



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΔΠΜΣ σε «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία»**

**Επίδραση του συστήματος αγκύρωσης  
συμβατικών κλάδων στην απόδοση συσκευών  
ανάκτησης κυματικής ενέργειας**

**Effect of a conventional multi – leg mooring  
system on the efficiency of wave energy  
converters (WEC's)**

**Μεταπτυχιακή εργασία  
Ανάργυρου Σ. Μαυράκου**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Χατζηγεωργίου**

**Αθήνα, Μάιος 2021**

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο «Επίδραση του συστήματος αγκύρωσης συμβατικών κλάδων στην απόδοση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας» αποτελεί μια προσπάθεια να διερευνηθεί η επίδραση της ακαμψίας που προσφέρουν οι κλάδοι αγκύρωσης συμβατικού συστήματος αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων στην απόδοση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Η ανάλυση γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων, που αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στα αρχικά στάδια της μελέτης συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας και επιτρέπει την εκτίμηση της παραγόμενης κυματικής ενέργειας και την επίδραση του συστήματος αγκύρωσης σε αυτήν παρουσία αρμονικών και θαλάσσιων κυματισμών.

Οι εξισώσεις κίνησης του αγκυρωμένου κυματικού μετατροπέα διαμορφώνονται κατάλληλα ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ακαμψία του συστήματος αγκύρωσης και οι δυναμικές συνιστώσες της δύναμης που αναπτύσσονται στο σημείο πρόσδεσής του με την πλωτή κατασκευή. Τα χαρακτηριστικά του κάθε κλάδου αγκύρωσης (στατικά και δυναμικά) εξετάστηκαν αρχικά στο δισδιάστατο επίπεδο του κάθε κλάδου, ως προς το οποίο υπολογίζονται οι σχέσεις εξωτερικής δύναμης – μετατόπισης καθώς και οι συντελεστές ακαμψίας εκάστου κλάδου, χαρακτηριστικά τα οποία στη συνέχεια ανάγονται στο αδρανειακό σύστημα ως προς το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις του κυματικού μετατροπέα, λαμβάνοντας υπόψη τις συντεταγμένες του σημείου πρόσδεσης και την διεύθυνση του κάθε κλάδου σε αυτόν, ώστε να δημιουργηθεί το 6 X 6 μητρώο των συντελεστών επαναφοράς, καθώς και το αντίστοιχο μητρώο δυναμικών συνιστωσών της δύναμης. Η συζευγμένη επίλυση των εξισώσεων κίνησης λαμβάνει με τον τρόπο αυτόν υπόψη τόσο τα υδροδυναμικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά του πλωτήρα, όσο και τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης.

Για δυο χαρακτηριστικές μορφές κυματικών μετατροπέων, δηλαδή: (α) πλωτό κυλινδρικό μετατροπέα κινούμενο στους τρεις βαθμούς ελευθερίας κίνησης (surge, pitch και heave) και (β) μετατροπέα, αξονοσυμμετρικής μορφής με θάλαμο ταλάντωσης υδάτινης στήλης, εξετάστηκε η επίδραση της ύπαρξης συστήματος αγκύρωσης στην απόδοσή τους, συγκρίνοντάς την με αυτή για την περίπτωση του ελεύθερα πλέοντος σώματος. Παράλληλα, προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις διέγερσης σε κάθε συσκευή, οι υδροδυναμικοί συντελεστές και οι κινήσεις της. Κατά τους υπολογισμούς της απόδοσης των κυματικών μετατροπέων, ο μηχανισμός απόληψης ενέργειας (Power Take Off System) προσομοιάστηκε με αποσβεστήρα, η τιμή απόσβεσης του οποίου λήφθηκε ίση με την τιμή της υδροδυναμικής απόσβεσης στο σημείο του συντονισμού στην καθ' ύψος ή την περιστροφική κίνηση (για την περίπτωση του πλωτήρα), ενώ για την περίπτωση της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ο συντελεστής  $\Lambda$  που συσχετίζει την πίεση και την παροχή στον αεροστρόβιλο λήφθηκε ίσος με αυτόν που αντιστοιχεί στο σημείο που εμφανίζεται ο συντονισμός στην καθ' ύψος κίνηση της υδάτινης στήλης (rumping mode).

Για την υδροδυναμική ανάλυση των συσκευών χρησιμοποιήθηκαν υπάρχοντα λογισμικά πακέτα, που επιλύουν τα προβλήματα περιθλασης και ακτινοβολίας για τυχαίες μορφές εκ περιστροφής συμμετρικών σωμάτων με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας (υπολογιστικό πρόγραμμα "CYLINDER"), με την επέκτασή του ώστε να λαμβάνει υπόψη τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των κλάδων αγκύρωσης και να επιλύει το πρόβλημα

της κινούμενης συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, καθώς και τα προγράμματα στατικής (STATMOOR) και δυναμικής (DYNMOOR) ανάλυσης κλάδων αγκύρωσης για τον προσδιορισμό των στατικών και δυναμικών χαρακτηριστικών τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή/εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εν συνεχεία, στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες των μηχανισμών/συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την υδροδυναμική ανάλυση των συσκευών που εξετάζονται, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ανάλυση ενός κλάδου αγκύρωσης, στον υπολογισμό των συντελεστών ακαμψίας του, στα δυναμικά χαρακτηριστικά του και στην αναγωγή τους στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων που περιγράφει την κίνηση της πλωτής κατασκευής, στο πέμπτο κεφάλαιο διατυπώνεται το συζευγμένο σύστημα των εξισώσεων κίνησης που λαμβάνει υπόψη του τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πλωτήρα, τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης, ενώ παράλληλα γίνεται και η εκτίμηση της απόδοσης των εξεταζόμενων κυματικών μετατροπών σε απλούς και φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου των προγραμμάτων H/Y που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα τελευταία που αναφέρονται στην ανάλυση των κινήσεων και της απόδοσης των αγκυρωμένων μετατροπών κυματικής ενέργειας που μελετήθηκαν, καθώς και στις συγκρίσεις με τις αντίστοιχες περιπτώσεις των ελεύθερα πλεόντων σωμάτων, περιέχονται στο έβδομο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων και προτείνονται μελλοντικές έρευνες.

## Abstract

This dissertation entitled "Effect of a conventional multi – leg anchoring system on the performance of wave energy converters (WEC's)" is an attempt to investigate the effect of static and dynamic stiffness offered by a multi - leg conventional mooring system on the performance of wave energy devices. The analysis is carried out in the frequency domain, which is a useful tool in the early stages of the analysis of wave energy converters and allows the estimation of the absorbed wave energy and the effect of the mooring system on it in the presence of harmonic and sea waves.

The motion equations of the moored wave energy converter are properly formulated to take into account the static stiffness of the mooring system along with the dynamic components of the tension developed at the attachment point with the floating structure (fairleads). The characteristics of each mooring line (static and dynamic) were first examined in the two-dimensional plane of static equilibrium of each line, in respect of which the external force-displacement relations as well as the stiffness coefficients and the dynamic tensions of each line are calculated. These characteristics are then reduced to the inertial coordinate system with respect to which the motions of the wave energy converters are calculated, by accounting for the co-ordinates of the fairlead point and the direction of each line, in order to create the 6 X 6 matrix of the restoring coefficients, as well as the corresponding matrix of dynamic components of the tension. Thus, the coupled solution of the motion equations takes into account both the hydrodynamic and inertial characteristics of the floater along with the characteristics of the mooring system.

For two typical types of wave energy converters, namely: (a) floating cylindrical converter (point absorber) moving at three degrees of freedom (surge, pitch and heave) and (b) a vertical axisymmetric converter with a water column oscillation chamber, the effect of mooring system characteristics on their performance has been investigated and compared with that for the case of the freely floating body. At the same time, the excitation forces on each device, the hydrodynamic coefficients and the motions were determined. In calculating the efficiency of wave energy converters, the Power Take Off System (PTO) was simulated with a damper whose damping coefficient is assumed equal to the value of the hydrodynamic damping at the wave frequency where the heave and pitch resonances occur (for the case of the point absorber), while in the case of the oscillating water column device the factor  $\Lambda$ , relating the pressure and flow rate in the turbine, was taken to be equal to the one corresponding to the frequency where the pumping mode resonance occurs.

For the hydrodynamic analysis of the devices, existing software packages were used, which solve the diffraction and radiation problems for arbitrarily shaped vertical axisymmetric bodies (software "CYLINDER"), by extending it properly to take into account the static and dynamic characteristics of the mooring system and to solve the problem of the moving oscillating water column device, along with computer codes for the static (STATMOOR) and the dynamic (DYNMOOR) analysis of mooring lines to determine their characteristics.

The first chapter of the present thesis, provides a brief description / introduction of renewable energy sources. Then, in the second chapter, reference is made to the technologies of wave energy converters. The third chapter presents the theoretical background of the method used for the hydrodynamic analysis of the considered devices, the fourth chapter refers to the analysis of a mooring line, the calculation of its stiffness coefficients (static and dynamic) and their reduction to the inertial coordinate system that describes the motions of the floating structure, the fifth chapter is devoted to the coupled system of motions' equations accounting for the hydrodynamic characteristics of the investigated floater and the characteristics of the mooring system, as well as to the performance evaluation of the devices in regular and irregular sea waves. In the sixth chapter details of the input data of the used computer codes are given, whereas in the seven chapter the numerical results from the analysis of the motions and the efficiency of the investigated moored wave energy converters are presented, along with comparisons with the corresponding cases of free-floating bodies. Finally, the eight chapter is devoted to the final conclusions and suggestions for future research.

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας βασίζεται στην πολύτιμη αρωγή πολλών ανθρώπων καθ' όλη τη διάρκειά της, τους οποίους οφείλω να ευχαριστήσω.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και Αντιπρύτανη του Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Χατζηγεωργίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης Διπλωματικής εργασίας καθώς και για το γεγονός ότι μου έδωσε ελευθερία ως προς τη θεματική επιλογή της.

Οι ευχαριστίες μου απευθύνονται επίσης στον Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου Γ. Τριανταφύλλου και στον Διευθυντή Ερευνών του ΕΛΚΕΘΕ, Δρ. Τ. Σουκισιάν, διδάσκοντα στο ΔΠΜΣ «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία» ως μέλη της τριμελούς επιτροπής της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Κονισπολιάτη, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, οι ευχαριστίες μου απευθύνονται σε όλους τους συμφοιτητές για τις συζητήσεις μας και την συνεργασία που είχαμε σε όλη την διάρκεια της κοινής φοιτητικής μας πορείας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και με ενθαρρύνει σε κάθε μου προσπάθεια για την επίτευξη ενός νέου στόχου που θα με κάνει να εξελιχθώ.

## Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή .....	9
1.1	Ιστορική αναδρομή .....	9
1.2	Ενεργειακοί Πόροι.....	11
	Ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι.....	11
	Μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι.....	12
1.3	Διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων .....	13
1.4	Θετικά και αρνητικά της χρήσης των ΑΠΕ .....	20
1.4.1	Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ .....	20
1.4.2	Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ .....	20
1.5	Εξεταζόμενες ΑΠΕ.....	21
2	Συσκευές Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Σ.Α.Κ.Ε.).....	22
2.1	Κυματική ενέργεια .....	22
2.2	Κυματικό δυναμικό .....	23
2.2.1	Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών.....	23
2.2.2	Κατανομή κυματικού δυναμικού .....	24
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας .	26
2.3.1	Πλεονεκτήματα .....	26
2.3.2	Μειονεκτήματα .....	27
2.4	Ιστορική αναδρομή Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας.....	29
2.5	Τεχνολογίες Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας .....	30
2.5.1	Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers).....	32
2.5.2	Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης ( Oscillating Wave pitch Converter).....	36
2.5.3	Συσκευές Υπερχείλισης του Νερού (Overtopping Device).....	36
2.5.4	Pelamis.....	39
2.5.5	Βυθισμένες Συσκευές Διαφοράς Πίεσης (Submerged Pressure Differential). 40	
2.5.6	Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column) .....	41
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	45
3.1	Γενικά.....	45
3.2	Διατύπωση του υδροδυναμικού προβλήματος πρώτης τάξης (προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας).....	46
3.3	Γραμμικοποιημένες οριακές συνθήκες.....	49
3.4	Δυναμικά ταχύτητας περίθλασης και ακτινοβολίας για διαφορετικούς τύπους δακτυλιοειδών στοιχείων.....	51

3.5	Δυνάμεις διέγερσης και υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης .....	54
3.6	Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης 56	
3.7	Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.....	57
4	Ανάλυση του συστήματος αγκύρωσης .....	59
4.1	Γενικά.....	59
4.2	Στατική ανάλυση ενός κλάδου ακύρωσης.....	61
4.3	Χαρακτηριστικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης – μετατόπισης. Συντελεστές ακαμψίας στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης .....	62
4.4	Αναγωγή στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων κίνησης της πλωτής κατασκευής .....	70
4.5	Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης.....	72
5	Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης. Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας. 82	
5.1	Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης .....	82
5.2	Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς.....	84
5.3	Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς.....	85
6	Κώδικας υπολογισμού.....	88
6.1	Περιγραφή των παραμέτρων του αρχείου δεδομένων.....	89
6.2	Περιγραφή αρχείου εξαγόμενων αποτελεσμάτων.....	96
6.3	Γεωμετρικές μορφές των κυματικών συσκευών που εξετάστηκαν και αρχεία εισαγωγής δεδομένων προγράμματος cylinder3.f.....	97
7	Αποτελέσματα .....	101
7.1	Δυνάμεις Διέγερσης .....	101
7.2	Υδροδυναμικοί Συντελεστές .....	103
7.3	Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο.....	107
7.4	Κινήσεις των κυματικών συσκευών .....	108
7.5	Απορροφούμενη κυματική ισχύς.....	117
8	Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	125
9	Βιβλιογραφία.....	127



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση παγκοσμίως για ενέργεια με στόχο την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών και δραστηριοτήτων του σύγχρονου τρόπου ζωής, οδηγεί στην αναζήτηση φιλικότερων για το περιβάλλον λύσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η λεγόμενη “πράσινη” ενέργεια λογίζεται ως μορφή εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως η γεωθερμία, ο άνεμος, η κυκλοφορία του νερού κ.α.

Η χρήση των ΑΠΕ είναι συνυφασμένη με τη ζωή των ανθρώπων σχεδόν καθ’ όλη την ιστορία της ανθρώπινης κοινωνίας. Η εκμετάλλευση της δύναμης του νερού και του αέρα σε νερόμυλους, ανεμόμυλους και ιστιοπλοΐα ήταν ιδιαίτερα διαδομένη και ίσως αποτελούσαν τις μόνες πηγές ενέργειας πέραν της αποδιδόμενης από τον ίδιο τον άνθρωπο και των οικόσιτων ζώων. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα γινόταν εκτεταμένη χρήση αυτών, καθώς διέθετε ισχυρό αιολικό δυναμικό σε στεριά και θάλασσα και ευρύ δίκτυο χειμάρρων. Βέβαια η επικράτηση αυτών των πηγών ενέργειας διήρκησε έως ότου έκαναν την εμφάνισή τους τα ορυκτά καύσιμα. Έχοντας στη διάθεση του ο άνθρωπος τα πολύ καλής απόδοσης ορυκτά καύσιμα, και ειδικά σε μεγάλες ποσότητες, από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα όπου ανακαλύφθηκαν μεγάλες ποσότητες κοιτασμάτων πετρελαίου, εγκατέλειψε την όχι και τόσο αποδοτική τότε καθαρή ενέργεια. Άλλωστε με τα μέχρι τότε μέσα θα ήταν ίσως ανέφικτο να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις του εκβιομηχανιζόμενου τότε κόσμου μόνο από τις ΑΠΕ.

Ωστόσο όπως προαναφέρθηκε, τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση επαναφοράς στη χρήση ΑΠΕ και η προσπάθεια οι ενεργειακές ανάγκες να καλυφθούν κυρίως από αυτές. Τους λόγους για αυτό μπορεί κανείς να τους εντοπίσει σε διάφορα οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Η διαρκής μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων φέρει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής χρήσης αυτών. Έτσι, επόμενη είναι η αναζήτηση οικονομικότερων και σταθερότερων μακροπρόθεσμα πηγών ενέργειας, όπως οι ΑΠΕ.

