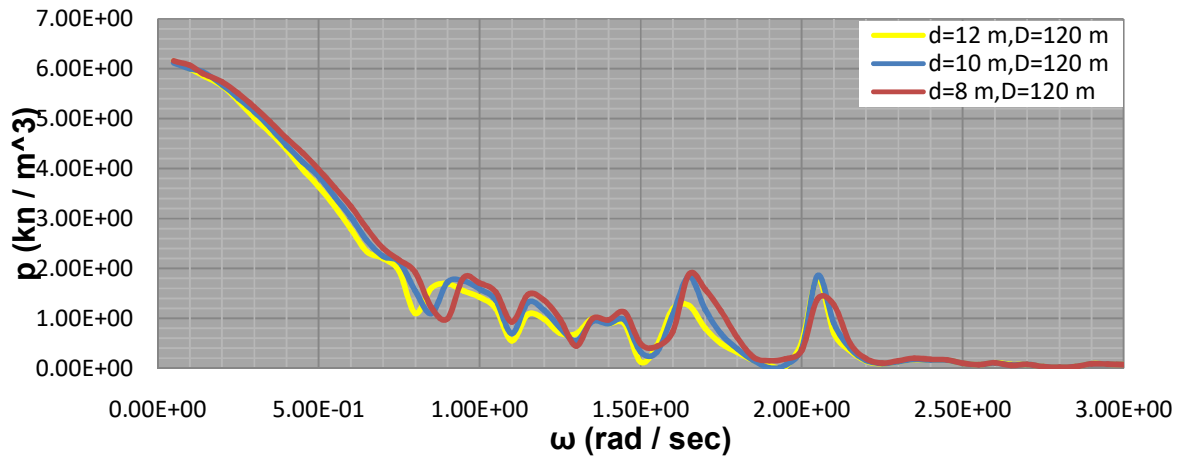
Διάγραμμα 6.18 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



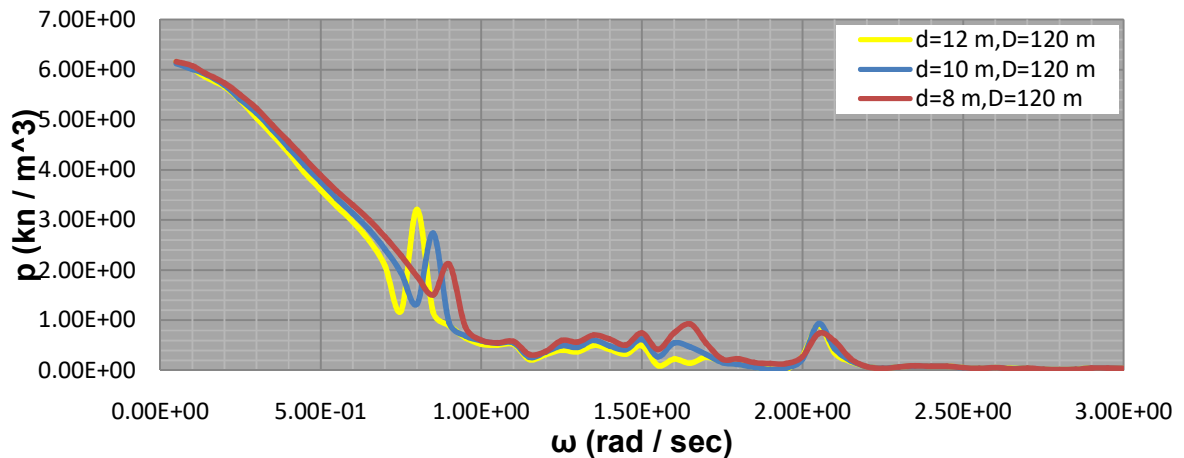
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

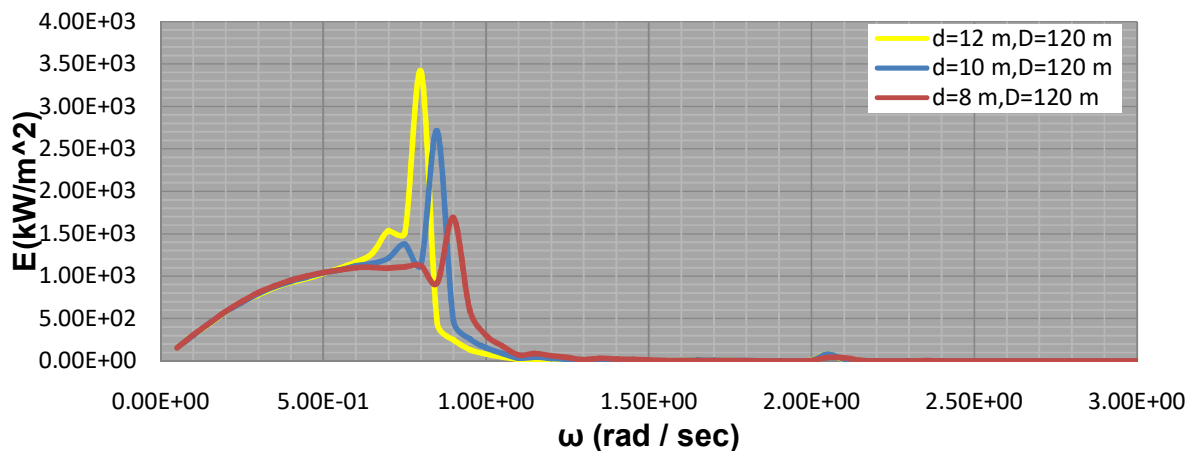
Διάγραμμα 6.19 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.20 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

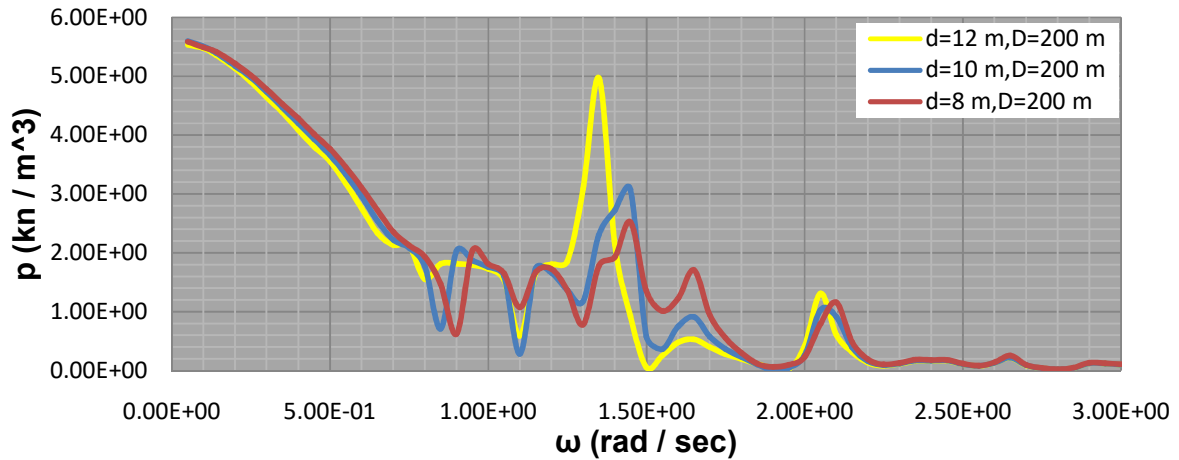


Διάγραμμα 6.21 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

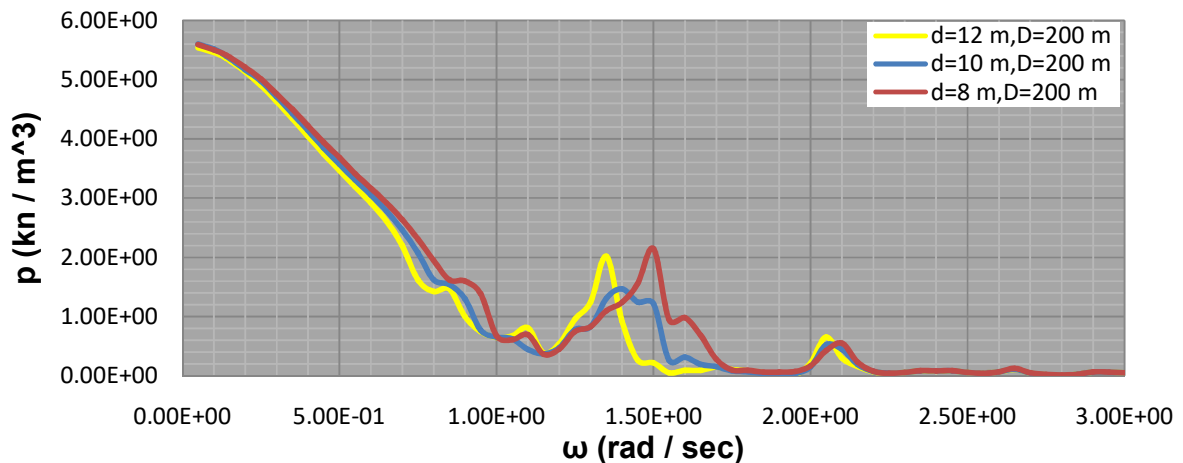


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

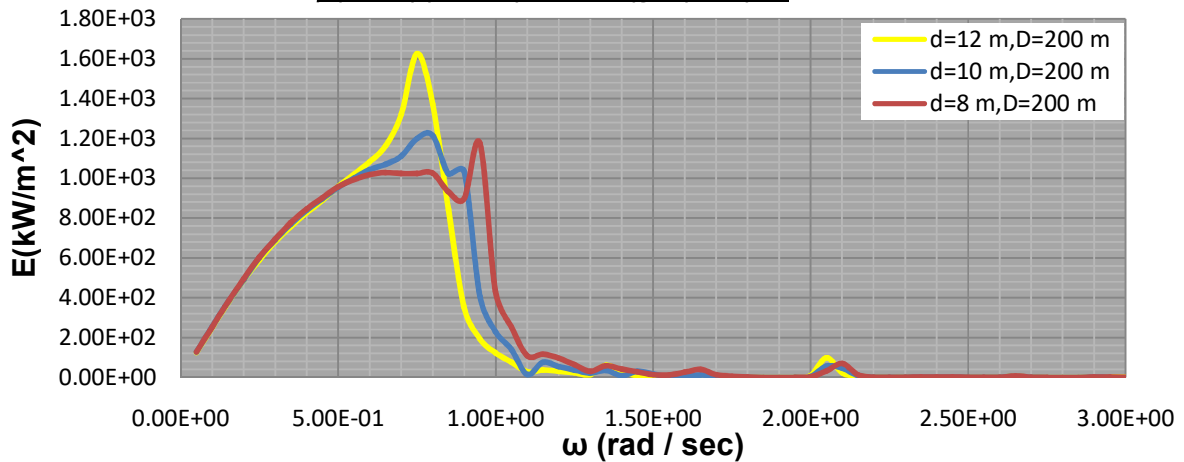
Διάγραμμα 6.22 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.23 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.24 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Από τα διαγράμματα 6.21 και 6.24 για αγκυρωμένη τρίγωνη πλωτή κατασκευή χωρίς την εγκατάσταση Α/Γ σε βάθη νερών 120 m και 200 m αντίστοιχα, παρατηρούμε πως για βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων $d=8$ m, η απορροφούμενη κυματική ισχύς είναι μεγαλύτερη κοντά στο πεδίο συχνοτήτων των κυματισμών των Ελληνικών χωρικών υδάτων (περίπου ίση $\omega=1$ rad/sec) ως προς τα υπόλοιπα εξεταζόμενα βυθίσματα. Επομένως, το βέλτιστο βύθισμα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων είναι ίσο με $d=8$ m, όπου η ίδια τιμή θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα βήματα.

6.1.4 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΜΑΝΔΥΑ ΤΩΝ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α/Γ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, η βέλτιστη ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των αρχείων εισαγωγής(inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Ελεύθερα πλέουσα κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 14.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 12.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 10.05 m

ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 14.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 12.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 10.05 m

2) Αγκυρωμένη κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 14.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 12.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 10.05 m

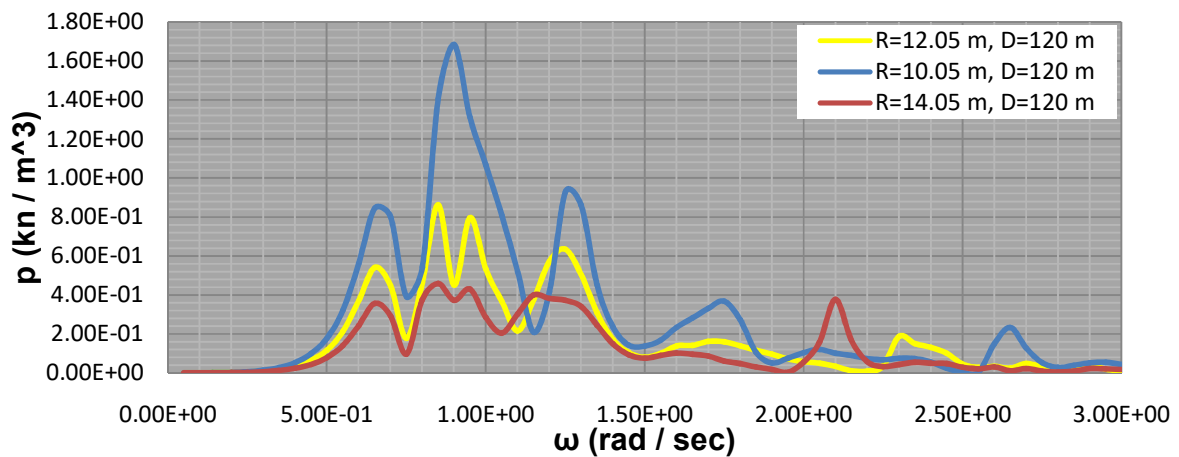
ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 14.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 12.05 m
- Ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων R= 10.05 m

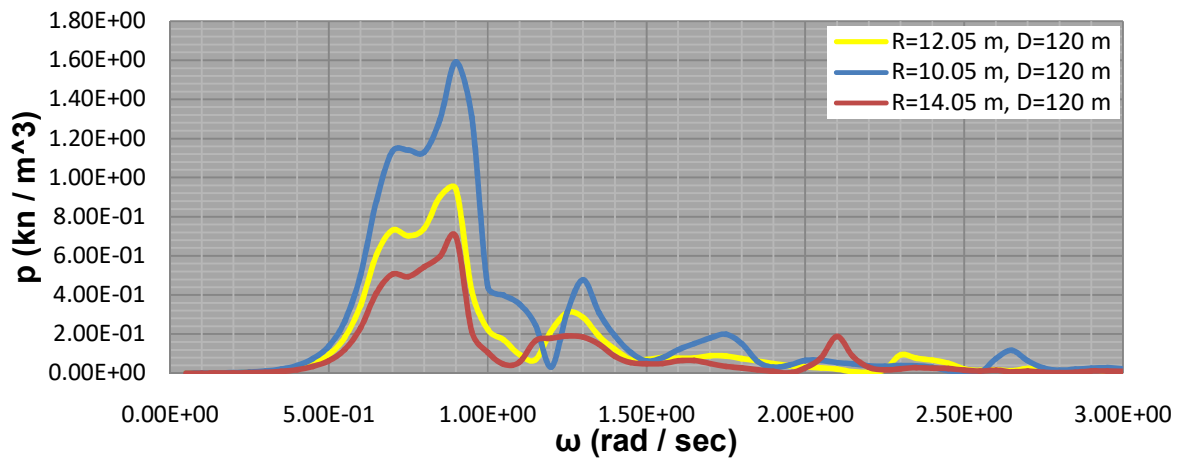
ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

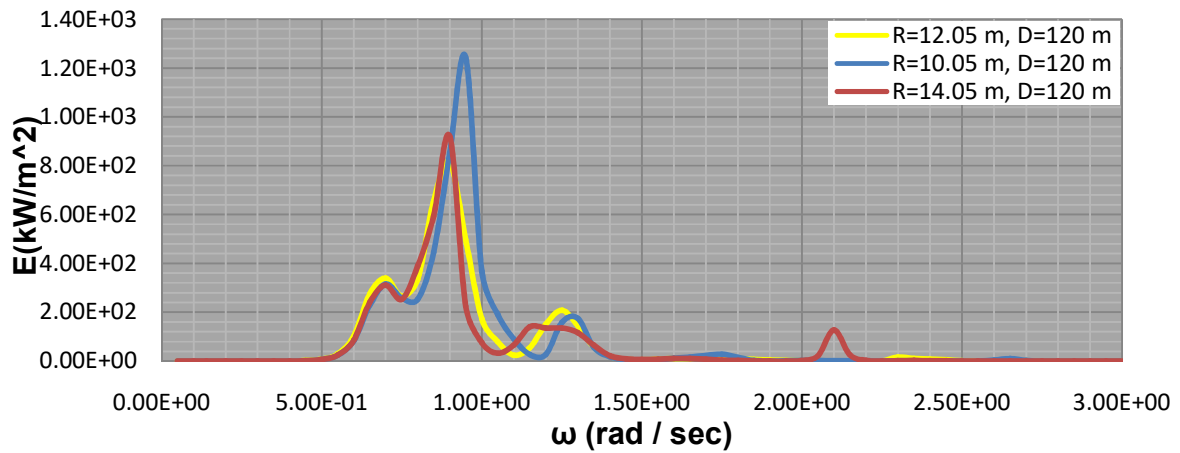
Διάγραμμα 6.25 :Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.26 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

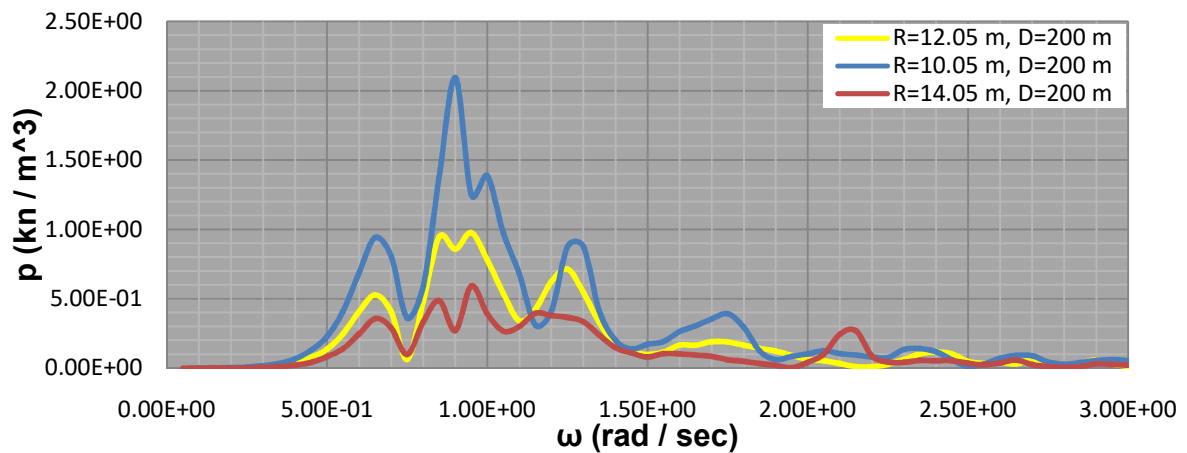


Διάγραμμα 6.27 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

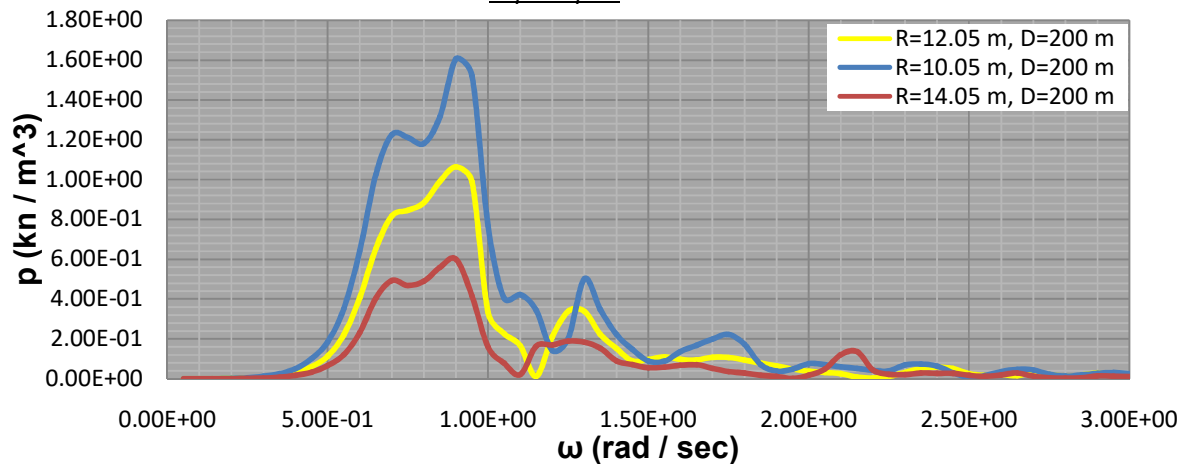


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

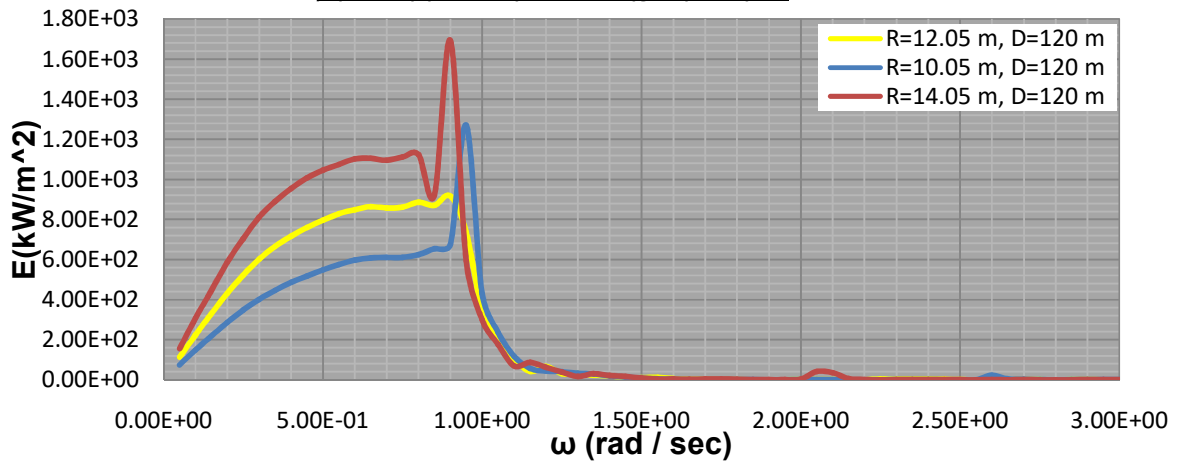
Διάγραμμα 6.28: Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.29 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



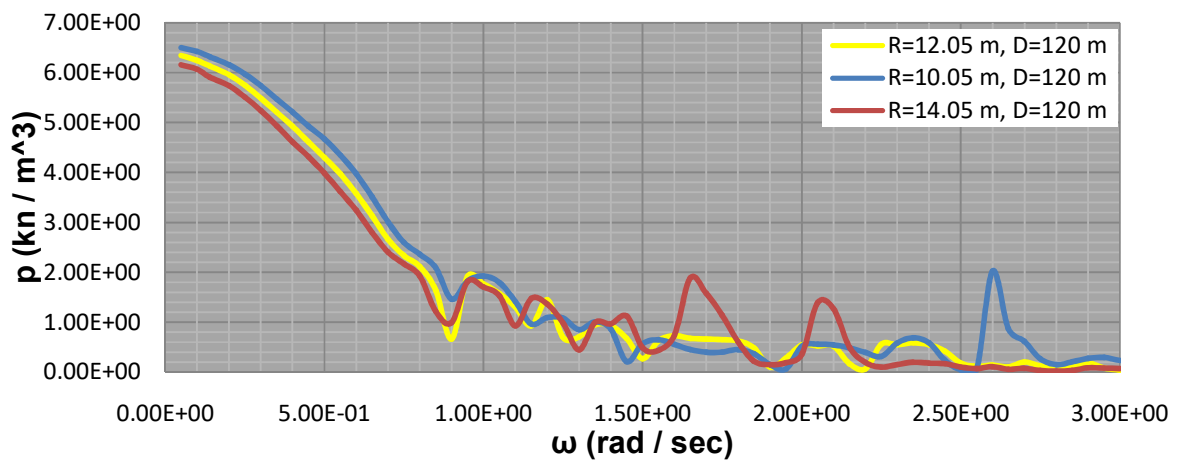
Διάγραμμα 6.30 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



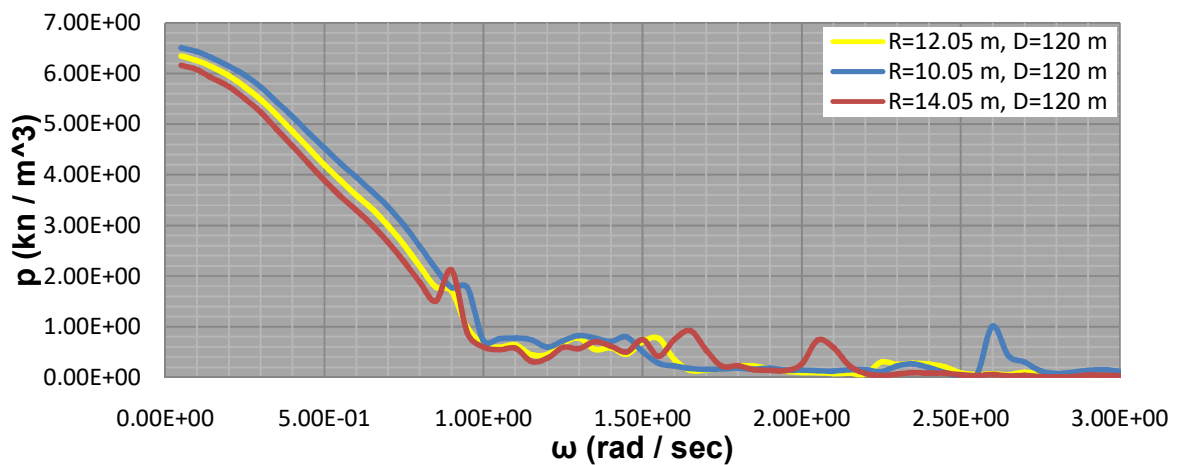
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

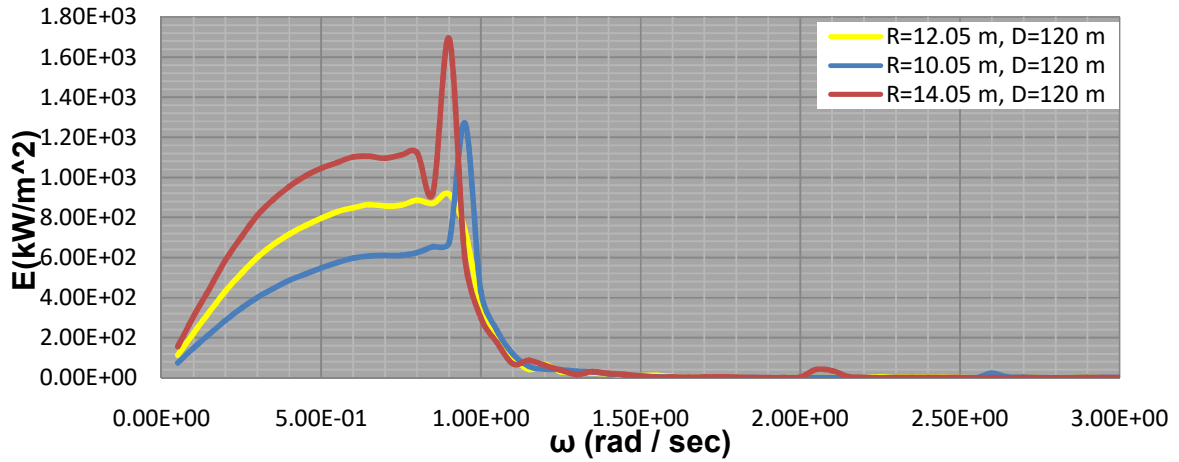
Διάγραμμα 6.31 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.32 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

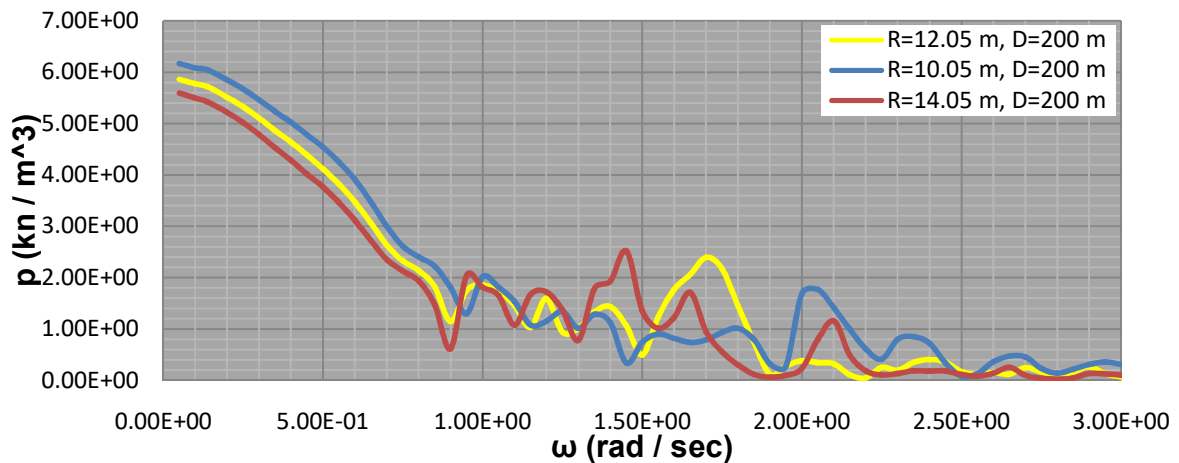


Διάγραμμα 6.33 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

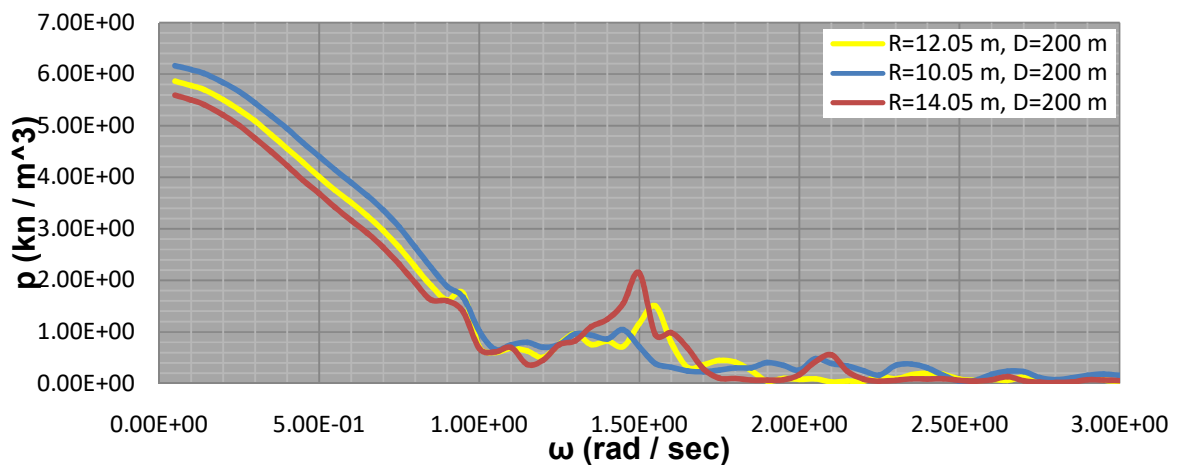


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

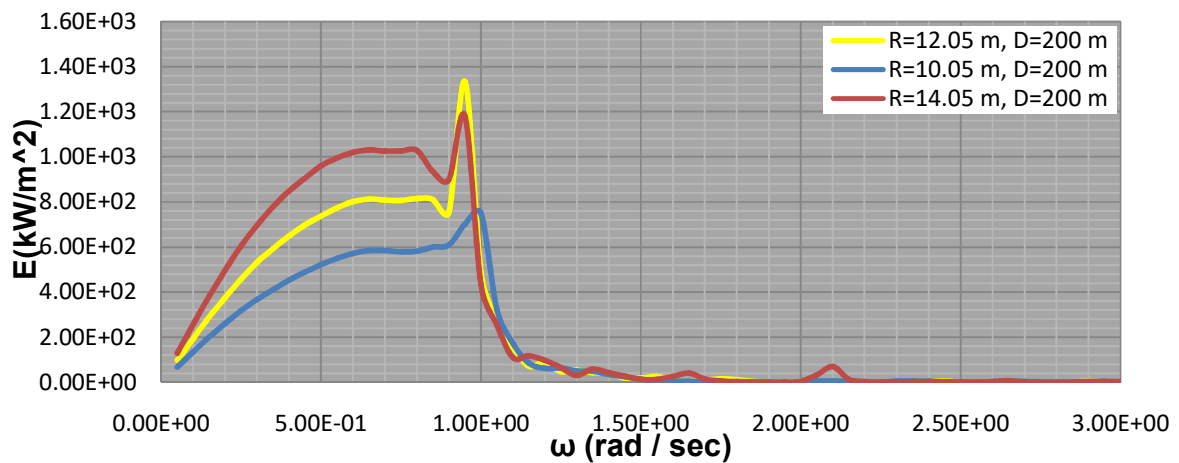
Διάγραμμα 6.34 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο. 1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.35 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο. 2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.36: Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Από τα διαγράμματα 6.36 και 6.33 για αγκυρωμένη τρίγωνη πλωτή κατασκευή χωρίς την εγκατάσταση Α/Γ σε βάθη νερών 120 m και 200 m αντίστοιχα, παρατηρούμε πως για ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων $R=14.05\text{ m}$, η απορροφούμενη κυματική ενέργεια παρουσιάζει μέγιστο κοντά στο πεδίο συχνοτήτων των κυματισμών των Ελληνικών χωρικών υδάτων (περίπου ίση $\omega=1\text{ rad/sec}$). Επομένως, με βάση τη θεωρία, η βέλτιστη ακτίνα του εξωτερικού μανδύα των ανωστικών κυλίνδρων είναι ίση με $R=14.05\text{ m}$, διότι όσο μειώνεται η ελεύθερη επιφάνεια που ταλαντώνεται αναλόγως μειώνεται και η παραγόμενη ισχύς. Η ίδια τιμή θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα βήματα.