Βασικότερο, ωστόσο, λόγο για την ανωτέρω ενεργειακή στροφή, αποτελεί η επίτευξη ενός βιώσιμου περιβάλλοντος παρά την αλόγιστη πολλές φορές χρήση ενέργειας από τους ανθρώπους. Η χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί σε περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και εν τέλει καταστροφές. Είτε λόγω έμμεσων μακροχρόνιων συνεπειών όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου από την καύση υδρογονανθράκων, είτε λόγω άμεσων καταστροφών λόγω ατυχήματος κατά την παραγωγή/μεταφορά/χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως πυρηνικές καταστροφές (Chernobyl, Fukushima) και ατυχήματα πετρελαιοφόρων δεξαμενοπλοίων, είτε ατυχημάτων κατά την εξόρυξη και παραγωγή υδρογονανθράκων από το θαλάσσιο περιβάλλον. Αξίζει να αναφερθεί το χαρακτηριστικό ατύχημα του Deepwater Horizon στον Κόλπο του Μεξικού το 2010 κατά το οποίο υπήρξε εκροή 4.9 εκατομμυρίων βαρελιών αργού πετρελαίου στη θάλασσα. Συνέπειες αυτού του ατυχήματος ήταν η τεράστια οικολογική καταστροφή που προκλήθηκε και η οικονομική επιβάρυνση της BP, για αποζημιώσεις, η οποία ανήλθε στο ποσό των 18.7 δισεκατομμυρίων δολαρίων [1]. Προφανής λοιπόν είναι η αναγκαιότητα χρήσης της «πράσινης» ενέργειας

ώστε να διατηρηθεί ο πλανήτης κατά το δυνατόν ανέπαφος από τις ενεργειακές απαιτήσεις των εκάστοτε ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

## 1.2 Ενεργειακοί Πόροι

Οι ενεργειακοί πόροι χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τους ανανεώσιμους και τους μη ανανεώσιμους. Πιο αναλυτικά:

### Ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι

Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ΑΠΕ θεωρούνται: η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδραυλική, η ωκεάνια ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα, η ενέργεια από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίασή τους:

- **Αιολική ενέργεια (Wind Energy):** Είναι η κινητική ενέργεια που προκύπτει από τον άνεμο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ή άμεσα εκμεταλλεύσιμη μηχανική ενέργεια. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνεται και η υπεράκτια αιολική ενέργεια (offshore ή marine wind energy), που αποτελεί μαζί με την ωκεάνια ενέργεια (ocean energy – OE) τις δύο συνιστώσες αυτού που στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται σαν θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια (marine renewable energy – MRE).
- **Ηλιακή ενέργεια (solar energy):** Ονομάζεται η εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της εκπεμπόμενης θερμότητας του ήλιου. Έτσι προκύπτουν εφαρμογές θερμικές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι), βιοκλιματικές και μετατροπείς της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- **Γεωθερμική ενέργεια (Geothermal Energy):** Είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.
- **Υδραυλική ενέργεια (Hydraulic Energy):** Είναι η εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των υδάτων (ποταμών συνήθως) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Ωκεάνια ενέργεια (Ocean Energy):** Είναι η ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί από τους ωκεανούς. Η ωκεάνια ενέργεια αναφέρεται πολλές φορές στην βιβλιογραφία και σαν «μπλε» ενέργεια (blue energy). Χωρίζεται σε τέσσερις επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το γενεσιουργό της αίτιο, δηλαδή[2]:
  - i) Ενέργεια από τις παλίρροιες και τα ρεύματα (tidal/sea currents). Εκμεταλλεύεται την άνοδο των υδάτων κατά την παλίρροια ή τα θαλάσσια ρεύματα.
  - ii) Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική.
  - iii) Ενέργεια θερμοκλινούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
  - iv) Ενέργεια από την μεταβολή της αλατότητας (salinity gradients). Εκμεταλλεύεται τη διαφορά πυκνότητας του νερού για την παραγωγή ενέργειας.
- **Ενέργεια από βιομάζα:** Γίνεται χρήση των υδατανθράκων των φυτών που βρίσκονται στα αστικά απόβλητα και απορρίμματα (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της

ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα φιλικότερα στο περιβάλλον από ότι τα αντίστοιχα ορυκτά.

### Μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι

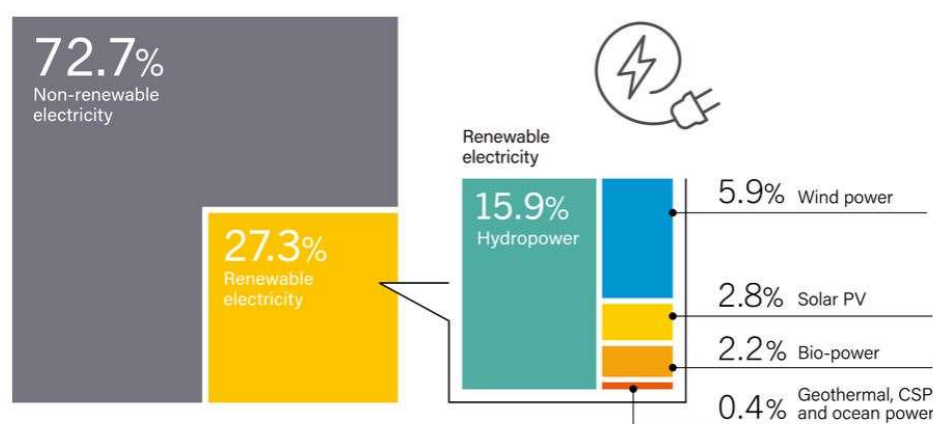
Ως μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι νοούνται οι εξής :

- Η πυρηνική ενέργεια.
- Η καύση ορυκτών καυσίμων: Τα ορυκτά καύσιμα είναι καύσιμα προερχόμενα από φυσικές πηγές, όπως αναερόβια αποσύνθεση νεκρών θαμμένων οργανισμών. Η ηλικία των νεκρών οργανισμών που με την εναπόθεσή τους σχηματίζουν τα ορυκτά καύσιμα κυμαίνεται από μερικά εκατομμύρια μέχρι 650 εκατομμύρια χρόνια. Χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:
  - i) Υγρά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο και τα παράγωγά του.
  - ii) Αέρια καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο.
  - iii) Στερεά καύσιμα, όπως κάρβουνο.

Ο εκτιμώμενος χρόνος, σύμφωνα με μελέτες, μέχρι εξαντλήσεως των αποθεμάτων των παραπάνω ορυκτών με τη σημερινή τους κατανάλωση είναι: 43, 61 και 148 χρόνια αντίστοιχα. Τα πιο αισιόδοξα σενάρια μιλούν για 43, 167 και 417 κάνοντας την υπόθεση εκτεταμένης μείωσης βέβαια στη χρήση τους [71].

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται σύμφωνα με την [27] το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια. Παρουσιάζεται επίσης η ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από ανανεώσιμους πόρους.

Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2019



Note: Data should not be compared with previous versions of this figure due to revisions in data and methodology.

REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.1 Το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια [27]

### 1.3 Διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων

Όπως προαναφέρθηκε, και από την [32], οι δύο βασικές κατηγορίες ανανεώσιμων θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων είναι:

- (i) Η θαλάσσια αιολική ενέργεια
- (ii) Η ωκεάνια ενέργεια

Η **θαλάσσια αιολική ενέργεια** αποτελεί την πλέον ώριμη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας σε ότι αφορά στην τεχνολογική ανάπτυξη, στην εμπορική της εκμετάλλευση, στην ύπαρξη πολιτικών για την ανάπτυξή της, καθώς και την εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με άλλες μορφές θαλάσσιων ενεργειακών πόρων. Με βάση το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια, είναι πλέον πολλά υποσχόμενη και διαδεδομένη μορφή θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων που αναμένεται ότι θα αναπτυχθεί τα επόμενα χρόνια σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με το [4] στο τέλος του 2016, το 86% της παγκόσμιας παραγόμενης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είχε εγκατασταθεί στις θάλασσες των πέντε επικεφαλής ευρωπαϊκών κρατών με υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας (Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Δανία, Ολλανδία και Βέλγιο).

Το 2018, 409 νέες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη και συνδέθηκαν με το δίκτυο στα πλαίσια 18 μεγάλων έργων Αυτό προσέθεσε 2.649 MW στο δίκτυο. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι στο τέλος του 2018, στην Ευρώπη υπήρχαν εγκατεστημένα 18.499MW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, που αντιστοιχούν σε 4.543 συνδεδεμένες ανεμογεννήτριες σε 11 Ευρωπαϊκές χώρες [5]. Οι περισσότερες από τις εγκαταστάσεις είναι σταθερές, σε ένα μέσο βάθος νερού 27.1 μέτρα, ενώ η μεγαλύτερη απόσταση εγκατεστημένης ανεμογεννήτριας από την ακτή ήταν 103km. Σύμφωνα με την WIND EUROPE ORGANIZATION [6], 323 GW συνολικής αιολικής ισχύος θα είναι εγκατεστημένα στην Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το 2030, εκ των οποίων 253 GW χερσαίες εγκαταστάσεις και 70GW υπεράκτιες, ξεπερνώντας το όριο της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος των 200GW του 2020, με τα 24,6 GW εξ αυτών εγκατεστημένα στη θάλασσα [7].

Αυτό θα έχει σαν συνέπεια να αυξηθεί πολύ γρήγορα ο αριθμός των υπεράκτιων εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την ακτή. Μεταξύ της πληθώρας των σχεδιάσεων που αναπτύχθηκαν μέχρι τώρα για την εκμετάλλευση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού, οι σταθερές ανεμογεννήτριες αποτελούν μια ώριμη τεχνολογία, ειδικά για μικρά βάθη νερού στην περιοχή της εγκατάστασης. Τα monopiles και οι jacket αποτελούν τις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κατασκευές για την στήριξη των ανεμογεννητριών, αντιπροσωπεύοντας για το 2018 το 99% όλων των χρησιμοποιηθέντων εδράσεων (66% και 33% αντίστοιχα) [5]. Οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, αποτελούν για τις περιοχές με μεγαλύτερα βάθη νερού (όπως για παράδειγμα η Μεσόγειος) την πιο ενδεδειγμένη λύση και αναμένεται για τον λόγο αυτό μεγάλη ανάπτυξή τους τα επόμενα χρόνια. Εκτός από την πρώτη μεγάλης κλίμακας βιομηχανική εγκατάσταση πάρκου πλωτών ανεμογεννητριών στα βόρειο – ανατολικά παράλια της Σκωτίας [8], υπάρχουν επίσης μερικά εμπορικά εκμεταλλεύσιμα προγράμματα

ανάπτυξης πλωτών ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν το 2018 στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Γαλλία (Kincardine Pilot, Ηνωμένο Βασίλειο; Floatgen, Eolink Prototype, Γαλλία) [5].

Σε ότι αφορά στην εκμετάλλευση **ωκεάνιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων**, οι σχετικές τεχνολογίες ευρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της IRENA [9] για τις εγκατεστημένες ισχύς, η Ευρώπη κατατάσσεται στην παγκόσμια πρωτοπορία. Στο έδαφός της ευρίσκονται το 52% του συνολικού, σε παγκόσμιο επίπεδο, αριθμού των εταιρειών ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας (52% της παλιρροϊκής ενέργειας και το 60% της κυματικής ενέργειας) με περισσότερα από 25MW εγκατεστημένης ισχύος στο τέλος του 2017, αυξημένης σε σχέση με τα εγκατεστημένα 12MW στο τέλος του 2016. Εντούτοις, σύμφωνα με την έκθεση της World Energy Council [10] το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από κυματική ενέργεια ανέρχεται σε 440€/MWh και το αντίστοιχο από την παλιρροϊκή ενέργεια είναι περίπου 380€/MWh δείχνοντας την μεγάλη διαφορά από τις αντίστοιχες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτια αιολική ενέργεια, η οποία για το 2017 έχει μειωθεί στα επίπεδα του 54.5€/ MWh, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος της ηλεκτρικής διασύνδεσης [11].

Η ιδέα της εκμετάλλευσης της ωκεάνιας ενέργειας δεν είναι νέα. Υπάρχουν αρκετές εκατοντάδες από πατέντες που είχαν αναπτυχθεί έως το τέλος του 20ου αιώνα [12], [13], [14]. Ειδικότερα, η ωκεάνια κυματική ενέργεια ως εναλλακτική μορφή ενέργειας, είναι ελκυστική επειδή είναι η μεγαλύτερη μεταξύ όλων των ωκεάνιων ενεργειακών πόρων [15], [16]. Εκτιμάται ότι η θεωρητική παγκόσμια συνολική ισχύς των ωκεάνιων ενεργειακών πόρων ανέρχεται σε 83.500 TWh/yr περίπου [17] εκ των οποίων το παλιρροϊακό δυναμικό ανέρχεται σε 10.000 TWh/yr περίπου, το ενεργειακό δυναμικό που οφείλεται στο θερμοκλίνο περίπου σε 44.000TWh/yr και το κυματικό δυναμικό σε 29.500 TWh/yr.

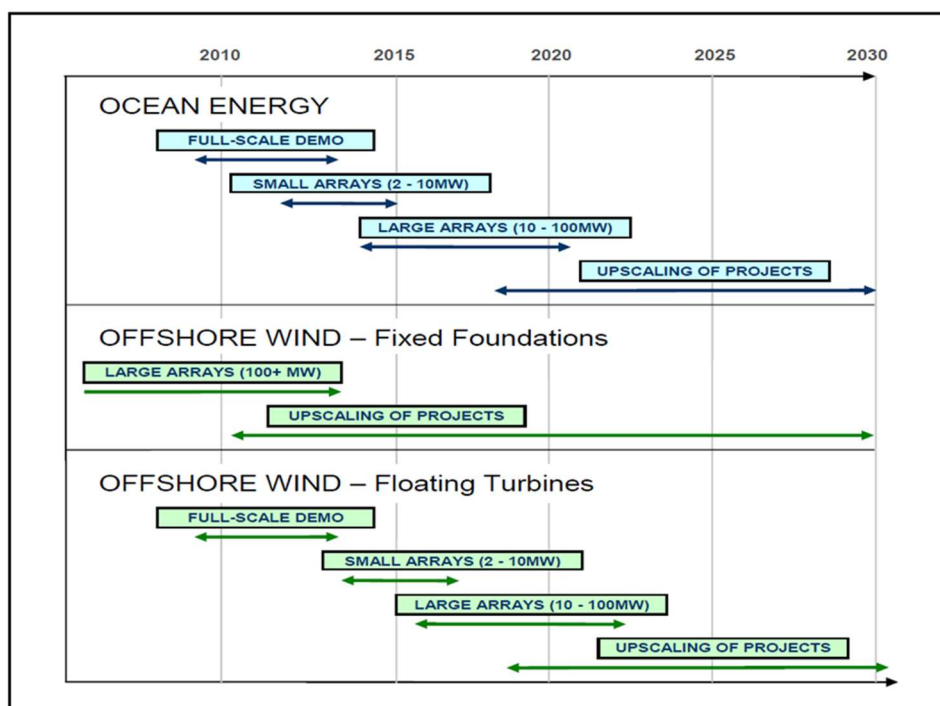
Το παγκόσμια διατιθέμενο ωκεάνιο ενεργειακό δυναμικό ανέρχεται σε περίπου τέσσερις φορές την παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία για το 2008 ήταν 16.819TWh/yr και είναι συγκρίσιμο με το ήμισυ της πρωτογενώς παραγόμενης ενέργειας που για το 2008 ήταν 143.851 TWh/yr [17].

Πλήθος χωρών και περιοχών που έχουν εκτενές ανάπτυγμα ακτών αντελήφθησαν την δυνατότητα να συνεισφέρει η κυματική ενέργεια στην κάλυψη τμήματος των ενεργειακών τους αναγκών, με συνέπεια να παρουσιαστούν μελέτες για την εκτίμηση του μεγέθους της ωκεάνιας ενέργειας εντός των χωρικών τους υδάτων που μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμη. Το παράδειγμα των ΗΠΑ είναι χαρακτηριστικό. Εκτίμησαν το διαθέσιμο κυματικό δυναμικό στις ακτές τους ότι είναι της τάξης των 2.640 TWh/yr εκ των οποίων εκμεταλλεύσιμα είναι τα 1.170 TWh/yr [18], ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο το αντίστοιχο ποσό είναι περίπου 70 TWh/yr [19].