6.1.5 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ Α/Γ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α/Γ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, το βέλτιστο βύθισμα του κεντρικού κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των αρχείων εισαγωγής(inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Ελεύθερα πλέουσα κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 20 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 14 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 8 m

ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 20 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 14 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 8 m

2) Αγκυρωμένη κατασκευή

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 20 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 14 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 8 m

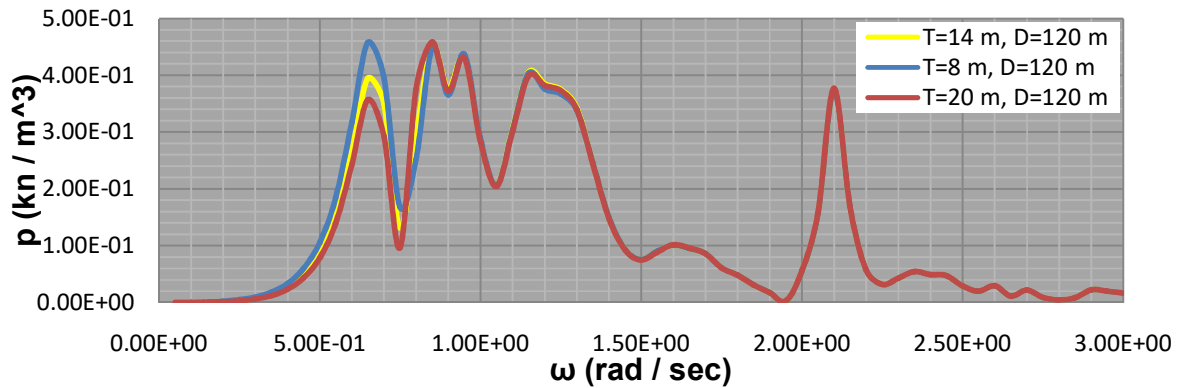
ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 20 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 14 m
- Βύθισμα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ T= 8 m

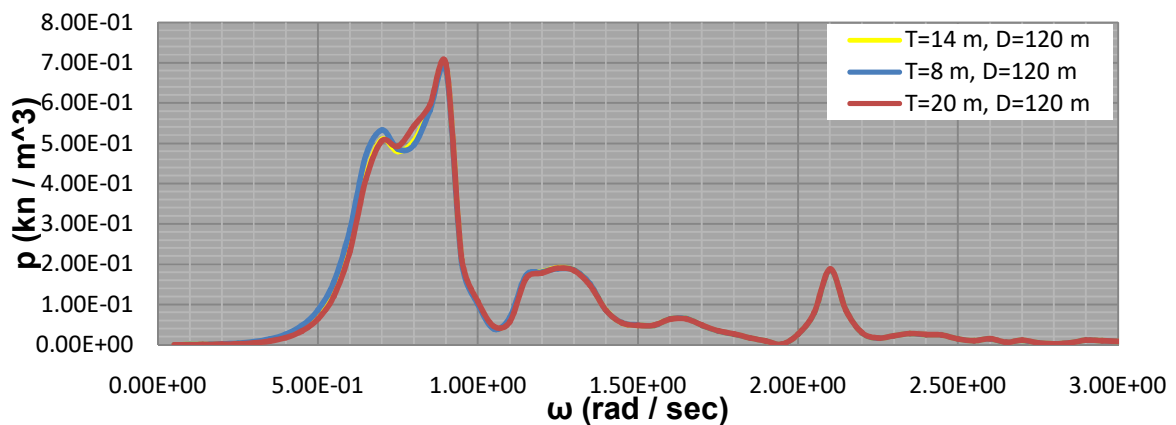
ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

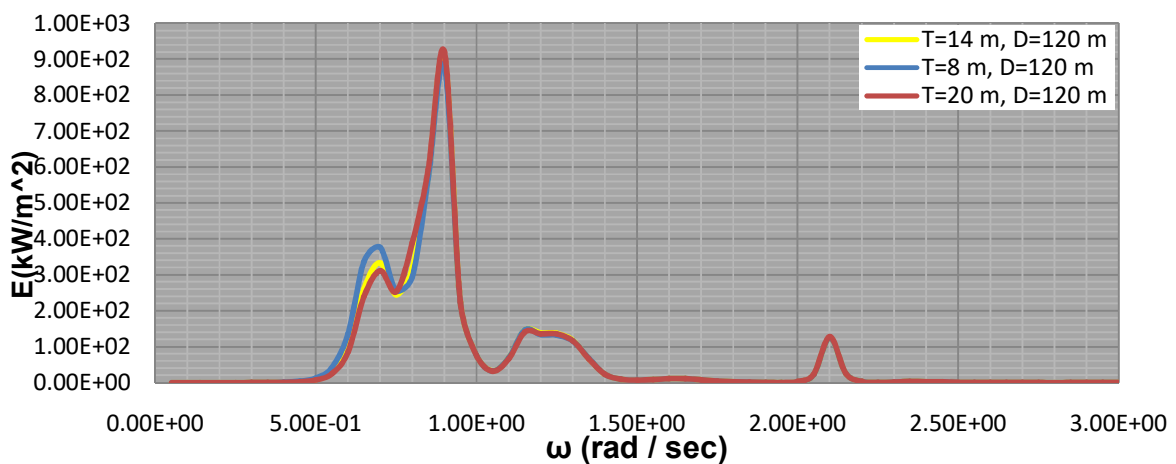
Διάγραμμα 6.37 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.38 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

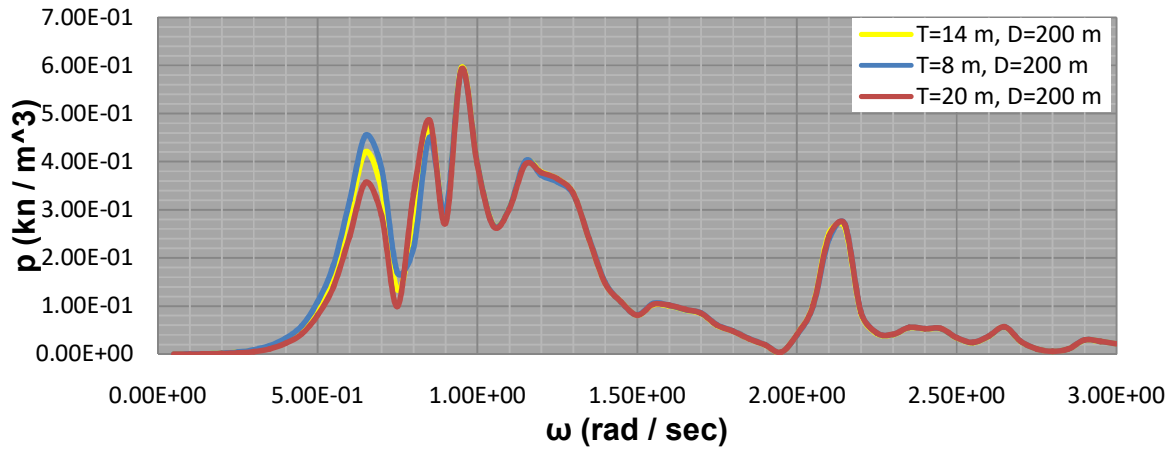


Διάγραμμα 6.39: Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

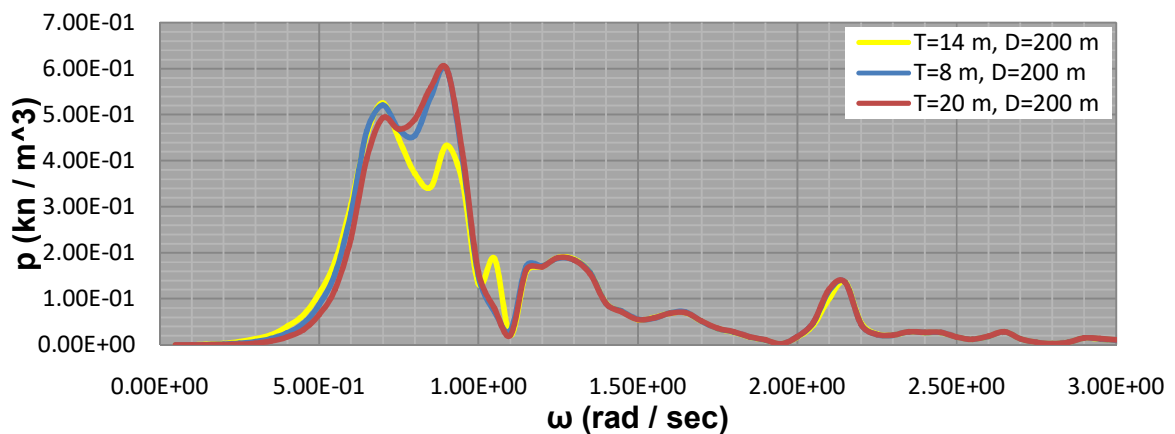


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

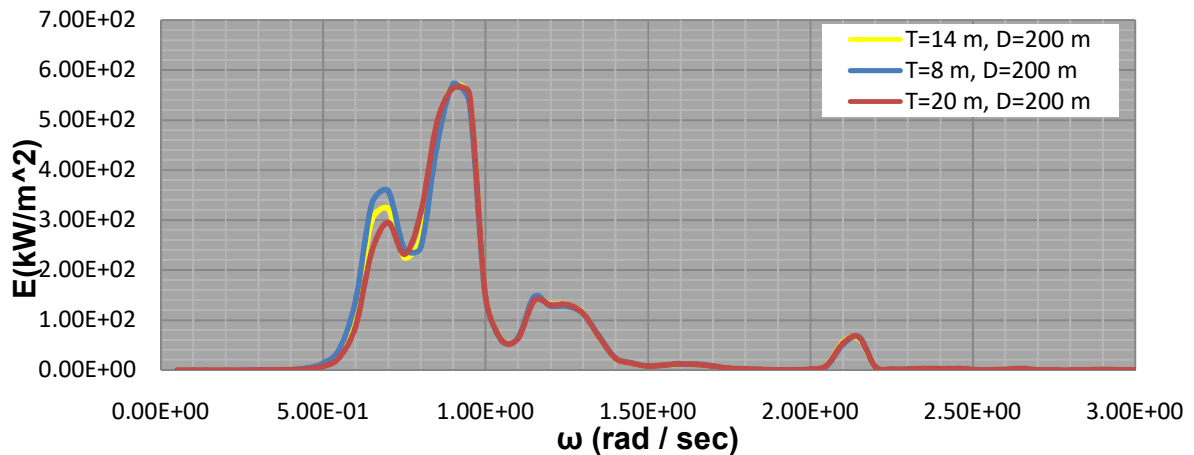
Διάγραμμα 6.40 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.41 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



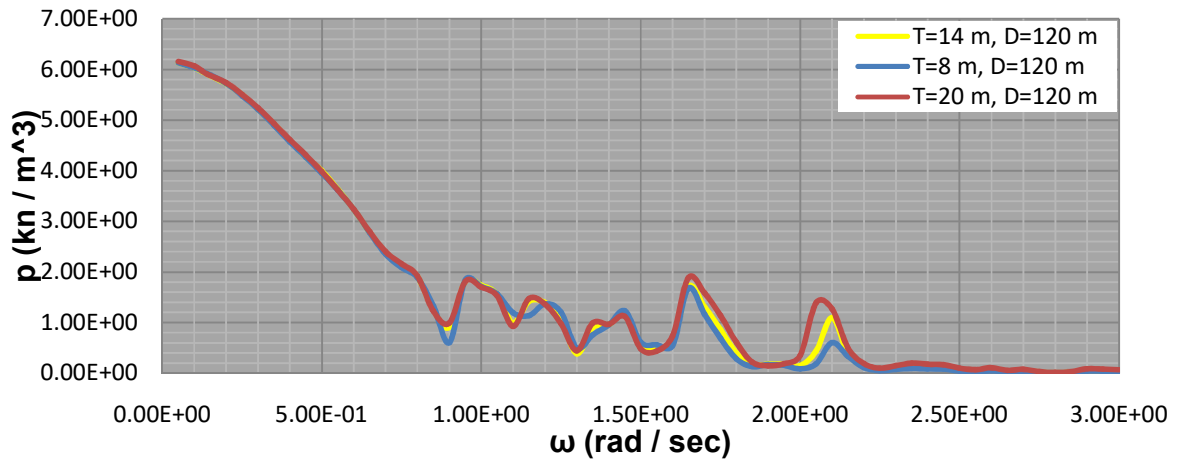
Διάγραμμα 6.42 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



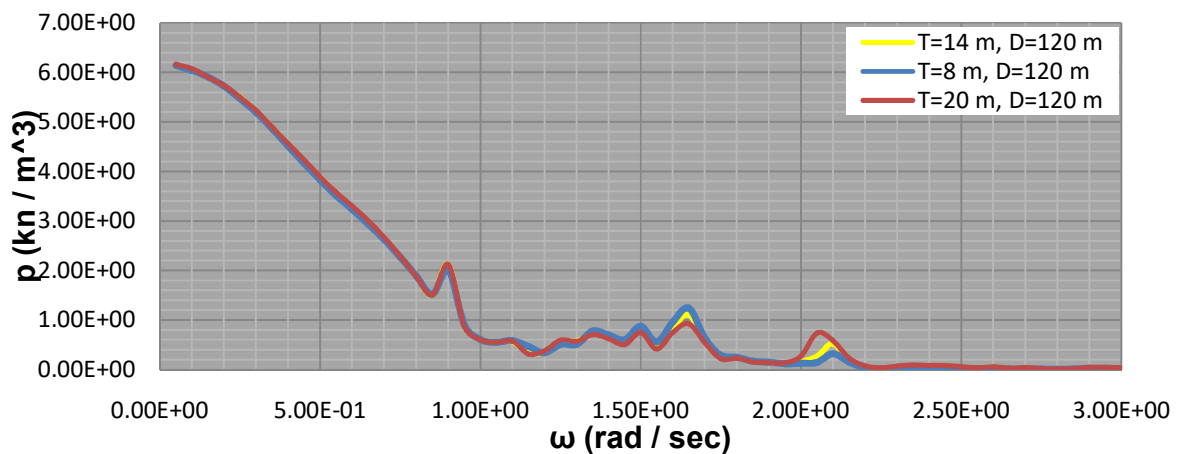
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

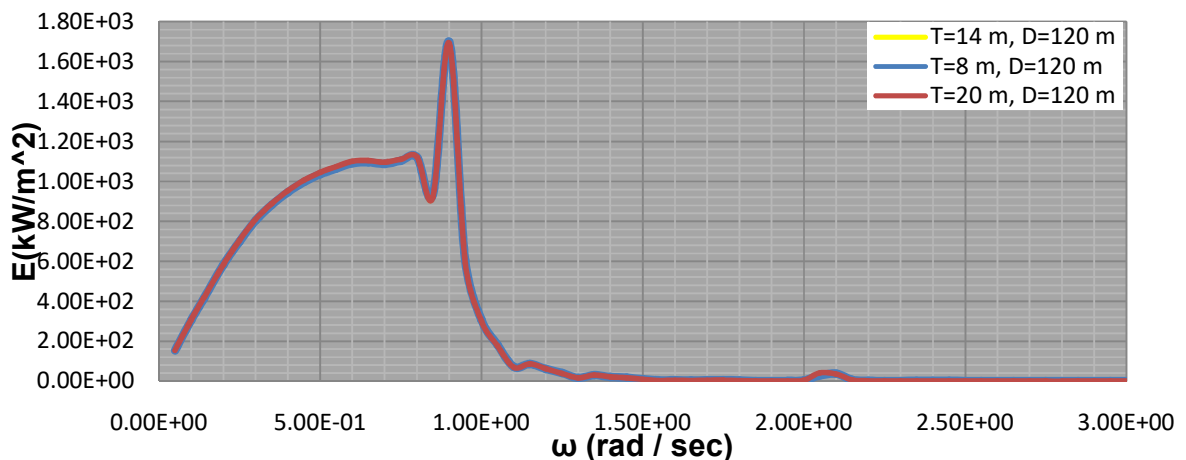
Διάγραμμα 6.43 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.44 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

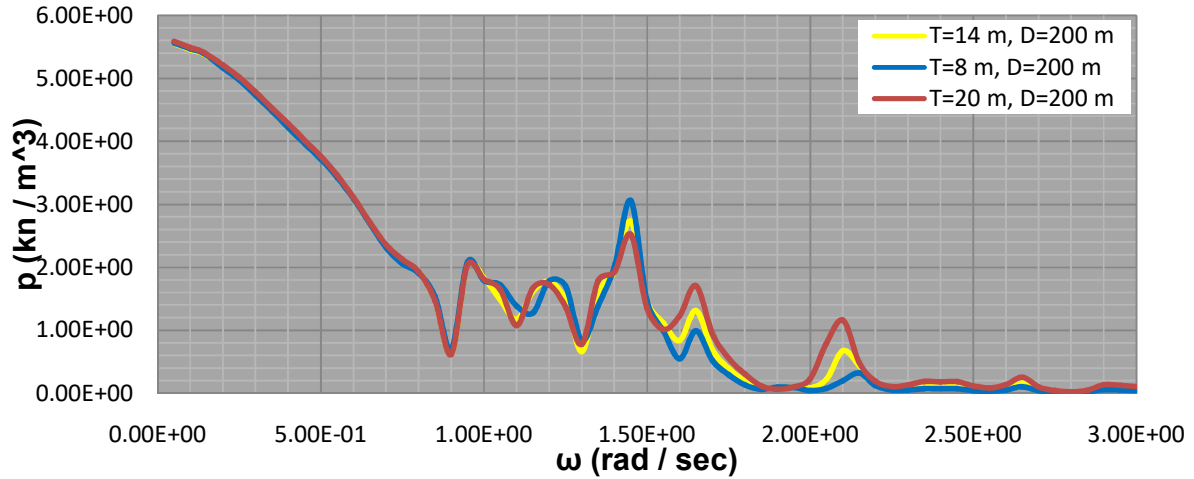


Διάγραμμα 6.45: Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

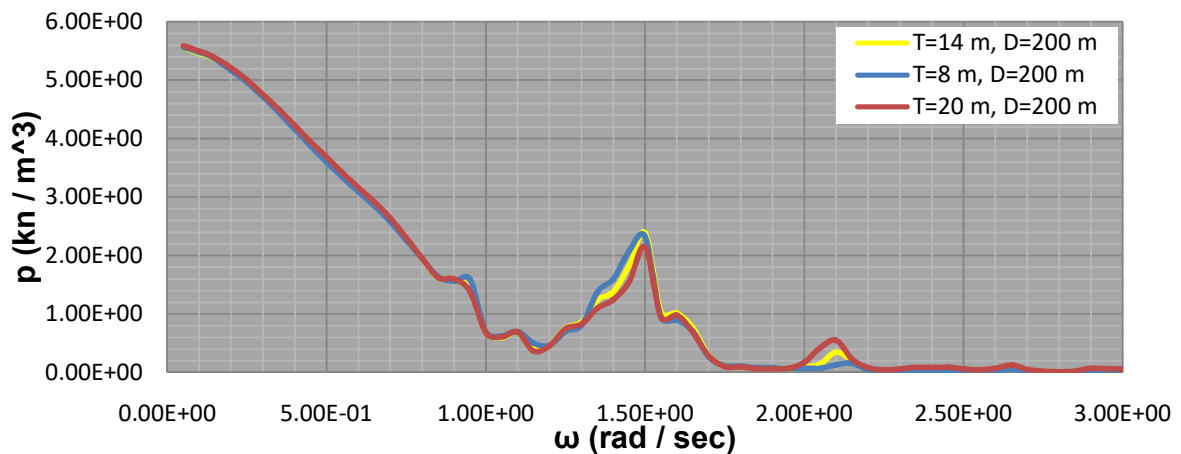


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

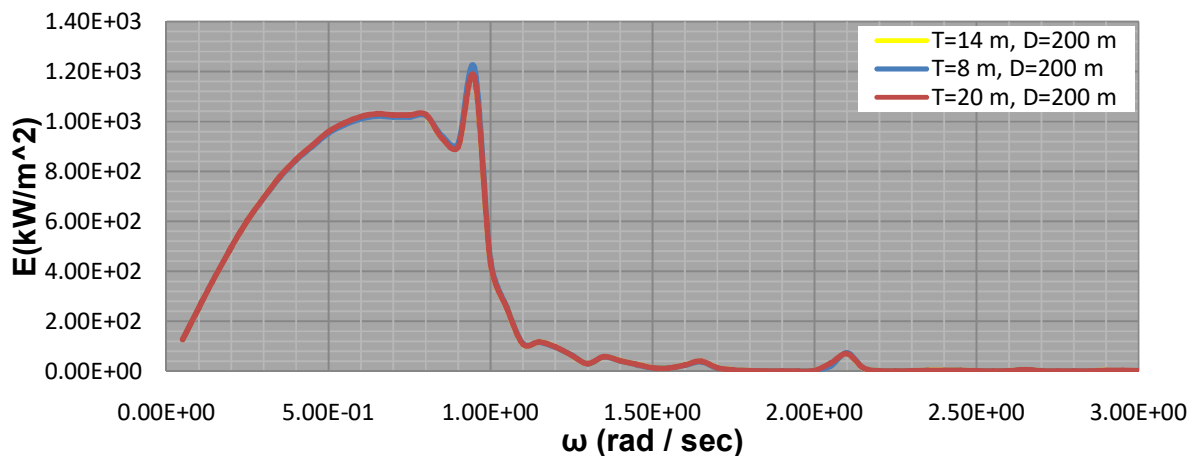
Διάγραμμα 6.46 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.47 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.48 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Από τα διαγράμματα 6.43-6.48 για αγκυρωμένη τρίγωνη πλωτή κατασκευή χωρίς την εγκατάσταση Α/Γ σε βάθη νερών 120 m και 200 m αντίστοιχα, παρατηρούμε η μεταβολή του βυθίσματος του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ, δεν επηρεάζει την απόδοση της διάταξης το οποίο είναι λογικό διότι βρίσκεται εξωτερικά των OWC. Επομένως η απόδοση παραμένει σταθερή για όλα τα βυθίσματα του πυλώνα στήριξης, αφού και η απόσταση μεταξύ των σωμάτων παραμένει 50m. Το βύθισμα που επιλέγεται είναι $T=20$ m είναι για να εξισορροπείται το βάρος της Α/Γ από την άντωση του πυλώνα στήριξης της.

6.1.6 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΝΩΣΤΙΚΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α/Γ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, τη βέλτιστη ακτίνα των εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των αρχείων εισαγωγής (inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Ελεύθερα πλέουσα κατασκευή

i) Βάθος νερού ($D=120$ m)

- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 5$ m
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 8$ m
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 12$ m

ii) Βάθος νερού ($D=200$ m)

- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 5$ m
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 8$ m
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 12$ m

2) Αγκυρωμένη κατασκευή

i) Βάθος νερού ($D=120$ m)

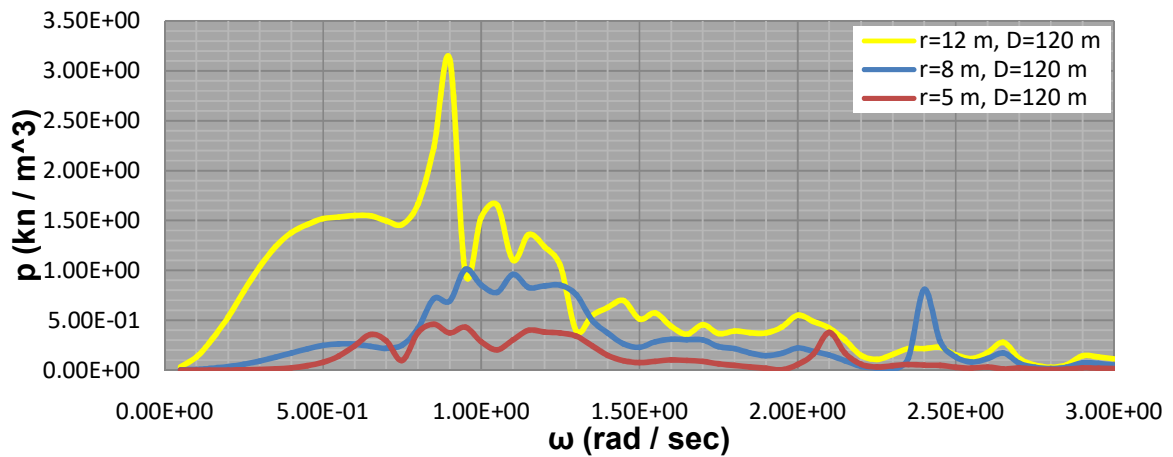
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 5$ m

- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 8 \text{ m}$
- Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 12 \text{ m}$
- ii) Βάθος νερού ($D=200 \text{ m}$)
 - Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 5 \text{ m}$
 - Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 8 \text{ m}$
 - Ακτίνα εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων $r= 12 \text{ m}$

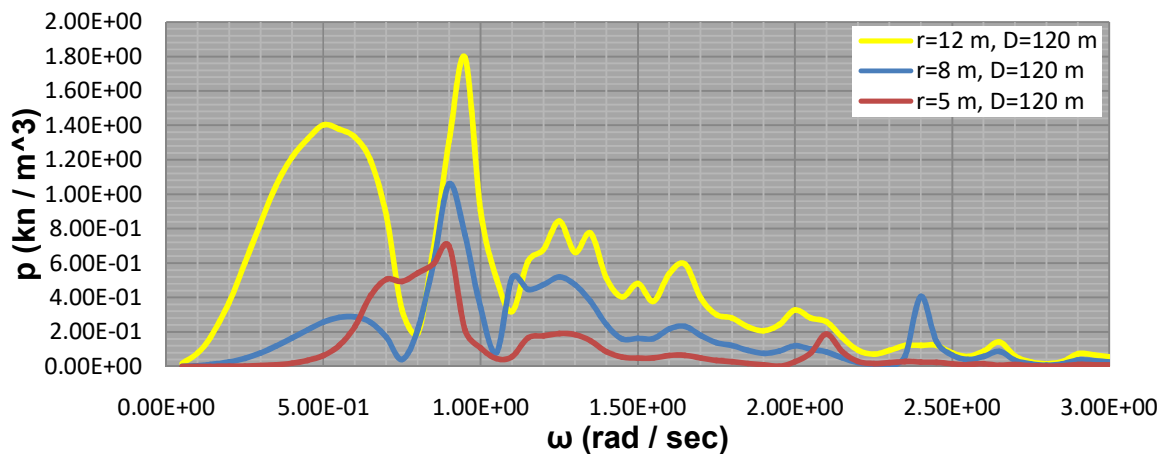
ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ $D=120 \text{ m}$

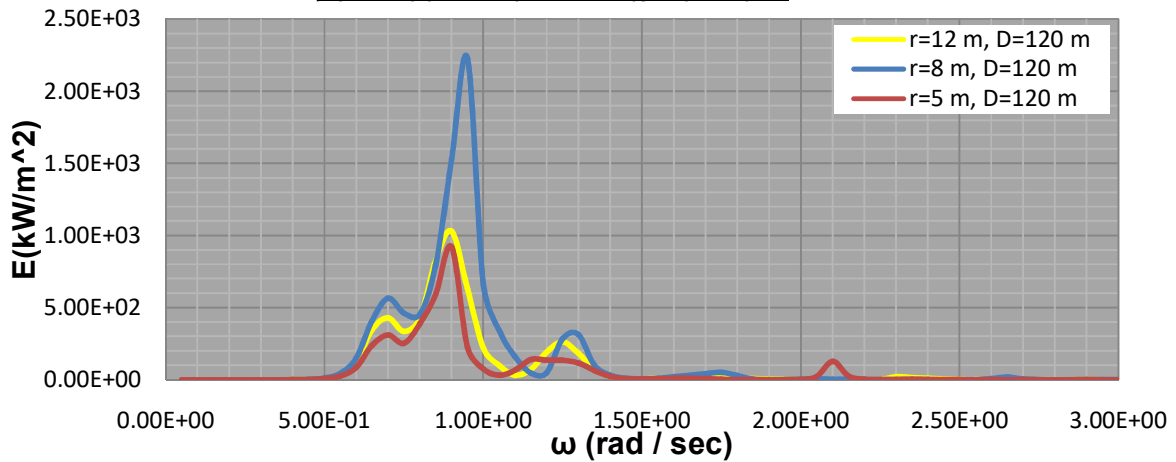
Διάγραμμα 6.49 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.50 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή No.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

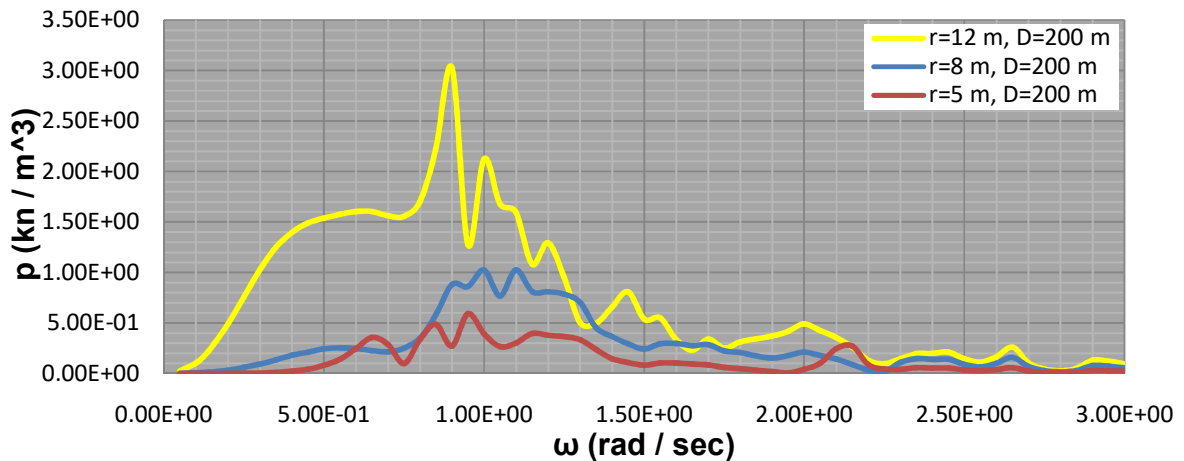


Διάγραμμα 6.51 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

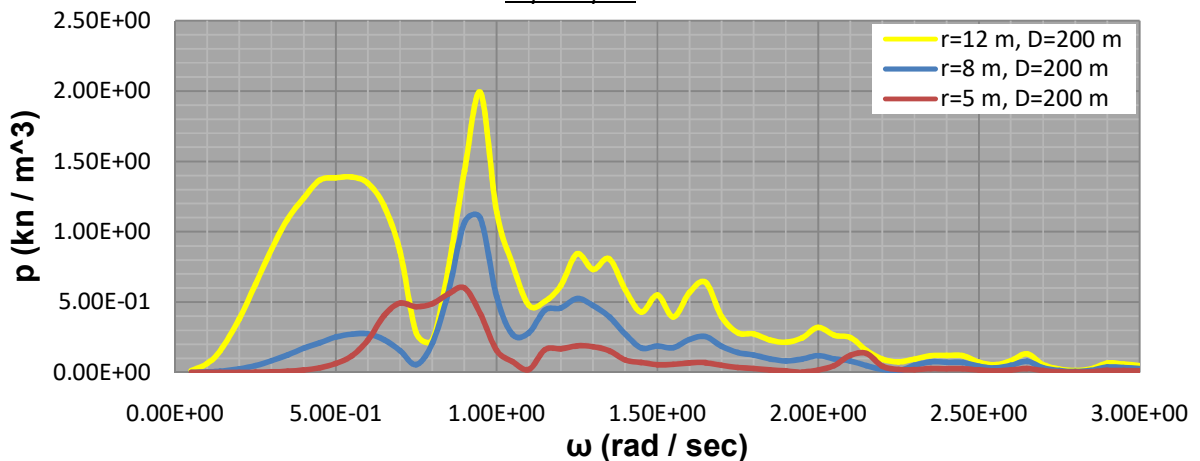


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

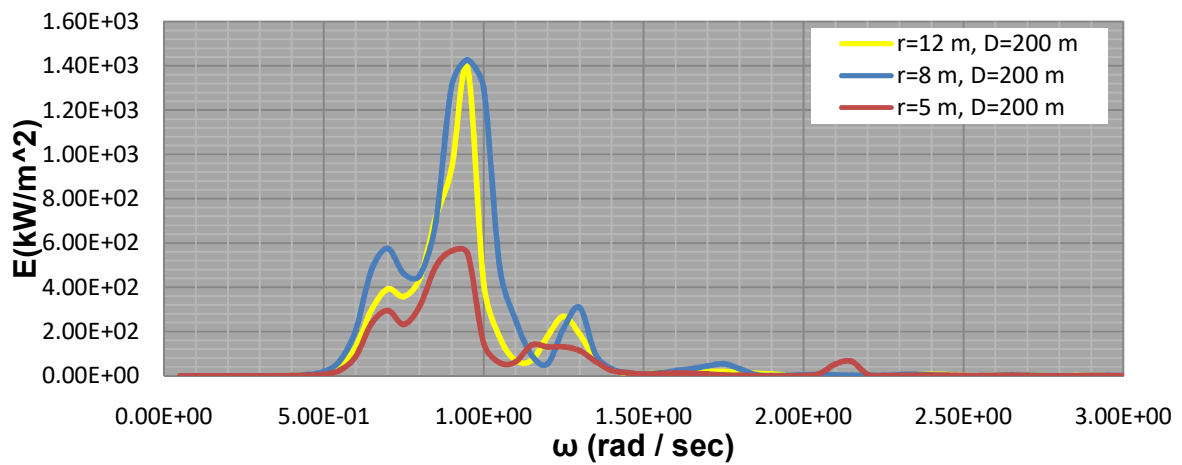
Διάγραμμα 6.52 :Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.53 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



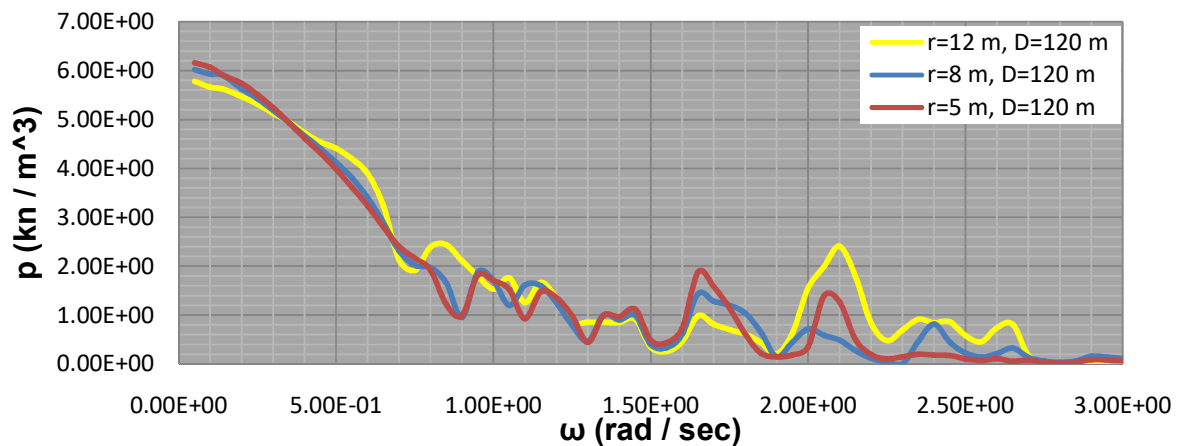
Διάγραμμα 6.54: Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



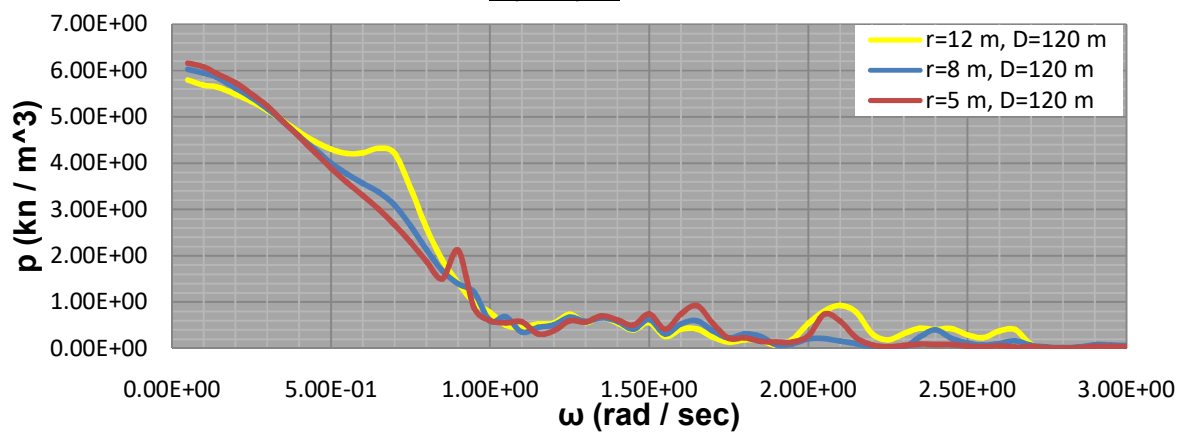
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