Πολλές χώρες στράφηκαν στο σχεδιασμό, εγκατάσταση και λειτουργία συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας (Wave Energy Converters - WEC's). Αν και το ποσό της παραγόμενης ενέργειας είναι χαμηλό συγκρινόμενο με άλλους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, εν τούτοις υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη και των ωκεάνιων ενεργειακών πόρων [20]. Όμως μερικές τεχνολογίες δεν μπόρεσαν να διεισδύσουν στην αγορά, λόγω της αβεβαιότητας της επένδυσης, καθώς επίσης και του επιχειρηματικού κινδύνου που εμπεριείχετο σε αυτήν.

Με στόχο την αντιστροφή της κατάστασης στασιμότητας που έχει διαμορφωθεί, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εγκαινίασε το 2014 την Blue Energy Communication [21] η οποία παρουσιάζει την αναμενόμενη συνεισφορά της ωκεάνιας ενέργειας στην Ευρώπη, θέτοντας παράλληλα το πλαίσιο για την ανάπτυξη των σχετικών τεχνολογιών κατά το 2020 και πέραν αυτού [22]. Μια πρόσφατη έκδοση με τις απόψεις της βιομηχανίας, δείχνει μια εν δυνάμει ταχεία επέκταση της εκμετάλλευσης της ωκεάνιας ενέργειας για τα επόμενα σαράντα χρόνια που αθροιστικά θα συνεισφέρουν 100GW διασυνδεδεμένης με το δίκτυο κυματικής ενέργειας μέχρι το 2050. Η ακολουθούμενη Ευρωπαϊκή πολιτική ενίσχυσης της εκμετάλλευσης της ωκεάνιας ενέργειας, οδήγησε σε ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ωκεάνιας ενεργειακής ισχύος από το 2014 και μετά. Σύμφωνα με τα τελευταία στατιστικά στοιχεία της IRENA [9] στο τέλος του 2017, η παγκόσμια εγκατεστημένη ωκεάνια ενεργειακή ισχύς υπερδιπλασιάστηκε ξεκινώντας από λιγότερα από 12MW το 2016 και φθάνοντας σε περισσότερα από 25MW το 2017.

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο [23], η εικόνα 1.2 δείχνει την αναμενόμενη τα επόμενα χρόνια εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης των θαλάσσιων ενεργειακών πόρων, που περιλαμβάνουν τόσο την ωκεάνια, όσο και την υπεράκτια αιολική ενέργεια.



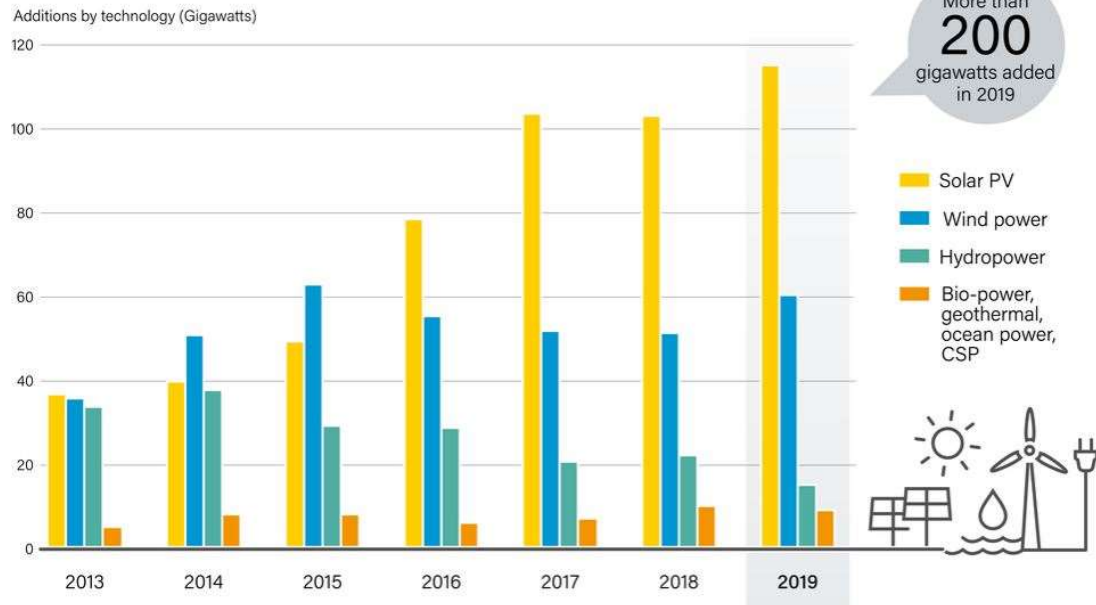
Εικόνα 1.2 Αναμενόμενη εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης θαλάσσιων ενεργειακών πόρων [23]

Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται σύμφωνα με την [27], η ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου, ενώ, σύμφωνα με την [3], στην εικόνα 1.4, δίδεται η μεταβολή κατά έτος της συνολικά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο που παράγεται από ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους ανά κατηγορία ανανεώσιμου πόρου.

Επίσης στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται οι εγκατεστημένες ισχύς ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου για το 2018 σε παγκόσμια κλίμακα, στην Ε.Ε. και στις 6 επικεφαλής χώρες [3]. Σημειώνεται ότι στα στοιχεία που παρουσιάζονται δεν

συμπεριλαμβάνονται οι ισχύς από τα υδροηλεκτρικά έργα. Οι επικεφαλής χώρες για το 2018 ήταν η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Γερμανία, ακολουθούμενες από την Ινδία, την Ιαπωνία, το Ηνωμένο Βασίλειο, Ιταλία, Βραζιλία / Ισπανία. Οι επικεφαλής χώρες εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος παραγόμενης από ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους (μη λαμβανομένων υπόψη των υδροηλεκτρικών) ανά κάτοικο ήταν για το 2018, σύμφωνα με την ίδια πηγή, η Ισλανδία, η Δανία, η Γερμανία, η Σουηδία και η Φιλανδία.

#### Annual Additions of Renewable Power Capacity, by Technology and Total, 2013-2019

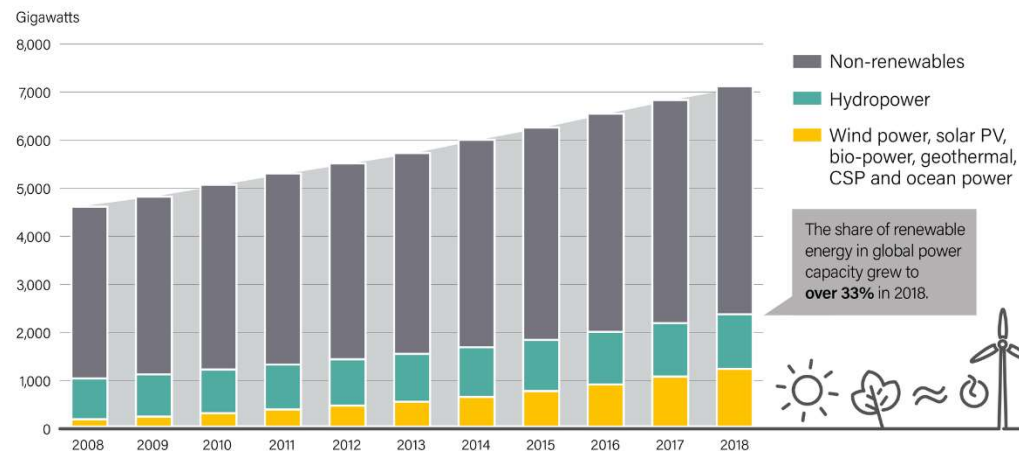


Note: Solar PV capacity data are provided in direct current (DC). Data are not comparable against technology contributions to electricity generation.

REN21 RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.3 Η ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου [27]

#### Global Power Generating Capacity, by Source, 2008-2018

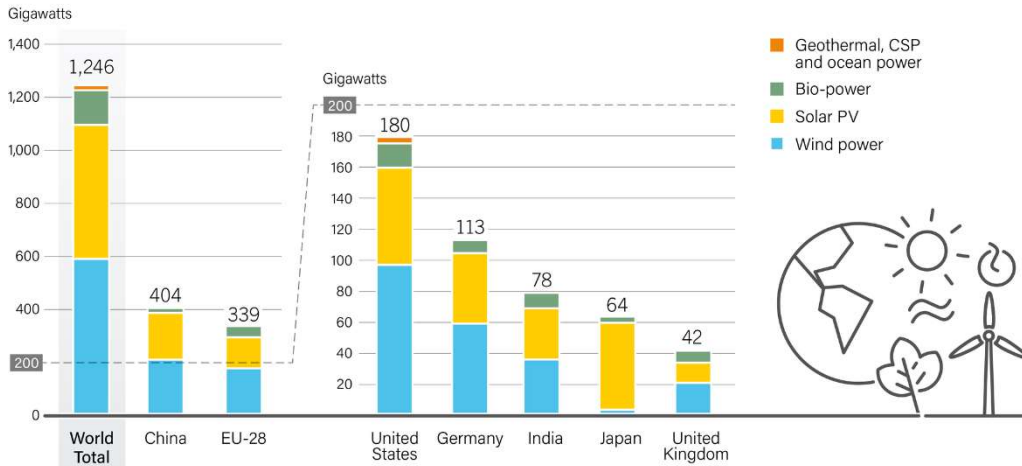


REN21 RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.4 Η μεταβολή κατά έτος της συνολικά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο που παράγεται από ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους ανά κατηγορία ανανεώσιμου πόρου [3]



### Renewable Power Capacities in World, EU-28 and Top 6 Countries, 2018



Note: Not including hydropower.

REN21 RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.5 οι εγκατεστημένες ισχύς ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου για το 2018 σε παγκόσμια κλίμακα, στην Ε.Ε. και στις 6 επικεφαλής χώρες [3]

Στην εικόνα 1.6 παρουσιάζονται τα ποσοστά της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου στην Ε.Ε. για τα έτη 2000 και 2015, σύμφωνα με την [24], ενώ στην εικόνα 1.7 παρουσιάζονται σύμφωνα με την [25] τα εκτιμώμενα ποσά παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου, για το 2018 και το 2050, για τρία σενάρια:

- i. ο σενάριο ταχείας μετάβασης (**Rapid**) περιλαμβάνει μια σειρά πολιτικών μέτρων, με κύριο, μια σημαντική αύξηση των τιμών του άνθρακα, υποστηριζόμενο από πιο στοχευμένα ανά τομέα μέτρα που ώστε να μειωθούν οι εκπομπές άνθρακα από τη κατανάλωση ενέργειας κατά περίπου 70% έως το 2050. Αυτή η μείωση των εκπομπών συμβαδίζει με σενάρια περιορισμού της αύξησης σε παγκόσμιο επίπεδο των θερμοκρασιών έως το 2100 κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου σε σχέση με τα επίπεδα θερμοκρασιών πριν την βιομηχανοποίηση (preindustrial).
- ii. Το σενάριο Net Zero (**Net Zero**) υποθέτει ότι ενσωματώνονται τα πολιτικά μέτρα της περίπτωσης **Rapid** και ενισχύονται από σημαντικές μετατοπίσεις στην κοινωνική συμπεριφορά και στις προτιμήσεις, επιτυγχάνοντας περαιτέρω μείωση των εκπομπών άνθρακα. Οι παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα από τη χρήση ενέργειας μειώνονται περισσότερο από 95% έως το 2050, σε γενικές γραμμές σύμφωνα με μια σειρά σεναρίων που είναι συνεπή με περιορισμένη θερμοκρασιακή αυξάνεται έως 1,5 βαθμούς Κελσίου.
- iii. Το σενάριο **Business-as-Usual (BAU)** υποθέτει ότι οι κυβερνητικές πολιτικές, τεχνολογίες και κοινωνικές προτιμήσεις συνεχίζουν να εξελίσσονται με τρόπο και ταχύτητα όπως στο πρόσφατο παρελθόν. Κάτι τέτοιο σηματοδοτεί, την συνέχιση μιας αυξητικής τάσης, αν και σχετικά αργής, που οδηγεί σε μέγιστες εκπομπές άνθρακα στα μέσα του 2020. Παρά την κορύφωση, υπάρχει μια μικρή μείωση των εκπομπών άνθρακα από την χρήση ενέργειας, με τις προβλεπόμενες εκπομπές το 2050 να είναι 10% κάτω από τα επίπεδα του 2018.

Η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας αυξάνεται κατά περίπου 10% στις περιπτώσεις **Rapid** και **Net Zero** κατά την διάρκεια των ετών (διαφορά 2020 και 2050) και γύρω στο 25% στην περίπτωση **BAU**.

Τέλος στην εικόνα 1.8 δίδονται τα ποσοστά της πρωτογενούς ενέργειας που παράγονται από κάθε ενεργειακό πόρο στην περίπτωση **Rapid**.

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

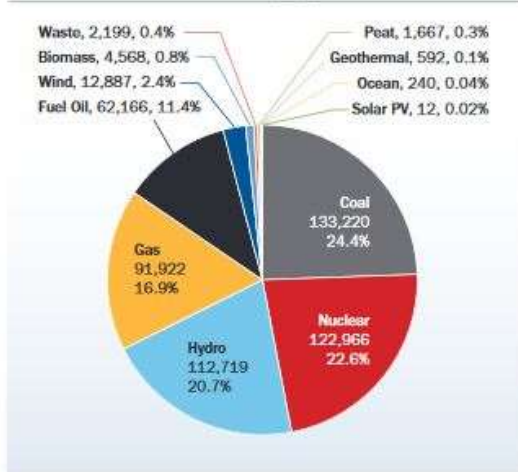
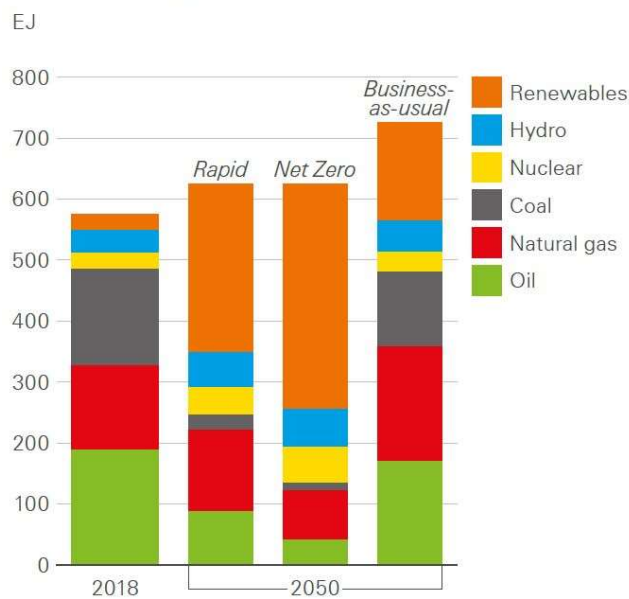


FIGURE 8: EU POWER MIX 2015 (MW)



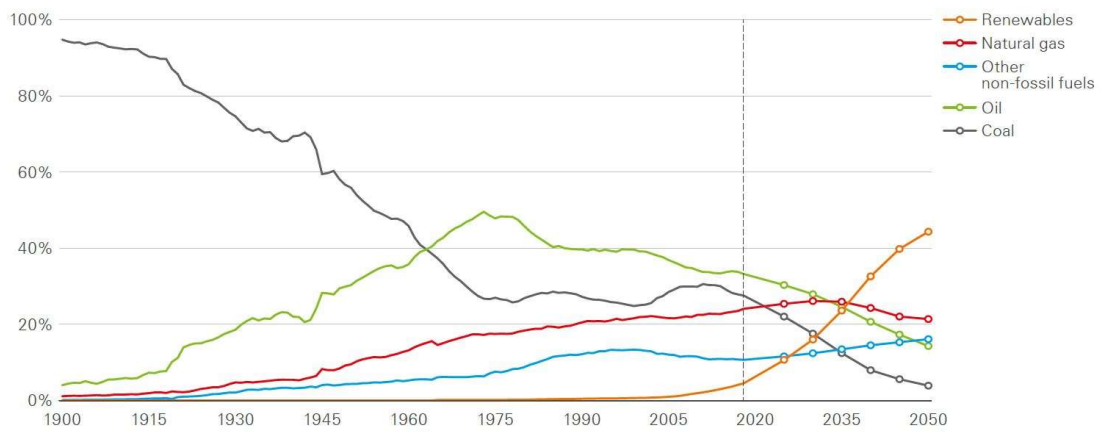
Εικόνα 1.6 Ποσοστά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου στην Ε.Ε. για τα έτη 2000 και 2015 [24]

Primary energy consumption by source



Εικόνα 1.7 Προβλεπόμενα ποσά παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου, παγκοσμίως για το 2050, για τα σενάρια Rapid, Net Zero, BAU [25]

Shares of primary energy in *Rapid*



Εικόνα 1.8 Προβλεπόμενα ποσοστά παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου, παγκοσμίως για το 2050, για το σενάριο *Rapid* [25]

## 1.4 Θετικά και αρνητικά της χρήσης των ΑΠΕ

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη της απαιτούμενης ενεργειακής ζήτησης έχει αρκετά πλεονεκτήματα και μερικά μειονεκτήματα/σημεία που χρήζουν βελτίωσης. Ακολουθεί συνοπτική ανάλυσή τους:

### 1.4.1 Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον.
- Είναι κατ' ουσίαν ανεξάντλητες.
- Μπορούν να βοηθήσουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων περιοχών (μικρών κοινοτήτων, νησιών, κλπ).
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού και να επιτρέψουν στην ενεργειακή αυτονομία από μιας κατοικίας μέχρι ολόκληρης κοινότητας στην ύπαιθρο. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει αναλογία ζήτησης ενέργειας και μεγέθους έργων παροχής της, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αφ' ενός η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και αφ' ετέρου η κατάργηση της ανάγκης για έργα μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αφού η κάθε περιοχή θα φροντίζει για την αυτονομία της.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει αρκετά καλό χρόνο ζωής.
- Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ο βαθμός απόδοσής τους και έχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω εξέλιξης.

### 1.4.2 Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

- Έχουν σχετικά μικρό συντελεστή απόδοσης (περίπου 30%), με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερα αρχικά κεφάλαια και διαθέσιμες εκτάσεις εγκατάστασής τους (εφόσον μιλάμε για χερσαίες εγκαταστάσεις). Έτσι προς το παρόν δεν μπορούν να καλύψουν εύκολα μεγάλα αστικά κέντρα. Ωστόσο η ενεργειακή τους απόδοση είναι τομέας που διαρκώς εξελίσσεται και βελτιώνεται με τα χρόνια και την πρόοδο της τεχνολογίας.
- Σε κάποιες μορφές ΑΠΕ υπάρχει εξάρτηση από τα εποχιακά καιρικά φαινόμενα, το γεωγραφικό πλάτος και μικρόκλιμα της περιοχής. Έτσι υπάρχει αυξομείωση της ενεργειακής παροχής, κάτι που μπορεί να αντισταθμιστεί με συνδυασμό διαφορετικών ΑΠΕ.

Συμπερασματικά μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα από την χρήση των ΑΠΕ για την ενεργειακή κάλυψη των αναγκών του πληθυσμού, είναι όμως συνυφασμένη η χρήση αυτή και από μια σειρά μειονεκτημάτων τα οποία επηρεάζουν την τελική τεχνοοικονομικά βιώσιμη εφαρμογή τους. Σημειώνεται πάντως ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα βρίσκεται σε διαρκή αναζήτηση λύσεων για τα προβλήματα αυτά, ώστε να επεκταθεί η χρήση τους.

## 1.5 Εξεταζόμενες ΑΠΕ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την κυματική ενέργεια, που αποτελεί ένα τμήμα της ωκεάνιας ενέργειας όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, ειδικότερα δε με τις συσκευές ανάκτησης κυματικού δυναμικού που βασίζονται στην αρχή της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Oscillating Water Columns – OWC). Λεπτομερέστερη αναφορά σε αυτές τις συσκευές πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο 2, μαζί με την περιγραφή των υπόλοιπων πλέον χαρακτηριστικών τεχνολογιών συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας.

Ειδικότερα, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας στόχος είναι να μελετηθεί κατά πόσον η γεωμετρία του θαλάμου ταλάντωσης του ρευστού επηρεάζει την απόδοση της συσκευής, καθώς και το κατά πόσον με την αλλαγή της γεωμετρίας του θαλάμου, μπορεί να επηρεαστεί η συχνότητα συντονισμού της υδάτινης στήλης σε αυτήν με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων στο οποίο οι συσκευές αυτές μπορεί να λειτουργούν βέλτιστα.

Στα πλαίσια αυτά μελετώνται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των συσκευών (δυνάμεις και ροπές διέγερσης, υδροδυναμικοί συντελεστές, ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εντός του θαλάμου της συσκευής) για θαλάμους ταλάντωσης, απλής, σύνθετης κυλινδρικής, σφαιρικής και κωνικής γεωμετρίας, καθώς και για θαλάμους με απλές ή και επάλληλες ομοαξονικές δακτυλιοειδείς επιφάνειες ταλάντωσης της υδάτινης στήλης.

## 2 Συσκευές Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Σ.Α.Κ.Ε.)

Το κεφάλαιο αυτό περιέχει: μια σύντομη αναφορά στην κυματική ενέργεια και στα γενεσιουργά αιτία της, στο κυματικό δυναμικό τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και στον ελλαδικό χώρο, μια σύντομη ιστορική αναδρομή των Σ.Α.Κ.Ε. από τον 18ο αιώνα έως σήμερα, τη δυνατότητα εκμετάλλευσής τους καθώς και τους βασικότερους τύπους Σ.Α.Κ.Ε και τους τρόπους λειτουργίας τους.

### 2.1 Κυματική ενέργεια

Τα κύματα σχηματίζονται από ανέμους που διατρέχουν την επιφάνεια της θάλασσας. Το μέγεθος των κυμάτων εξαρτάται από τη ταχύτητα του ανέμου, τη διάρκειά του, την απόσταση πάνω στη θάλασσα που διανύει ο άνεμος (fetch), τη βαθυμετρία του πυθμένα (που μπορεί να επικεντρώσει ή να διασπείρει την ενέργεια του κύματος) [26]. Η κίνηση των μορίων του νερού επιφέρει τη διάδοση μεγάλης ποσότητας κινητικής ενέργειας, που μπορεί να αξιοποιηθεί από τις Σ.Α.Κ.Ε.

Οι καλύτερες πηγές κυματικής ενέργειας βρίσκονται σε περιοχές όπου ισχυροί άνεμοι έχουν διανύσει μεγάλες αποστάσεις. Για το λόγο αυτό στην Ευρώπη οι πιο αποδοτικές περιοχές είναι οι Δυτικές ακτές, καθώς βρίσκονται στο τέλος μιας μεγάλης απόστασης, τον Ατλαντικό Ωκεανό. Τα κύματα έχουν περισσότερη ενέργεια στην ανοιχτή θάλασσα, μακριά από την ακτογραμμή και σε μεγάλα βάθη σε αντίθεση με τα μικρά βάθη κοντά στην ακτογραμμή όπου η αλληλεπίδραση λόγω τριβής με τον πυθμένα μειώνει την ενέργειά τους. Για την ανάκτηση της ενέργειας αυτής έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί μεγάλη ποικιλία συσκευών με διαφορετικό τρόπο λειτουργίας από διάφορες κατασκευάστριες εταιρίες.

Η κυματική ισχύς, ή η ροή ενέργειας ανά μονάδα μήκους μετώπου του κυματισμού (flux of energy per unit crest length), στην περίπτωση διάδοσής του σε βαθύ νερό δίνεται με καλή προσέγγιση από την σχέση:

$$J = \frac{\rho g^2}{64} T H^2 \quad (2.1)$$

όπου:  $\rho$  η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, έστω  $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $T$  η περίοδος του κύματος,  $H$  το ύψος κύματος και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας, έστω  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ , οπότε η προηγούμενη σχέση (1) γίνεται:

$$J = (490 \frac{W}{m^3 s}) T H^2 \quad (2.2)$$

Επομένως, προκύπτει πως η δυναμική ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη της περιόδου και του τετραγώνου του ύψους του και μετριέται σε KW/m μετώπου του.

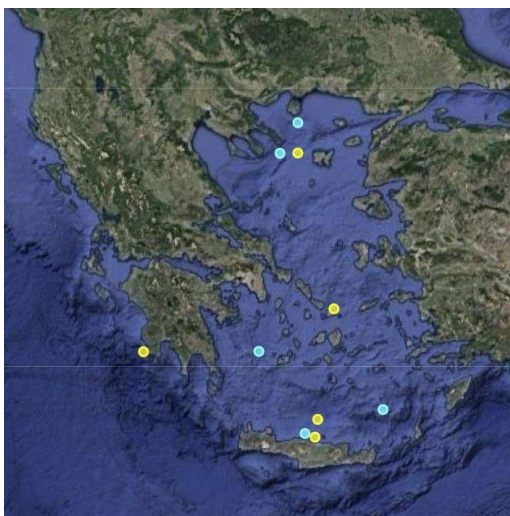
## 2.2 Κυματικό δυναμικό

### 2.2.1 Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών

Οι τρόποι λήψης και εκτίμησης δεδομένων είναι οι εξής:

- Από δορυφόρους (σκεδασιόμετρα και αλτίμετρα) που προσδίδουν συνεχή παροχή δεδομένων σχετικά με τη θαλάσσιο περιβάλλον έχοντας μοναδικό μειονέκτημα ότι η θέση τους συνεχώς αλλάζει (Satellite radar altimeter-RA, ERS-1/2, TOPEX, Geosat Follow-On, Jason, Envisat), Synthetic Aperture Radar – SAR).
- Από επιτόπιες μετρήσεις οι οποίες παρέχουν συνεχή ενημέρωση. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως το υπάρχον δίκτυο είναι μικρό (κυματογράφοι, πιεσόμετρα βυθού, συστήματα sonar ULS, Doppler current profilers, κλπ).
- Μέσω επιχειρησιακών μοντέλων προσομοίωσης τα οποία λειτουργούν ως προγνωστικά σε συνεχή ροή, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παρελθόντος καθώς και των δορυφορικών και επιτόπιων μετρήσεων.

Στον ελλαδικό θαλάσσιο χώρο σημαντικό σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης των κυματισμών αποτελεί το δίκτυο κυματογράφων «Ποσειδών» του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Το δίκτυο αποτελείται από 12 ωκεανογραφικούς και 10 πλωτήρες SeaWatch και μέσω αυτών μετράται το ύψος και η κατεύθυνση των κυματισμών. Στους πλωτήρες είναι εγκατεστημένοι και αισθητήρες για την μέτρηση: α) της ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, β) της θερμοκρασίας και της πίεσης της ατμόσφαιρας, γ) του σημαντικού ύψους, της κατεύθυνσης και της περιόδου του κύματος, δ) της επιφανειακής θερμοκρασίας και αλατότητας και ε) της ταχύτητας και της κατεύθυνσης των ρευμάτων. Τα παραπάνω δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται καταλλήλως καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και εν συνεχεία αποστέλλονται κάθε 3 ώρες δορυφορικά στο ΕΛΚΕΘΕ προς περαιτέρω επεξεργασία και εισαγωγή τους στα προγνωστικά του μοντέλα. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι θέσεις των πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών στον ελλαδικό χώρο [28].

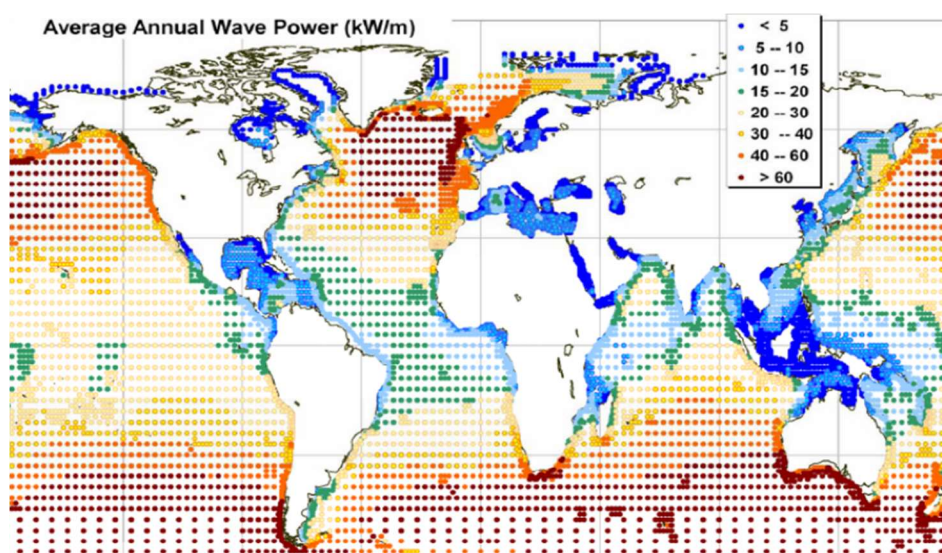


Εικόνα 2.1 Δίκτυο πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών [28]

### 2.2.2 Κατανομή κυματικού δυναμικού

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.3 το παγκόσμιο κυματικό ενεργειακό δυναμικό εκτιμάται σε 29.500 TWh/yr, εκ των οποίων το 10% βρίσκεται στην Ευρώπη. Οι διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες έχουν γενικά ακτογραμμές με διαφορετική πυκνότητα προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας ανά km ακτογραμμής. Οι διαφορές μπορεί να οφείλονται στην απόσταση από την ακτή όπου το βάθος του νερού μπορεί να θεωρηθεί ως «βαθύ», στα γεωλογικά χαρακτηριστικά του πυθμένα, στην ύπαρξη ή μη θαλάσσιων ρευμάτων και παλίρροιας [17]. Οι διαφορές στην διατιθέμενη ενεργειακή πυκνότητα αντικατοπτρίζεται και στον σχετικά μεγάλο αριθμό τεχνολογιών που έχουν προταθεί για την μετατροπή της κυματικής ενέργειας.

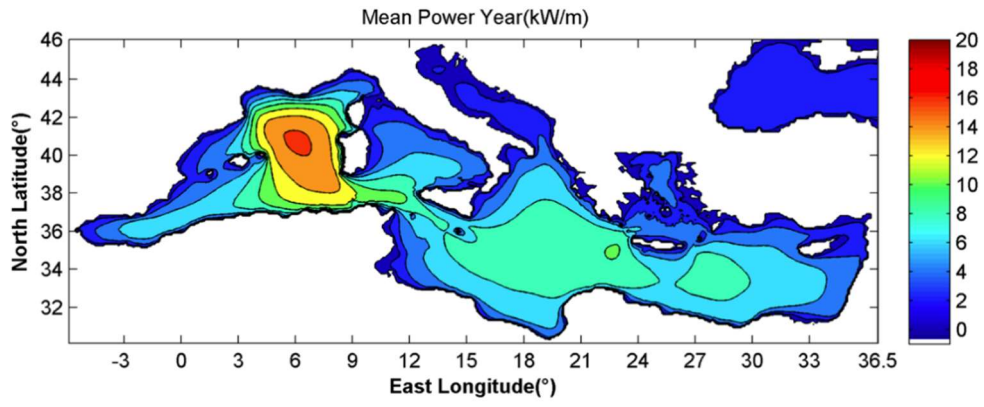
Η κυματική ενέργεια είναι ανισομερώς κατανομημένη παγκοσμίως. Στην εύκρατη ζώνη δηλαδή σε γεωγραφικά ύψη μεταξύ 30° και 60° το δυναμικό των κυματισμών είναι υψηλότερο, με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 20-70GW/m κυματικού μετώπου.