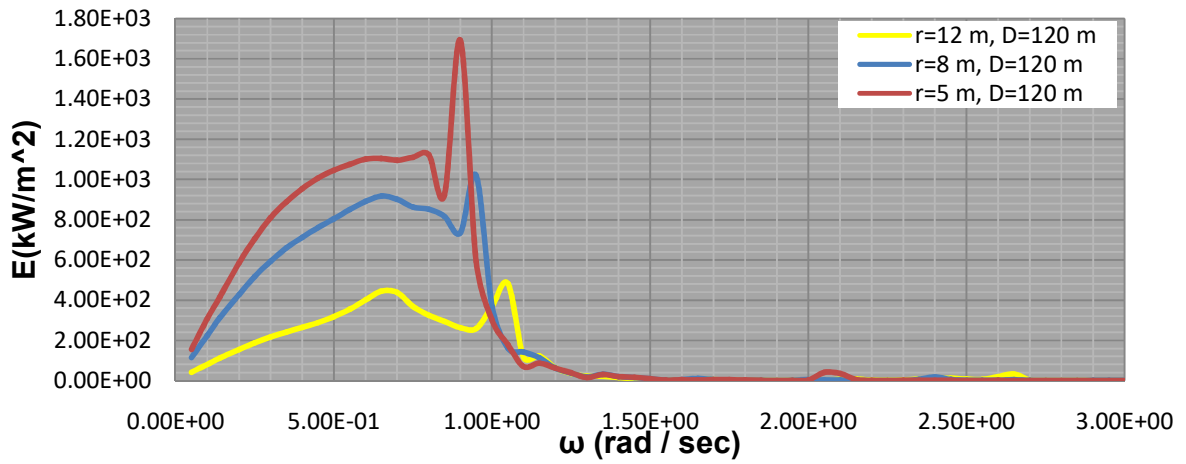
Διάγραμμα 6.55 :Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.56 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

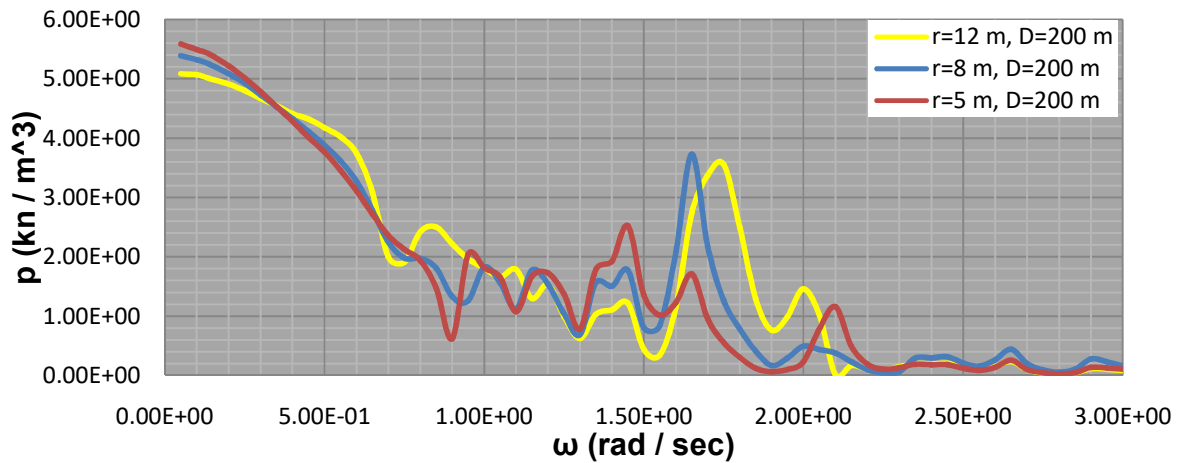


Διάγραμμα 6.57 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

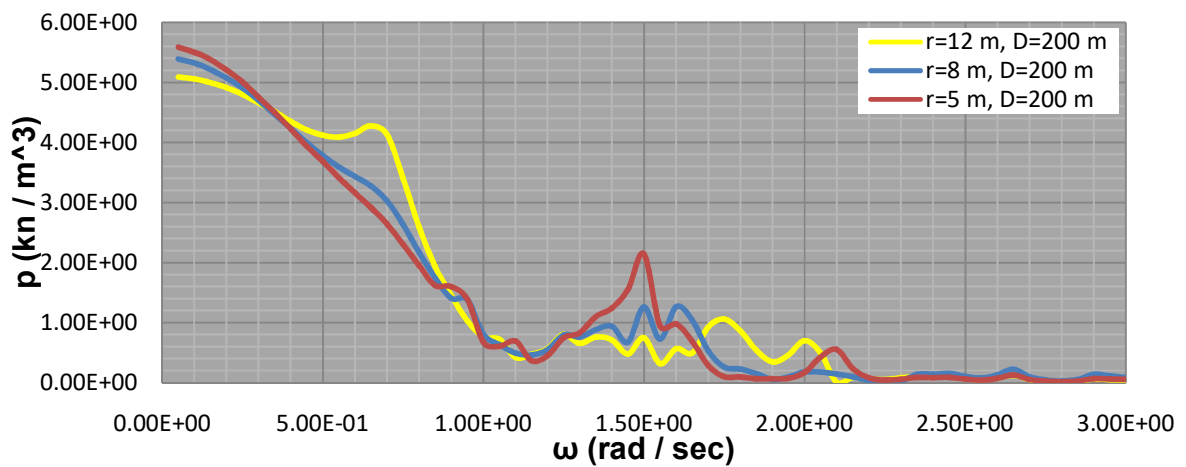


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

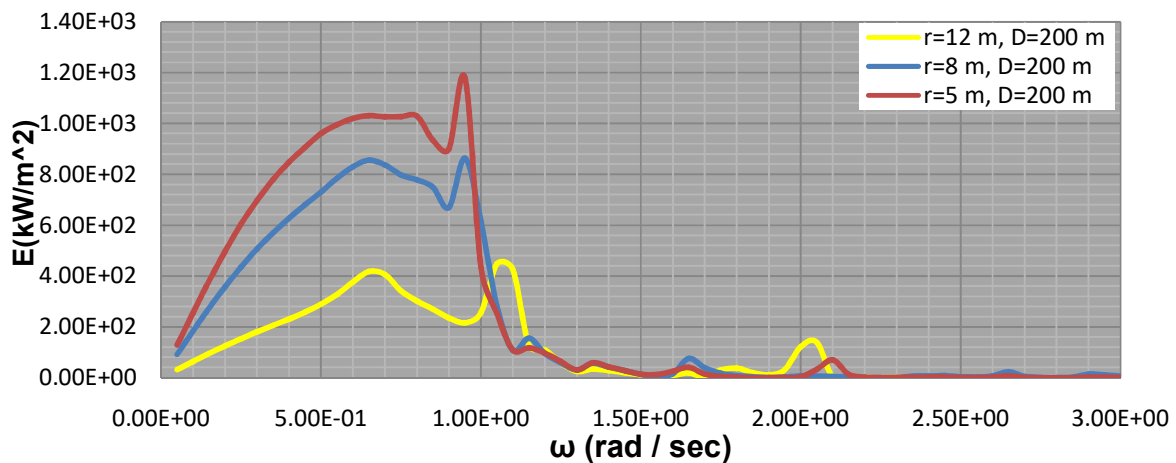
Διάγραμμα 6.58 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.1 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.59 : Εσωτερική πίεση στην συσκευή Νο.2 & 3 για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.60 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



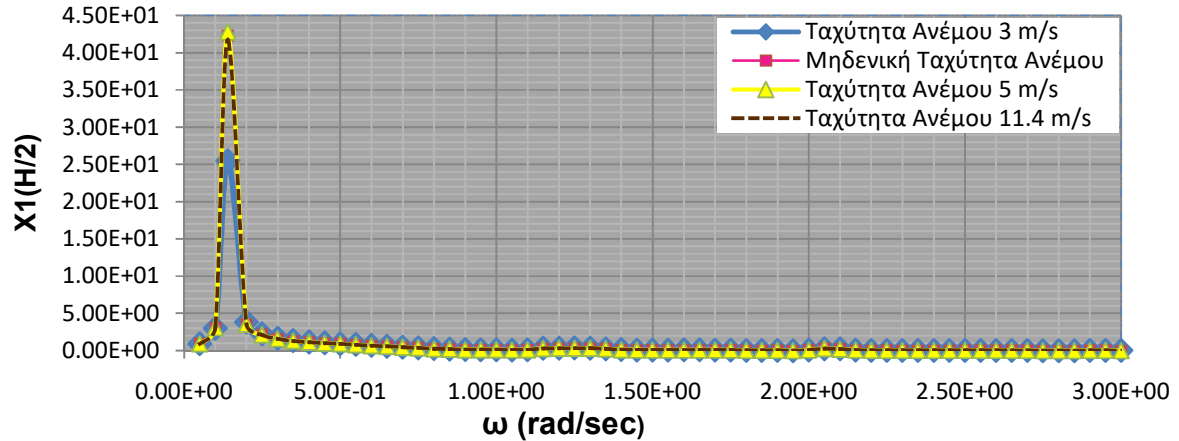
Από τα διαγράμματα 6.57 και 6.60 για αγκυρωμένη τρίγωνη πλωτή κατασκευή χωρίς την εγκατάσταση Α/Γ σε βάθη νερών 120 m και 200 m αντίστοιχα, παρατηρούμε πως για ακτίνα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ $r=5$ m, η απορροφούμενη κυματική ισχύς είναι μεγαλύτερη κοντά στο πεδίο συχνοτήτων των κυματισμών των Ελληνικών χωρικών υδάτων (περίπου ίση $\omega=1$ rad/sec) ως προς τις υπόλοιπες εξεταζόμενες ακτίνες. Επομένως, η βέλτιστη ακτίνα του κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ είναι ίση με $r=5$ m, όπου η ίδια τιμή θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα βήματα.

6.1.7 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

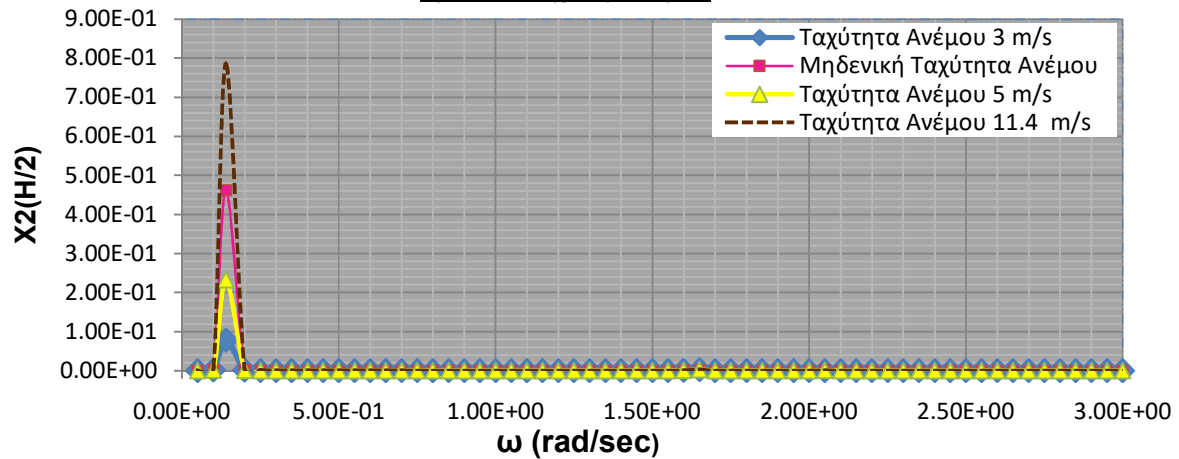
Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, η επίδραση του ανέμου στην πλωτή κατασκευή. Σύμφωνα με τις παραπάνω περιπτώσεις, σημειώνεται ότι οι διαστάσεις αλλά και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη πλωτής κατασκευής μαζί με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης παρουσιάζονται στους πίνακες 6.1 και 6.2. Μελετήθηκε τρίγωνη αγκυρωμένη κατασκευή σε βάθη νερών 120 m και 200 m με την εγκατάσταση Α/Γ.

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120m

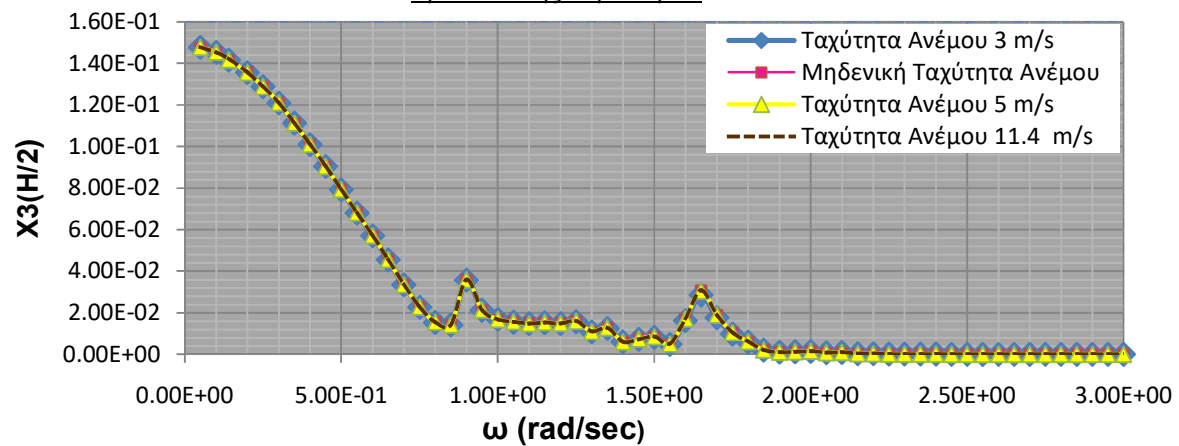
Διάγραμμα 6.61 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



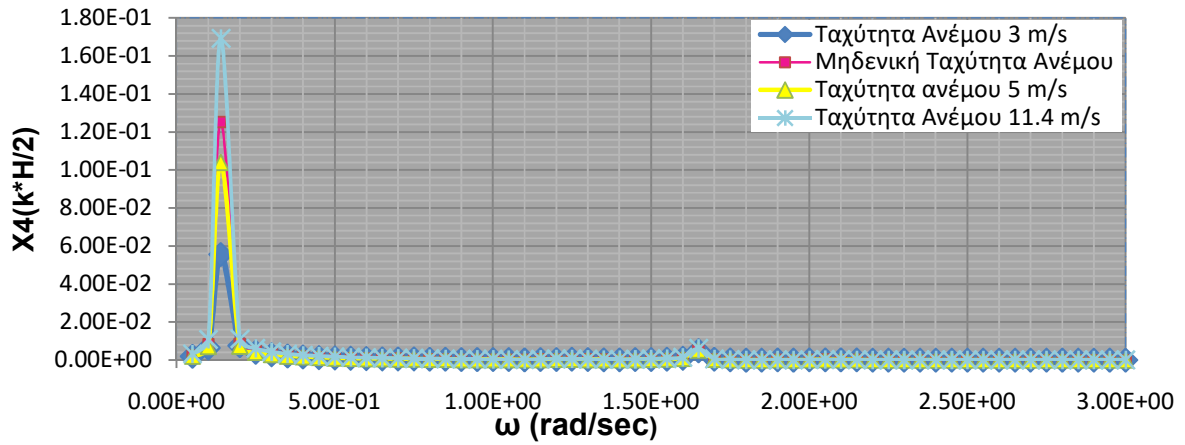
Διάγραμμα 6.62 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



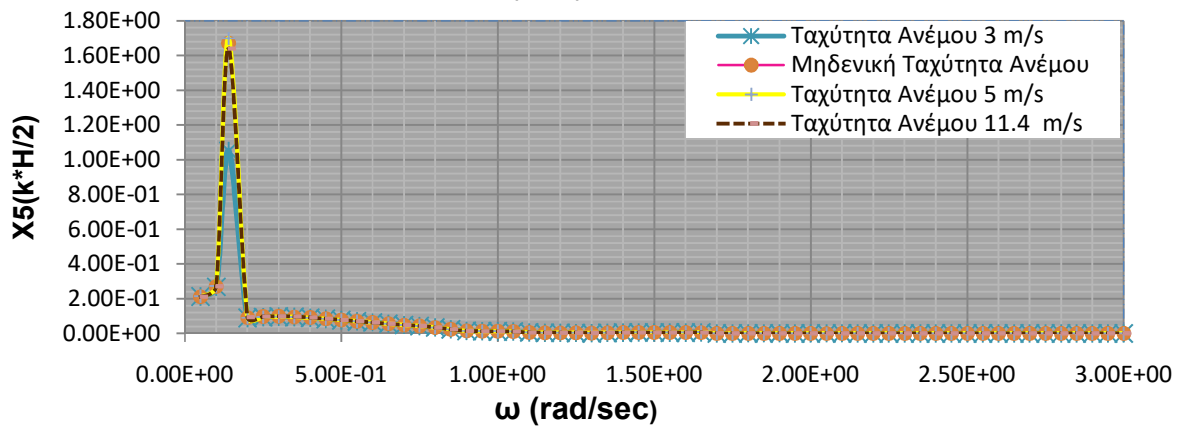
Διάγραμμα 6.63 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



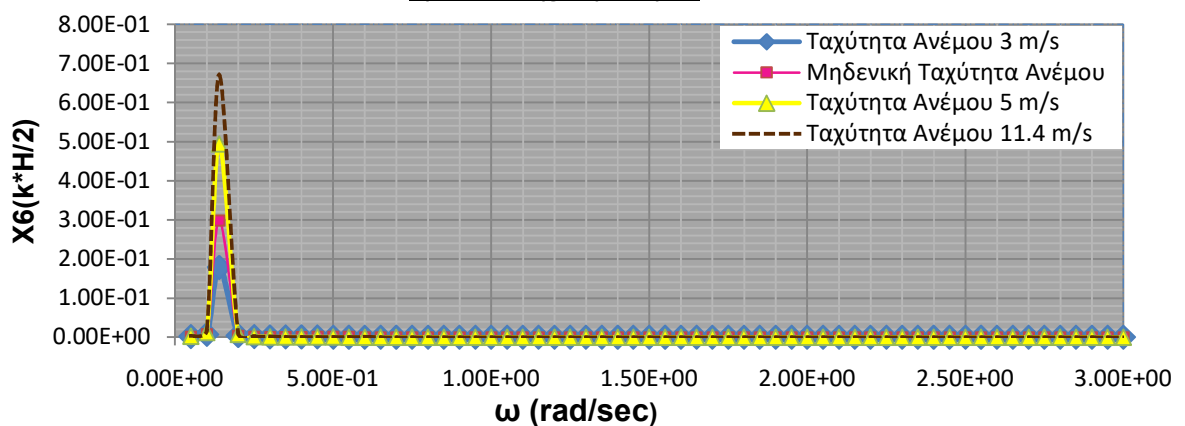
Διάγραμμα 6.64 : Ο αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.65 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευτασμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

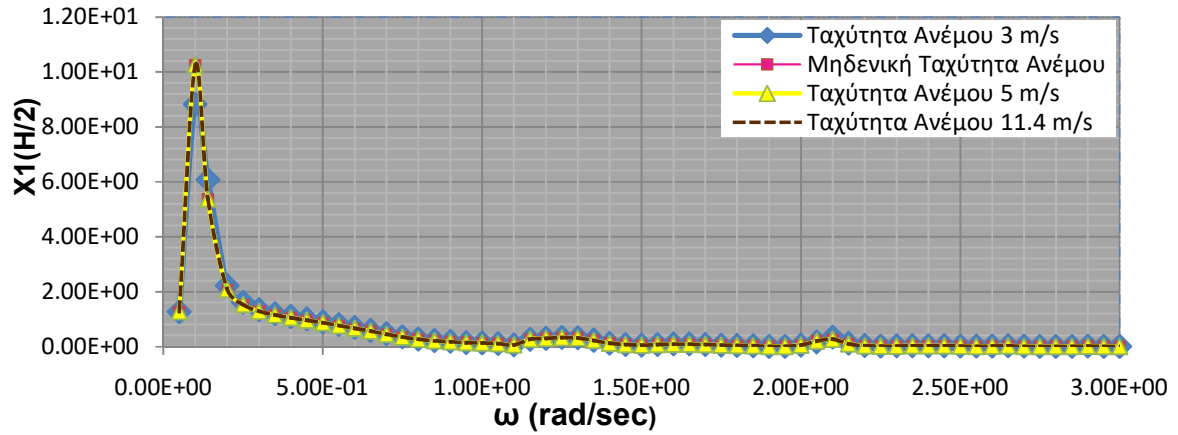


Διάγραμμα 6.66 : Η αδιαστατοποιημένη στροφική οριζόντια μετατόπιση (yaw) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

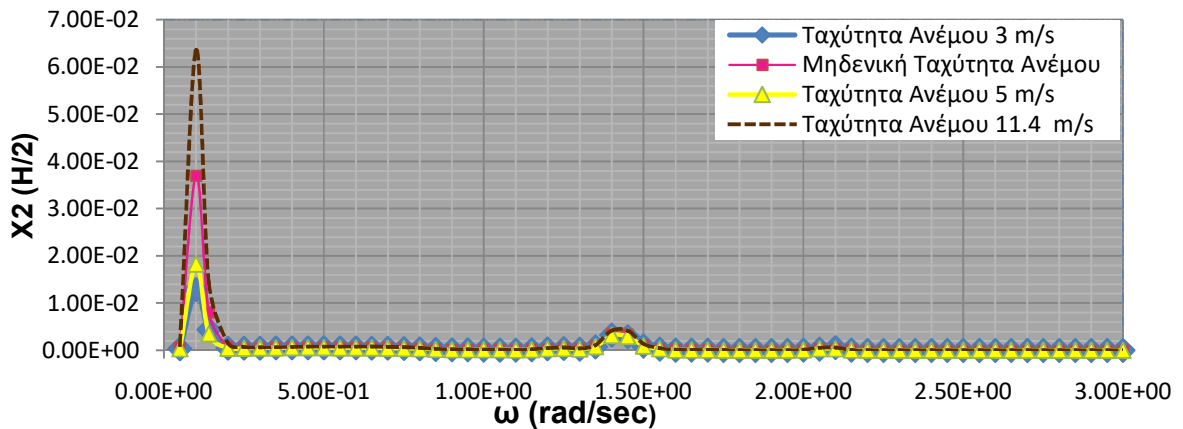


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

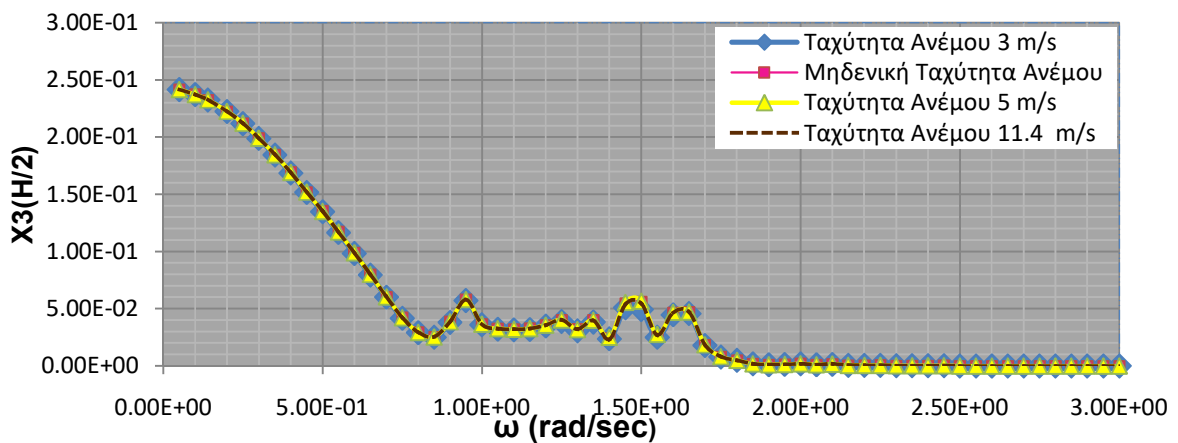
Διάγραμμα 6.67 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



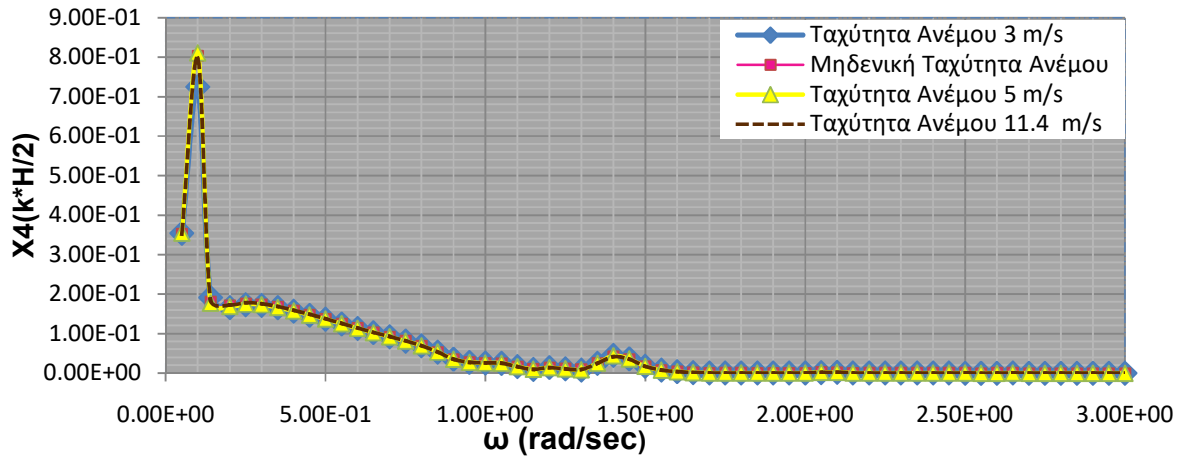
Διάγραμμα 6.68 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



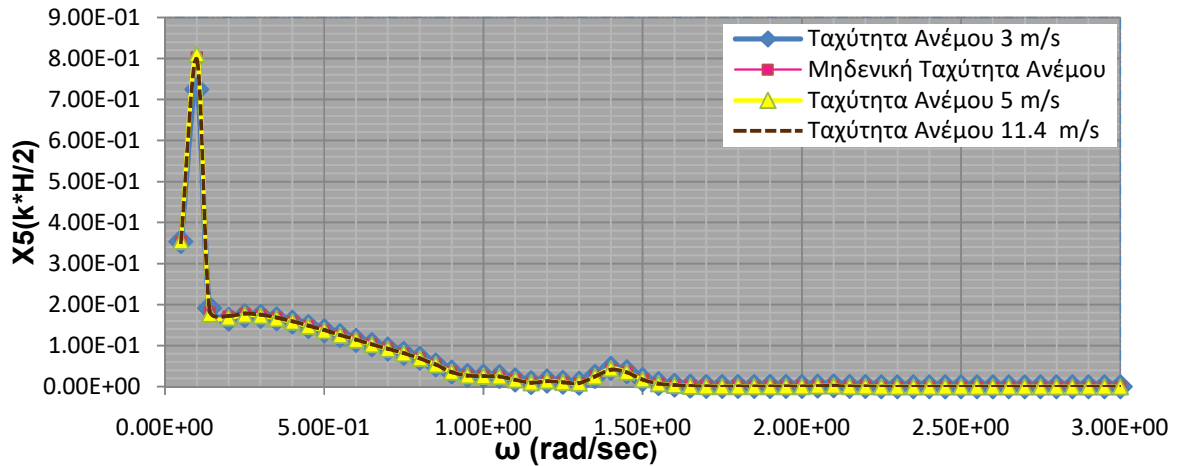
Διάγραμμα 6.69 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



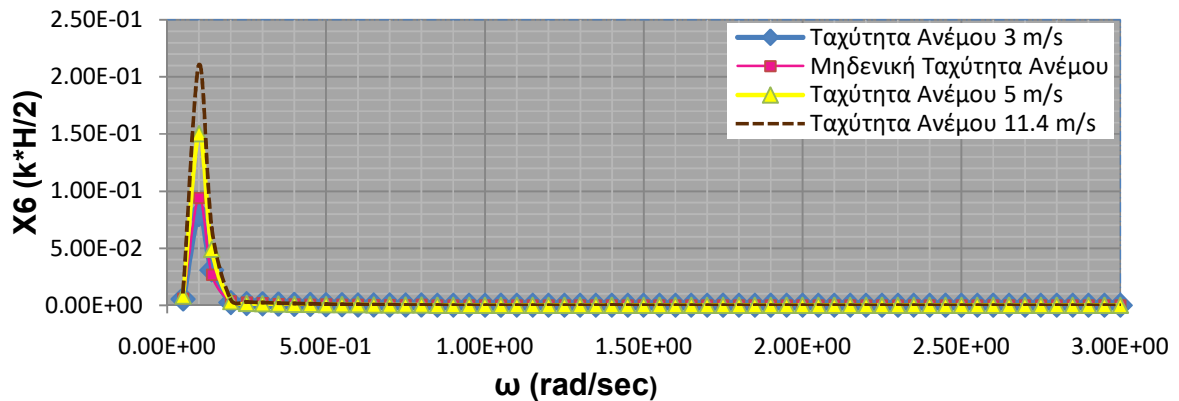
Διάγραμμα 6.70 : Ο αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.71 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευσισμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.72 : Η αδιαστατοποιημένη στροφική οριζόντια μετατόπιση (yaw) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου η ταχύτητα ανέμου δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Επομένως στα παρακάτω βήματα θα κρατήσουμε σταθερή την επιβολή του ανέμου με μέτρο $V_{\text{ανέμου}} = 3 \text{ m/s}$.

6.1.8 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 7- ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στο συγκεκριμένο βήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να διερευνηθεί θεωρητικά, η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης κυματισμών στην πλωτή κατασκευή. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 μοιρών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Αγκυρωμένη κατασκευή χωρίς Α/Γ

- i) Βάθος νερού (D=120 m)
- ii) Βάθος νερού (D=200 m)

2) Αγκυρωμένη κατασκευή με Α/Γ

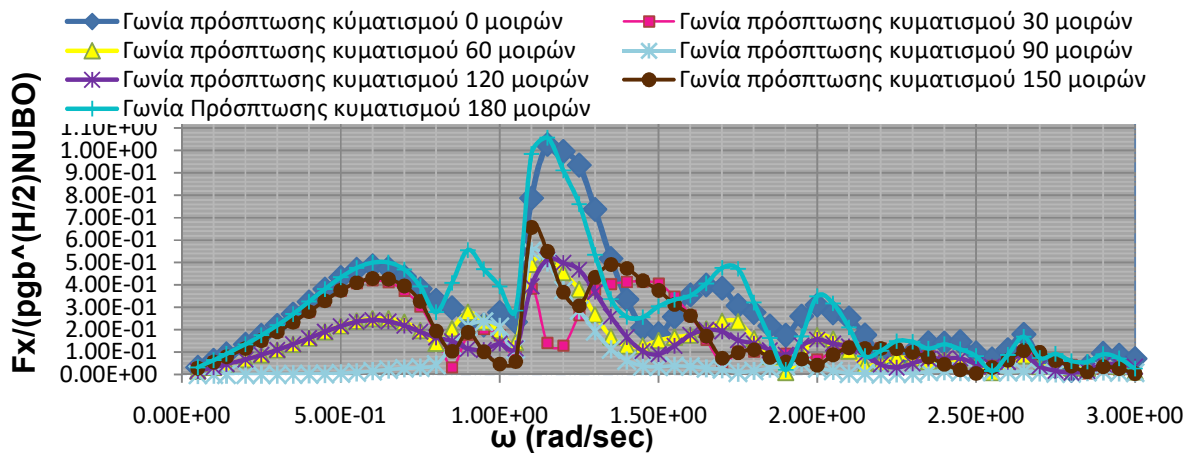
- i) Βάθος νερού (D=120 m)
- ii) Βάθος νερού (D=200 m) Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την εκάστοτε αδιαστατοποίηση είναι τα εξής:

- πυκνότητα του νερού $\rho = 1.025 \text{ t/m}^3$
- επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- ακτίνα εξωτερικού μανδύα $r_{\text{ef}} = 14.05 \text{ m}$
- αριθμός σωμάτων NUBO
- ύψος κύματος $H = 2 \text{ m}$
- γωνιακή συχνότητα ω σε rad/s
- κυματαριθμός k σε m^{-1}

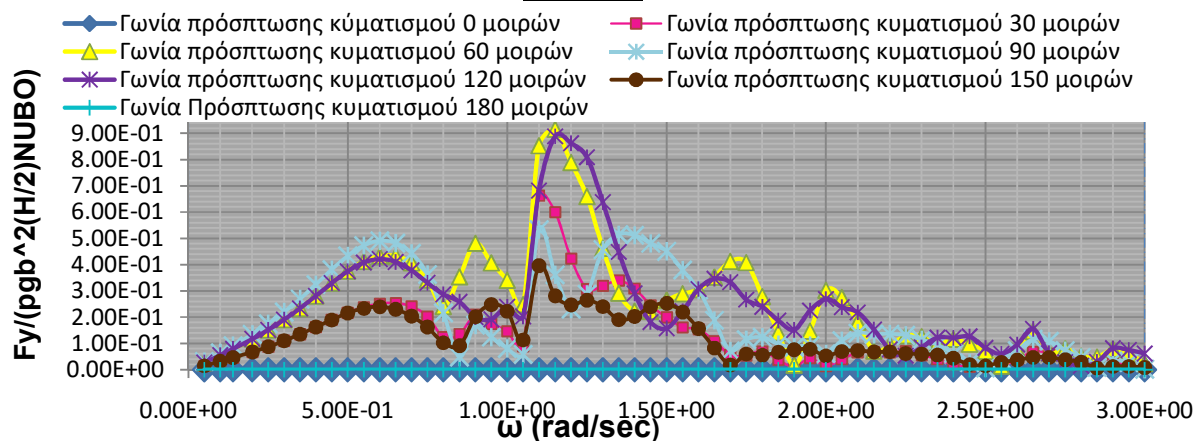
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΧΩΡΙΣ ΑΓ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

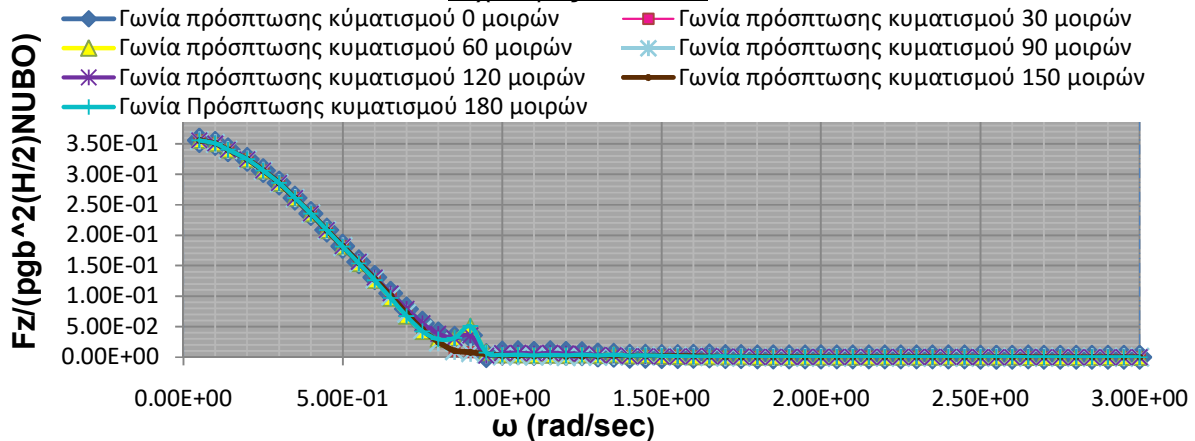
Διάγραμμα 6.73 : Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



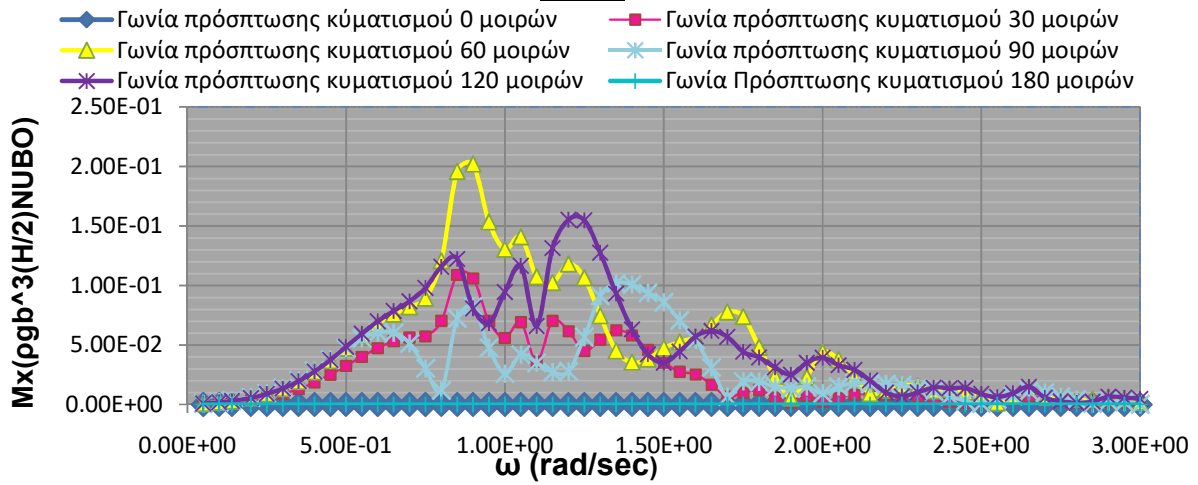
Διάγραμμα 6.74 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



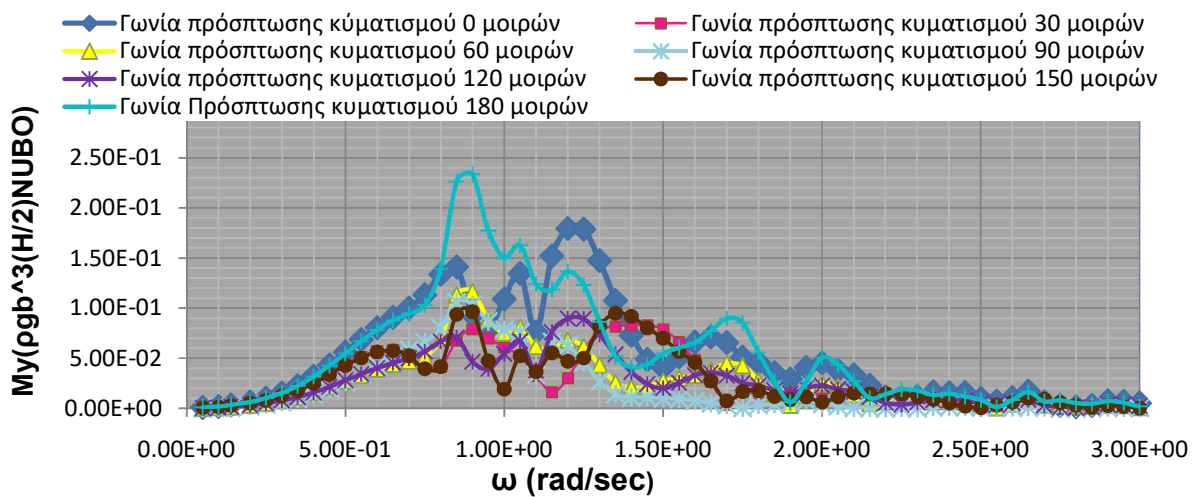
Διάγραμμα 6.75: Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



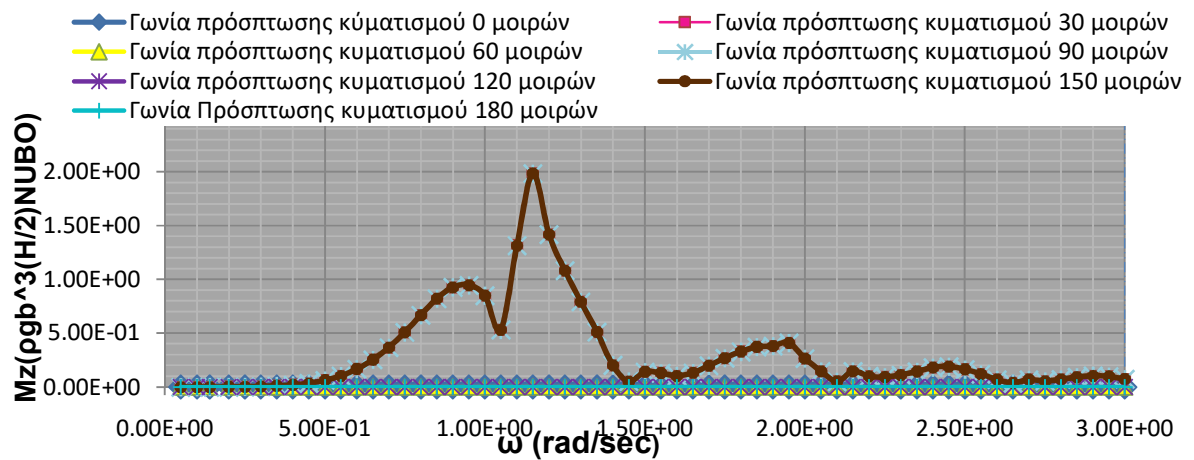
Διάγραμμα 6.76: Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



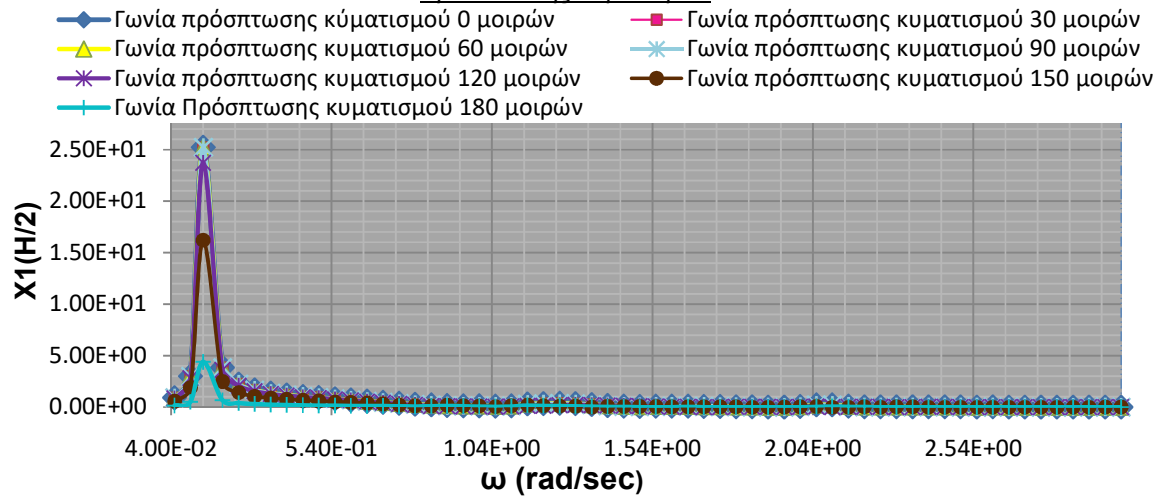
Διάγραμμα 6.77 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



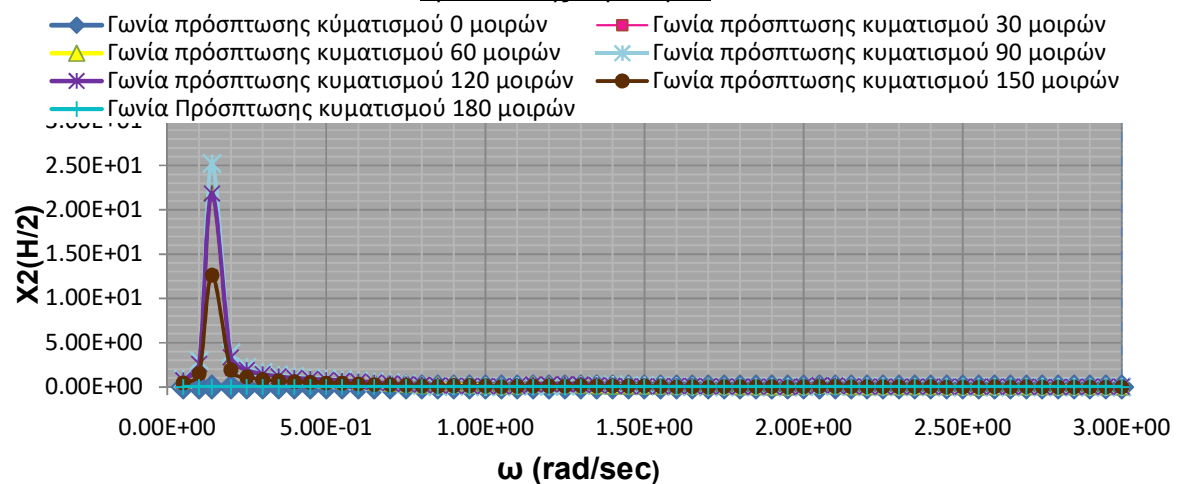
Διάγραμμα 6.78 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



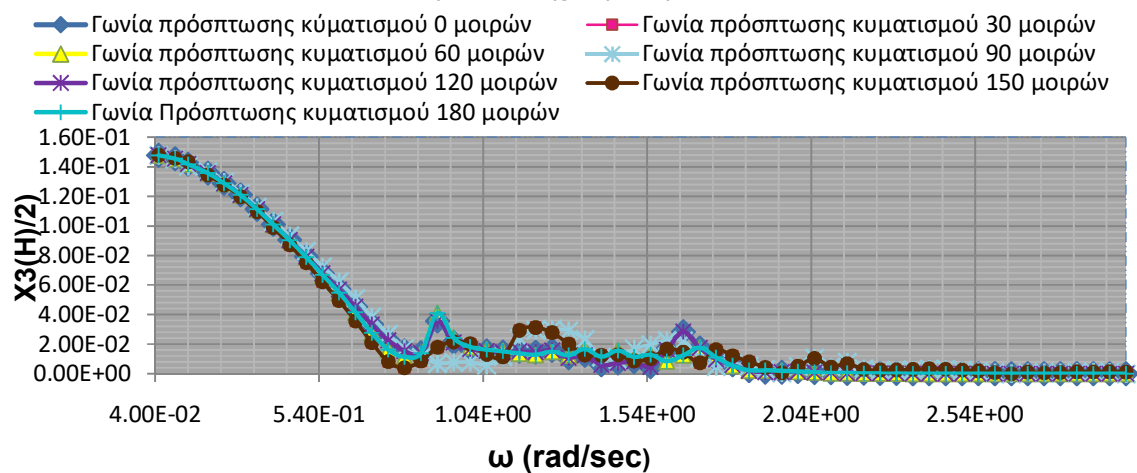
Διάγραμμα 6.79 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



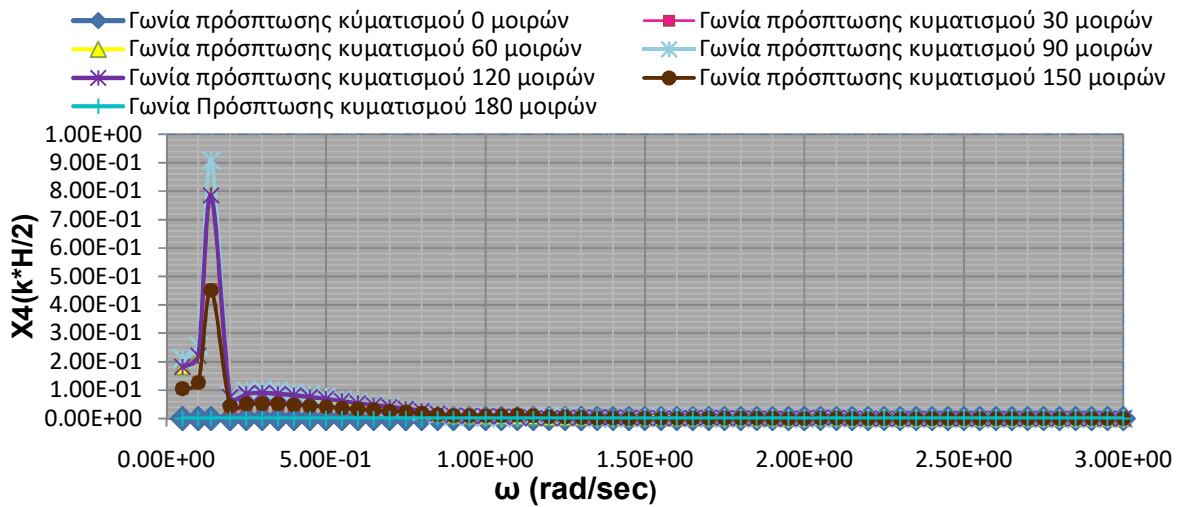
Διάγραμμα 6.80 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



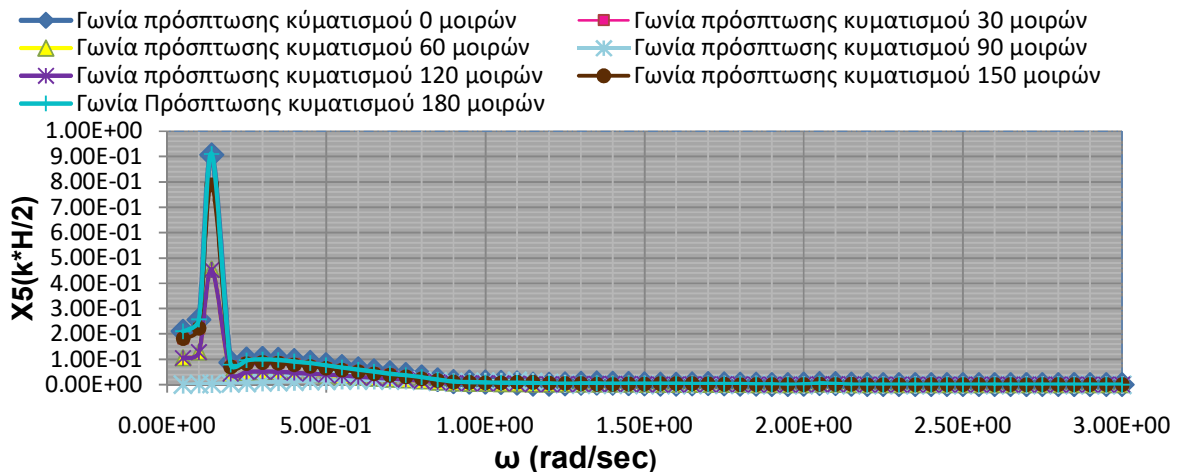
Διάγραμμα 6.81 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



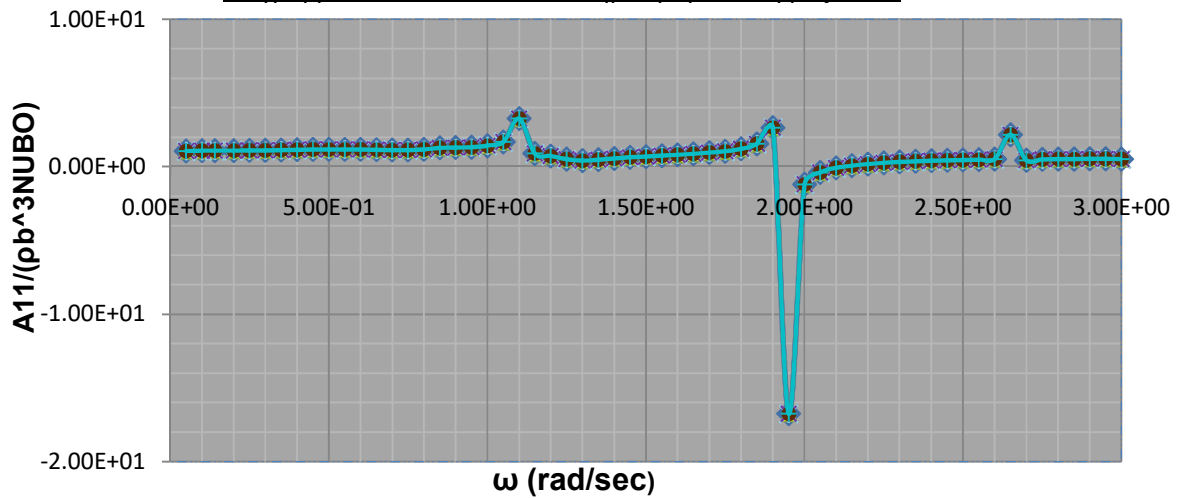
Διάγραμμα 6.82 :Ο αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



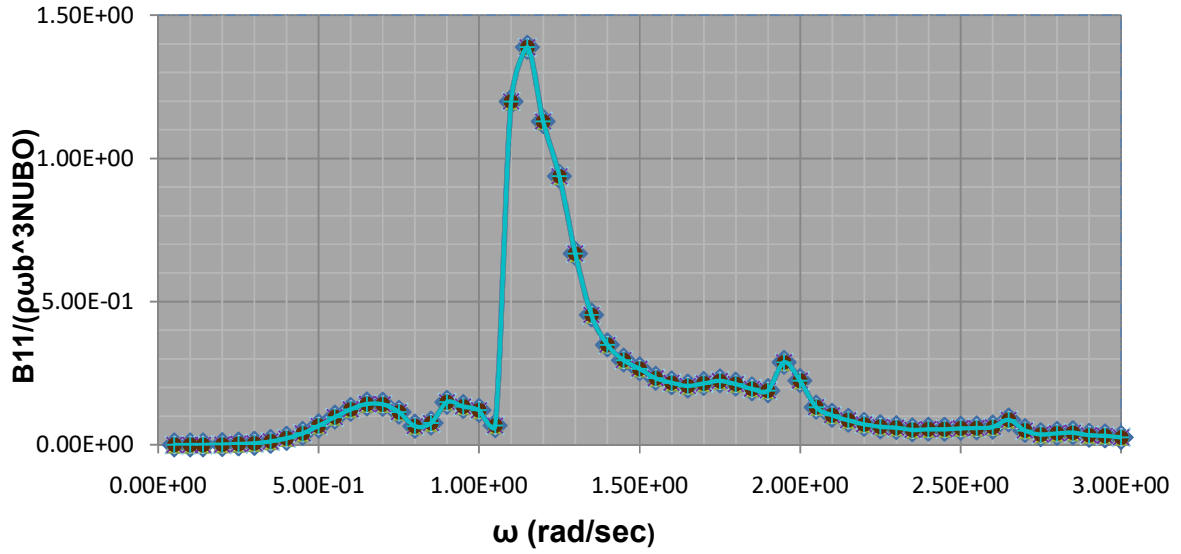
Διάγραμμα 6.83 :Ο προνευτισμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



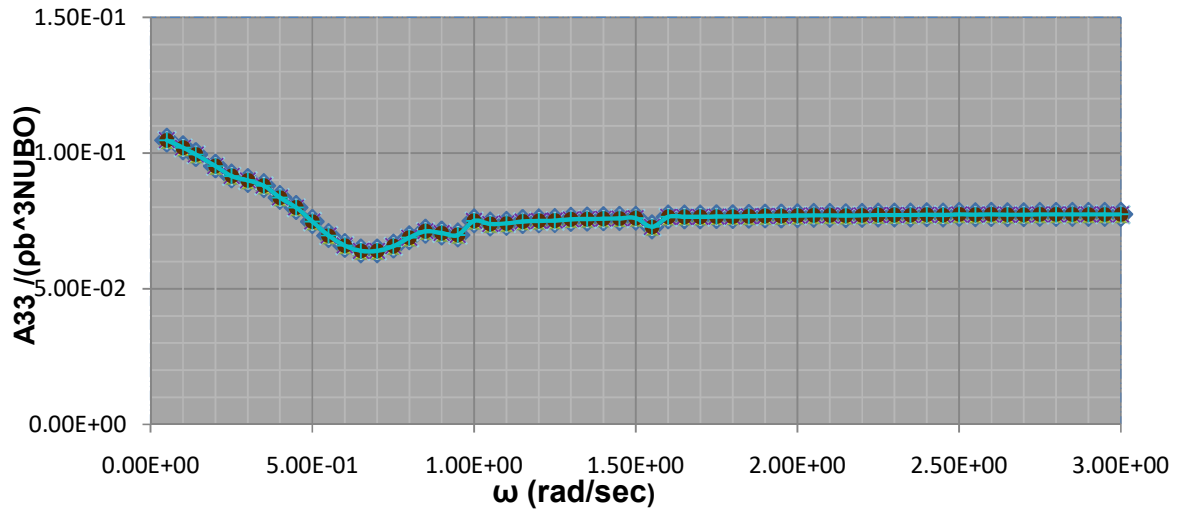
Διάγραμμα 6.84 :Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A11



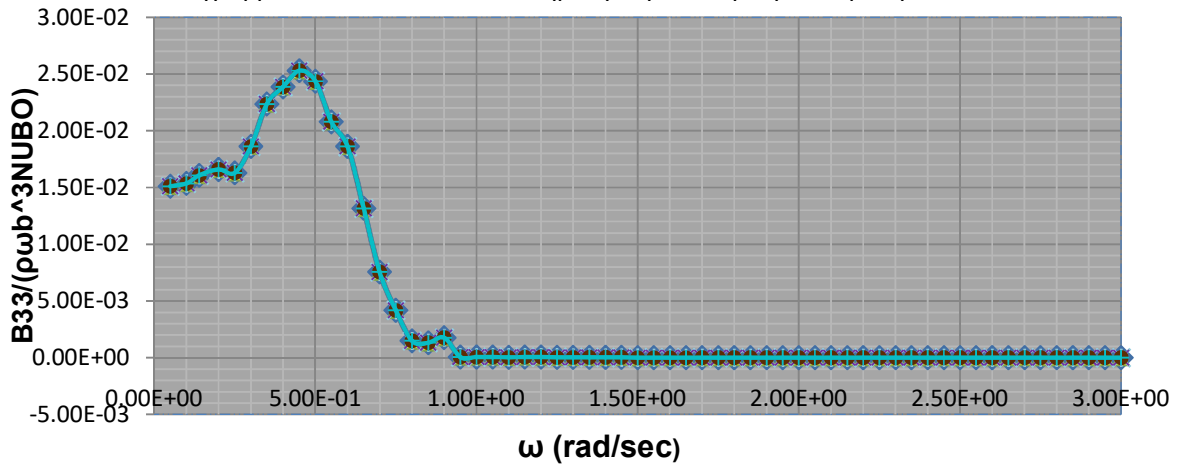
Διάγραμμα 6.85 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B11



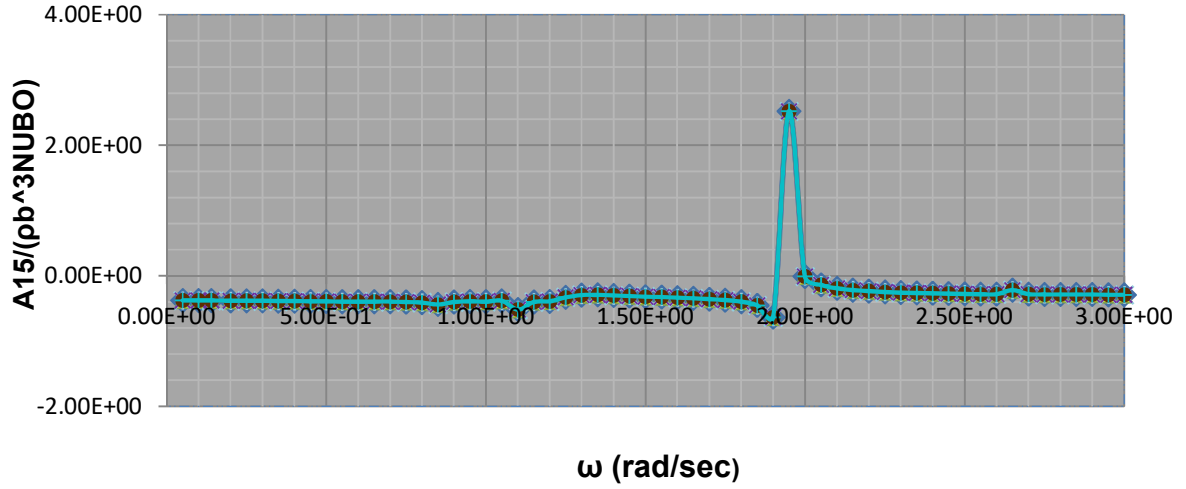
Διάγραμμα 6.86 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A33



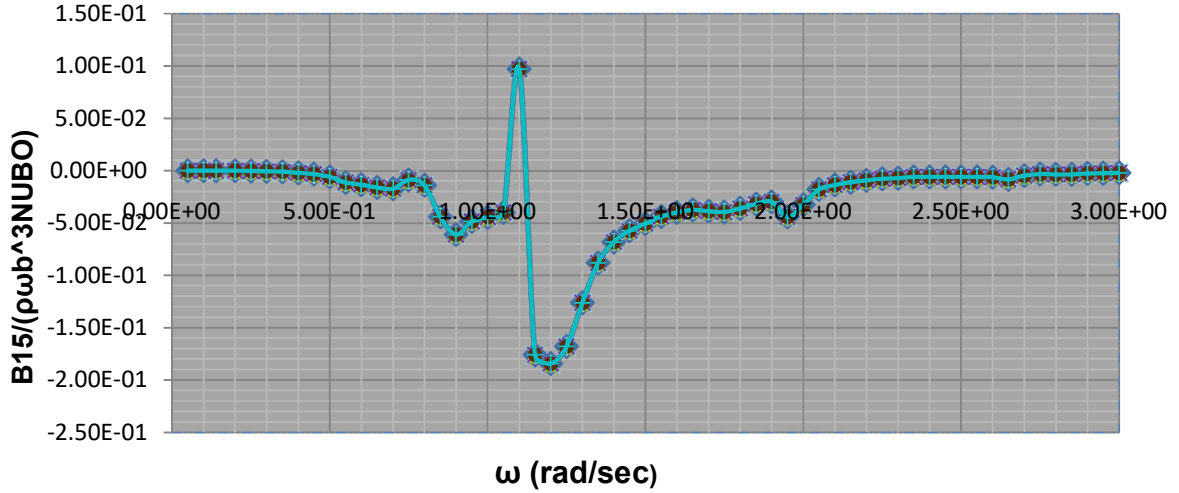
Διάγραμμα 6.87 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B33



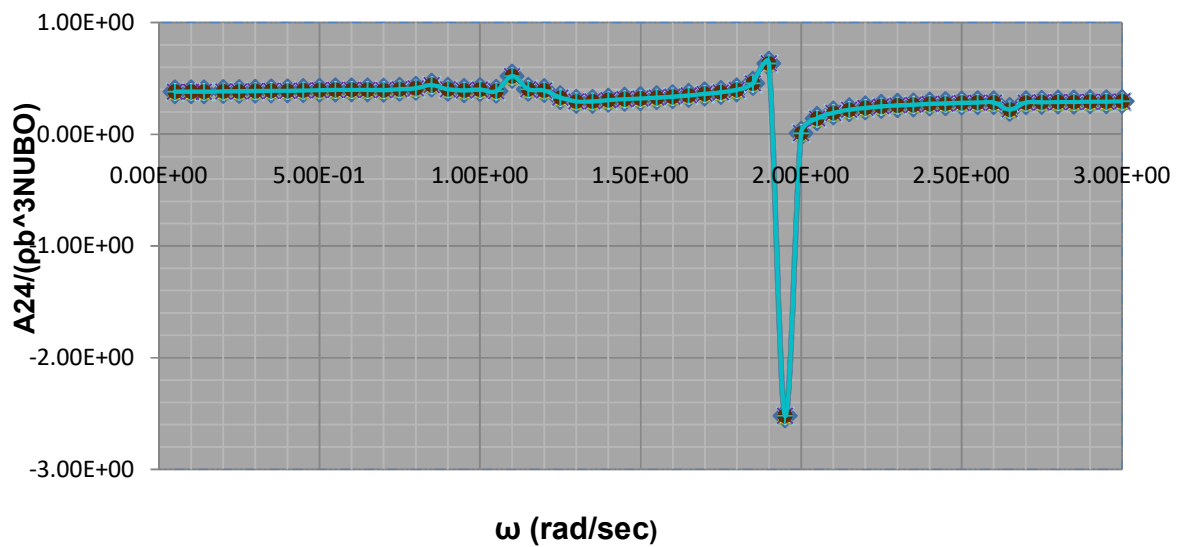
Διάγραμμα 6.88 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A15



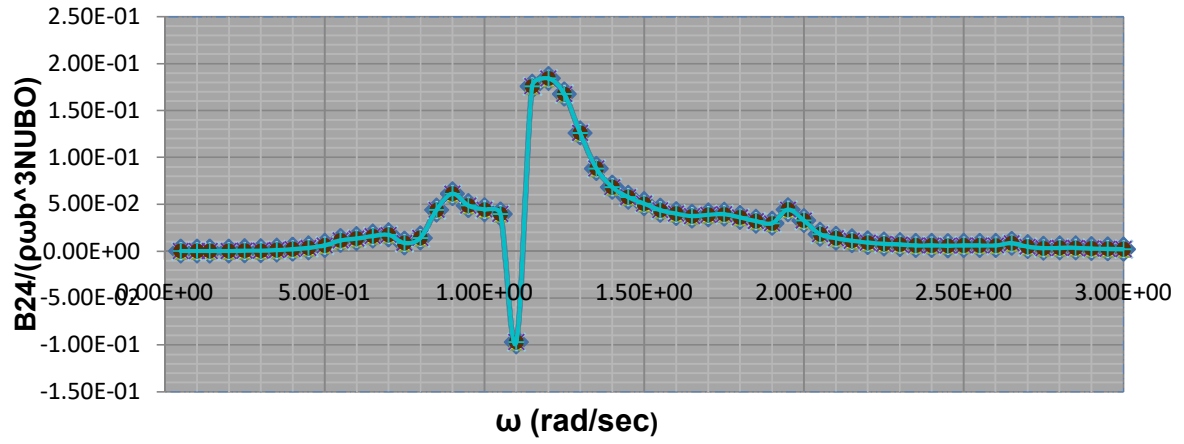
Διάγραμμα 6.89 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B15



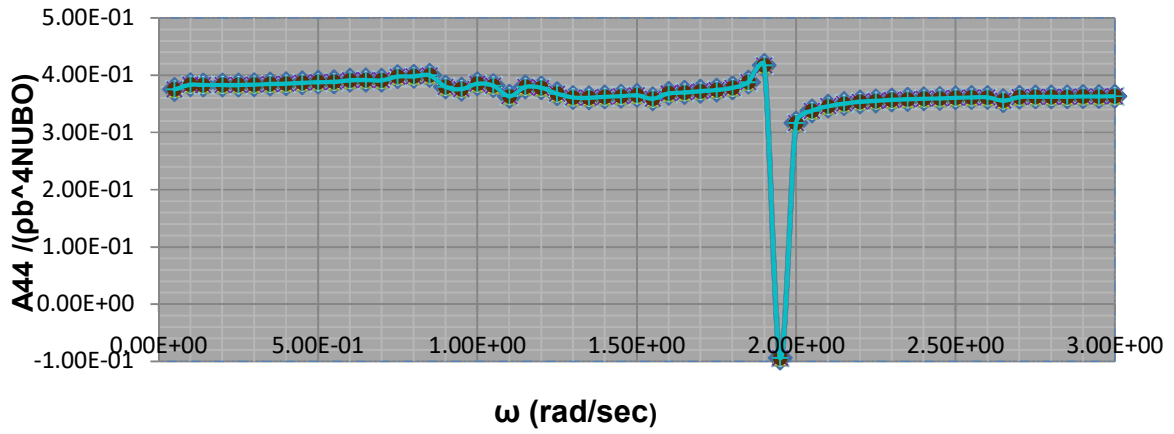
Διάγραμμα 6.90 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A24



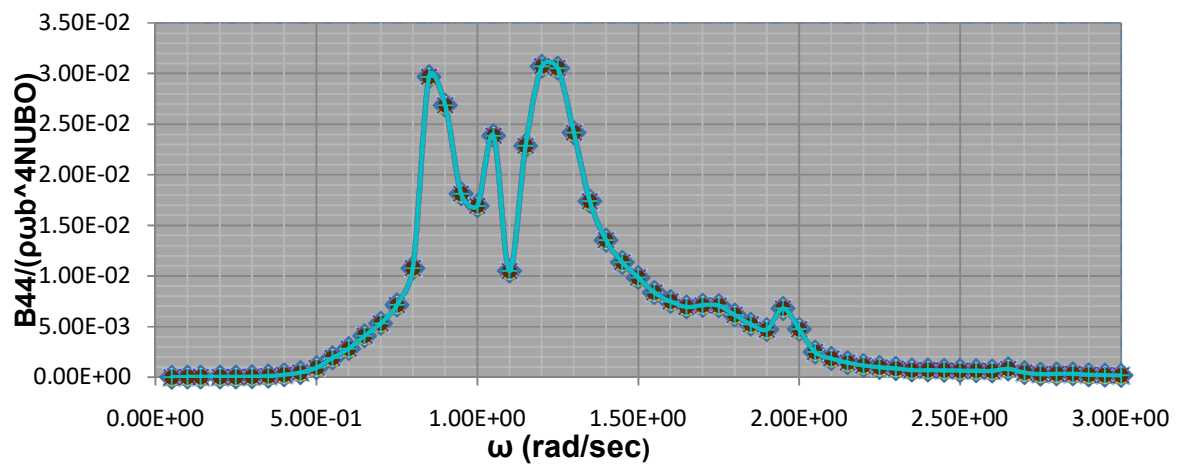
Διάγραμμα 6.91 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B24



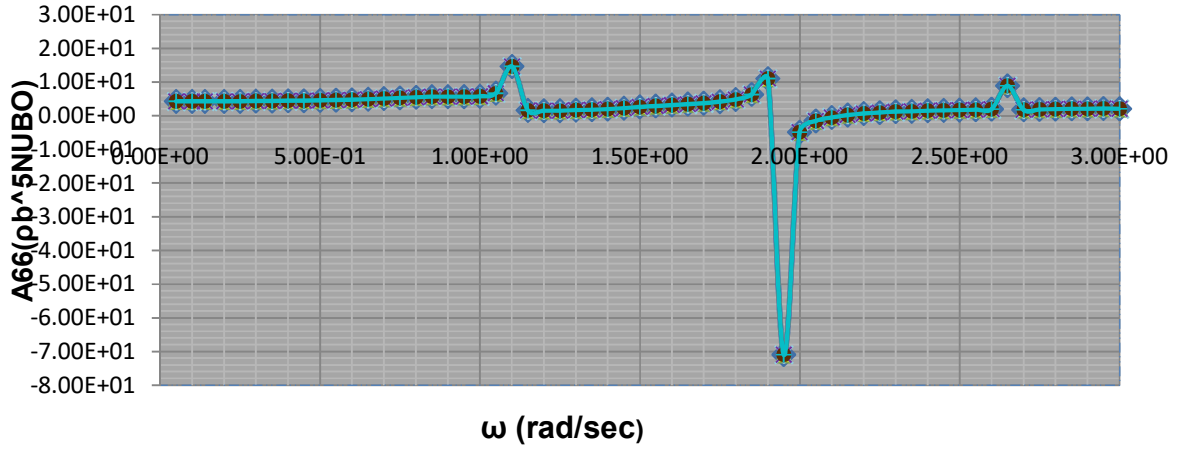
Διάγραμμα 6.92 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A44