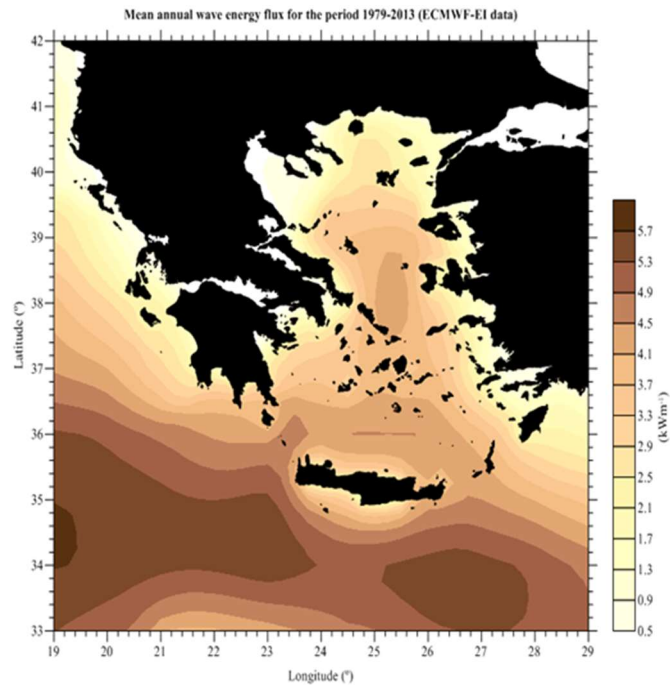
Εικόνα 2.2 Ετήσιο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό [29]

Υπολογίζεται πως το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό των χωρών της Ε.Ε. είναι 150-230 TWh/yr, εκ των οποίων τα 4-11TWh/yr αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στην Μεσόγειο [30], ενώ στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται κατ' αντιστοιχία το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στις Ελληνικές θάλασσες.





Εικόνα 2.3 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στη Μεσόγειο [30]



Εικόνα 2.4 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό ανά μήκος μετώπου κύματος [31]

## 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας

Η χρήση συσκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, τα οποία θα δούμε παρακάτω.

### 2.3.1 Πλεονεκτήματα

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Σ.Α.Κ.Ε είναι:

- Οι θαλάσσιοι κυματισμοί διαθέτουν την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ [33]. Οι κυματισμοί δημιουργούνται από τον άνεμο, οι οποίοι με την σειρά τους δημιουργούνται από την ηλιακή ενέργεια. Πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας τυπικού μεγέθους  $0.3 \text{ kW/m}^2$  οριζόντιας επιφάνειας, μετατρέπεται σε μια μέση πυκνότητα κυματικής ενέργειας  $2 - 3 \text{ kW/m}^2$  ανά μονάδα επιφάνειας κάθετα τοποθετημένης στην διεύθυνση μετάδοσης των κυμάτων, ακριβώς κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια [34]
- Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας φαίνεται ότι έχει πολύ περιορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Στην [15] εξετάστηκε η ενδεχόμενη επίπτωση στο περιβάλλον μιας παράκτιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας στη διάρκεια της ζωής της (life cycle emission assessment). Διαπιστώθηκε ότι γενικά οι υπεράκτιες κατασκευές προκαλούν την χαμηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.
- Έχει αναφερθεί προηγουμένως ότι οι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας μπορούν να παράγουν ισχύ για μεγαλύτερο από το 90% του χρόνου ζωής τους, συγκρινόμενες με τις συσκευές ανάκτησης αιολικής ή ηλιακής ενέργειας που αποδίδουν στο 20 – 30% του χρόνου ζωής τους [34].
- Παρατηρείται μια φυσική εποχική μεταβλητότητα της κυματικής ενέργειας, η οποία ακολουθεί και την ηλεκτρική ζήτηση στα εύκρατα κλίματα [33].
- Οι κυματισμοί μπορεί να διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες.
- Δημιουργούν ελάχιστη οπτική όχληση σε σχέση με άλλες υπεράκτιες ΑΠΕ. (όπως οι πλωτές ανεμογεννήτριες), οπότε υπάρχει η δυνατότητα πόντισης και λειτουργίας τους πιο κοντά στην ακτογραμμή. Λόγω αυτού, επιτυγχάνεται ευκολότερη προσβασιμότητα συντήρησης και μικρότερο κόστος καλωδιώσεως για τη μεταφορά της ενέργειας προς την ακτή.
- Η ενδεχόμενη ηχητική όχληση στο πλησίον ηπειρωτικό περιβάλλον είναι μηδαμινή.
- Η αναγκαία έκταση πόντισής τους είναι αμελητέα και συνήθως βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή, αφού το καταλληλότερο βάθος βυθού για τις Σ.Α.Κ.Ε. είναι της τάξης των 50m. Έτσι δεν παρεμποδίζονται άλλες χρήσεις που προϋπήρχαν στην περιοχή αυτή, όπως περιοχές αλιείας.

### 2.3.2 Μειονεκτήματα

Τροχοπέδη στην ως τώρα ανάπτυξη και χρήση των τεχνολογιών ανάκτησης της κυματικής και της ωκεάνιας εν γένει ενέργειας (ocean energy) αποτέλεσαν οι εξής κυρίως παράγοντες [35] [36]: (i) η ωρίμανση των τεχνολογιών, (ii) τα χρηματοδοτικά εργαλεία για την υποστήριξή τους, (iii) θέματα που σχετίζονται με το περιβάλλον, καθώς και (iv) η διαθεσιμότητα του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα:

- (i) ωρίμανση των τεχνολογιών: παρά τις μέχρι τώρα προόδους, οι σχετικές τεχνολογίες για την ανάκτηση της θαλάσσιας ενέργειας εξακολουθούν να μην είναι ανταγωνιστικές σε σχέση με άλλες μορφές ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων.

Ένας σημαντικός παράγοντας δυσκολίας είναι οι εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος λόγω κυρίως των κυματισμών στις οποίες εκτίθενται οι συσκευές αυτές και τα επί μέρους λειτουργικά τους συστήματα (π.χ. αγκυρώσεις), με αποτέλεσμα η ανάγκη επίτευξης της δομικής τους ακεραιότητας τόσο σε συνθήκες λειτουργίας όσο και σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες επιβίωσης με στόχο την επίτευξη μακροχρόνιας λειτουργικής αξιοπιστίας των κατασκευών, να αυξάνει το κατασκευαστικό κόστος και συνακόλουθα και το κόστος της παραγόμενης ενέργειας (Levelised Cost of Electricity – LCOE).

Πέραν τούτου, η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία των επιμέρους ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, των ηλεκτρονικών μετατροπέων, κ.α. για την ανάκτηση της ενέργειας και την μετατροπή της, ακανόνιστης, με τυχαία κατεύθυνση, φάση και μικρή συχνότητα, ενέργειας των κυματισμών, στην απαιτούμενη σταθερή συχνότητα ηλεκτρισμού, μπορεί να επηρεάσουν την εν γένει αξιοπιστία των συσκευών ανάκτησης της κυματικής ενέργειας [37].

Στα παραπάνω θα πρέπει να προσθέσουμε και την δυσκολία, όπως στην περίπτωση κάθε ΑΠΕ., της αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας σε περιόδους που η ζήτησή της είναι χαμηλή, καθώς και την πολυμορφία των συσκευών σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες εκμετάλλευσης ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων (άνεμος), στις οποίες έχει επικρατήσει η οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτρια.

- (ii) χρηματοδοτικά εργαλεία και η αγορά: Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στις επενδύσεις για την ωκεάνια ενέργεια (Ocean Energy), έχοντας επενδύσει 125 εκατομμύρια ευρώ για έρευνα και ανάπτυξη [38] σε προγράμματα κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας. Εν τούτοις το ποσοστό της χρηματοδότησης για την έρευνα και την ανάπτυξη της ωκεάνιας ενέργειας είναι μόνον το 10% του ποσού που έχει διατεθεί για την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας και αυτό λόγω του μικρού βαθμού ωριμότητας της σχετικής τεχνολογίας ανάκτησής της. Κατά συνέπεια απαιτείται ανάπτυξη της ωκεάνιας ενέργειας για να προκληθεί περαιτέρω ιδιωτικό και δημόσιο ενδιαφέρον και χρηματοδοτήσεις.
- (iii) θέματα που σχετίζονται με το περιβάλλον: Ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ωκεάνιας ενέργειας, είναι και η αβεβαιότητα που εκφράζεται σχετικά με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις που μπορεί

να έχουν οι τεχνολογίες αυτές στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η αβεβαιότητα αυτή, σε συνδυασμό με την έλλειψη συγκεκριμένης αδειοδοτικής και εγκριτικής διαδικασίας, οδηγεί τους δημιουργούς των τεχνολογιών στην ανάγκη εφαρμογής αυστηρών και ακριβών διαδικασιών παρακολούθησης των επιπτώσεων πριν και μετά την έγκριση. Επίσης, επιφυλάξεις που εκφράζονται για την ενδεχόμενη επίδραση της ανάπτυξης των διαφόρων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ωκεάνιας ενέργειας στο περιβάλλον, δημιουργούν προβλήματα αποδοχής τους από το κοινωνικό σύνολο με αποτέλεσμα σημαντικές καθυστερήσεις κατά την ανάπτυξη και αντιπαραθέσεις με τις τοπικές κοινωνίες. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να αυξηθεί η γνώση επί του αντικειμένου, αναλύοντας τις επιπτώσεις και σχεδιάζοντας μέτρα για τον περιορισμό ή την παντελή εξάλειψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περιοχή εγκατάστασης της τεχνολογίας [22].

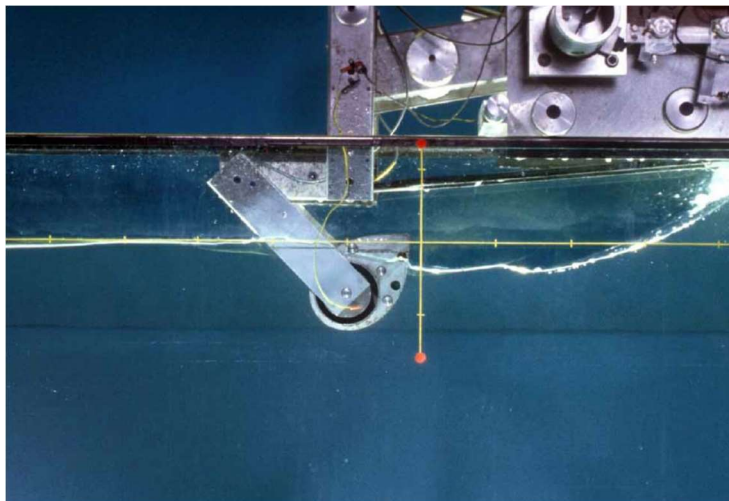
- (iv) διαθεσιμότητα του δικτύου: Η έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου διασύνδεσης της ενέργειας, που μπορεί να οφείλεται στο κανονιστικό πλαίσιο, στην ασυμβατότητα με υπάρχουσες υποδομές ή ακόμα και με την έλλειψη πολιτικής βούλησης δημιουργεί πρόβλημα στην επιτάχυνση της ανάπτυξης των τεχνολογιών και στην εξεύρεση χρηματοδοτήσεων. Στο πλαίσιο αυτό, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη εμπειρία που έχει προκύψει με την ανάπτυξη της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας και σε συντονισμένες δράσεις μεταξύ των δύο τεχνολογιών.

## 2.4 Ιστορική αναδρομή Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας.

Η χρήση των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας εμφανίστηκε σε πρώιμο στάδιο τον 18ο αιώνα. Πρώτη ευρεσιτεχνία για παραγωγή ενέργειας από τα κύματα, αποτέλεσε αυτή που κατατέθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Girard, η οποία δεν εφαρμόστηκε ποτέ. Ακολούθησαν αρκετές άλλες ευρεσιτεχνίες, όμως η πρώτη εφαρμογή μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική έγινε το 1910 στο Bordeaux της Γαλλίας από τον Bouchaux-Pratique προς ηλεκτροδότηση του σπιτιού του. Αποτελούσε συγχρόνως και την πρώτο δείγμα συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης - OWC (Oscillating Water Column).

Πολύ σημαντική έρευνα υπό το σύγχρονο επιστημονικό πρίσμα ξεκίνησε την δεκαετία του 1940 από τον Ιάπωνα Yoshio Masuda, ο οποίος μελέτησε και δοκίμασε διάφορα είδη διατάξεων Σ.Α.Κ.Ε. και ανέπτυξε ιδιαίτερα τον τύπο της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης - OWC (Oscillating Water Column).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ξεκίνησε εκτεταμένη έρευνα για ΑΠΕ. και ειδικότερα για Σ.Α.Κ.Ε., λόγω της τότε πετρελαϊκής κρίσης. Συμμετείχαν και ασχολήθηκαν επί του θέματος πολλοί διακεκριμένοι ακαδημαϊκοί όπως οι: Kiell Budal, Johannes Falnes, Michael French, John Newman David Evans, Michael McCormick και Stephen Salter. Ο τελευταίος, από το πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, εφηύρε την ομώνυμη συσκευή Salter's Duck [34]. Η απόδοσή της σύμφωνα με τα υπό κλίμακα πειράματα ήταν 80%. Περιείχε ένα εκκρεμές στο εσωτερικό της και όσο κινείτο η συσκευή από τους κυματισμούς, ταλαντωνόταν και αυτό μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική.



Εικόνα 2.5 Συσκευή Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας.: Salter's Duck [34]

Ωστόσο την επόμενη δεκαετία η τιμή του πετρελαίου επανήλθε στα πρότερα φυσιολογικά της επίπεδα και συνεπακόλουθα ο ως τότε ρυθμός εξέλιξης Σ.Α.Κ.Ε. ελαττώθηκε σημαντικά. Όμως την τελευταία 20ετία το ενδιαφέρον για χρήση Σ.Α.Κ.Ε. και γενικότερα για ΑΠΕ. αυξήθηκε σημαντικά λόγω της κλιματικής αλλαγής και της ανάγκης απεξάρτησης από την επιβλαβή χρήση υδρογονανθράκων προς παραγωγή ενέργειας.

## 2.5 Τεχνολογίες Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας

Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες αιολικής ενέργειας, στις οποίες έχει επικρατήσει ένας τύπος ανεμογεννήτριας για την ανάκτησή της (οριζοντίου άξονα, μεγάλης ονομαστικής ισχύος), υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών και αντίστοιχα μεγάλος αριθμός συσκευών για την ανάκτηση της κυματικής ενέργειας. Πάνω από 1000 πατέντες έχουν κατατεθεί στην Ιαπωνία, τις ΗΠΑ και την Ευρώπη [33]. Παρά τον μεγάλο αριθμό συσκευών που διακρίνονται ως προς την σχεδιάσή τους, εν τούτοις μπορεί να καταταχθούν σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασής τους και την αρχή λειτουργίας τους.

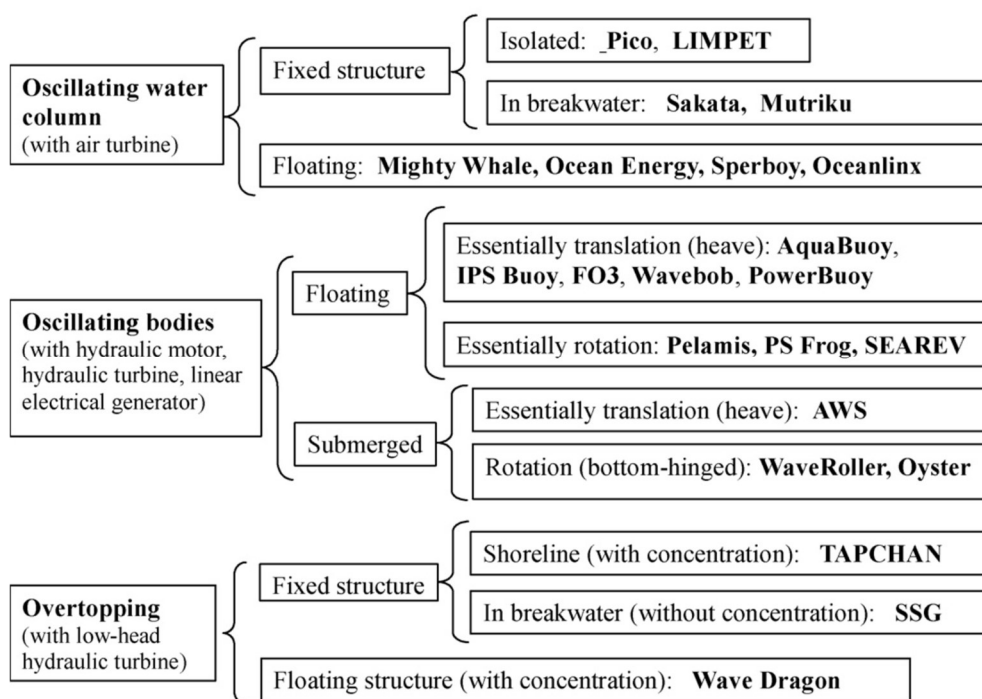
Σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασής τους οι Σ.Α.Κ.Ε διακρίνονται σε:

- (i) Επάκτιες συσκευές (shoreline devices). Οι επάκτιες συσκευές έχουν το προτέρημα να βρίσκονται κοντά στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι εύκολο να συντηρηθούν, και, καθώς οι κυματισμοί έχουν εξασθενήσει διαδιδόμενοι σε ρηχά νερά, οι συσκευές έχουν μικρή πιθανότητα να υποστούν ζημιά από αυτούς σε περιπτώσεις ακραίων φορτίσεων.
- (ii) Παράκτιες συσκευές. Οι παράκτιες συσκευές είναι εγκαταστάσεις που βρίσκονται όχι μακρύτερα από 500 μέτρα από την ακτογραμμή και που είναι αγκυρωμένες σε σχετικά μικρά βάθη (της τάξεως των 20 με 30 μέτρων ή και μικρότερα). Έχουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης εξ' αιτίας της μικρής απόστασης, ενώ ταυτόχρονα συναντούν υψηλότερο κυματικό δυναμικό από αυτό που υπάρχει συνήθως στην ακτή. Οι συσκευές σε αυτές τις τοποθεσίες είναι συχνά προσδεδεδεμένες στον πυθμένα, γεγονός που τους δίνει μια κατάλληλη ακίνητη βάση, με την οποία μπορεί να συνεργαστεί ένα ταλαντευόμενο σώμα.
- (iii) Υπεράκτιες κατασκευές. Οι υπεράκτιες συσκευές είναι τοποθετημένες σε βαθιά νερά. Το προτέρημα να είναι μια συσκευή τοποθετημένη σε βαθύ νερό είναι ότι μπορεί να απορροφήσει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας λόγω του υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου των κυματισμών που διαδίδονται σε βαθύ νερό. Ωστόσο, οι υπεράκτιες συσκευές είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν και να συντηρηθούν, ενώ λόγω των μεγαλύτερων κυματισμών και του μεγαλύτερου ενεργειακού περιεχομένου των κυμάτων, χρειάζεται να σχεδιαστούν ώστε να αντέχουν σε πιο ακραίες συνθήκες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος κατασκευής. Αυτό σε συνδυασμό με πρόσθετα προβλήματα αγκύρωσής τους, καθώς και προσβασιμότητας για την συντήρησή τους, αλλά και των μεγάλου μήκους υποθαλάσσιων καλωδιώσεων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν καθυστερήσει την ανάπτυξή τους και μόνον μερικά από τα συστήματα αυτά έχουν φθάσει σε επιδεικτικό επίπεδο στο φυσικό τους μέγεθος.

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας των Σ.Α.Κ.Ε, μπορούμε να διακρίνουμε τεχνολογίες που βασίζονται [39]:

- (i) Στη Ταλαντευόμενη Υδάτινη Στήλη (Oscillating Water Column – OWC), όπου η απόληψη της ενέργειας γίνεται με αεροστρόβιλο και με συσκευές επάκτιες ή πλωτές.
- (ii) Στις ταλαντώσεις/κινήσεις σωμάτων (oscillating bodies), όπου η απόληψη της ενέργειας γίνεται μέσω υδραυλικών κινητήρων, υδροστροβίλων ή/και γραμμικών ηλεκτρικών κινητήρων. Οι συσκευές μπορεί να είναι πλωτές ή βυθισμένες.
- (iii) Στην υπερχειλίση (overtopping), όπου η απόληψη της ενέργειας γίνεται με χαμηλού μανομετρικού υδροστροβίλους και συσκευές επάκτιες ή και πλωτές.

Στην εικόνα 2.6 που έχει ληφθεί από το [39], παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τεχνολογιών, μαζί με χαρακτηριστικά παραδείγματα συσκευών/μονάδων που έχουν κατασκευαστεί με βάση την κάθε μια από αυτές. Ο κατάλογος των συσκευών είναι ενδεικτικός και δεν εξαντλεί το πλήθος των εγκατεστημένων μονάδων.



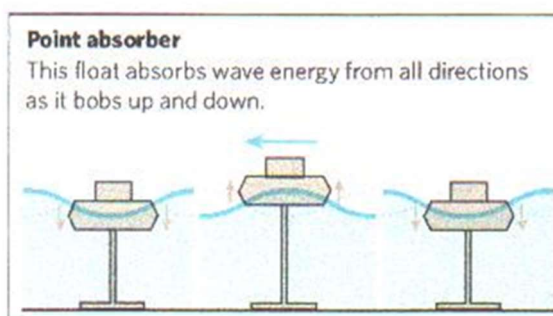
Εικόνα 2.6: Οι κατηγορίες των διαφόρων τεχνολογιών ανάκτησης κυματικής ενέργειας Πηγή [39]

Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των πλέον αντιπροσωπευτικών τεχνολογιών που προαναφέρθηκαν.

### 2.5.1 Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers)

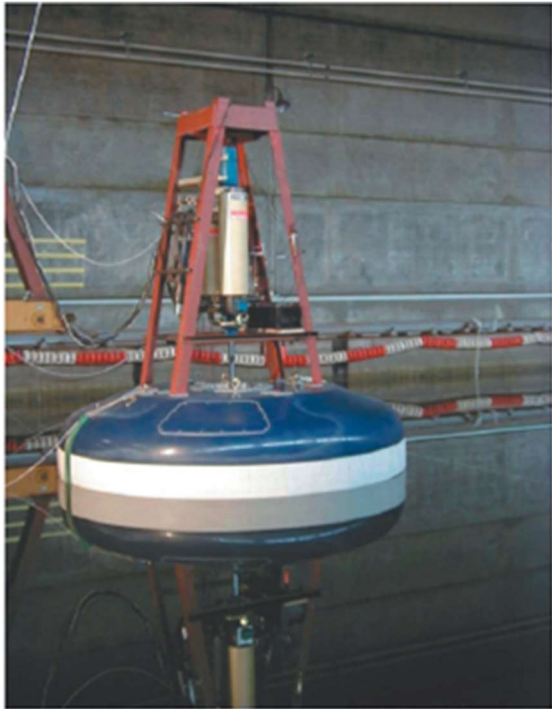
Οι σημειακοί απορροφητές ενέργειας είναι συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία των ταλαντευόμενων σωμάτων, σύμφωνα με την κατάταξη της Εικόνας 2.6, και εκμεταλλεύονται την ανύψωση και πτώση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (κορυφή και κοιλάδα κύματος), προκειμένου να κινήσουν μέσω διαφόρων μηχανισμών, γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Απορροφούν ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις πρόσπτωσης του κυματισμού. Μπορούν να διακριθούν σε διατάξεις ενός ή δύο καθ' ύψος κινούμενων σωμάτων [39].

Οι διατάξεις ενός καθ' ύψος ταλαντευόμενου σώματος αποτελούνται συνήθως από πλωτήρα ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας και ακολουθεί την καθ' ύψος κίνησή της, κινούμενος σε σχέση με ένα σταθερό σημείο στον πυθμένα στο οποίο αγκυρώνεται (βλέπε εικόνα 2.7, όπου απεικονίζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας τους). Μεταξύ του πλωτήρα και του κλάδου αγκύρωσης παρεμβάλλεται ο μηχανισμός απόληψης ενέργειας που είναι συνήθως μια υδραυλική εμβολοφόρος αντλία. Η σχετική κίνηση μεταξύ του πλωτήρα και της αγκύρωσης στον πυθμένα, ενεργοποιεί τον μηχανισμό απόληψης ενέργειας (υδραυλική εμβολοφόρο αντλία), ο οποίος καταθλίβει υγρό μέσω βαλβίδων ελεγχόμενης λειτουργίας από δοχείο χαμηλής σε δοχείο υψηλής πίεσης. Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση σημειακού απορροφητήρα που αναπτύχθηκε στην Δανία την δεκαετία του 1990 και απορροφά ενέργεια κατά την καθ' ύψος κίνησή του, παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8 [40].



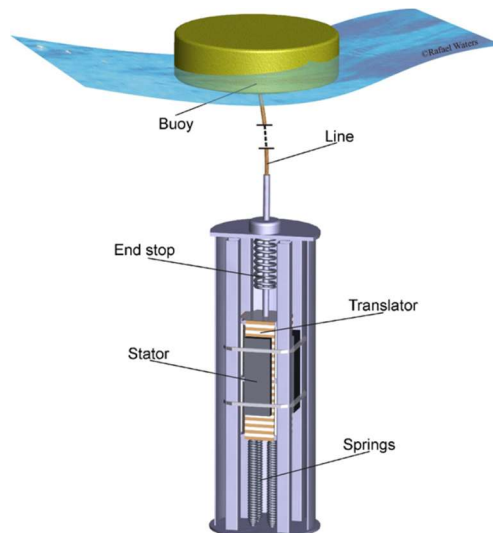
Εικόνα 2.7: Αρχή λειτουργίας σημειακών απορροφητήρων [41]





Εικόνα 2.8: Σημειακός απορροφητήρας με υδραυλικό μηχανισμό απόληψης ενέργειας [40]

Παραλλαγή του σημειακού απορροφητήρα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αποτελεί η διάταξη που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Uppsala [42], στην οποία ο υδραυλικός μηχανισμός απόληψης ενέργειας, έχει αντικατασταθεί από ηλεκτρικό κινητήρα που είναι εγκατεστημένος στον πυθμένα της θάλασσας και συνδέεται με τον πλωτήρα μέσω αγκύρωσης υπό προένταση, βλέπε Εικόνα 2.9 . Στη [42] γίνεται αναφορά και σε πειράματα που έγιναν στα ανοικτά των Σουηδικών ακτών με πλωτήρα 3m.



Εικόνα 2.9: Σημειακός απορροφητήρας με γραμμικό ηλεκτρικό κινητήρα απόληψης ενέργειας [39]

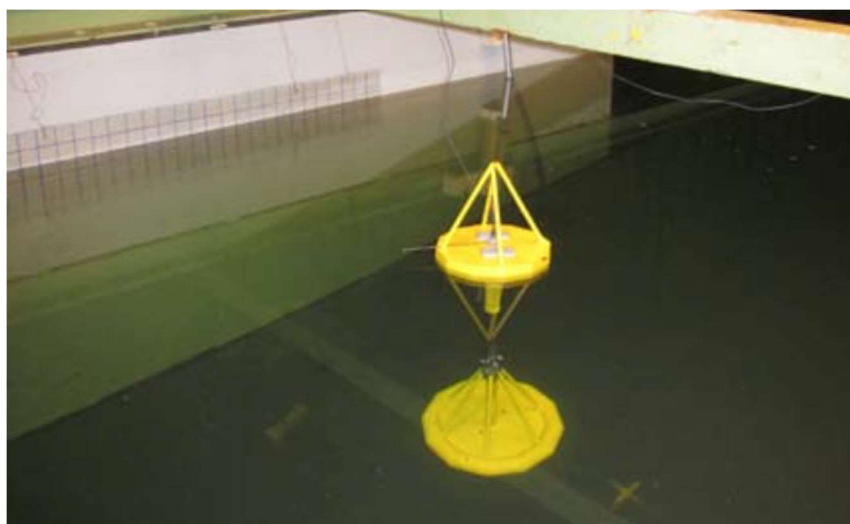
Η διάταξη του ενός καθ' ύψος κινούμενου σώματος που λειτουργεί ως σημειακός απορροφητήρας κυματικής ενέργειας, μπορεί να εμφανίζει δυσκολίες λόγω του βάθους του νερού ή παλιρροϊκών κινήσεων που αυξομειώνουν την στάθμη της θάλασσας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με διατάξεις δυο σωμάτων, στα οποία η ενέργεια απορροφάται μέσω της σχετικής κίνησης των δυο σωμάτων που κινούνται διαφορετικά. Η

υδροδυναμική τους συμπεριφορά αλλάζει σε σχέση με εκείνη ενός μεμονωμένου σώματος [43], [44], [45], [46], [47] ενώ εμφανίζουν και ειδικά προβλήματα ελέγχου της μεταξύ τους κίνησής τους [39].

Μια χαρακτηριστική περίπτωση διάταξης δύο σωμάτων είναι αυτή που αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Εταιρεία Ocean Power Technologies και φέρει το όνομα PowerBuoy. Απεικονίζεται στις Εικόνες 2.10 και 2.11 στις οποίες αναφέρονται και οι βιβλιογραφικές παραπομπές από τις οποίες ελήφθησαν. Στην περίπτωση της διάταξης αυτής, ένας επιφανειακός πλωτήρας μορφής δίσκου αλληλοεπιδρά με ένα βυθισμένο κυλινδρικό σώμα που καταλήγει σε μια οριζόντια πλάκα απόσβεσης που χρησιμοποιείται για να αυξήσει την αδράνεια του βυθισμένου κυλινδρικού σώματος μέσω της πρόσθετης μάζας του περιβάλλοντος νερού. Η σχετική κίνηση μεταξύ των δύο σωμάτων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδραυλικού μηχανισμού απόληψης της ενέργειας. Ένας τέτοιος πλωτήρας δοκιμάστηκε στην Ισπανία στην ανοικτή θάλασσα το 2008 [39].



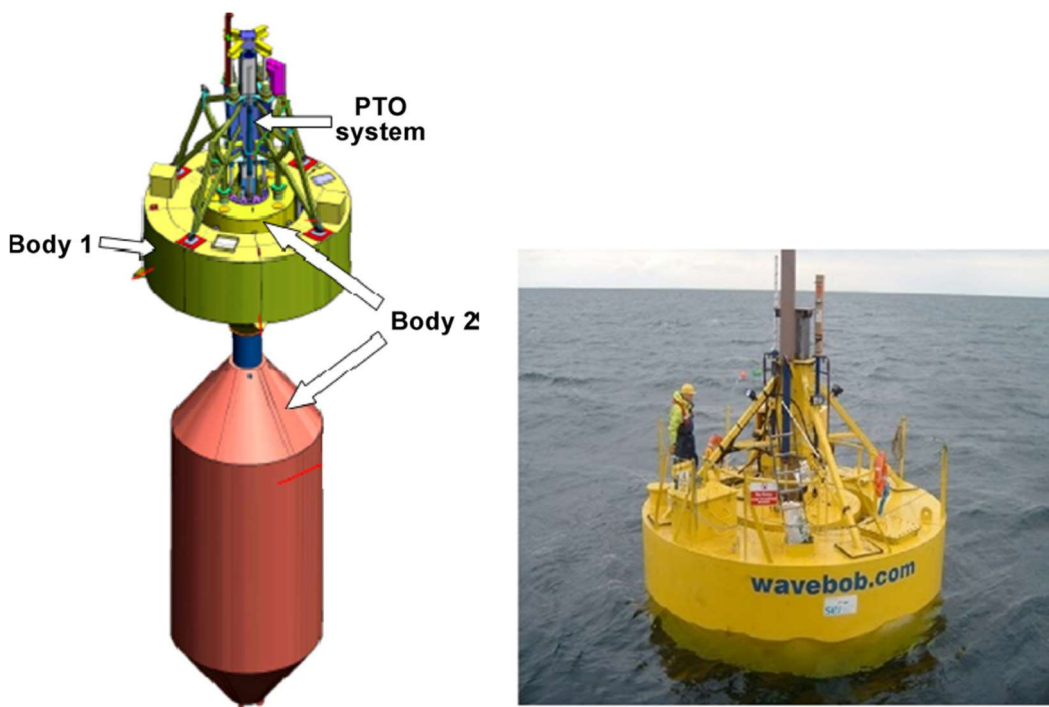
Εικόνα 2.10: Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [48], [39]



Εικόνα 2.11: Υπό κλίμακα διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [48]

Μια άλλη διάταξη δύο καθ' ύψος ταλαντευόμενων σωμάτων είναι ο πλωτήρας που φέρει το όνομα WaveBob [49] και απεικονίζεται στην Εικόνα 2.12. Αποτελείται από δύο ομοαξονικούς πλωτήρες, η σχετική κίνηση των οποίων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός υδραυλικού συστήματος υψηλής πίεσης με χρήση λαδιού. Ο εσωτερικός κύλινδρος είναι σταθερά συνδεδεμένος

με υποβρύχιο σώμα που βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια (βλέπε εικόνα 2.12) και το οποίο συνεισφέρει στην αύξηση της αδράνειας και επιτρέπει τον καλύτερο συντονισμό με την μέση συχνότητα του κύματος. Ένα υπό κλίμακα 1/4 μοντέλο της συσκευής δοκιμάστηκε στην Ιρλανδία (Galway Bay).