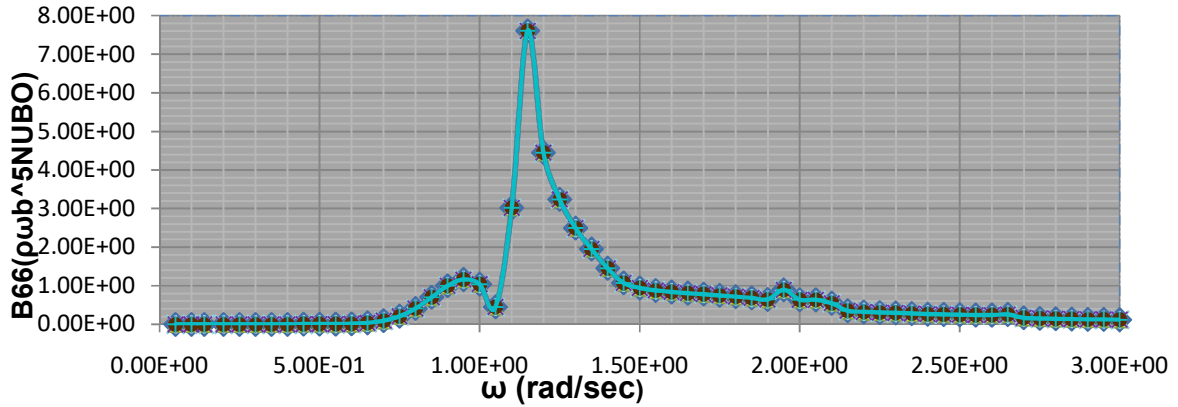
Διάγραμμα 6.93 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B44



Διάγραμμα 6.94 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A66

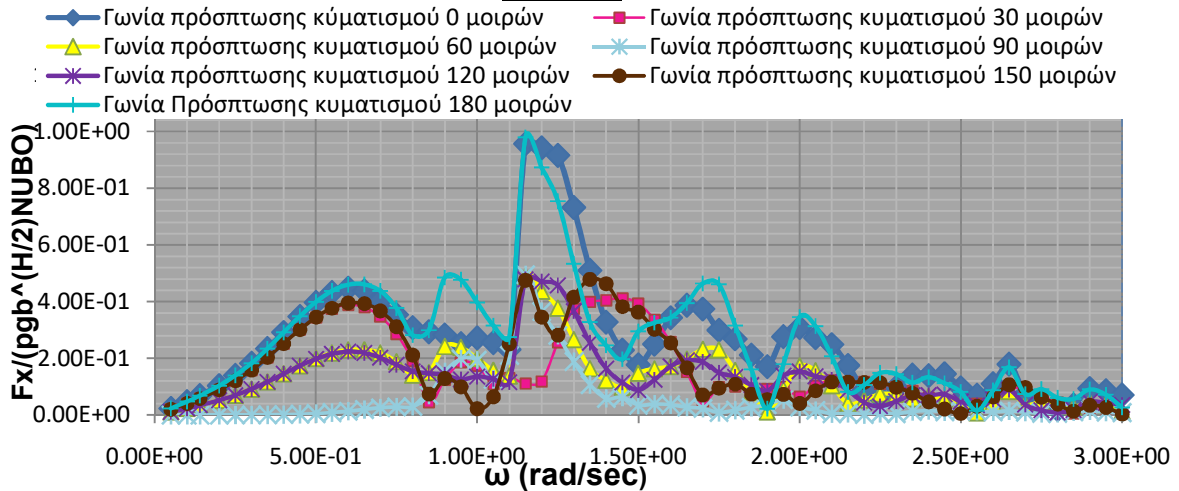


Διάγραμμα 6.95 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B66

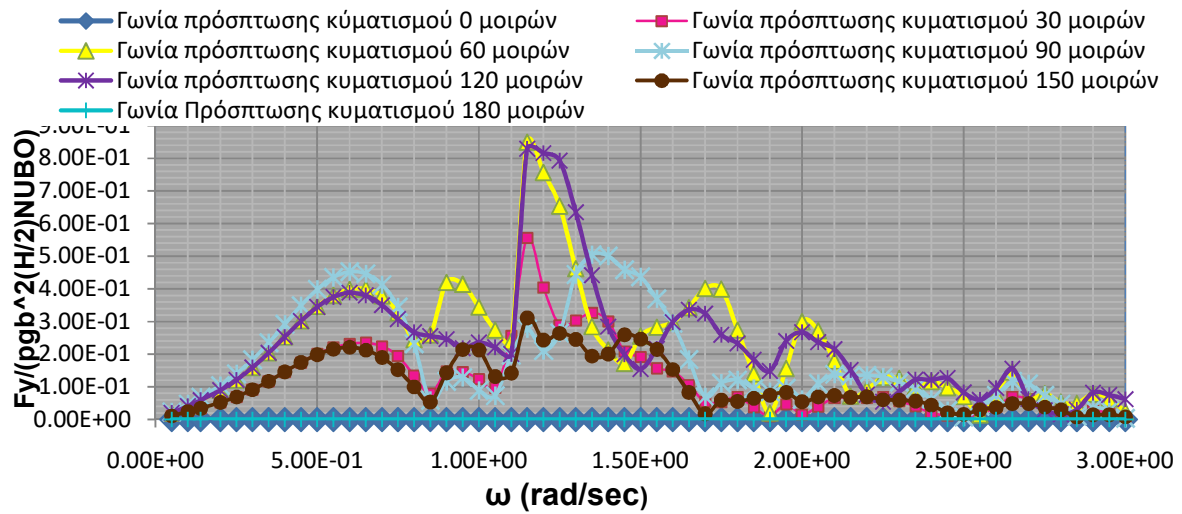


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

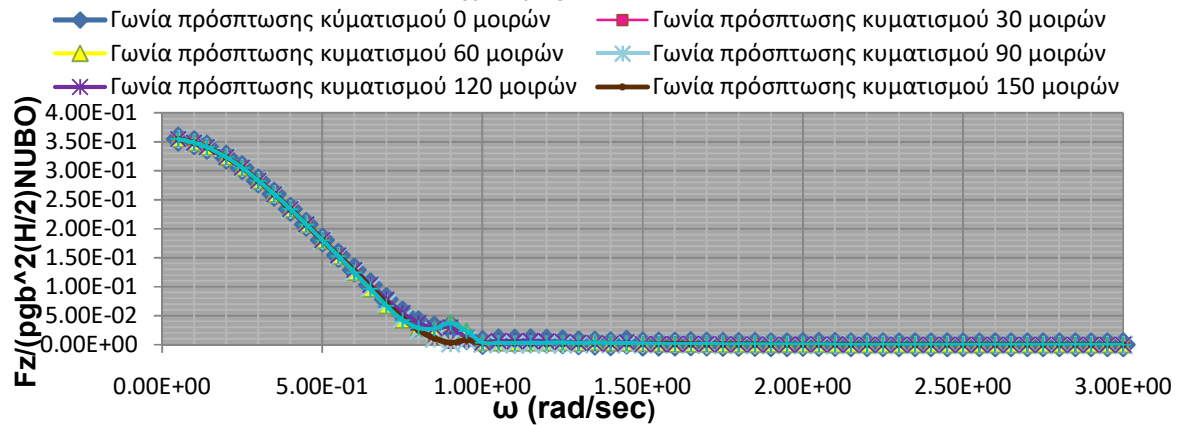
Διάγραμμα 6.96 : Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



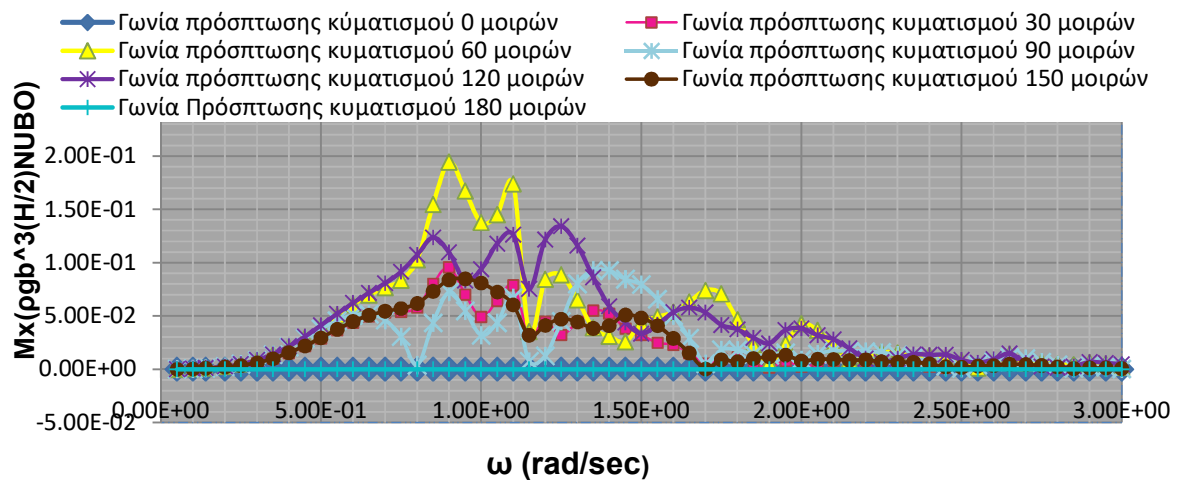
Διάγραμμα 6.97 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



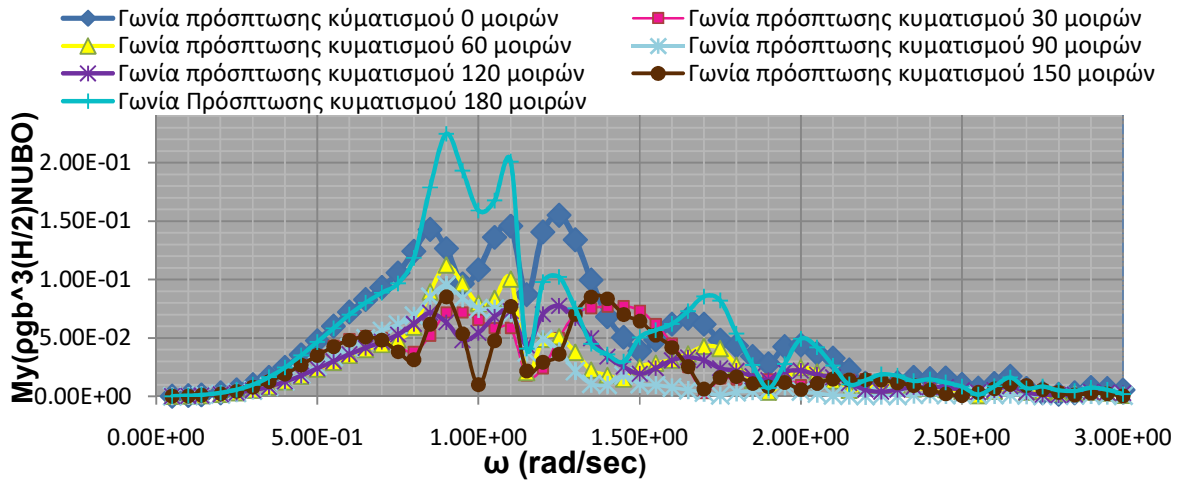
Διάγραμμα 6.98 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



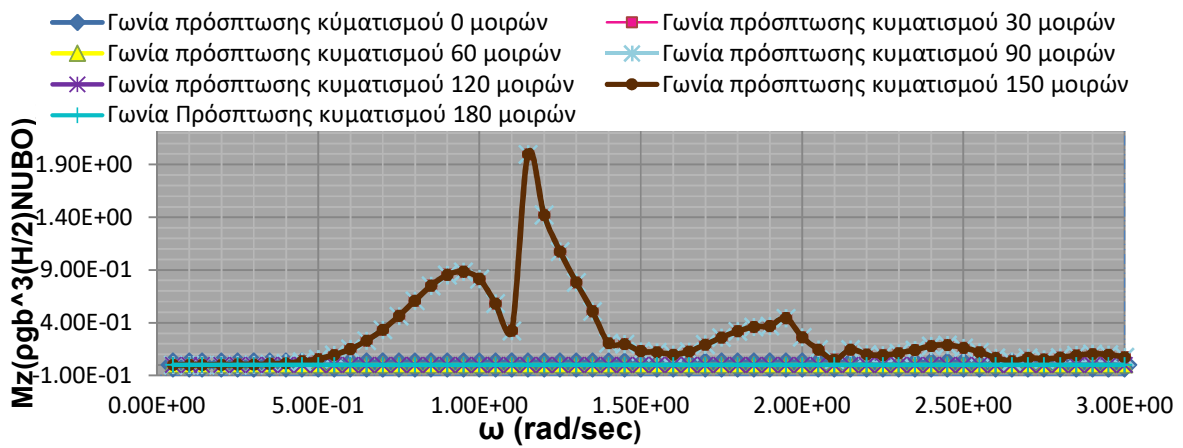
Διάγραμμα 6.99: Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



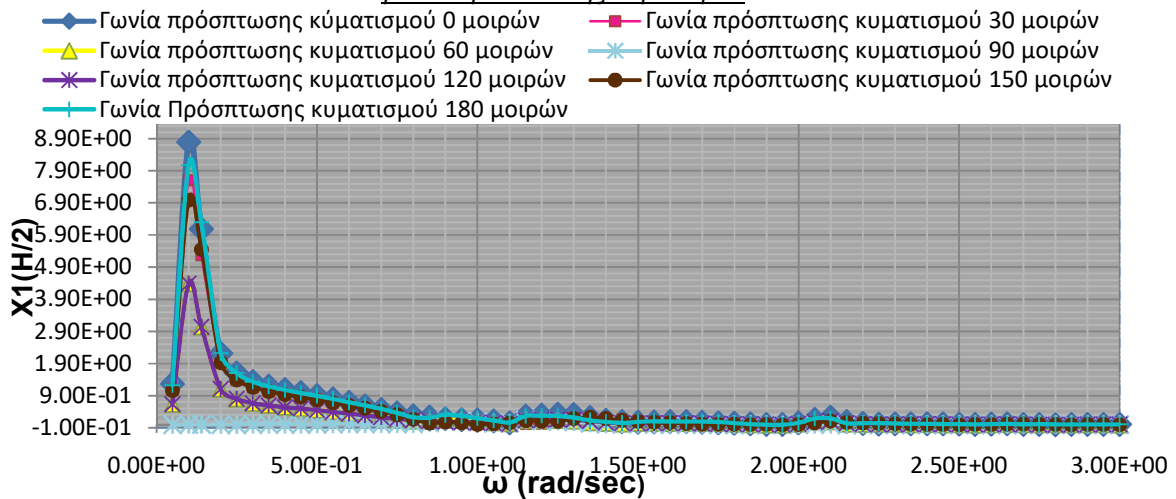
Διάγραμμα 6.100 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



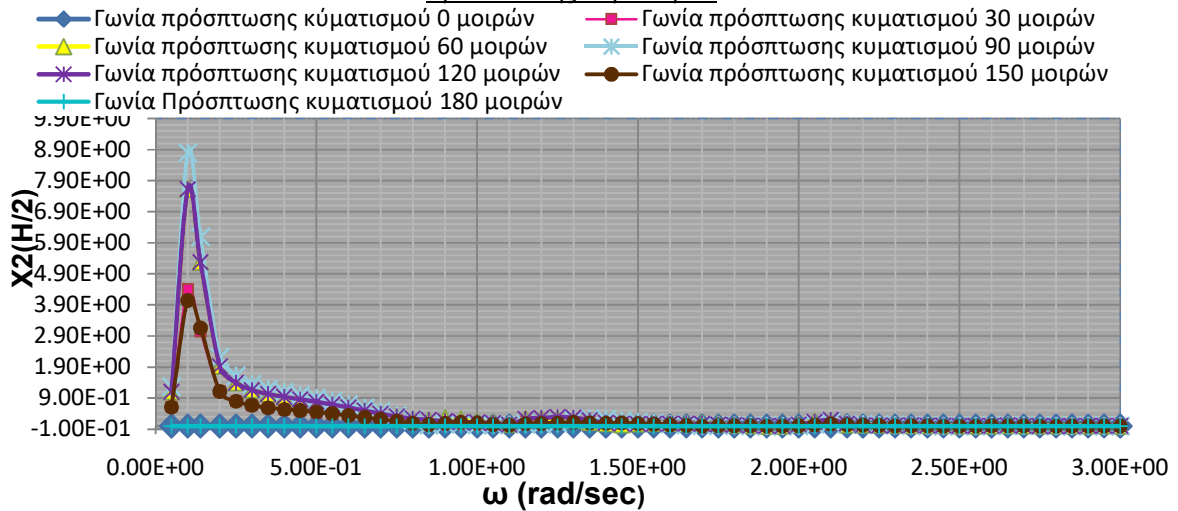
Διάγραμμα 6.101 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



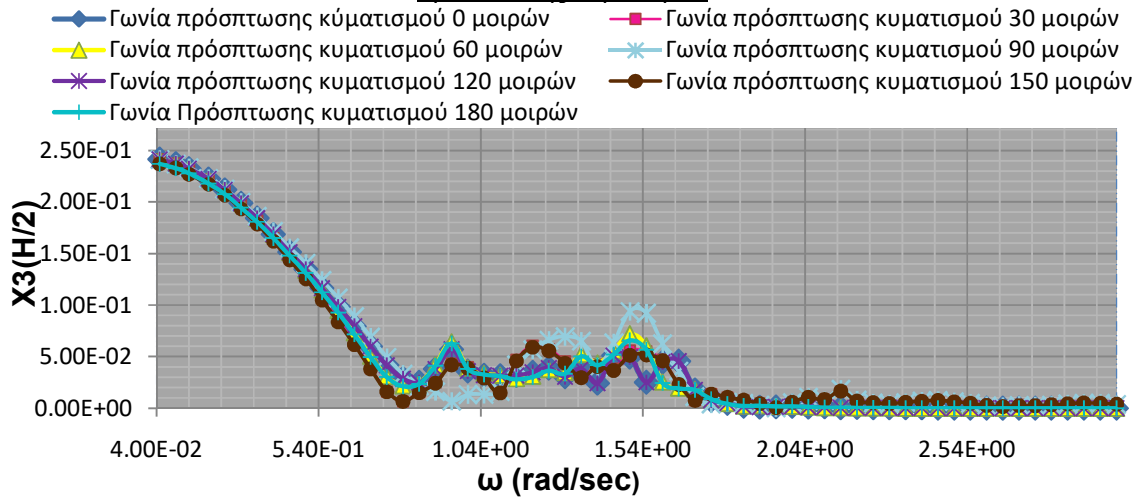
Διάγραμμα 6.102 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κύματιμού



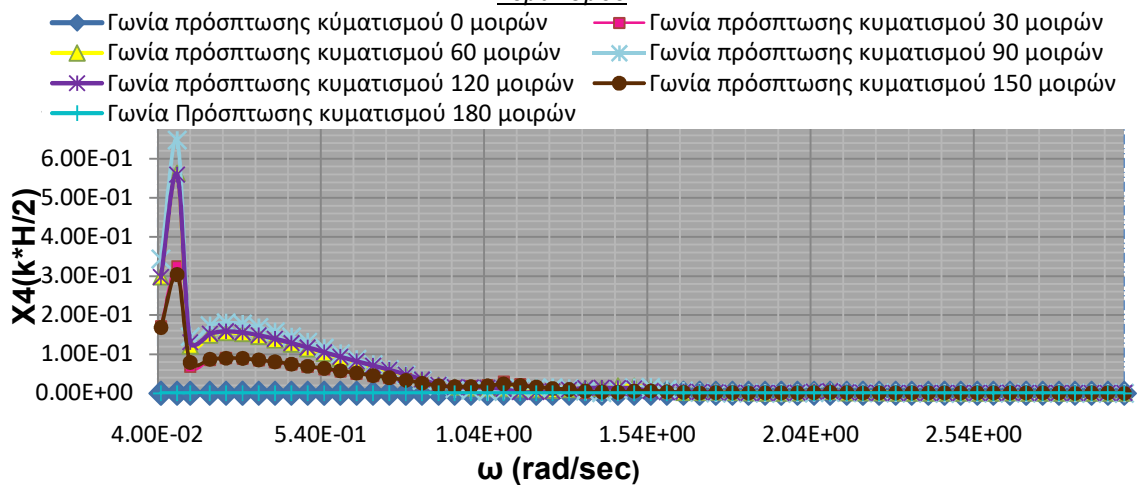
Διάγραμμα 6.103 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



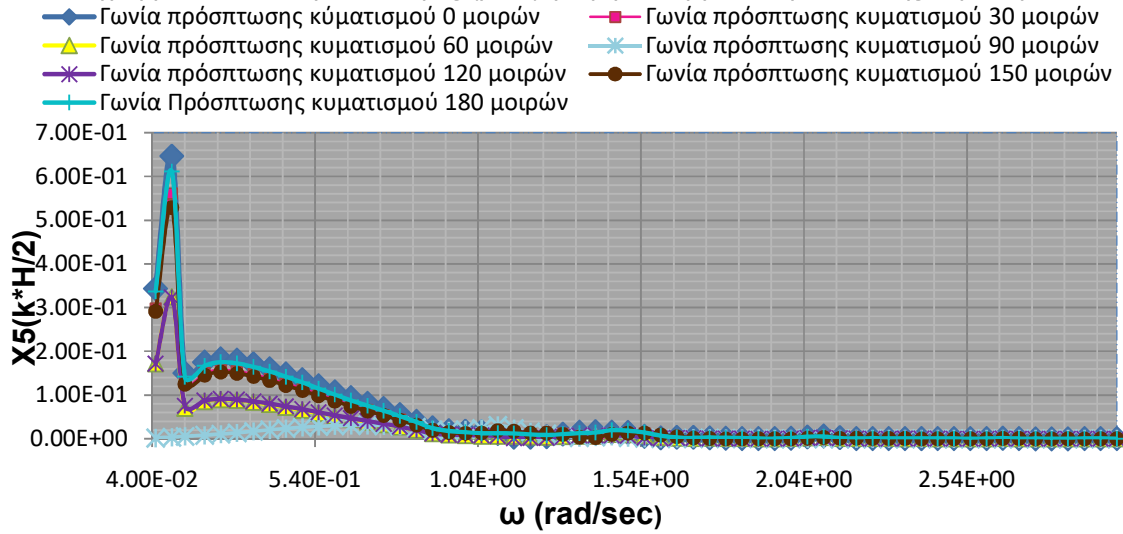
Διάγραμμα 6.104 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



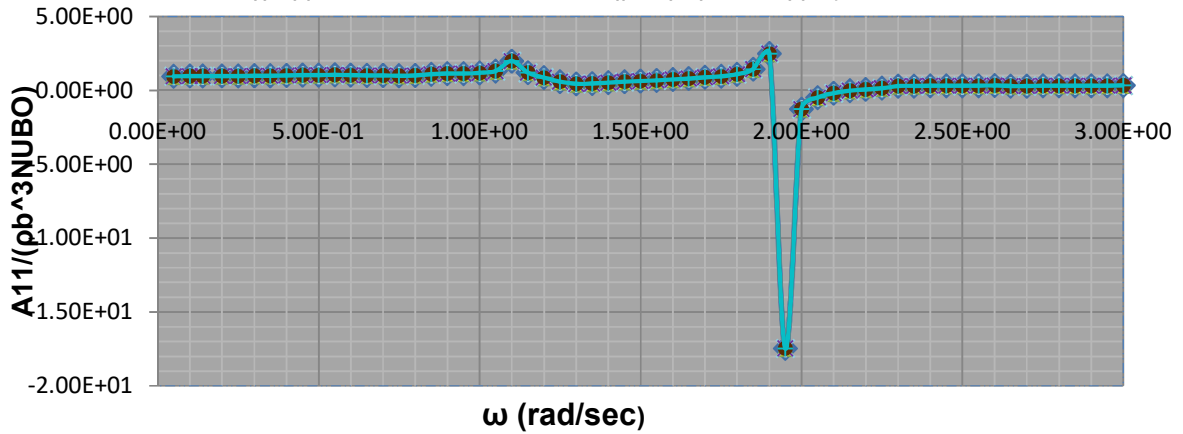
Διάγραμμα 6.105 : Ο αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



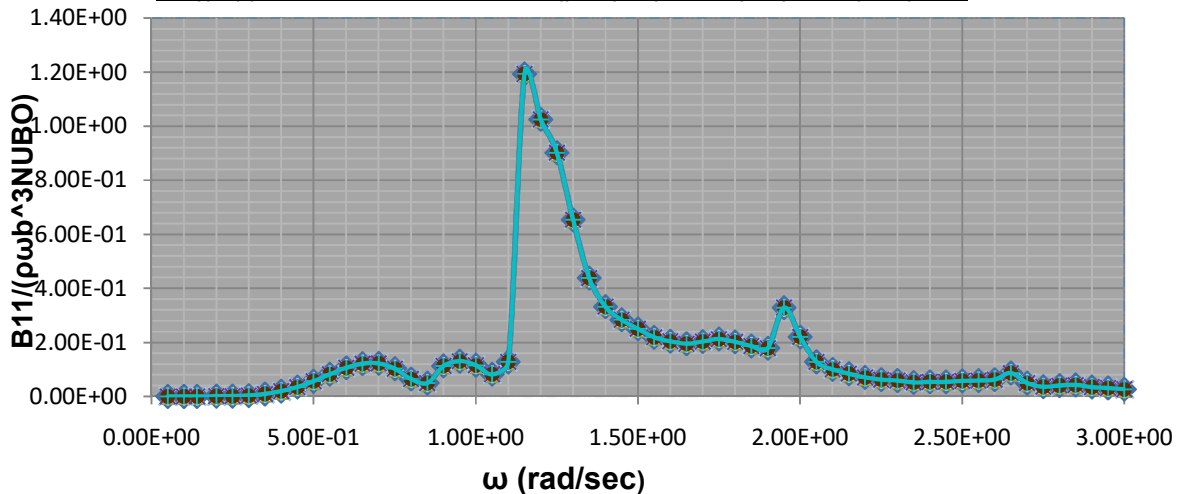
Διάγραμμα 6.106 : Ο προνευμασμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



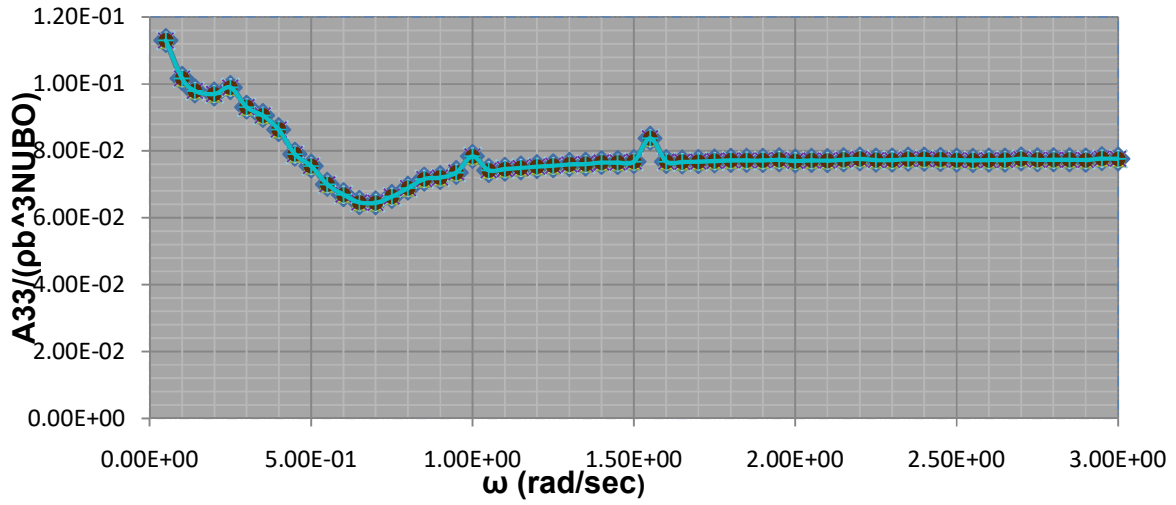
Διάγραμμα 6.107 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A11



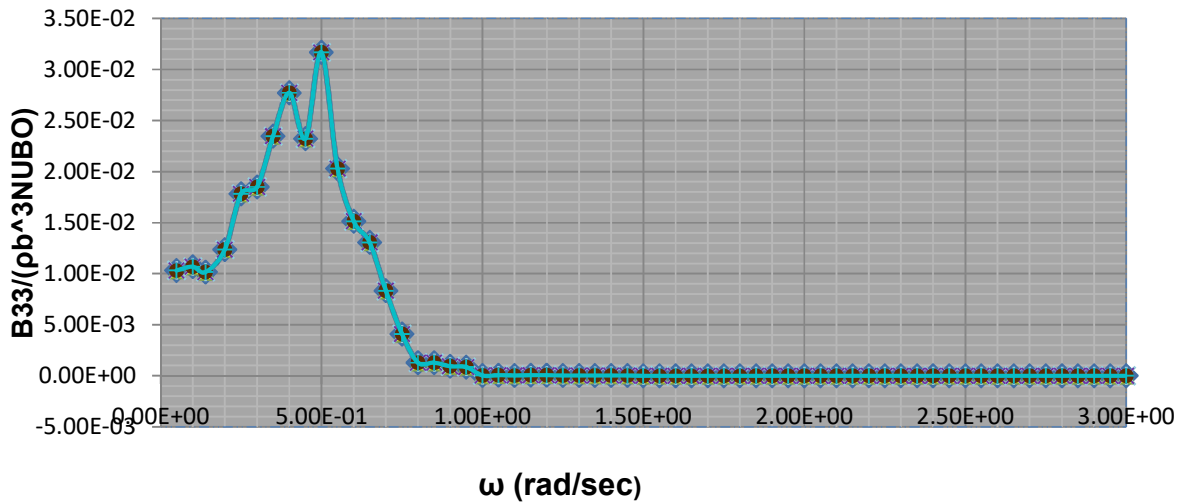
Διάγραμμα 6.108 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B11



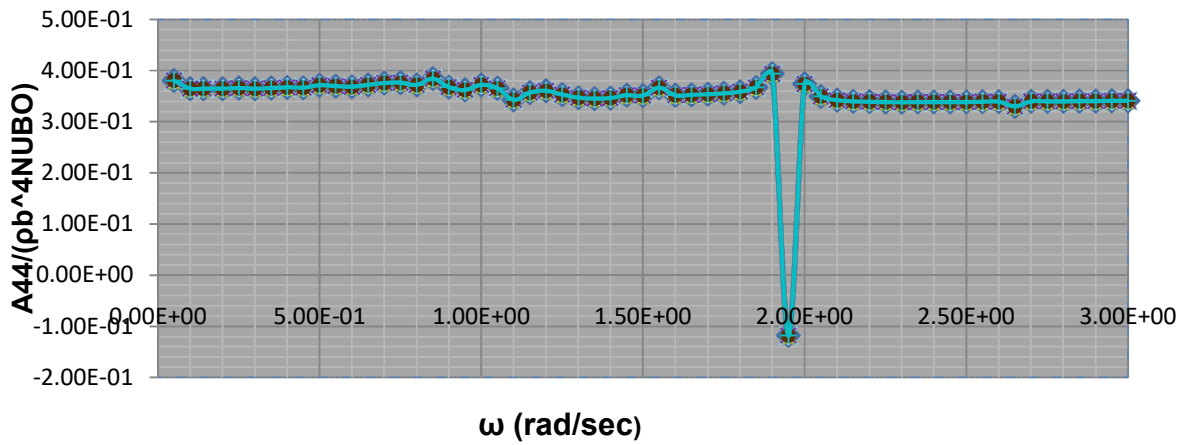
Διάγραμμα 6.109 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A33



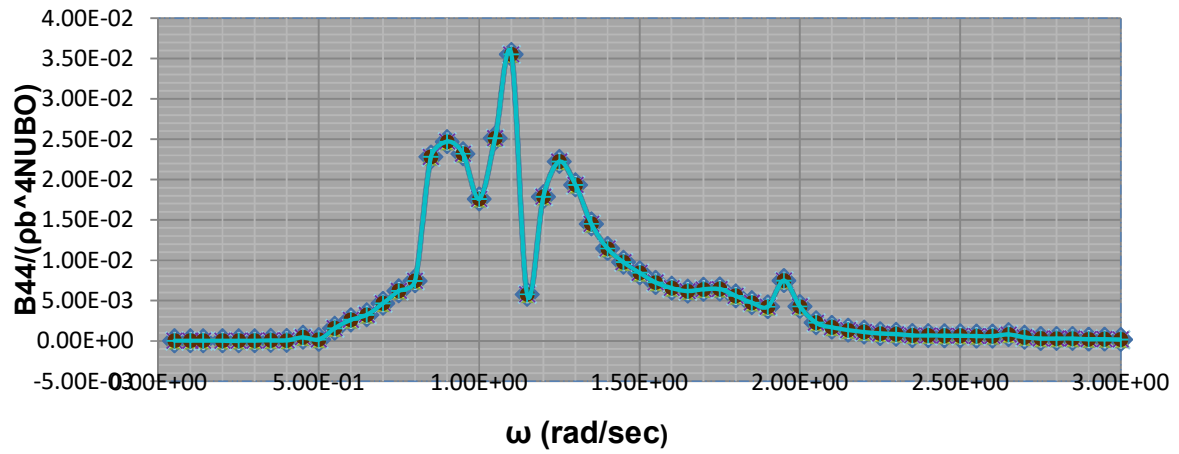
Διάγραμμα 6.110 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B33



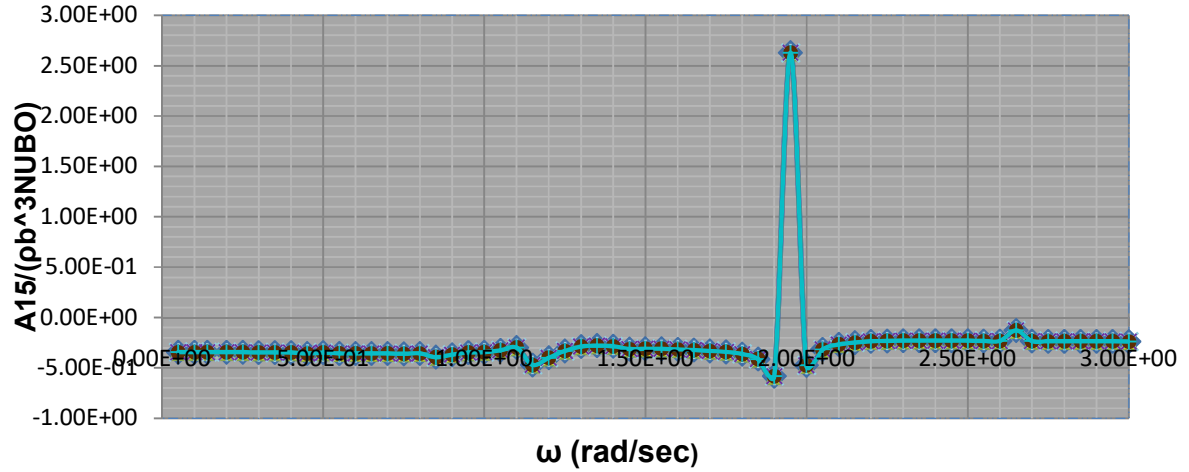
Διάγραμμα 6.111 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A44



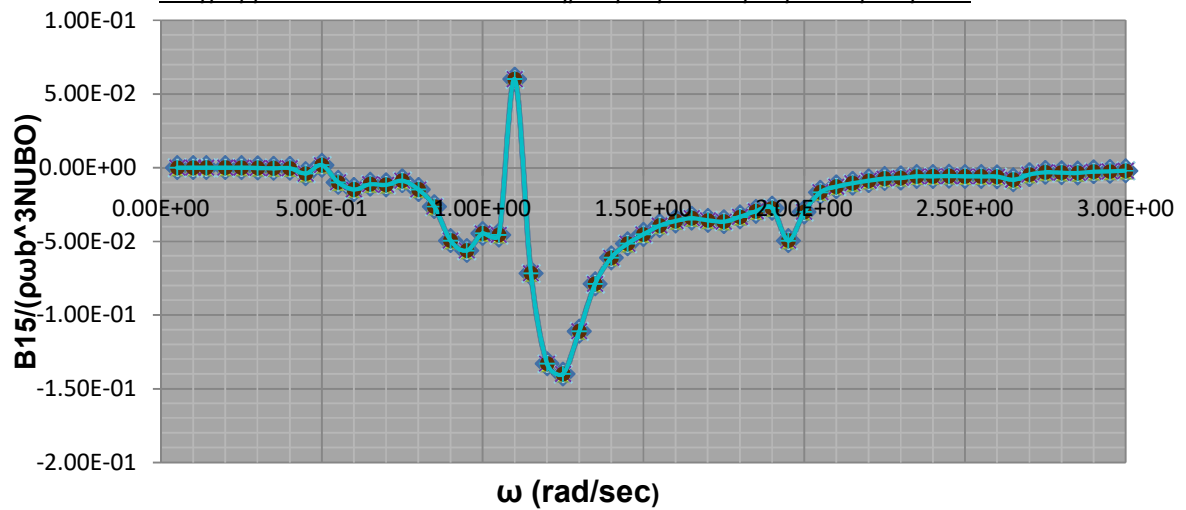
Διάγραμμα 6.112 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B44



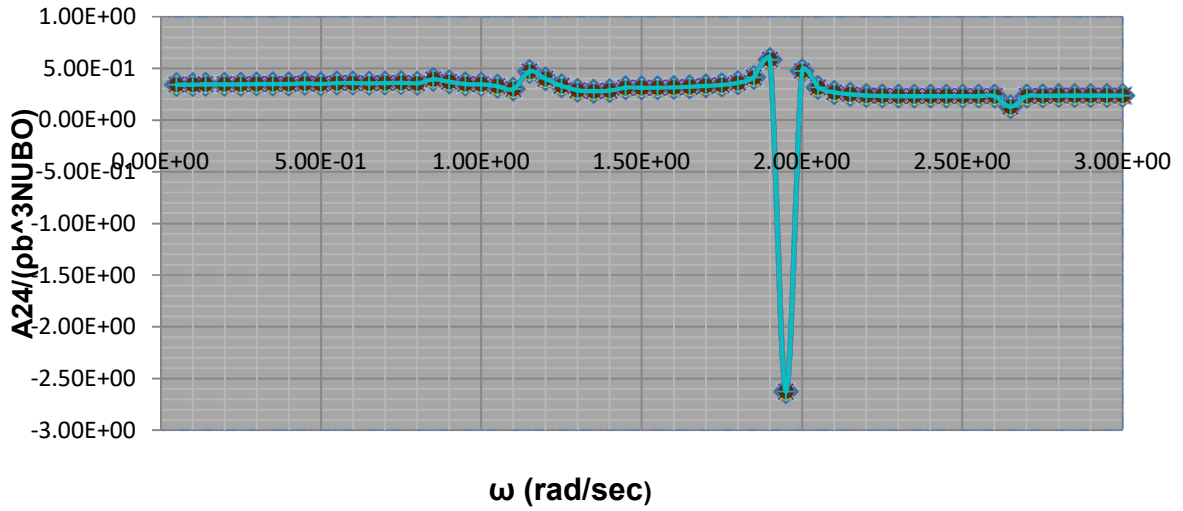
Διάγραμμα 6.113 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A15



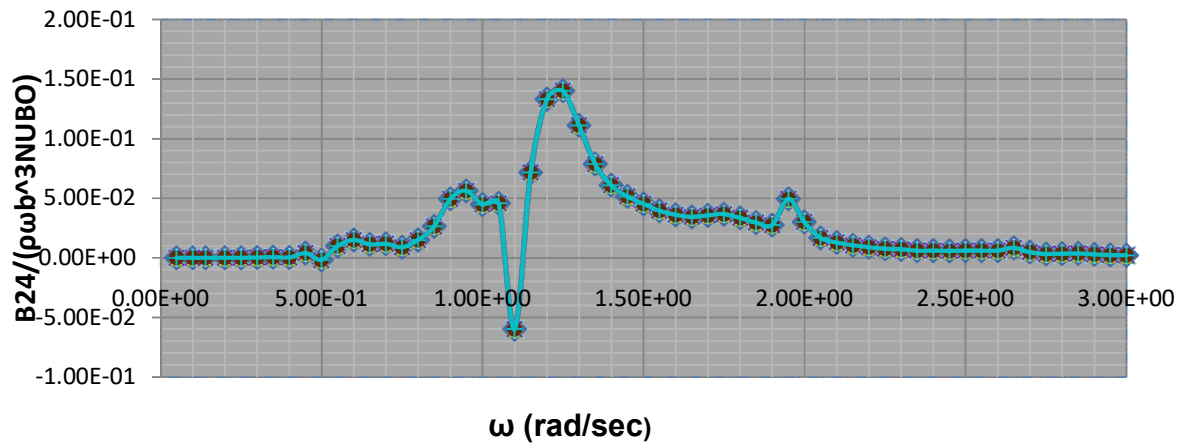
Διάγραμμα 6.114 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B15



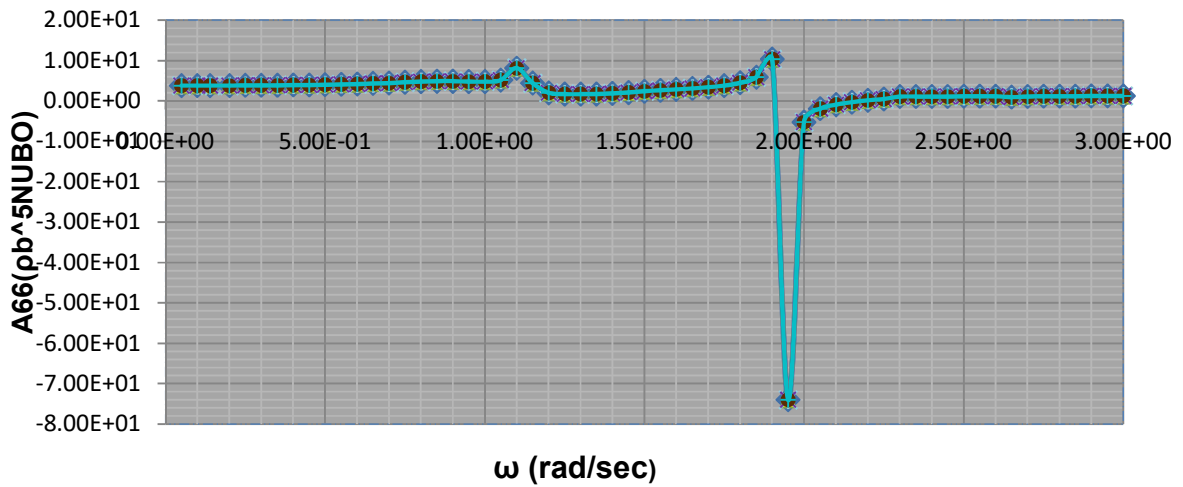
Διάγραμμα 6.115 : Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A24



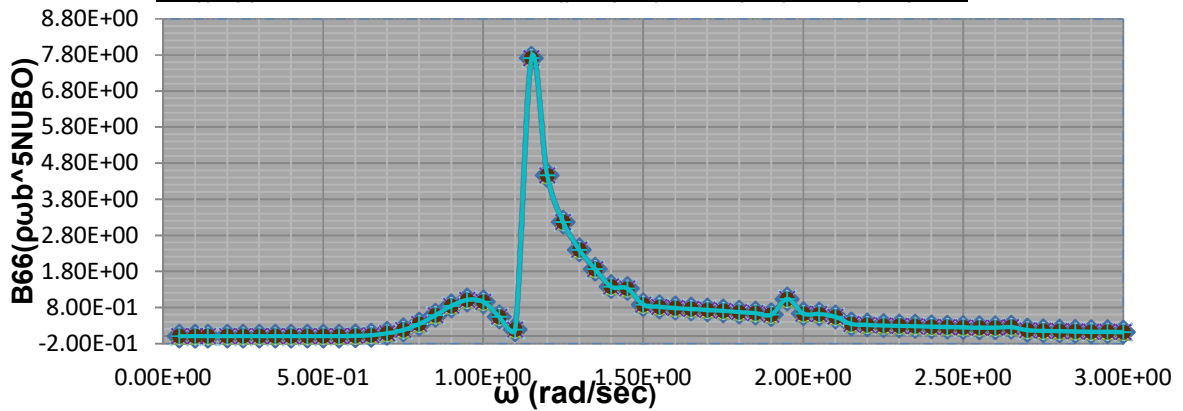
Διάγραμμα 6.116 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B24



Διάγραμμα 6.117: Η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα A66

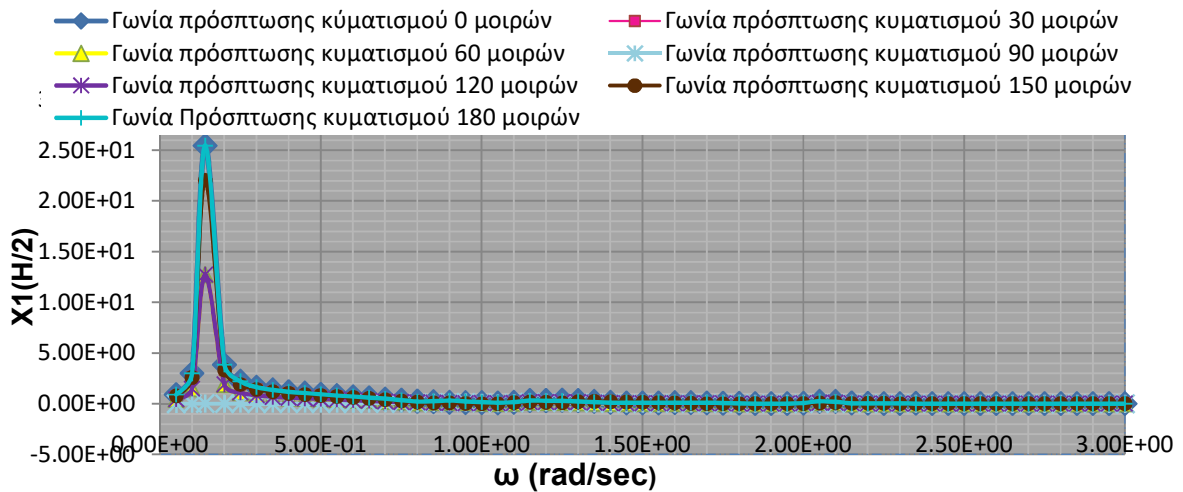


Διάγραμμα 6.118 : Η αδιαστατοποιημένη υδροδυναμική απόσβεση B66

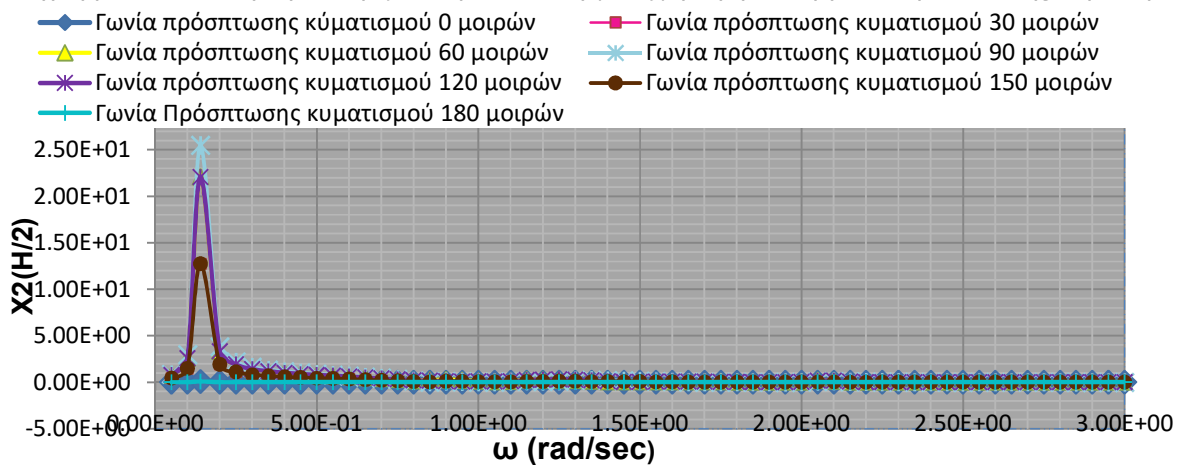


**ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΑΓ
ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m**

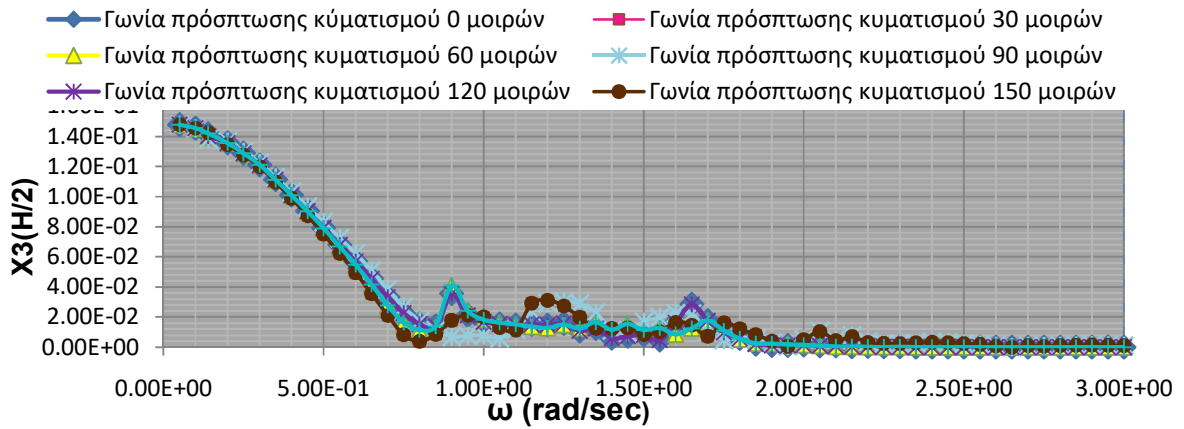
Διάγραμμα 6.119 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



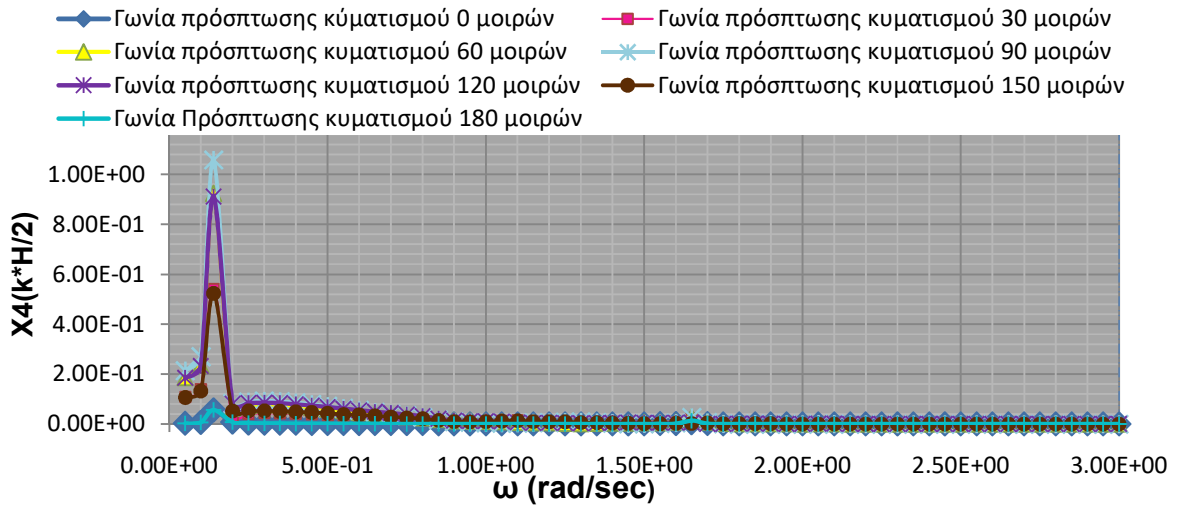
Διάγραμμα 6.120 : Η εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



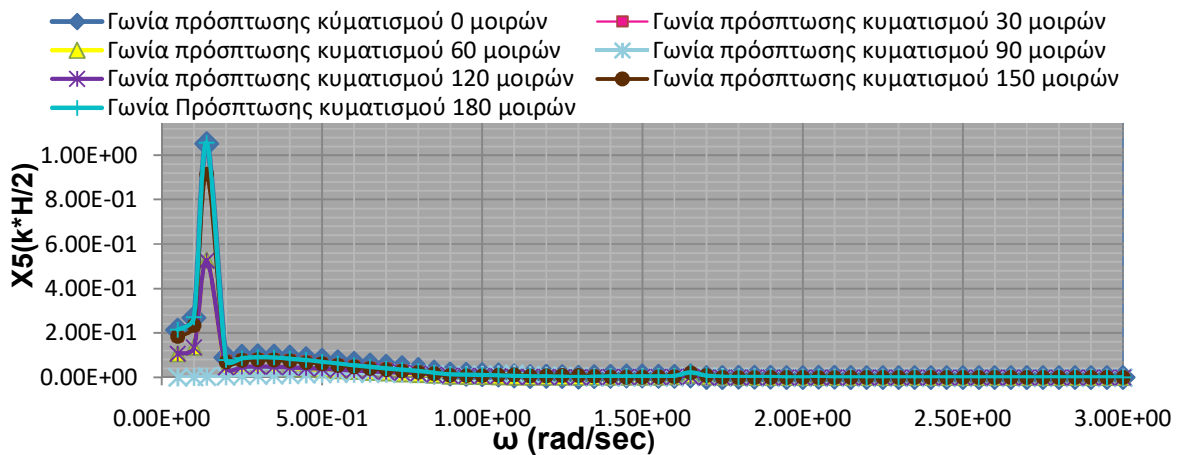
Διάγραμμα 6.121 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.122 : Ο αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

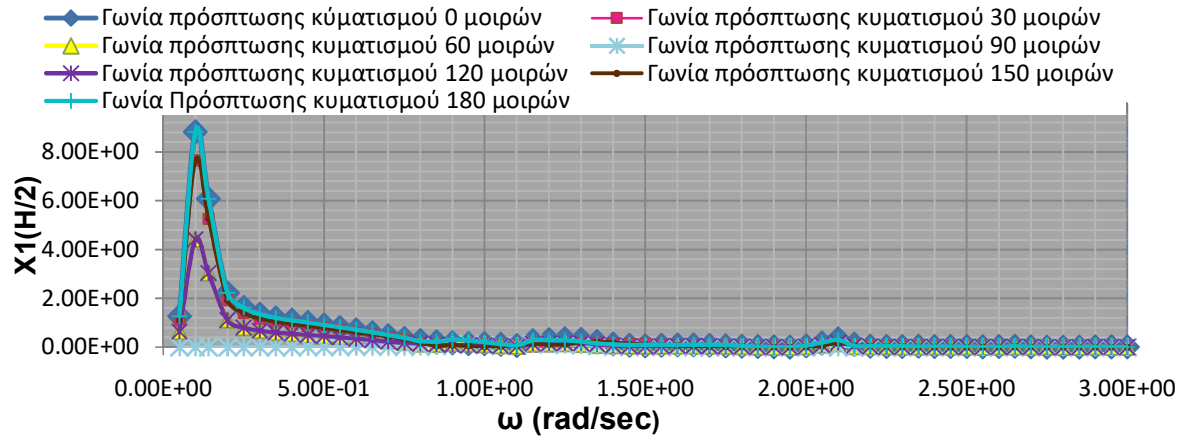


Διάγραμμα 6.123 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευτασμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

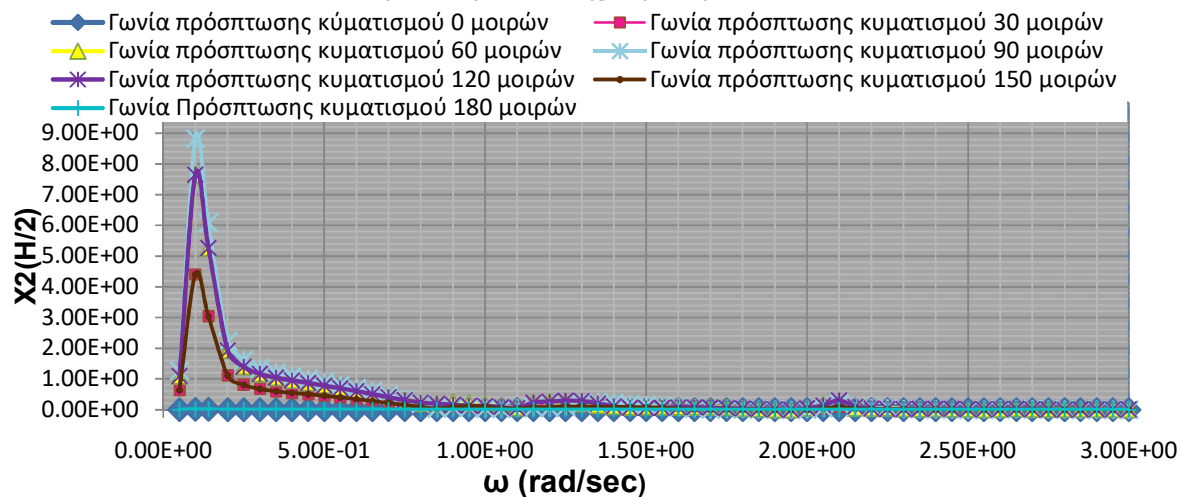


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

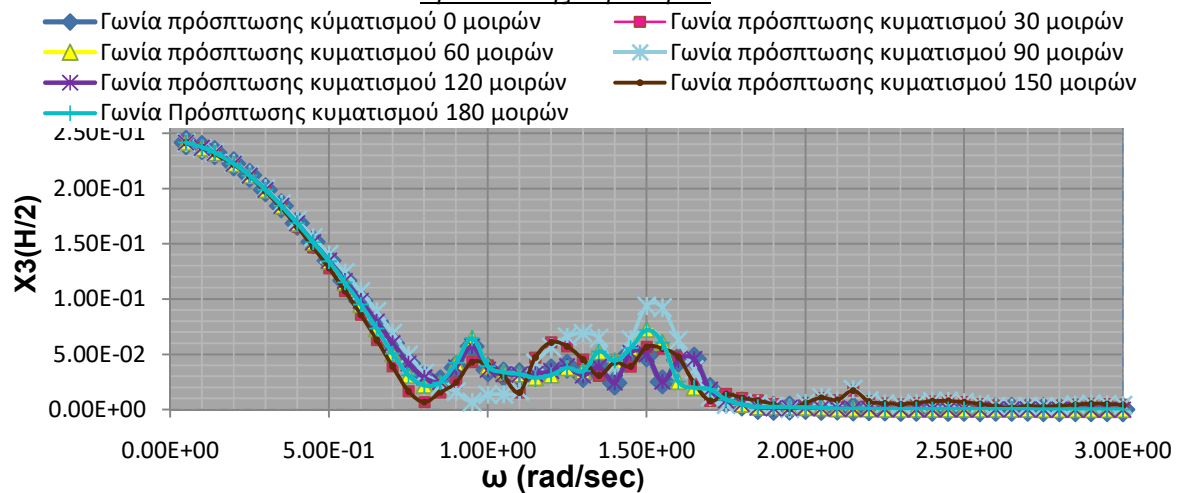
Διάγραμμα 6.124 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



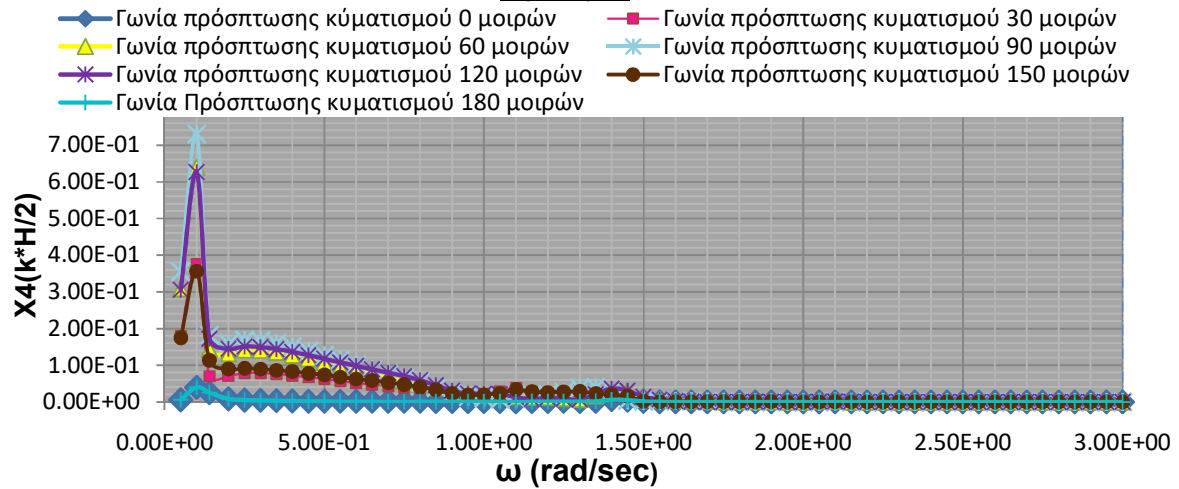
Διάγραμμα 6.125 : Η αδιαστατοποιημένη εγκάρσια οριζόντια μετατόπιση (sway) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



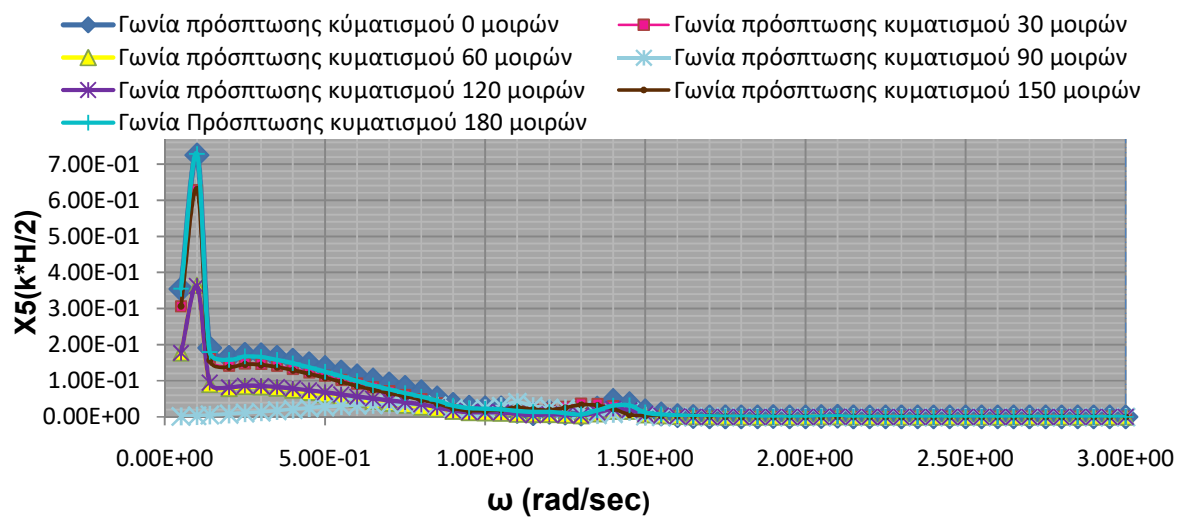
Διάγραμμα 6.126 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.127 :Ο Η αδιαστατοποιημένος διατοιχισμός (roll) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.128 :Ο αδιαστατοποιημένος προνευτασμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

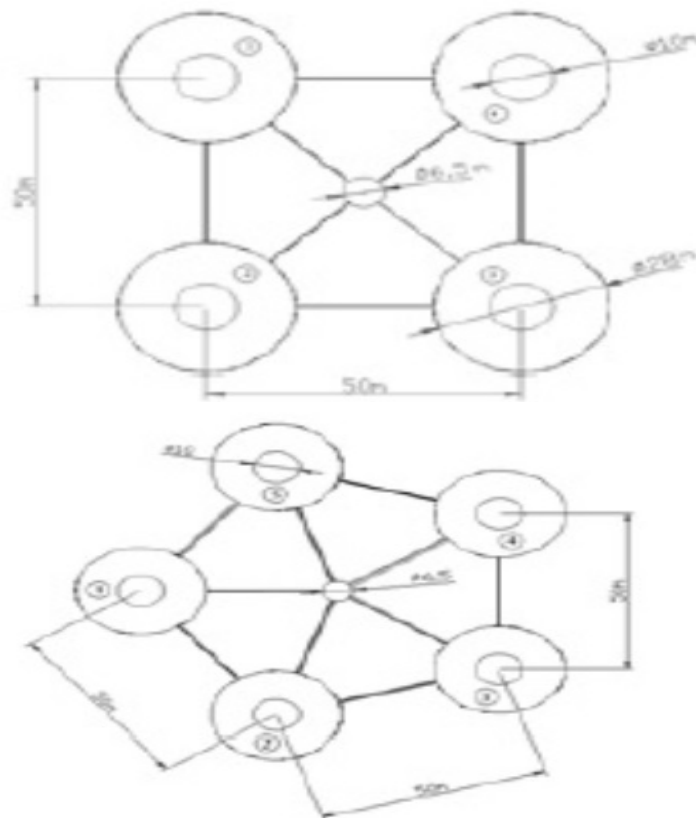


6.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΝΤΑΓΩΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΤΡΙΓΩΝΗ

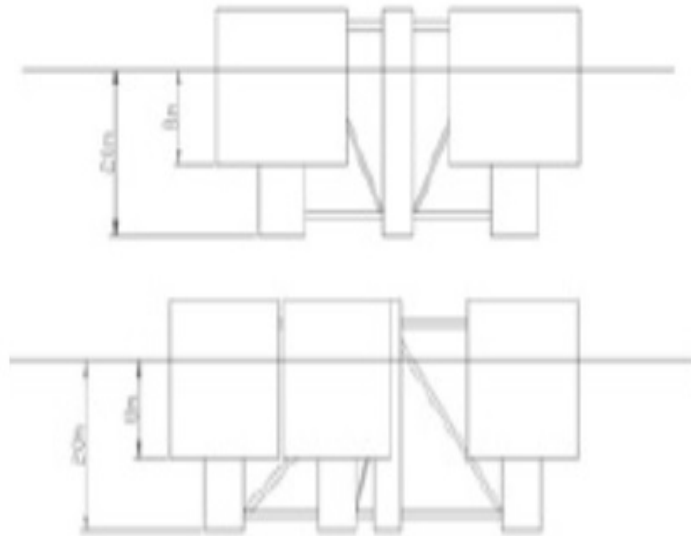
6.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΛΩΤΩΝ ΗΜΙΒΥΘΙΖΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στους παρακάτω πίνακες 6.3 και 6.4 δίδονται οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι που απεικονίζονται στα σχήματα 6.3 και 6.4 όπως επίσης και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών μαζί με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης. Η εκλογή των διαστάσεων έχει στηριχθεί στα παραπάνω περιπτώσεις όπου εξετάσαμε την διάταξη τρίγωνης κατασκευής. Στο παρών υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί σύγκριση της τρίγωνη, τετράγωνης και πεντάγωνης διάταξης.