Εικόνα 2.12: Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων. WaveBob [49], [39]

Σε σχέση με τους σημειακούς απορροφητήρες απορρόφησης ενέργειας έχουν γίνει τις τελευταίες δεκαετίες πολλές έρευνες ([50], [51], [52], [53]) για την διάταξή τους σε συστοιχίες κατασκευών που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, σε τρόπο ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί η θετική επίδραση που μπορεί να έχουν οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συσκευών στην απόδοσή τους, καθώς επίσης και οι κοινές υποδομές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να βελτιωθεί η παραγόμενη τιμή της ενέργειας ανά kWh.

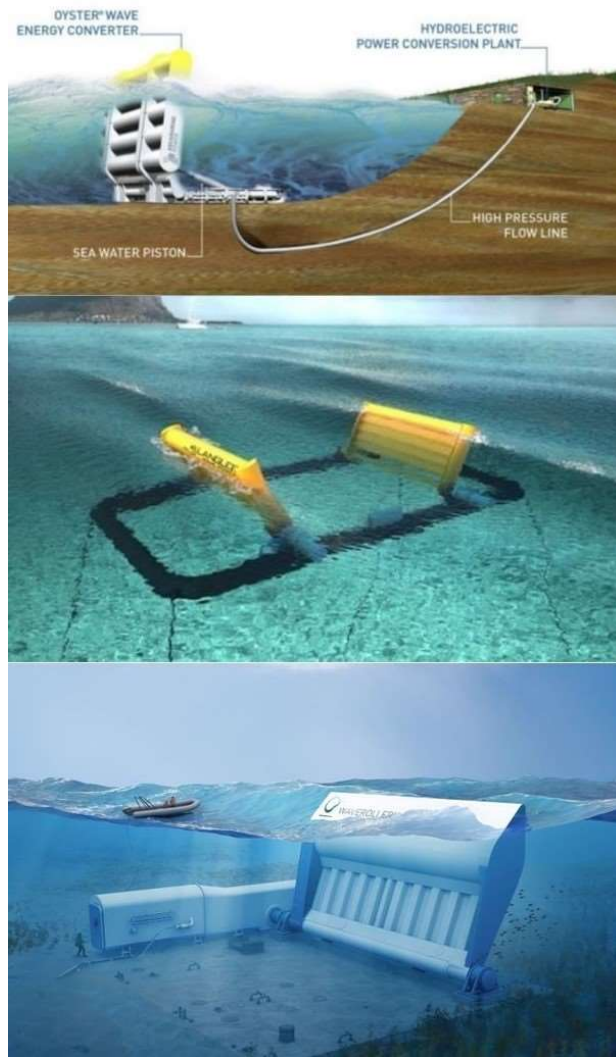
### 2.5.2 Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης ( Oscillating Wave pitch Converter)

Οι συσκευές αυτές, που ανήκουν στην κατηγορία των ταλαντευόμενων σωμάτων σύμφωνα με τη κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.6 προηγουμένως, εδράζονται αρθρωτά στο πυθμένα της θάλασσας σε συνήθως μικρά βάθη νερού (10 – 15m) σε τρόπο ώστε να μπορούν να εκτελούν κινήσεις προνευτασμού, εν είδη ανεστραμμένου εκκρεμούς και αποτελούνται από μια επίπεδη παλινδρομούσα άτρακτο που προσφέρει άνωση στο σύστημα και έναν βραχίονα που μέσω αυτού εδράζεται στον πυθμένα της θάλασσας (βλέπε εικόνα 2.13 όπου εμφανίζονται μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα της τεχνολογίας αυτής). Η άτρακτος κινείται περιστροφικά εξαιτίας της κίνησης των κυματισμών ενεργοποιώντας, λόγω της κίνησής της, υδραυλικούς κινητήρες που εδράζονται στον πυθμένα της θάλασσας που καταθλίβουν υψηλής πίεσης υγρό στην ακτή μέσω υποβρύχιου αγωγού [41].

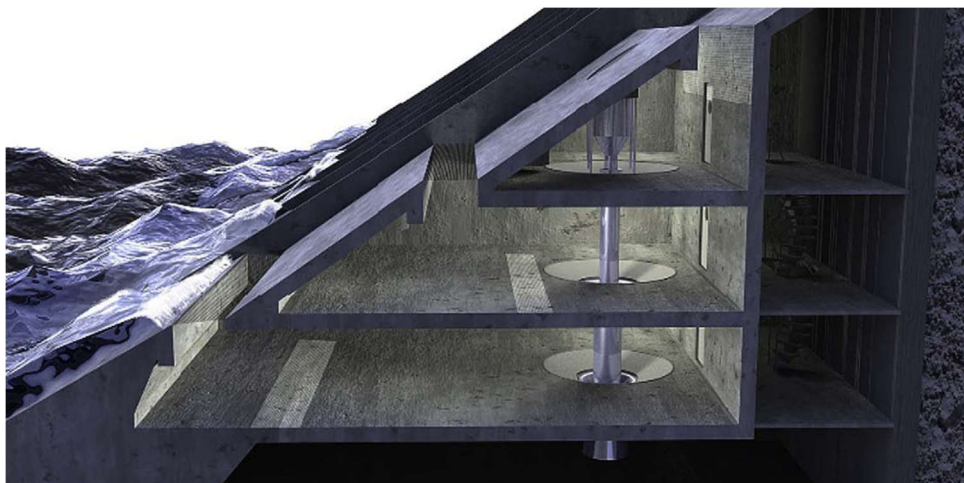
### 2.5.3 Συσκευές Υπερχείλισης του Νερού (Overtopping Device)

Αποτελούνται από ανοικτές δεξαμενές των οποίων το χείλος βρίσκεται πάνω από τη συνήθη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας. Το νερό που ξεπερνά το ύψος της δεξαμενής συλλέγεται σε αυτή και επαναφέρεται στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροτροβίλου, όπου μέσω γεννήτριας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Η τεχνολογία αυτή έχει βρει εφαρμογή τόσο σε επάκτιες, όσο και σε ανοικτής θάλασσας διατάξεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτού του είδους συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας είναι τα: SSG Wave Energy Converter της εταιρείας WAVEenergy [57] (βλέπε Εικόνα 2.14, για επάκτια κατασκευή) και το Wave Dragon [41] (βλέπε Εικόνα 2.15, για υπεράκτια πλωτή κατασκευή). Στην περίπτωση της Wave Dragon χρησιμοποιείται ένα είδος ημικυκλικού κυματικού συλλέκτη, προκειμένου να οδηγούνται οι κυματισμοί προς τη δεξαμενή.



Εικόνα 2.13: Συσκευές προνευτασμού (pitching devices) εδραζόμενες στον πυθμένα της θάλασσας ( Oyster[55], Langlee[56], Waveroller [57])



Εικόνα 2.14 Επάκτια συσκευή υπερχειλίσσης για την ανάκτηση κυματικής ενέργειας. SSG Wave Energy Converter [54]



*Εικόνα 2.15 Υπεράκτια συσκευή υπερχειλίσσης για την ανάκτηση κυματικής ενέργειας. Wave Dragon [41]*

#### 2.5.4 Pelamis

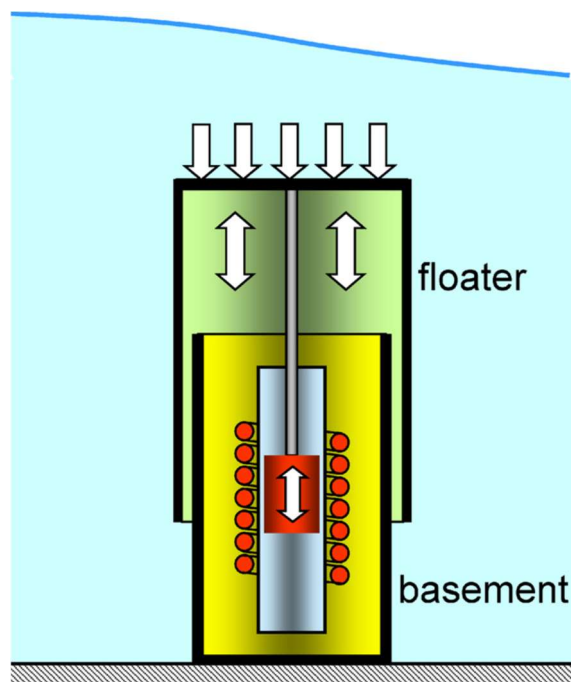
Ανήκει στην κατηγορία των ταλαντευόμενων συσκευών, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της Εικόνας 2.6 πιο πάνω, και έχει αναπτυχθεί από ποικίλους, όπως η WS Atkins [58]. Χαρακτηριστική μορφή της παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16. Αποτελείται από ενωμένα μεταξύ τους κυλινδρικά τμήματα μεγάλου μήκους και μικρής μετωπικής επιφάνειας ως προς το κύμα, τα οποία πλέουν ημιβυθισμένα στην ελεύθερη επιφάνεια. Οι συσκευές προσανατολίζονται στην διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών και ακολουθούν κατά το μήκος τους τις κινήσεις του κύματος. Μέσω υδραυλικών μηχανισμών στις αρθρώσεις σύνδεσης των τμημάτων μεταξύ τους, μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η συσκευή έχει την δυνατότητα να εκμεταλλεύεται κατά την λειτουργία των υδραυλικών μηχανισμών, όχι μόνον την σχετική περιστροφή στο κατακόρυφο επίπεδο στις αρθρώσεις σύνδεσης των επί μέρους κυλινδρικών τμημάτων μεταξύ τους, αλλά και στο οριζόντιο επίπεδο, κάτι που κάνει την απορρόφηση ενέργειας ακόμα μεγαλύτερη.



Εικόνα 2.16 Συσκευή Pelamis Πηγή [58]

### 2.5.5 Βυθισμένες Συσκευές Διαφοράς Πίεσης (Submerged Pressure Differential)

Οι συσκευές αυτές βρίσκονται συνήθως παράκτια και εδράζονται σταθερά στον πυθμένα της θάλασσας. Πρόκειται για συσκευές που εκμεταλλεύονται τη διαφορά στην υδροστατική πίεση που παρουσιάζεται από την ανύψωση και πτώση της ελεύθερης επιφάνειας. Αποτελούνται από ένα ανώτερο ταλαντευόμενο τμήμα (πλωτήρας) και μια βάση που εδράζεται στον πυθμένα. Σχηματικά αναπαριστάνεται στην εικόνα 2.17



Εικόνα 2.17: Σχηματική αναπαράσταση συσκευής διαφοράς πίεσης [39]

Ο πλωτήρας «αντιλαμβάνεται» τη διαφοροποίηση στη πίεση που του ασκείται, ανάλογα αν βρίσκεται κάτω από την κορυφή ή την κοιλιά του κύματος. Πιέζεται προς τα κάτω όταν βρίσκεται κάτω από την κορυφή του κύματος και κινείται προς τα πάνω όταν βρίσκεται κάτω από την κοιλιά του κύματος. Η ελεύθερη καθ' ύψος κίνηση εμποδίζεται από μια γραμμική γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, η δε εσωτερική πίεση του αέρα στον θάλαμο λειτουργεί σαν ελατήριο. Χαρακτηριστικό δείγμα αυτού του είδους συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας είναι το Archimedes Wave Swing (AWS), βλέπε Εικόνα 2.18, που αναπτύχθηκε από την Teamwork Technology, BV (NL) και σήμερα ανήκει στην AWS Ocean Energy Ltd. Το σύστημα εγκαταστάθηκε και λειτουργεί στην Πορτογαλία το 2004 και έχει ονομαστική ισχύ 2MW. Υπήρξε το πρώτο σύστημα στο οποίο εγκαταστάθηκε γραμμική γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

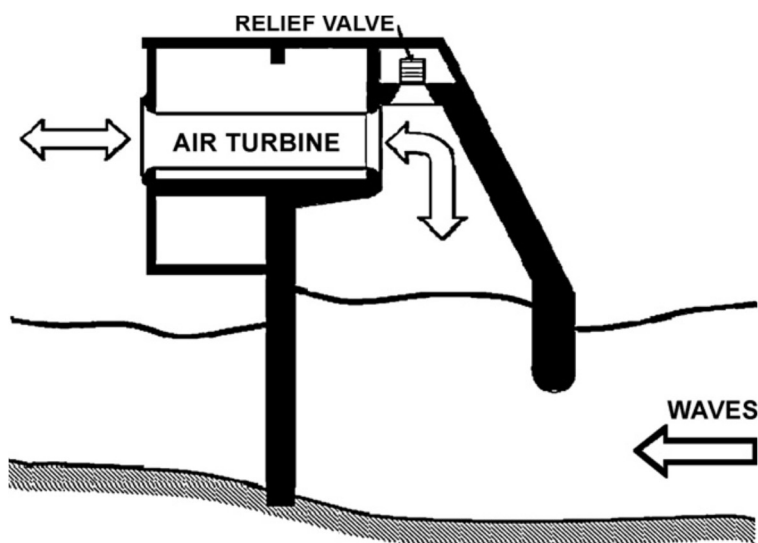




Εικόνα 2.18 Archimedes Wave Swing ( AWS) [59]

### 2.5.6 Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)

Αποτελούν κατασκευές ημιβυθισμένες, κενές εσωτερικά σε μορφή θαλάμου και ανοιχτές στο κατώτερο μέρος τους μέσω ανοίγματος προς την θάλασσα. Το ανώτερο σημείο αυτού του ανοίγματος είναι κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Σχηματική αναπαράσταση της συσκευής φαίνεται στην Εικόνα 2.19.



Εικόνα 2.19: Αρχή λειτουργίας ταλαντευόμενης στήλης νερού [39]

Ο θάλαμος ταλάντωσης της συσκευής πάνω από την επιφάνεια του νερού περιέχει αέρα. Κατά την πρόσπτωση των κυματισμών δημιουργείται παλινδρομική κίνηση του νερού, με αποτέλεσμα η στήλη του αέρα να συμπιέζεται και να αποσυμπιέζεται. Όταν η στάθμη του νερού μέσα στο θάλαμο πέφτει, επέρχεται εκτόνωση του θαλάμου και αναρροφάται ποσότητα αέρα από την ατμόσφαιρα μέσω ενός αεροστροβίλου. Όταν ανεβαίνει η στάθμη του νερού στον θάλαμο, ο αέρας που βρίσκεται από πάνω της συμπιέζεται και ο περιεχόμενος αέρας οδηγείται μέσω του ίδιου αεροστροβίλου προς και από την ατμόσφαιρα. Ο πιο συνηθισμένος τύπος αεροστρόβιλου είναι ο Wells, ο οποίος στρέφεται

προς την ίδια κατεύθυνση ανεξαρτήτως της φοράς κίνησης του αέρα (εκτόνωση, συμπίεση προς εξισορρόπηση της πίεσης). Μέσω αυτής της κίνησής του ενεργοποιείται μια γεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εκμεταλλευόμενη την κινητική ενέργειά του.