Σχήμα 6.3 :Κάτοψη τετράγωνης και πεντάγωνης πλωτής ημιβυθιζόμενης κατασκευής



Εικόνα 6.4 : Πλάγια όψη τετράγωνης και πεντάγωνης πλωτής ημιβυθιζόμενης κατασκευής



Πίνακας 6.3 : Διαστάσεις του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου

ΩΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ (ΣΤΙΣ ΚΟΡΥΦΕΣ ΤΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΕΝΤΑΓΩΝΟΥ)	
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ
Εσωτερικός ανωστικός κύλινδρος (ακτίνα)	5 m
Βύθισμα εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	20 m
Εξωτερικός μανδύας (Εσωτ./Εξωτ. Ακτίνα)	14 m / 14.05 m
Βύθισμα εξωτερικού μανδύα	8 m
Διάκεντρος εσωτερικών ανωστικών κυλίνδρων	50 m
Ύψος εξάλων εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	12 m
Συνολικό ύψος εσωτερικού ανωστικού κυλίνδρου	32 m
Κεντρικός κύλινδρος στήριξης Α/Γ (ακτίνα)	3.25 m
Βύθισμα κεντρικού κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ	20 m
Διάμετρος κυλινδρικών στοιχείων δικτυώματος	1.6 m
Βύθισμα σχεδίασης	20 m
Ύψος εξάλων κεντρικού κυλίνδρου στήριξης Α/Γ (απόσταση βάσης του πύργου της Α/Γ από την ΕΕ)	10 m
Διάμετρος βραχιόνων σύνδεσης	1.6 m

Πίνακας 6.4 :Βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών μαζί με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης

ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΝΤΑΓΩΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ		
	ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ	ΠΕΝΤΑΓΩΝΗ
Μάζα κάθε συσκευής	1646.2 tn	1646.2 tn
Μάζα κεντρικού κυλίνδρου στήριξης της Α/Γ	600.0 tn	600.0 tn
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 1 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(-25.00, -25.00)	(-42.24, 0)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 2 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(25.00, 25.00)	(-13.24, -40.00)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 3 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(25.00, -25.00)	(34.75, -25.00)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 4 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	(-25.00, 25.00)	(-34.75, 25.00)
Απόσταση κέντρου μάζας συσκευής Νο. 5 από το κέντρο μάζας της κατασκευής(x, y)	-	(-13.24, 40.00)
Κέντρο μάζας της πλωτής κατασκευής (κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια)	4.05 m	4.05 m
Μάζα πλωτής κατασκευής με ενδεχόμενο έρμα	2.8326×10^6 kg	3.4816×10^6 kg
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο roll γύρω από το ΚΜ	2.21×10^9 kg·m ²	4.03×10^9 kg·m ²
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο pitch γύρω από το ΚΜ	2.21×10^9 kg·m ²	3.94×10^9 kg·m ²
Μαζική ροπή αδράνειας πλατφόρμας στο yaw γύρω από το ΚΜ	3.97×10^9 kg·m ²	7.15×10^9 kg·m ²
Προένταση κάθε τένοντα	10,870 kN	10,800 kN
Συντελεστής επαναφοράς K_{xx} , K_{yy} κάθε τένοντα (βάθος νερού 120 m)	108 kN/m	108 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{xx} , K_{yy} κάθε τένοντα (βάθος νερού 200 m)	60.39 kN/m	60 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{zz} κάθε τένοντα (βάθος νερού 120 m)	3,722 kN/m	3,722 kN/m
Συντελεστής επαναφοράς K_{zz} κάθε τένοντα (βάθος νερού 200 m)	2,067 kN/m	2,067 kN/m

6.2.2 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΓΩΝΗΣ, ΤΕΤΡΑΓΩΝΗΣ ΚΑΙ ΠΕΝΤΑΓΩΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στο παρών υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος HAMVAB σε μορφή γραφικών παραστάσεων, ώστε να συγκριθούν θεωρητικά, συστοιχίες κάθετων αξονομετρικών συσκευών σε τρίγωνη, τετράγωνη και πεντάγωνη διάταξη. Μελετήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις αφού πρώτα τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι αλλά και τα βασικά αδρανειακά χαρακτηριστικά των αρχείων εισαγωγής(inputs) του προγράμματος των υπό μελέτη πλωτών κατασκευών για πεδία συχνοτήτων από 0-3 rad/sec:

1) Αγκυρωμένη κατασκευή χωρίς A/Γ

ii) Βάθος νερού (D=120 m)

- Τετράγωνη διάταξη
- Πεντάγωνη διάταξη

ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Τετράγωνη διάταξη
- Πεντάγωνη διάταξη

2) Αγκυρωμένη κατασκευή με A/Γ

i) Βάθος νερού (D=120 m)

- Τετράγωνη διάταξη
- Πεντάγωνη διάταξη

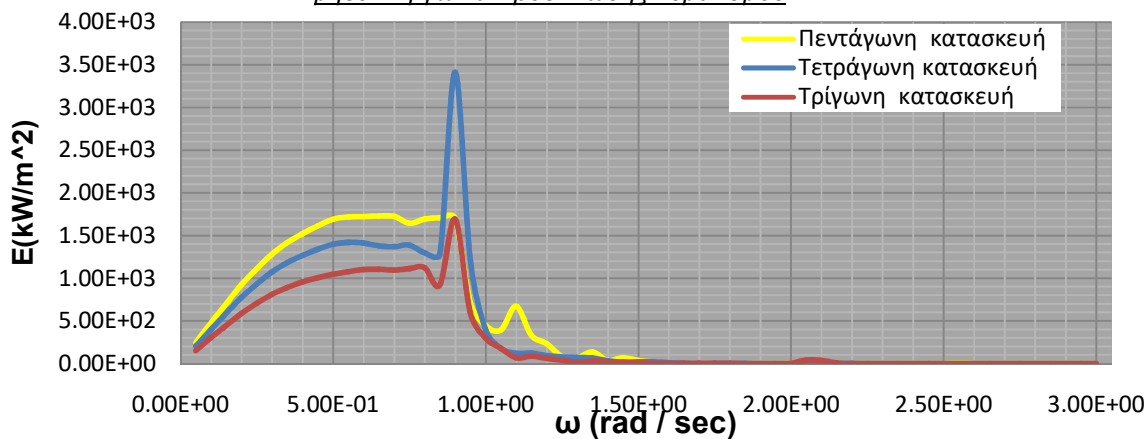
ii) Βάθος νερού (D=200 m)

- Τετράγωνη διάταξη
- Πεντάγωνη διάταξη

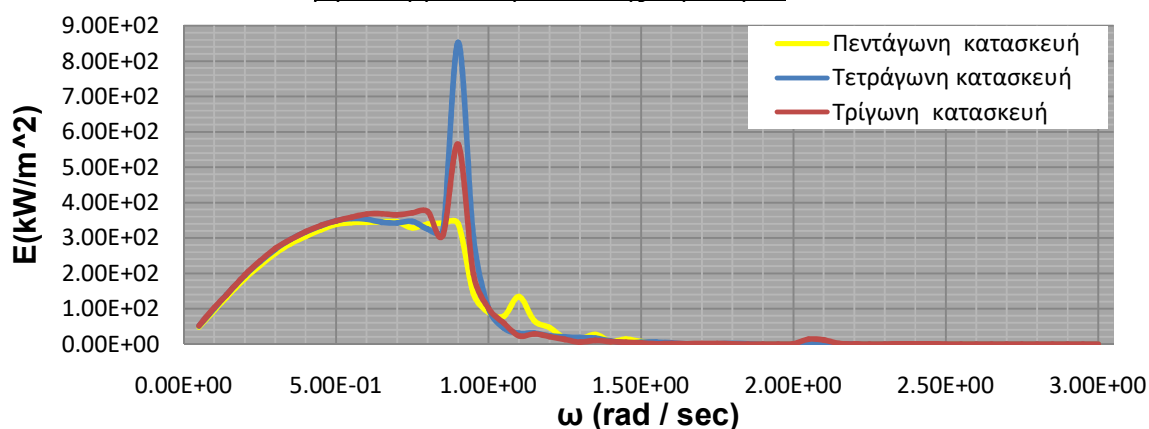
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΧΩΡΙΣ Α/Γ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

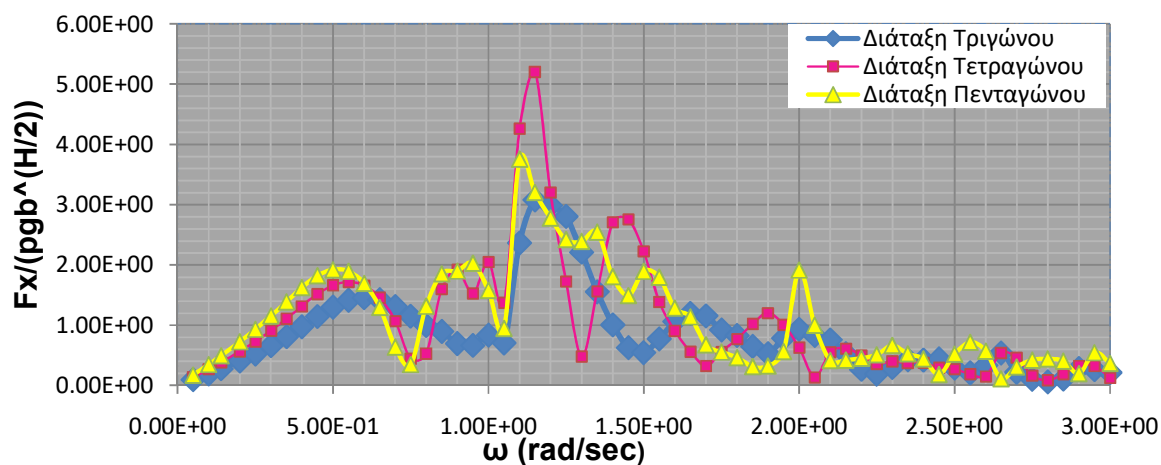
Διάγραμμα 6.129 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



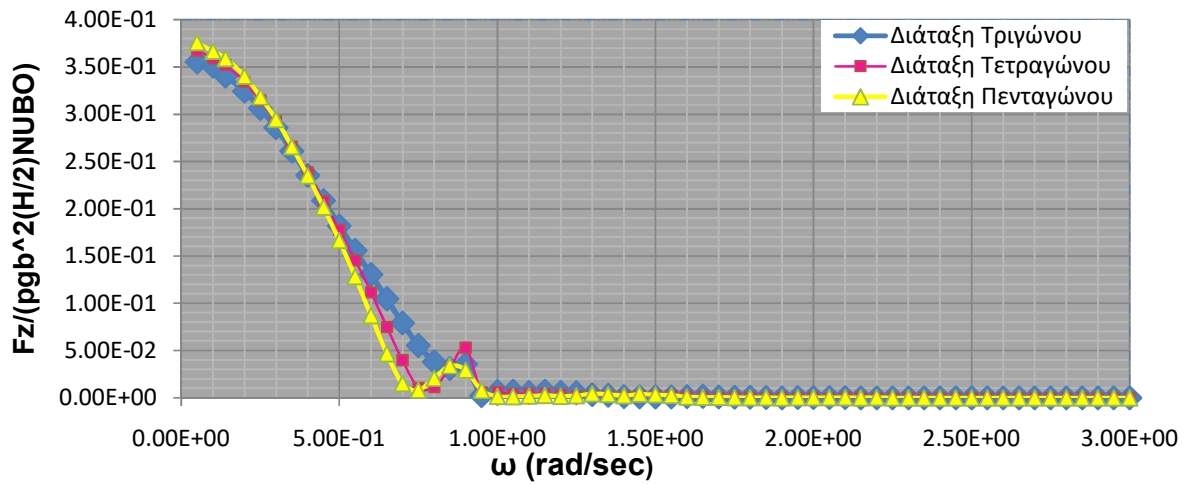
Διάγραμμα 6.130 : Μέση απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



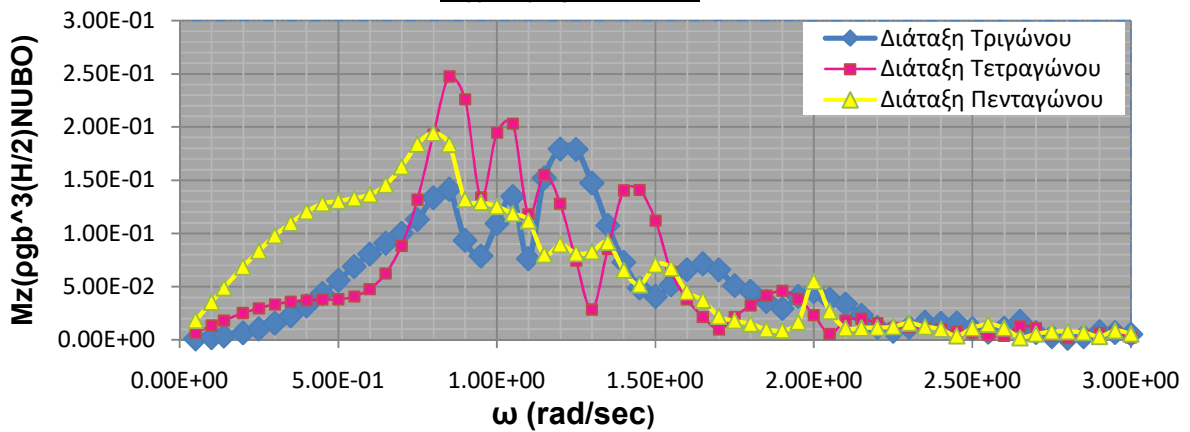
Διάγραμμα 6.131 : Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



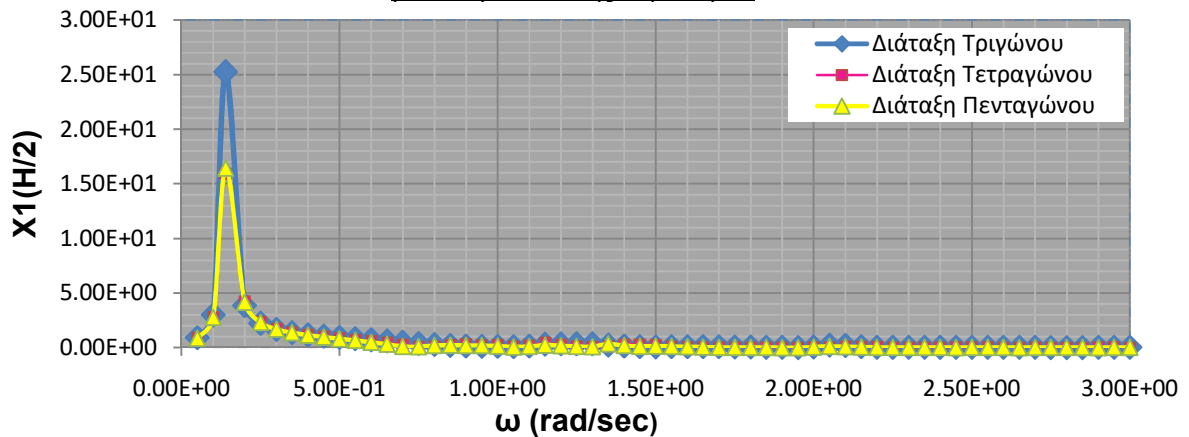
Διάγραμμα 6.132 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



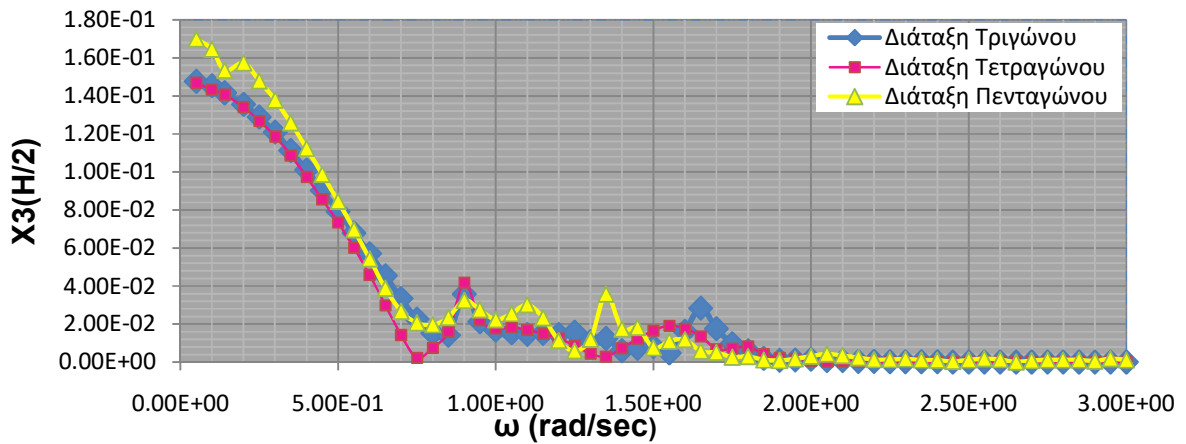
Διάγραμμα 6.133 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



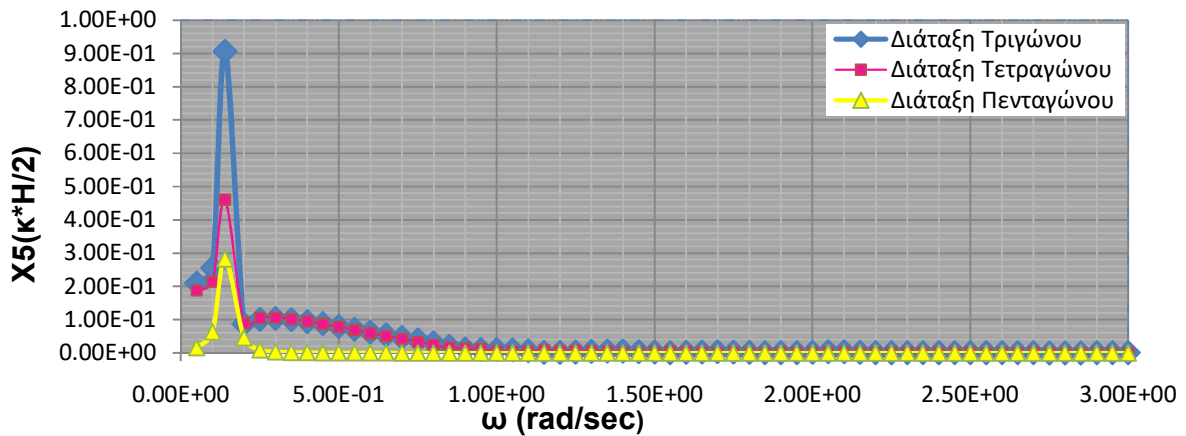
Διάγραμμα 6.134 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.135 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

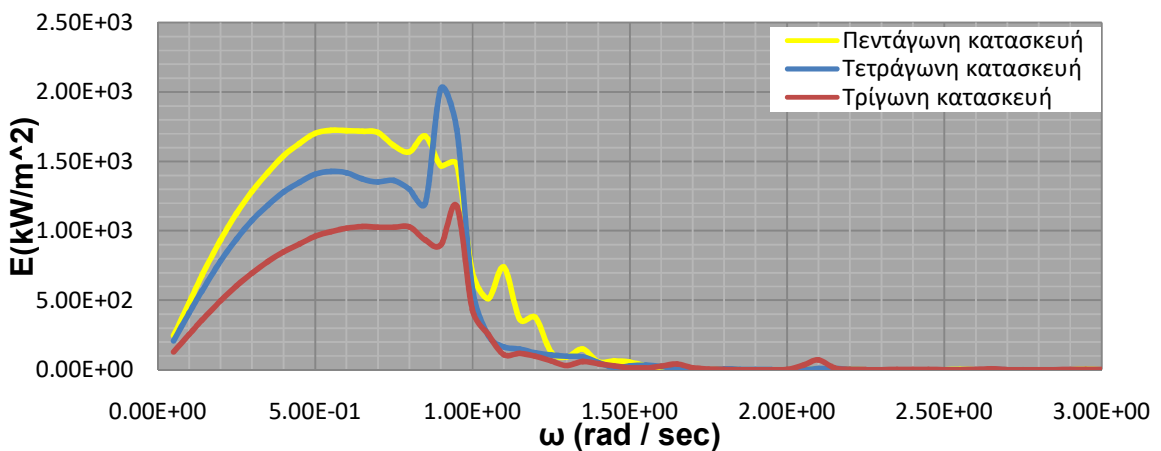


Διάγραμμα 6.136 :Ο αδιαστατοποιημένος προνευτισμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

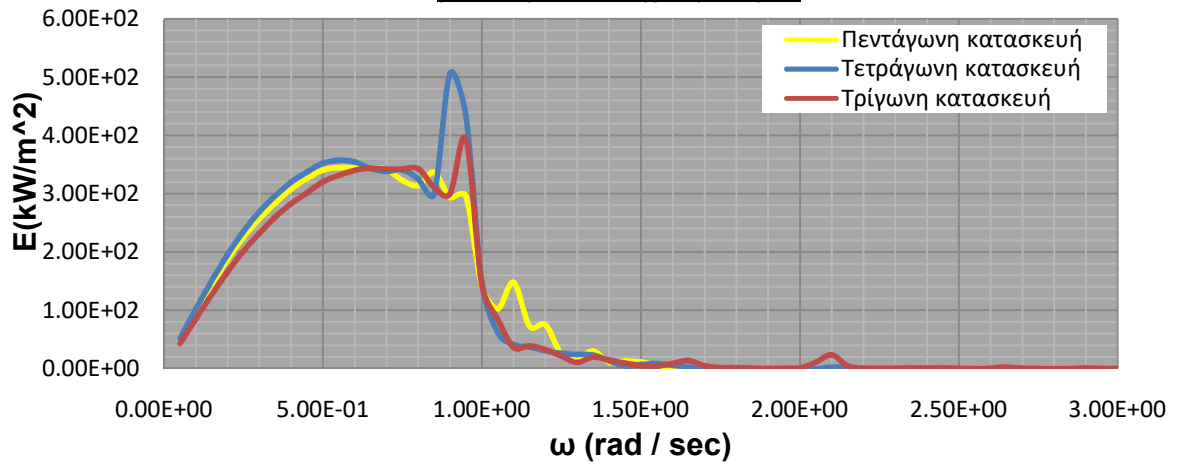


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

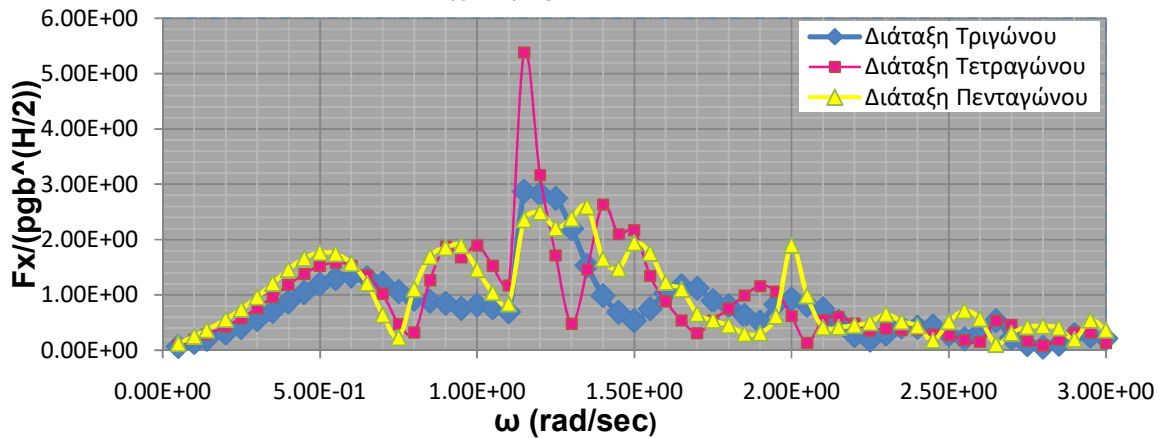
Διάγραμμα 6.137 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



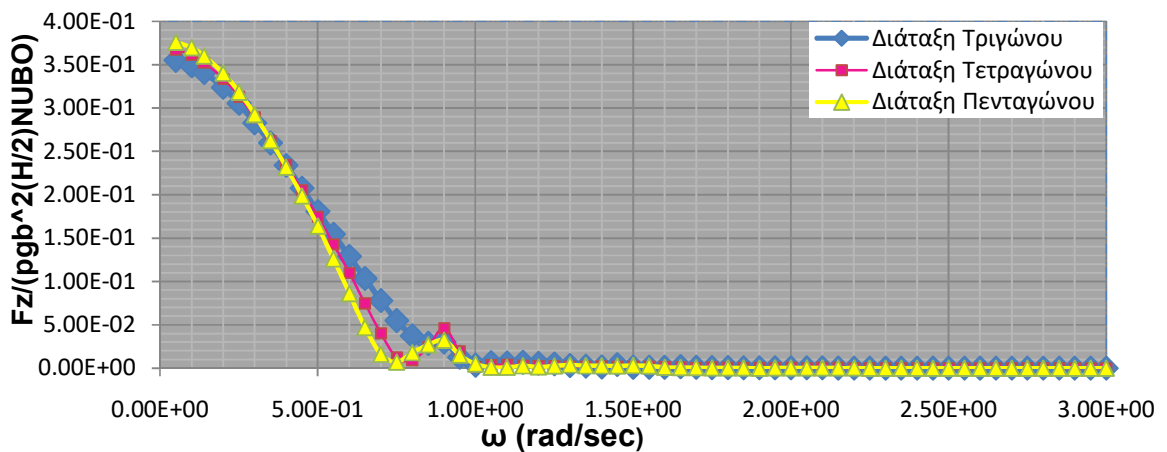
Διάγραμμα 6.138 : Μέση απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



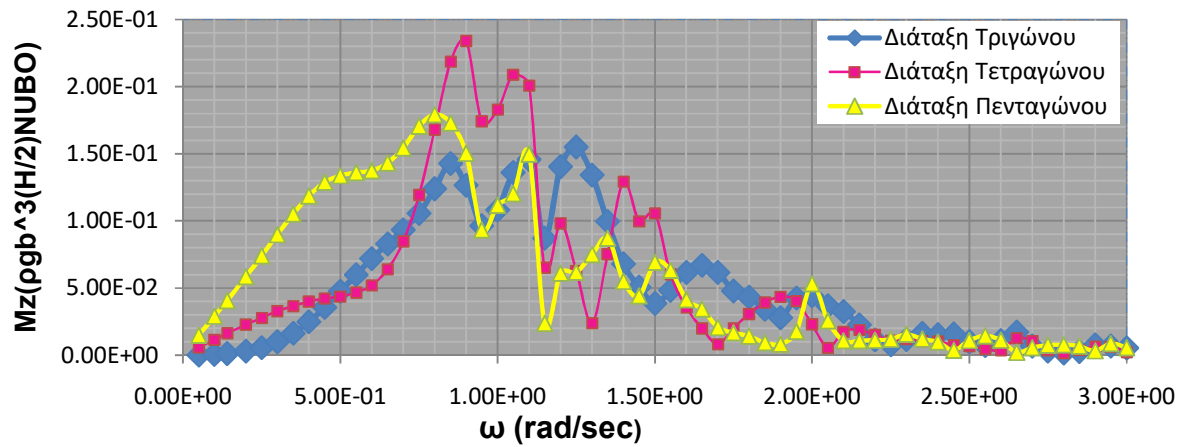
Διάγραμμα 6.139 : Η αδιαστατοποιημένη οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



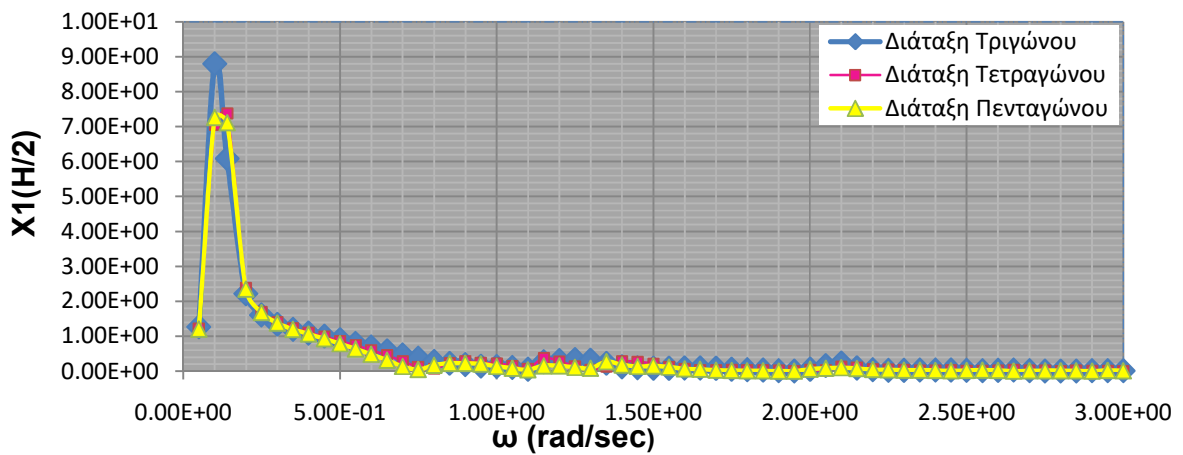
Διάγραμμα 6.140 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



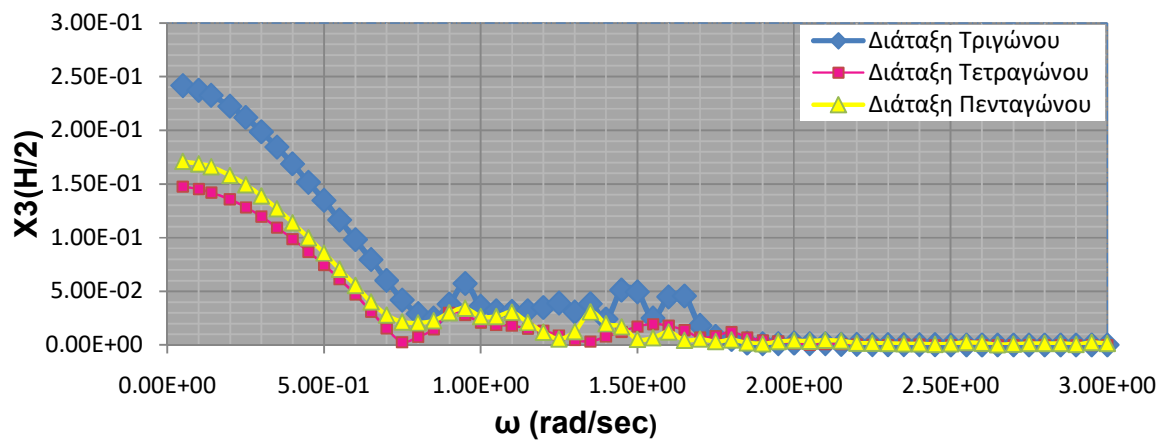
Διάγραμμα 6.141 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ροπή διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec



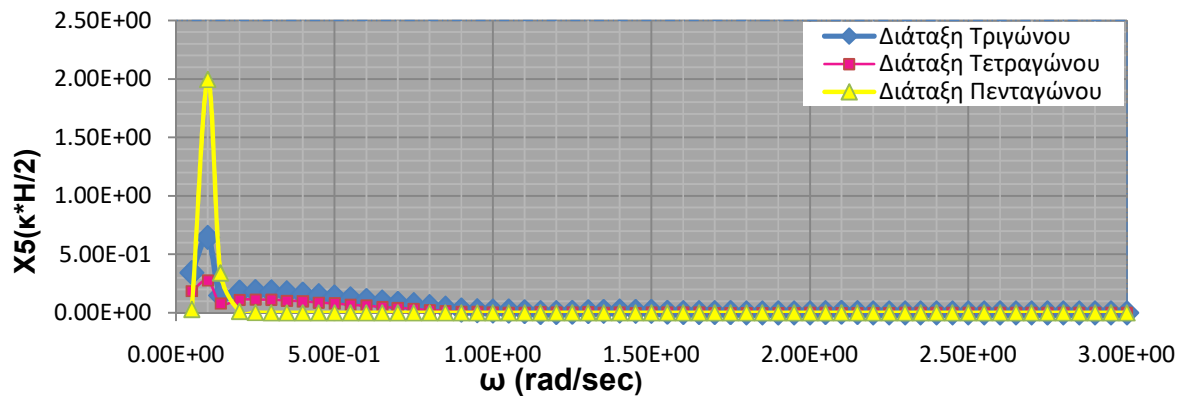
Διάγραμμα 6.142 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.143 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



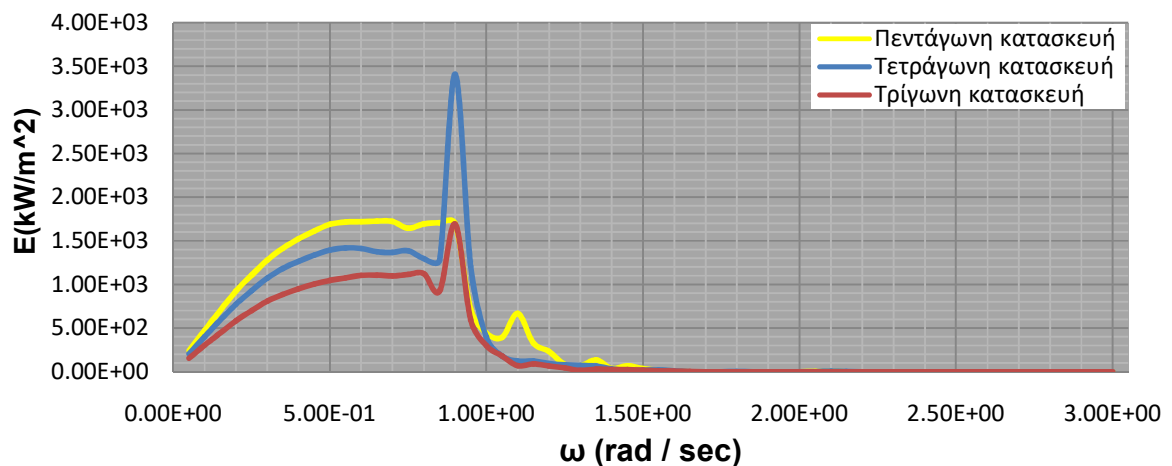
Διάγραμμα 6.144 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευσμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



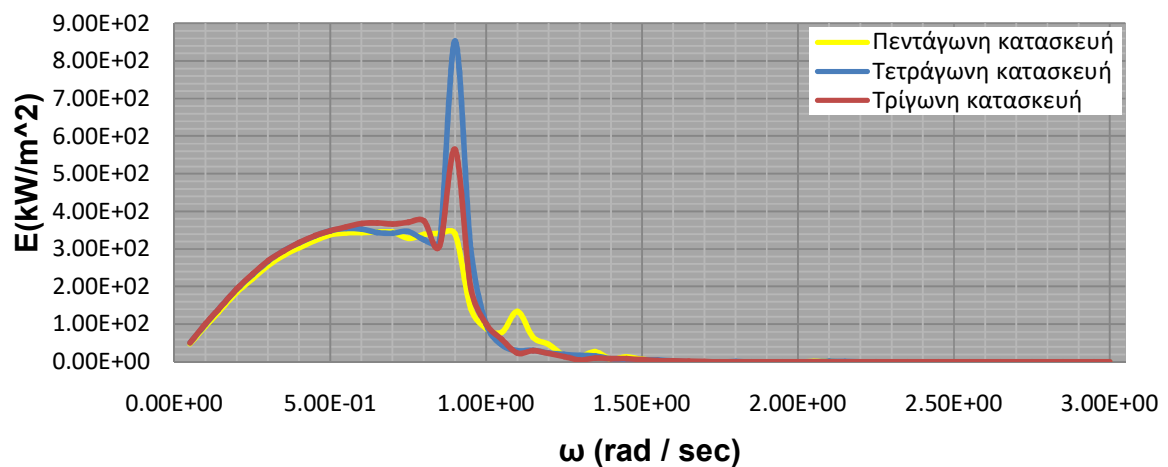
ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ Α/Γ

ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=120 m

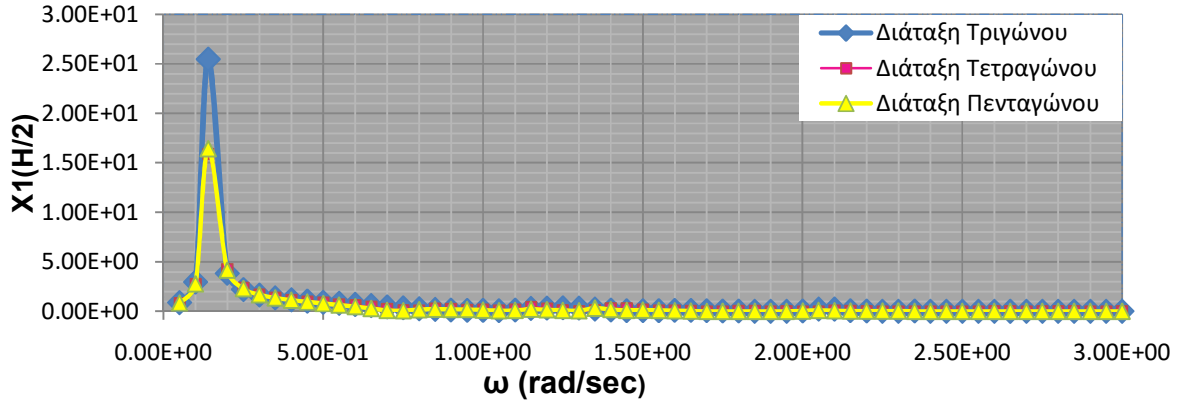
Διάγραμμα 6.145 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



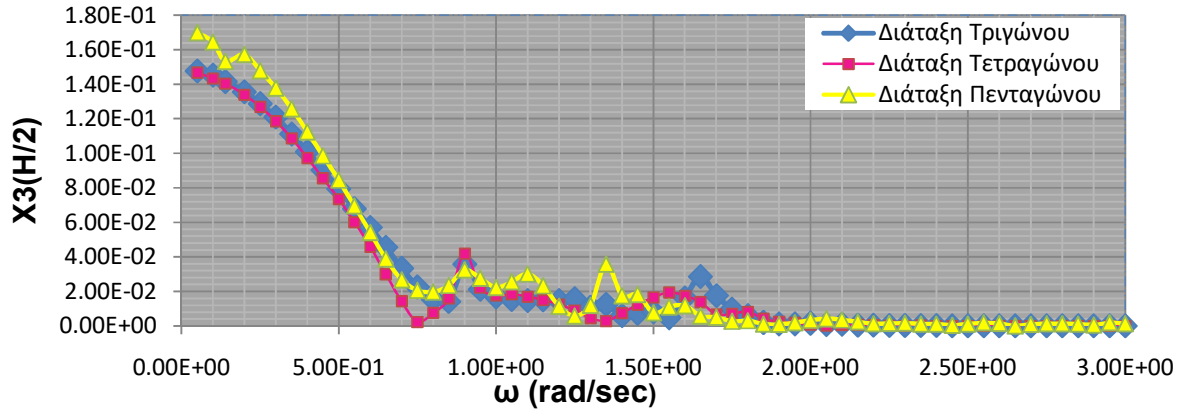
Διάγραμμα 6.146 : Μέση απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



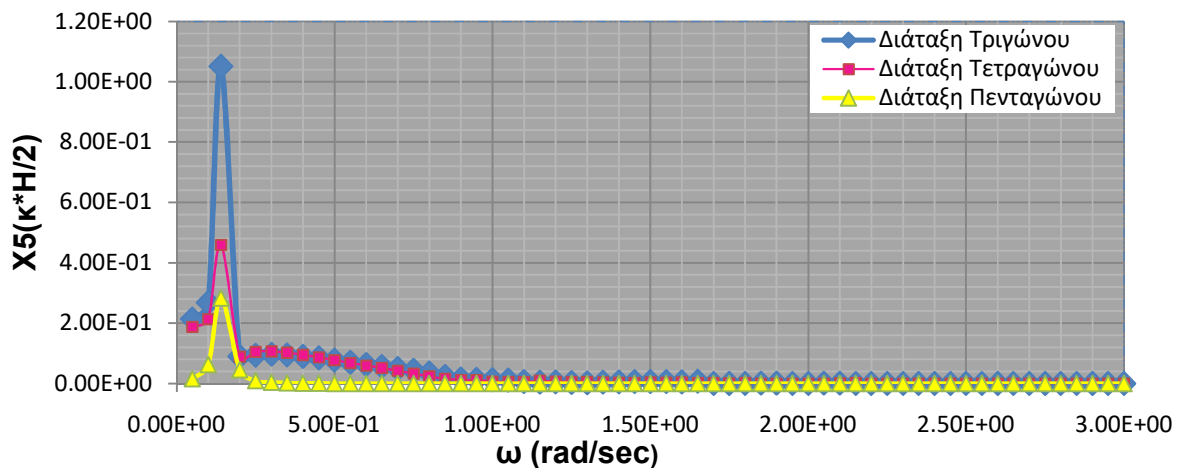
Διάγραμμα 6.147 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.148 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

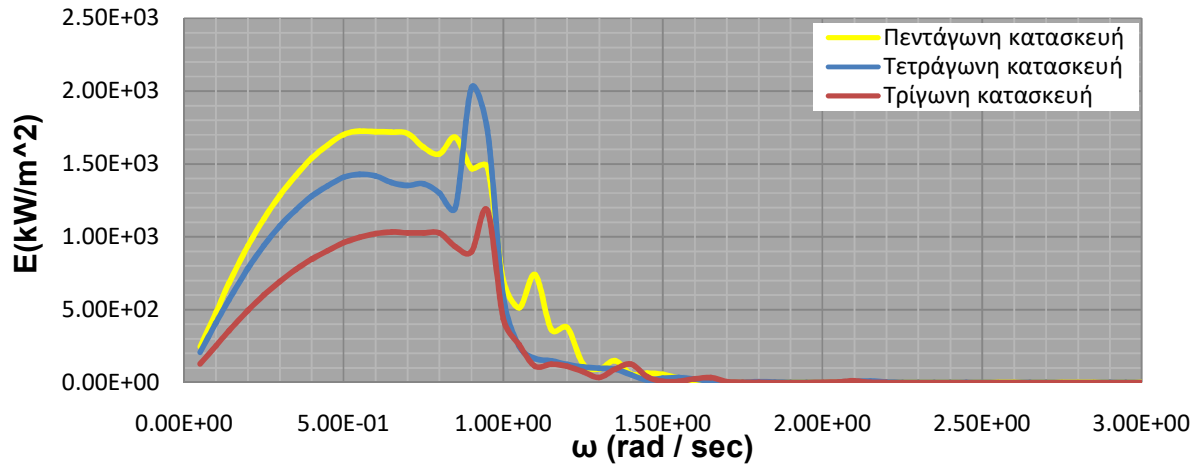


Διάγραμμα 6.149 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευτασμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

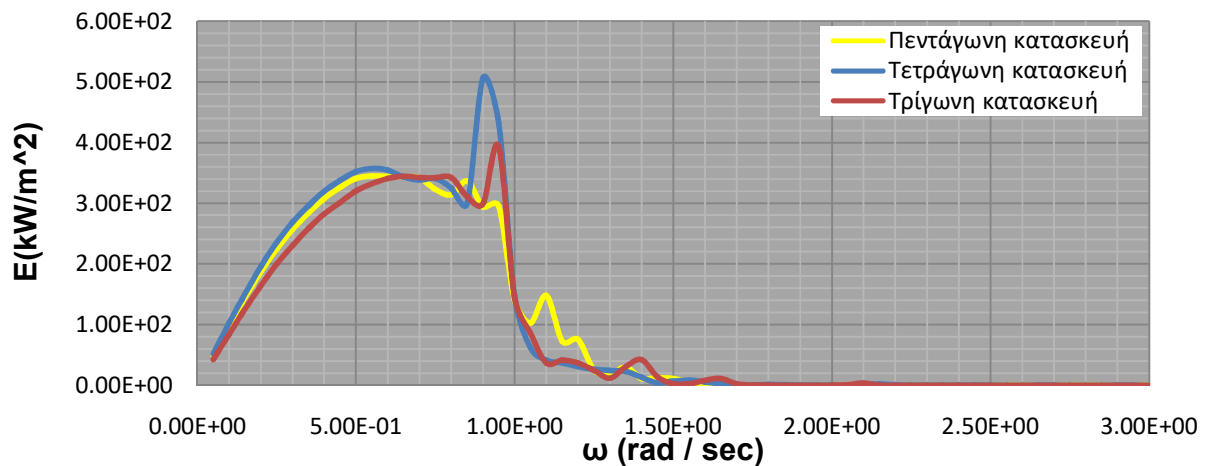


ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ D=200 m

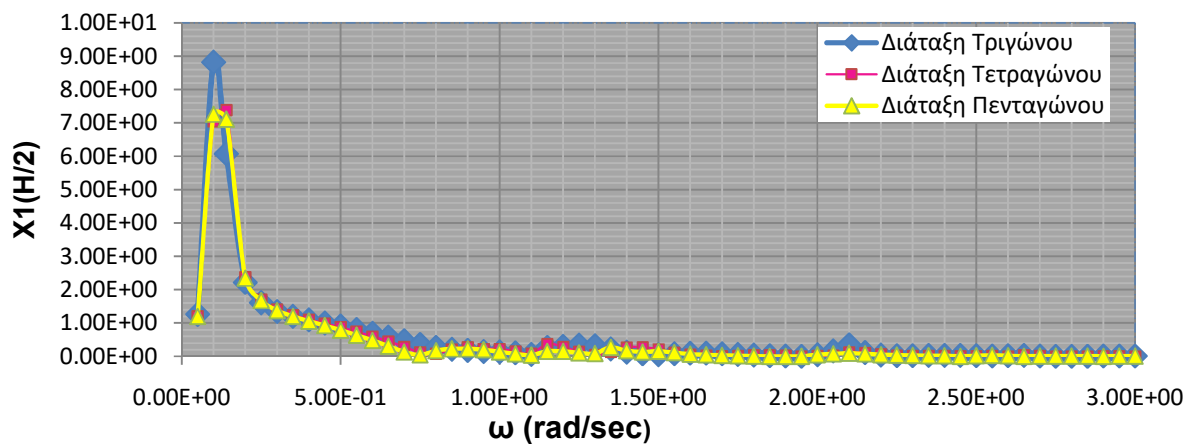
Διάγραμμα 6.150 : Συνολική απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



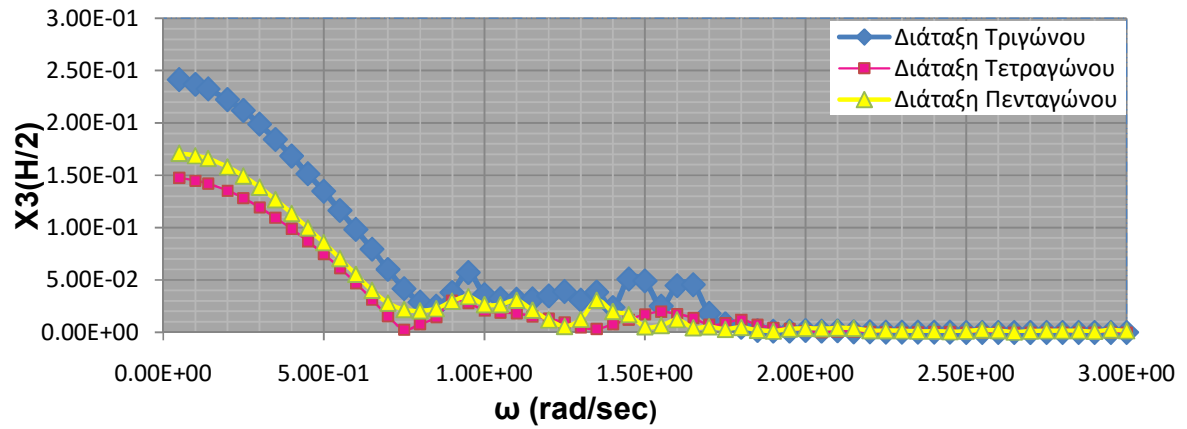
Διάγραμμα 6.151 : Μέση απορροφούμενη κυματική ισχύς από τις συσκευές της διάταξης για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



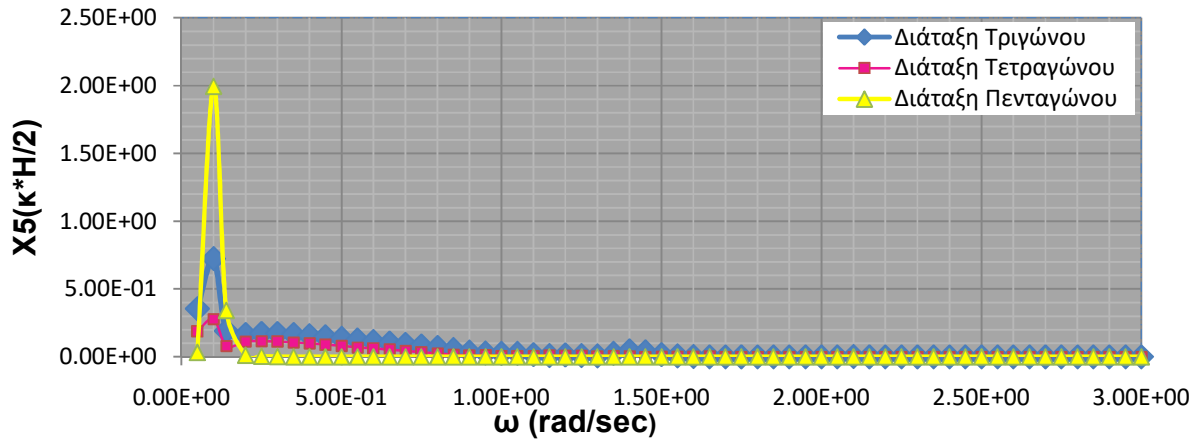
Διάγραμμα 6.152 : Η αδιαστατοποιημένη διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.153 : Η αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη μετατόπιση (heave) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



Διάγραμμα 6.154 : Ο αδιαστατοποιημένος προνευτισμός (pitch) για μηδενική γωνία πρόσπτωσης κυματισμού



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης των θεωρητικών δοκιμών μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής:

- Η ταχύτητα ανέμου δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μετατοπίσεις και περιστροφές της διάταξης(Σχ. 6.61-6.72).
- Οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x (Διαγρ. 6.73, 6.96) και οι εγκάρσιες δυνάμεις διέγερσης F_y (Διαγρ. 6.74, 6.97) παρουσιάζουν ομοιότητα για τα 0° και 180° , 30° και 150° , 60° και 120° ζεύγη γωνιών πρόσπτωσης του κυματισμού. Οι κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης F_z (Διαγρ.6.75, 6.98) τείνουν στο μηδέν για μεγάλες τιμές της συχνότητας ω , ενώ μηδενίζονται στη συχνότητα μηδενισμού (cancellation frequency).
- Οι οριζόντιες ροπές διέγερσης M_x (Διαγρ. 6.76, 6.99), οι εγκάρσιες ροπές διέγερσης M_y (Διαγρ. 6.77, 6.100) και οι κατακόρυφες ροπές διέγερσης M_z (Διαγρ. 6.78, 6.101), παρουσιάζουν ομοιότητα για τα ίδια ζεύγη γωνιών, δηλαδή για τις 0° και 180° , 30° και 150° και 60° και 120° . Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο μιας και η ροπή είναι το γινόμενο της δύναμης επί έναν μοχλοβραχίονα, επομένως είναι λογικό να παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τις δυνάμεις διέγερσης.
- Ο διατοιχισμός (roll) (Διαγρ. 6.82, 6.105, 6.122, 6.127) και ο προνευνασμός (pitch) (Διαγρ. 6.83, 6.106, 6.123, 6.128) παρουσιάζουν ομοιότητα για τα ζεύγη γωνιών 0° και 180° , 30° και 150° , 60° και 120° . Ο διατοιχισμός για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 0° και 180° παρουσιάζει ομοιότητα με τον προνευνασμό για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 90° . Επίσης ο διατοιχισμός για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 30° και 150° παρουσιάζει ομοιότητα με τον προνευνασμό για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 60° και 120° και αντίστοιχα ο διατοιχισμός για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 60° και 120° με τον προνευνασμό για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού με τις 30° ή 150° . Τέλος, ο διατοιχισμός για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 90° παρουσιάζει ομοιότητα με τον προνευνασμό για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 0° και 180° .

- Για την κατακόρυφη μετατόπιση (heave) (Διαγρ. 6.81, 6.104, 6.121, 6.126) διαπιστώνουμε ότι είναι όμοια για κάθε γωνία πρόσπτωσης κυματισμού, πράγμα που ήταν αναμενόμενο καθώς η κατεύθυνση του κυματισμού είναι πάντα στο κατά το οριζόντιο και εγκάρσιο επίπεδο.
- Λόγω συμμετρίας της κατασκευής ως προς το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο, οι υδροδυναμικές μάζες $A_{23}=A_{43}=A_{63}=A_{32}=A_{34}=A_{36}=0$. Το ίδιο και οι αντίστοιχες υδροδυναμικές αποσβέσεις. Επίσης επιβεβαιώνεται η συμμετρία των μητρών $[a_{ij}]$ και $[b_{ij}]$ μιας και οι υδροδυναμικές μάζες A_{24} (Διαγρ. 6.90, 6.115) και A_{15} (Διαγρ. 6.88, 6.113) και οι υδροδυναμικές αποσβέσεις B_{24} (Διαγρ. 6.91, 6.116) και B_{15} (Διαγρ. 6.89, 6.114) είναι ίδιες με τις συμμετρικές τους.
- Με την προσθήκη της ανεμογεννήτριας η διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge), η οριζόντια μετατόπιση (sway) και η κατακόρυφη μετατόπιση (heave) της κατασκευής δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλλαγές (Διαγρ. 6.119, 6.120, 6.121, 6.124, 6.125, 6.126) και είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες χωρίς την εγκατάσταση ανεμογεννήτριας. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) είναι περίπου ίδια με η οριζόντια μετατόπιση (sway) για τις εξής γωνίες: οι 0° σε surge με τις 90° σε sway, οι 30° σε surge με τις 60° σε sway και αντίστοιχα οι 60° σε surge με τις 30° σε sway και οι 90° σε surge με τις 0° σε sway.
- Όταν η κατασκευή αγκυρώνεται τότε είναι προφανές ότι για την διαμήκη οριζόντια μετατόπιση (surge) και την οριζόντια μετατόπιση (sway), έχουμε συντονισμό για πολύ χαμηλές συχνότητες (περίπου $0,05 \text{ rad/sec}$). Οι δύο αυτές κινήσεις παρουσιάζουν επίσης ομοιότητα για τα ζεύγη 0° (surge) με 90° (sway), 30° (surge) με 60° (sway) και αντίστροφα, με μόνη διαφορά ότι στην κίνηση surge οι κορυφές που σχηματίζονται στη συχνότητα συντονισμού είναι λίγο μεγαλύτερες (Διαγρ. 6.119, 6.120, 6.124, 6.125).
- Τα μέγιστα πλάτη της διαμήκου οριζόντιας μετατόπισης (surge), της οριζόντιας μετατόπισης (sway), της κατακόρυφη μετατόπιση (heave), του διατοιχισμού (roll) και του προνευτασμού (pitch) εντοπίζονται όταν οι τιμές της συχνότητας απόκρισης της κατασκευής τείνει στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

- Η διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες, καθώς τόσο ο άνεμος όσο και το κύμα προσπίπτουν στην κατασκευή κατά αυτή τη διεύθυνση.
- Σημαντική επίδραση υπάρχει και κατά την pitch περιστροφική απόκριση, για τους ίδιους λόγους με surge, κυρίως εκεί που μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα απόκρισης τείνει στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Στο φάσμα των υπόλοιπων συχνοτήτων διατηρείται σε χαμηλές τιμές η περιστροφή αυτή, λόγω του περιορισμού της από τους προεντεταμένους τένοντες.
- Η κατακόρυφη μετατόπιση (heave) λογίζεται ως πολύ μικρή και ειδικά εν συγκρίσει με την κίνηση κατά surge. Αυτό οφείλεται στην ακαμψία των τενόντων (TLP) κατά αυτή την διεύθυνση που αποσβένουν την επίδραση των φορτίσεων.
- Η κατακόρυφη μετατόπιση (heave) στα 120m βάθους αγκύρωσης είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή στα 200m, λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας k_{zz} στο πρώτο. Ωστόσο οι άλλες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες για το βάθος αγκύρωσης στα 120m, κάτι που οφείλεται στην αποφόρτιση της κατασκευής μέσω των υπόλοιπων μετακινήσεων αφού κατά heave υπάρχει μεγαλύτερη ακαμψία.
- Οι μετακινήσεις υπό την επίδραση της ταχύτητας που επέφερε τις μεγαλύτερες δυνάμεις στο στοιχείο της ανεμογεννήτριας, δηλαδή της ταχύτητας ανέμου 11.4m/s, ήταν ιδιαίτερα επηρεασμένες και ειδικά κατά τη sway διεύθυνση είναι σχεδόν διπλάσιο το πλάτος απόκρισης σε σχέση με το δεύτερο υπό την επίδραση των άλλων ταχυτήτων.
- Η μετακινησιακή συμπεριφορά της κατασκευής παρουσιάζει ομοιομορφία για διαφορετικές ταχύτητες
- Σε όλες τις καταστάσεις της τετράγωνης κατασκευής, η συνολική απορροφούμενη κυματική ενέργεια της διάταξης (Διαγρ. 6.129, 6.137, 6.145, 6.150) όπως επίσης και η μέση κυματική ενέργεια της διάταξης (Διαγρ. 6.130, 6.138, 6.146, 6.151), παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέτρο κοντά στο πεδίο συχνοτήτων των κυματισμών των Ελληνικών χωρικών υδάτων (περίπου ίση $\omega=1$ rad/sec). Επομένως είναι αντιληπτό πως η τετράγωνη κατασκευή είναι αποδοτικότερη σε σχέση με την τρίγωνη και την πεντάγωνη.

- Το μέτρο της οριζόντιας δύναμης διέγερσης F_x (Διαγρ. 6.131, 6.139) της τετράγωνης κατασκευής είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της τρίγωνης και τετράγωνης κατασκευής.
- Η διαμήκης οριζόντια μετατόπιση (surge) της τρίγωνης, της τετράγωνης αλλά και τις πεντάγωνης κατασκευής παρουσιάζουν ομοιότητα.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Όσον αφορά στην περαιτέρω μελέτη της υδροδυναμικής ανάλυσης πλωτών κατασκευών υπό την επίδραση κυματισμών, αλλά πιο συγκεκριμένα για τις τρίγωνες, τετράγωνες αλλά και πεντάγωνες ημιβυθισμένες κατασκευές προορισμένες να πλέουν σε βαθιά νερά και να φέρουν ανεμογεννήτρια, το πεδίο είναι ευρύ. Ακολουθούν ενδεικτικά ορισμένες προτάσεις:

- Για τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα και αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να γίνει αναλυτικότερη μελέτη του δευτεροτάξιου προβλήματος.
- Διεξαγωγή πειραμάτων για να επιβεβαιώσουν ή να διαψεύσουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα.
- Επιλογή ανεμογεννήτριας μεγαλύτερης ισχύος.
- Χρήση κλάδων αγκύρωσης με διαφορετική προένταση ή/και υλικού
- Μελέτη και εφαρμογή αεροστροβίλου υψηλής απόδοσης
- Τεχνοοικονομική μελέτη ώστε να αποδειχτεί εάν και κατά πόσο είναι οικονομικά βιώσιμες οι υπό εξέταση πλωτές κατασκευές

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ

- [1] https://el.wikipedia.org/wiki/Πηγή_ενέργειας/ **Last visit:** 15.02.2015
- [2] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges22.html/> **Last visit:** 15.02.2015
- [3] <https://sites.google.com/site/energeiakelyses/me-ananeosimes-peges-energeias/gaianthrakes-petrelaio> **Last visit:** 20.02.2015
- [4] http://users.sch.gr/omixara/eco_energy/simbatikes/karbouno.htm **Last visit:** 20.02.2015
- [5] <https://el.wikipedia.org/wiki/Πετρέλαιο/> **Last visit:** 16.02.2015
- [6] https://el.wikipedia.org/wiki/Φυσικό_αέριο **Last visit:** 20.02.2015
- [7] <https://sites.google.com/site/energeiakelyses/me-ananeosimes-peges-energeias/physiko-aerio-pyrenike-energeia/> **Last visit:** 01.03.2015
- [8] Παπαδόπουλος Μ. Π., **ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**, εκδόσεις ΕΜΠ, 1-2, 2-6, Αθήνα, 1997.
- [9] http://climate.wwf.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=29&Itemid=93/ **Last visit:** 30.11.2014
- [10] http://landwaterwind.blogspot.com/2011_01_01_archive.html **Last visit:** 30.11.2014
- [11] <http://www.allaboutenergy.gr/AiolikiEnergeia.html/> **Last visit:** 3.12.2014
- [12] <https://sites.google.com/site/renewableenergyaspate/aiolike-energeia/> **Last visit:** 3.12.2014
- [13] <http://www.power-technology.com/features/feature-biggest-wind-farms-in-the-world-texas/feature-biggest-wind-farms-in-the-world-texas-1.html/> **Last visit:** 3.12.2014
- [14] Αλέξανδρος Σ.Αλεξάκης, **Ηλιακή ενέργεια**, εκδ Σιδέρη Μιχάλη, Αθήνα, 2003.
- [15] http://users.sch.gr/imirinakis/hydraulic_energy.htm/ **Last visit:** 2.3.2015
- [16] <https://water.usgs.gov/edu/hybiggest.html/> **Last visit:** 2.3.2015
- [17] <http://hellasnrgr.gr/el/content/energeia-kymaton/> **Last visit:** 6.3.2015
- [18] Καλημέρης, Λιάκος, **Ενέργεια από Κύματα**, Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Ι του τμ. ΗΜΜΥ ΑΠΘ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ντοκόπουλου και τη συνεπικουρία των υπ. Δρ κκ. Νταγκούμα Αθ., Μαρινόπουλο Αν., Θεσσαλονίκη, 2005.
- [19] Ευθυμίου, Καραγιαννάκης, **Ενέργεια από Κύματα**, Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Ι του τμ. ΗΜΜΥ ΑΠΘ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ντοκόπουλου και τη συνεπικουρία των υπ. Δρ κκ. Νταγκούμα Αθ., Μαρινόπουλο Αν., Θεσσαλονίκη, 2005.
- [20] <http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/energy/html/anan2b.htm/> **Last visit:** 5.9.2015
- [21] <http://www.reuk.co.uk/wordpress/tidal/tidal-turbines/> **Last visit:** 5.9.2015
- [22] <http://www.allaboutenergy.gr/EnergeiaOkeanon.html/> **Last visit:** 25.2.2015
- [23] Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών, **Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας**, Κύπρος, Οκτώβριος 2010.
- [24] <https://el.wikipedia.org/wiki/Βιομάζα/> **Last visit:** 25.2.2015
- [25] https://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια/ **Last visit:** 3.12.2014
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power/ **Last visit:** 3.12.2014
- [27] Esteban M., López J., Negro V., Diez J., **Why Offshore Wind Energy**, Renewable Energy, Elsevier, 2011.
- [28] EESI – Environmental and Energy Studying Institute, **Offshore Wind Energy**, October 2010.
- [29] http://www.aquaret.com/index4b51.html?option=com_content&view=article&id=162&Itemid=305&lang=el/ **Last visit:** 7.12.2014

- [30] Χατζημπίρος Κ., **ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ 2050**, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο: Διαχείριση και Βελτίωση Παράκτιων Ζωνών, Αθήνα, 2015.
- [31] Grogg K., **Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines**, World Energy Congress 2011, Sweden, 2005.
- [32] Koby Attias, Shaul P. Ladany, **Optimal Layout for Wind Turbine Farms**, World Renewable Energy Congress 2011, Sweden, 2011.
- [33] Sclavounos, P., **Floating offshore wind turbines**, Marine Technology Society Journal, 42, 39-43., 2008.
- [34] EESI – Environmental and Energy Studying Institute, **Offshore Wind Energy**, October 2010.
- [35] Κτωρής, Α., **Υδροδυναμική Ανάλυση Πλωτής Α/Γ αγκυρωμένης με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης (Spar-buoy)**, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2014.
- [36] <http://www.georhythmiki.gr/> **Last visit:**05.02.2015
- [37] http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm/**Last visit:**05.02.2015
- [38] <http://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html>/**Last visit:**05.02.2015
- [39] <http://www.4coffshore.com/windfarms/tripile-support-structures-aid6.html>/**Last visit:**05.02.2015
- [40] <http://www.manifest.gr/ananeosimes-piges-energeias/aioliki-energeia/>**Last visit:**05.02.2015
- [41] http://www.aquaret.com/indexe9c6.html?option=com_content&view=article&id=168&Itemid=311&lang=el **Last visit:**05.02.2015
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Floating_wind_turbine **Last visit:** 10.02.2015
- [43] http://de.wikipedia.org/wiki/Schwimmende_Windkraftanlage **Last visit:** 10.02.2015
- [44] Μαυράκος Σ.Α., Χατζηγεωργίου Ι.Κ., **Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- [45] Thiagarajan K. P. and Daghe H. J., **State-of-the-art review of floating platform concepts for offshore wind energy generation**, ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2012-83690, Brazil, 2012.
- [46] <http://en.wikipedia.org/wiki/Semi-submersible> **Last visit:** 10.02.2015
- [47] Aubault, A., Cermelli, C., and Roddier, D., **WIND FLOAT: a floating foundation for offshore wind turbines Part III: structural analysis**, Proc. 28th Intl Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng., Honolulu, Hawaii, USA, OMAE-79232, 2009.
- [48] Cermelli, C., Roddier, D. and Aubault, A., **WINDFLOAT: a floating foundation for offshore wind turbines Part II: Hydrodynamics analysis.**, Proc. 28th Intl Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Eng., Honolulu, Hawaii, USA, Paper OMAE2009-79231, 2009.
- [49] http://en.wikipedia.org/wiki/Tension-leg_platform **Last visit:**10.02.2015
- [50] <http://www.livescience.com/7183-floating-ocean-windmills-designed-generate-power.html> **Last visit:**10.02.2015
- [51] Nihei, Y., Matsuura, M., Fujioka, H., and Suzuki, H., **An approach for the optimum design of TLP type offshore wind turbines**, Proceedings 30th Int. Conf. Ocean Offshore
- [52] <http://wacleanotech.org/2011/08/new-platform-would-let-wind-farms-float/> Houston, TX, pp. A25-A32. **Last visit:**10.05.2015

- [53] Moon, W. L. and Nordstrom, C. J., **Tension Leg Turbine Platform: Unique Integration of Mature Technologies**, Proceedings of the 16th Offshore Symposium, SNAME Texas Section, 2010.
- [54] Clément et al., **Wave energy in Europe: current status and perspectives**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 (5): 405–431., 2002.
- [55] Morris-Thomas et al.; Irvin, Rohan J.; Thiagarajan, Krish P., **An Investigation Into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column**, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 129 (4): 273–278., 2007.
- [56] **"Edinburgh Wave Energy Project"** (PDF). University of Edinburgh.
- [57] http://bioenergynews.blogspot.gr/2008/04/blog-post_1246.html **Last visit: 10.05.2015**
- [58] http://www.seai.ie/Renewables/Ocean_Energy_OLD/Ocean_Energy_Information_Research_Irelands_Wave_and_Tidal_Energy_Resources/ **Last visit: 10.05.2015**
- [59] Παναγιωτόπουλος Μιχαήλ, **Τεχνολογική Εξέλιξη Μηχανών Αξιοποίησης της Ενέργειας του Θαλάσσιου Κυματισμού Δυναμικό και Προοπτικές**, ΚΑΠΕ, 2010.
- [60] Wave Energy Planning and Marketing. (<http://www.waveplam.eu>) **Last visit: 10.05.2015**
- [61] The European Marine Energy Centre (EMEC). (<http://www.emec.org.uk>) **Last visit: 10.05.2015**
- [62] Falcão AF de O., **Wave energy utilization: a review of the technologies**, Renew Sust Energy Rev 2010.
- [63] <http://voith.com/en/index.html/> **Last visit: 10.05.2015**
- [64] <http://www.oceanlinx.com/> **Last visit: 10.05.2015**
- [65] <http://oceanenergy.ie/> **Last visit: 10.05.2015**
- [66] <http://buildipedia.com/aec-pros/public-infrastructure/pelamis-wave-energy-converter-renewable-energy-from-ocean-waves> **Last visit: 15.05.2015**
- [67] <http://wavestarenergy.com/> **Last visit: 15.05.2015**
- [68] <http://www.oceanpowertechnologies.com/> **Last visit: 15.05.2015**
- [69] <https://gigaom.com/2010/10/26/7-projects-paving-the-way-for-ocean-power/> **Last visit: 15.05.2015**
- [70] <http://www.psrmagazine.org/single-post/2016/03/02/Wave-Energy> **Last visit: 15.05.2015**
- [71] <http://www.wavedragon.net/> **Last visit: 15.05.2015**
- [72] <http://www.waveplane.com/> **Last visit: 15.05.2015**
- [73] http://en.openei.org/wiki/MHK_Technologies/Sea_wave_Slot_cone_Generator_SSG/ **Last visit: 15.05.2015**
- [74] <http://www.awsocan.com/> **Last visit: 15.05.2015**
- [75] <https://roadtoabundance.wordpress.com/2012/10/10/what-the-future-of-wave-energy-looks-like-forbes/> **Last visit: 15.05.2015**
- [76] <http://www.aquamarinepower.com/> **Last visit: 15.05.2015**
- [77] <http://www.offshorewind.biz/tag/langlee/> **Last visit: 15.05.2015**
- [78] <http://peswiki.com/directory:bulge-wave-anaconda-by-checkmate-sea-energy> **Last visit: 15.05.2015**
- [79] Μαυράκος, Σ. Α., **Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών**, ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.
- [80] Μαυράκος, Σ. Α., **Συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών**, 2012.
- [81] Konispoliatis, D.N., Mavrakos, **Hydrodynamics of arrays of OWC's devices Consisting of concentric cylinders restrained in waves**; Proceedings, 10th

- European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013), International Conference Ocean, Aalborg, Denmark. S.A. 2013.
- [82] Konispoliatis, D.N., Mavrakos., **Hydrodynamic analysis of an array of interacting free-floating oscillating water column(OWC's)devices**, Ocean Engineering 111.179–197,2016.
- [83] Falnes, **Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-Energy Extraction**, Cambridge University Press. J. 2002.
- [84] Mavrakos, S.A. & Koumoutsakos, P., **Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves**, Applied Ocean Research, Vol. 9, No. 3. 1987.
- [85] Mavrakos,S.A.,**Waveloads on a stationary floating bottomless cylinder with finite wallthickness**.In:Appl.OceanRes.7(No.4),213–224., 1985.
- [86] Garrett, C.J.R., **Wave forces on a circular dock**. In: The Journal of Fluid Mechanics; Vol. 46, No. 1, p. 129–139, 1971.
- [87] Mei, C.C. **The applied dynamics of ocean surface waves**. John Wiley, New York, 1983.
- [88] Twersky, V. **Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders** J. Acoustical Soc. of America, 24 (1), 1952.
- [89] Okhusu, M. **Hydrodynamic forces on multiple cylinders in waves**, Int. Symp. on the Dynamics of Marine Vehicles and structures in Waves, University College London, London. 1974.
- [90] Mavrakos, S.A. **Hydrodynamic coefficients for groups of interacting vertical axisymmetric bodies**, Ocean Engineering, Vol. 18, No. 5, p. 485–515., 1991.
- [91] Mavrakos, S.A., **Diffraction loads on arrays of truncated hollow cylinders**, Proceedings, 1st International Conference on Marine Industry (MARIND' 96), Varna Bulgaria, Vol. III, 91-105, 1996.
- [92] Mavrakos S.A., Konispoliatis D.N., **Hydrodynamics of a floating oscillating water column device**, International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM), Genoa, Italy, 2011.
- [93] Konispoliatis D.N., Mavrakos S.A., Mazarakos T.P., **Hydrodynamics of three-unit arrays of floating annular oscillating-water-column wave energy converters**, Applied Ocean Research, 2016.
- [94] Watson, G.N., **A treatise on the theory of Bessel functions**, (2nd Edn) Cambridge University Press, Cambridge, 1966.
- [95] Abramowitz, M., Stegun, I., **A Handbook of mathematical functions**. Dover Publications Inc, New York, 1970.
- [96] Evans, D.V., Porter, R., **Efficient calculation of hydrodynamic properties of OWC type devices**, OMAE–Volume I – Part B,1996.
- [97] Falcao, A.F. de O., **Wave–power absorption by a periodic linear array of oscillating water columns**; Ocean Engineering, 29, p. 1163–1186, 2002.
- [98] Sarmiento, A.J.N.A., Falcao, A.F. de O., **Wave generation by an oscillating surface –pressure and its application in wave-energy extraction**; J. Fluid Mech. 150, p. 467–485, 1985.
- [99] Konispoliatis, D.N., Mavrakos, **Hydrodynamics and power absorption characteristics of free floating and moored arrays of OWC devices**, Proc. of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2014 June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA, 2014.
- [100] Senjanovic I., Hadzic N., Tomic M., **On the linear stiffness of tension leg platforms**, Sustainable Mar. Trans. Exp. Sea Res. 108 (2011) 1081–1088.
- [101] Konispoliatis D.N., Manolas D., Voutsinas S.G., Mavrakos S.A. **“Modelling of an offshore multi-purpose floating structure supporting a wind turbine**

- including second-order wave loads”**, Proceedings, 12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2015).
- [102] Papadakis G., Riziotis V., Voutsinas S., Mavrakos S.A.. **W/T’s reduced order aeroelastic models (in Greek)**. Technical Report No. D3.2, Program POSEIDON (2014), Greek General Secretariat for Research and Technology, 2014.
- [103] Mazarakos T.P., Mavrakos S.A., Konispoliatis D.N., S.G. Voutsinas, D. Manolas. **“Multi –purpose floating structures for offshore wind and wave energy sources exploitation,”**COCONET Workshop for Offshore Wind Farms in the Mediterranean and Black Seas, Anavyssos- Greece, 9- 10 June 2014.
- [104] Nader, J.R.,Zhu,S.P.,Cooper,P.,Steppenbelt,B.**A finite element study of the efficiency of arrays of oscillating water column wave energy converters.** Ocean Eng. 43,72–81.,2012.
- [105] Nader, J.R., **Interaction of ocean waves with oscillating water column wave energy Convertors**, University of Wollongong, Australia, PhD, 2013.