Οι πρώτες συσκευές αυτής της τεχνολογίας ήταν σταθερά εδραζόμενες σε παράκτιες κατασκευές της ακτογραμμής όπως κυματοθραύστες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι:

- (i) Το European Pilot OWC Plant που βρίσκεται στο νησί Pico στις Αζόρες με ονομαστική παραγόμενη ισχύ 400 kW. (Εικόνα 2.20)



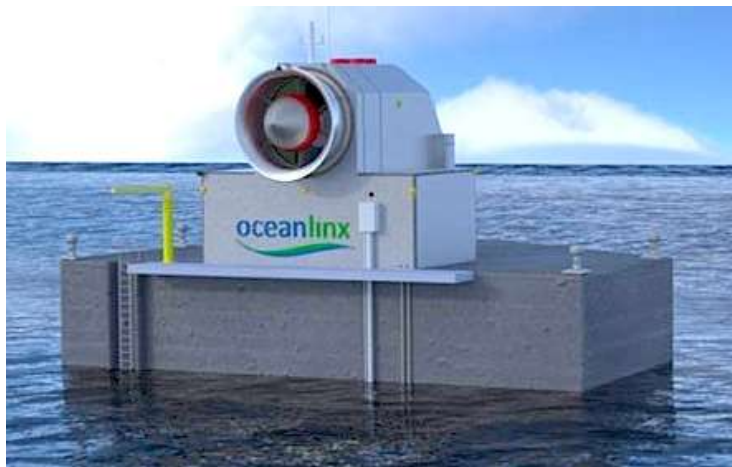
Εικόνα 2.20: Εγκατάσταση στο Pico στις Αζόρες (άνω) και ο αεροστρόβιλος της εγκατάστασης (κάτω) [41]

- (ii) Η εγκατάσταση Limpet OWC που αναπτύχθηκε από την WaveGen Ltd (UK) [41] και βρίσκεται στο νησί Islay στη δυτική ακτή της Σκωτίας με δύο τουρμπίνες Wells οι οποίες κινούν δύο γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 250kW η κάθε μια (συνολική ισχύς 500kW) (Εικόνα 2.21)



*Εικόνα 2.21: Εγκατάσταση Limpet OWC στο νησί Islay [41]*

Η αρχή λειτουργίας της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης επεκτάθηκε στη συνέχεια με επιτυχία και σε πλωτές εγκαταστάσεις οι οποίες έχοντας κατάλληλη αγκύρωση μπορούν να λειτουργούν απρόσκοπτα σε υπεράκτιες συνθήκες. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτής της κατηγορίας συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας είναι τα εξής: Oceanlix (Εικόνα 2.22) και το Ocean Energy Buoy (Εικόνα 2.23).

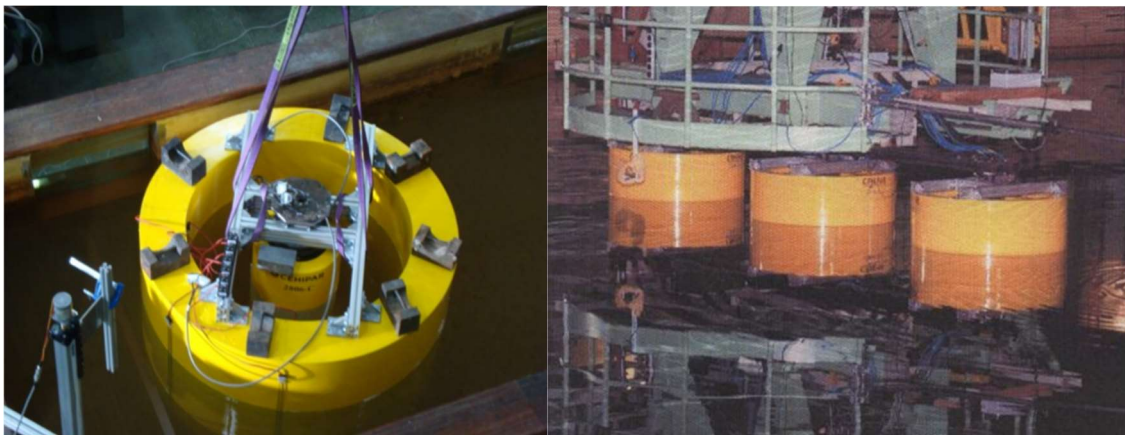


*Εικόνα 2.22: Πλωτή συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης Oceanlix [60]*



Εικόνα 2.23 Μοντέλο σε κλίμακα 1:4 πλωτής συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης Ocean Energy Buoy [61]

Σχετικά με τις υπεράκτιες πλωτές κατασκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, τα τελευταία χρόνια γίνεται συστηματική έρευνα για εναλλακτικές διατάξεις του θαλάμου ταλάντωσης του ρευστού ώστε να δημιουργούνται απλές ή ομοαξονικές δακτυλιοειδείς περιοχές ταλάντωσης της επιφάνειας του ρευστού μέσα στο πλωτό σώμα (βλέπε Εικόνες 2.24 και 2.25) με σκοπό να διαπιστωθεί η δυνατότητα αύξησης της απόδοσης των συσκευών λόγω της δυνατότητας συντονισμού τους σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων του προσπίπτοντος κυματισμού ή ακόμα και με την εξέταση της αύξησης της απόδοσής τους με την δημιουργία συστοιχίας τέτοιων συσκευών που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους [62], [63], [64].



Εικόνα 2.24 Πλωτή συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Θάλαμος δημιουργούμενος από μεμονωμένους ή συστοιχία ομοαξονικών κυλίνδρων [46]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τέτοιου είδους πλωτές συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, που έχουν θαλάμους απλής, σύνθετης κυλινδρικής, σφαιρικής και κωνικής γεωμετρίας, καθώς και θαλάμους με απλές ή και επάλληλες ομοαξονικές δακτυλιοειδείς επιφάνειες ταλάντωσης της υδάτινης στήλης.

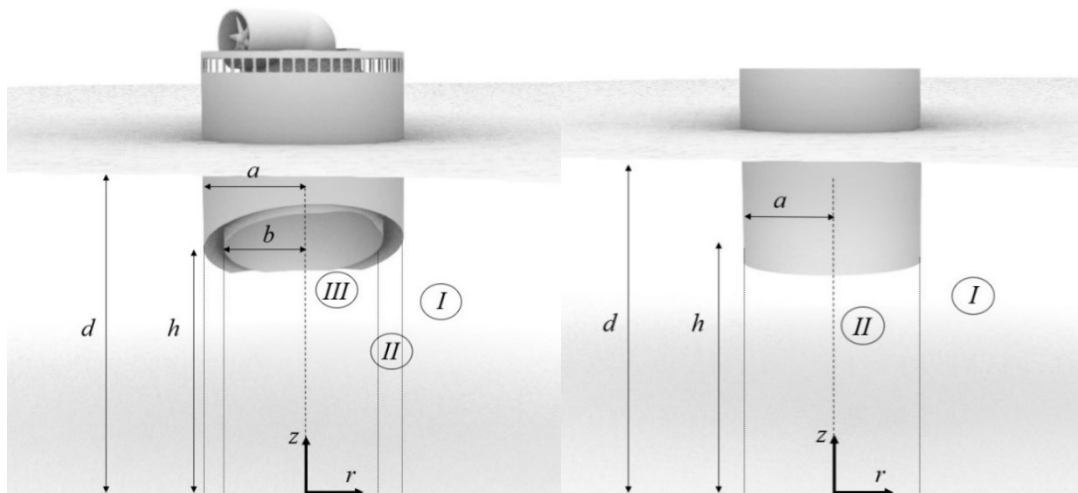
## 3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την υδροδυναμική ανάλυση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας, η απόληψη της οποίας βασίζεται τόσο στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης του νερού (oscillating water column – OWC), όσο και στον ταλαντευόμενο σημειακό απορροφητήρα (point absorber) κυλινδρικής γεωμετρίας με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας με στόχο εν τέλει να συζητηθούν κατάλληλα τα υδροδυναμικά τους χαρακτηριστικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης, ώστε να εξετασθεί η επίδραση των κλάδων αγκύρωσης στην απόδοση των συσκευών. Οι συσκευές και οι θάλαμοι ταλάντωσης της υδάτινης στήλης που εξετάζονται είναι εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας.

Η μέθοδος που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια ημιαναλυτική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς τυχαίας μορφής αξονοσυμμετρικών σωμάτων με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας και πρωτοπαρουσιάστηκε με λεπτομέρεια στην [65]. Στην παρούσα εργασία, με δεδομένο ότι έχουμε να αντιμετωπίσουμε και την περίπτωση αξονοσυμμετρικών σωμάτων με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, που περικλείουν στο εσωτερικό τους ελεύθερη επιφάνεια εντός του θαλάμου ταλάντωσης της υδάτινης στήλης, θα βασιστούμε στην ανάλυση της [65] και θα επεκτείνουμε τη μεθοδολογία όπως παρουσιάστηκε στις [62], [63], [64], [66], [67], [68] για σώματα με ελεύθερη επιφάνεια στο εσωτερικό τους.

Η μέθοδος βασίζεται στο διαχωρισμό του πεδίου της ροής γύρω από το σώμα, χρησιμοποιώντας ομοαξονικά δακτυλιοειδή στοιχεία, βλέπε σχήμα 3.1. Παρατηρούμε ότι κάθε σώμα της μορφής που εξετάζουμε και εμφανίζει συμμετρία ως προς κατακόρυφο άξονα, μπορεί να προσεγγιστεί με ομοαξονικά κυλινδρικά δακτυλιοειδή στοιχεία και ταυτόχρονα, το πεδίο ροής γύρω του διαχωρίζεται από αντίστοιχα κυλινδρικά δακτυλιοειδή στοιχεία, τα οποία ορίζονται τώρα από την βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος, την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και τον πυθμένα. Επομένως, έχουμε πεπερασμένα δακτυλιοειδή στοιχεία, που καλύπτουν το πεδίο ροής γύρω από το σώμα αλλά και ένα που επεκτείνεται μέχρι το άπειρο. Το τελευταίο «απειρού μεγέθους» δακτυλιοειδές στοιχείο χαρακτηρίζονται σαν τύπου I ενώ τα «πεπερασμένα» δακτυλιοειδή στοιχεία διακρίνονται σε δύο τύπους, II και III. Τύπου II είναι αυτά που εκτείνονται μεταξύ του σώματος και του πυθμένα ενώ τύπου III είναι αυτά που περικλείουν ελεύθερη επιφάνεια εντός του σώματος και εκτείνονται μεταξύ αυτής και του πυθμένα (Σχήμα 3.1α και 3.1β).



Σχήμα 3.1: Διαχωρισμός ροής γύρω από από κατακόρυφη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (α) και σημειακού απορροφητήρα (β)

### 3.2 Διατύπωση του υδροδυναμικού προβλήματος πρώτης τάξης (προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας)

Θεωρούμε τις δύο πλωτές συσκευές ανάκτησης της κυματικής ενέργειας που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1 οι οποίες δέχονται την επίδραση απλών αρμονικών κυματισμών πλάτους  $H/2$  και κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Οι εξεταζόμενες κυματικές συσκευές είναι: α) η συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης κυκλικής διατομής (OWC), εξωτερικής και εσωτερικής ακτίνας  $a, b$ , αντίστοιχα, και βυθίσματος  $(d - h)$  και ο σημειακός απορροφητήρας (point absorber), επίσης κυκλικής διατομής με ακτίνα  $a$  και βύθισμα  $(d - h)$ . Η ροή του ρευστού θεωρείται αστρόβιλη, ασυμπίεστη και μη συνεκτική, οπότε μπορεί να περιγραφεί από δυναμικό ταχύτητας. Λόγω της γεωμετρίας των εξεταζόμενων σωμάτων, χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες  $(r, \theta, z)$ , με αρχή τον πυθμένα της θάλασσας, και κατακόρυφο άξονα πάνω στον νοητό άξονα συμμετρίας κάθε συσκευής, διευθυνόμενο προς τα πάνω. Θεωρείται ότι το βάθος του νερού  $d$ , είναι σταθερό και ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι άπειρη προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι κινήσεις των κυματικών συσκευών και του περιρρέοντος ρευστού θεωρούνται μικρές ώστε το πρόβλημα των οριακών τιμών για την περίθλαση και την ακτινοβολία να θεωρείται γραμμικό.

Υπό την επίδραση ενός αρμονικού κυματισμού και υποθέτοντας ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα περί τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, το σώμα εκτελεί κίνηση σε τρεις βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο διάδοσης του κυματισμού, δύο μεταφορικές κινήσεις (στον άξονα  $x_1, x_2$ , καθ' ύψος μετατόπιση στον άξονα  $z, x_3$ ) και μια περιστροφή γύρω από τον άξονα  $x_5$ .

Υποθέτοντας ιδανικό ρευστό, μπορούμε να περιγράψουμε το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού γύρω από το σώμα κάνοντας χρήση του δυναμικού ταχύτητας, το ανάδελτα του οποίου, δίνει την ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου.

Το δυναμικό της ταχύτητας πρώτης τάξης μπορεί να εκφραστεί ως [64]:

Για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης:

$$\Phi(r, \theta, z; t) = \text{Re}\{\varphi_0(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_7(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1,3,5} \dot{x}_{j0} \cdot \varphi_j(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t} + p_{in0} \cdot \varphi_p(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t}\} \quad (3.1a)$$

Για τον σημειακό απορροφητήρα

$$\Phi(r, \theta, z; t) = \text{Re}\{\varphi_0(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_7(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1,3,5} \dot{x}_{j0} \cdot \varphi_j(r, \theta, z) \cdot e^{-i\omega t}\} \quad (3.1b)$$

όπου  $\varphi_0$ , είναι το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος απλού αρμονικού κυματισμού,  $\varphi_7$  είναι το δυναμικό σκέδασης (scattered wave potential) γύρω από το σώμα όταν αυτό είναι ακίνητο στον κυματισμό και με εσωτερική πίεση αέρα (συσκευή OWC) ίση με την ατμοσφαιρική,  $\varphi_j$ , ( $j=1,3,5$ ) είναι το δυναμικό ακτινοβολίας, το οποίο προκύπτει από την εξαναγκασμένη κίνηση του σώματος στην  $j$ -διεύθυνση της κίνησης με μοναδιαίο πλάτος ταχύτητας  $\dot{x}_{j0}$  στην  $j$ -διεύθυνση, με εσωτερική πίεση αέρα στο θάλαμο ίση με την ατμοσφαιρική (συσκευή OWC), και  $\varphi_p$ , είναι το δυναμικό πίεσης ακτινοβολίας, το οποίο προκύπτει από μοναδιαίου πλάτους εσωτερική πίεση αέρα στο θάλαμο της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, όταν η θεωρείται ακίνητη στον κυματισμό.

Το δυναμικό της περίθλασης (diffraction potential) για τις δύο μεμονωμένες κυματικές συσκευές περιγράφεται ως:

$$\varphi_D(r, \theta, z) = \varphi_0(r, \theta, z) + \varphi_7(r, \theta, z) \quad (3.2)$$

Το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος απλού αρμονικού κυματισμού μπορεί να εκφραστεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής :

$$\varphi_0(r, \theta, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \Psi_{0,m}(r, z) \cos(m\theta) \quad (3.3)$$

όπου:

$$\frac{1}{d} \Psi_{0,m}(r, z) = \frac{J_m(kr)Z_0(z)}{d \cdot Z'_0(d)} \quad (3.4)$$

Εδώ,  $J_m$  είναι οι συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους και  $m$ -τάξης,  $\varepsilon_m$  είναι το σύμβολο Neumann, με  $\varepsilon_0 = 1$  και  $\varepsilon_m = 2$ , όταν  $m \geq 1$ , και  $Z_0$  ορίζεται από τη σχέση:

$$Z_0(z) = N_0^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) = \left[ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \right]^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) \quad (3.5)$$

με  $Z'_0(d)$  τη παράγωγο της σχέσης (3.5) ως προς  $z$ , όταν  $z=d$ .

Η κυκλική συχνότητα  $\omega$  και ο κυματικός αριθμός  $k$  συνδέονται μέσω της εξίσωσης διασποράς:

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad (3.6)$$

Σε συμφωνία με τη σχέση (3.3) το δυναμικό περίθλασης γύρω από την κατασκευή μπορεί να γραφεί στη μορφή :

$$\varphi_D(r, \theta, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \Psi_{D,m}(r, z) \cos(m\theta) \quad (3.7)$$

ενώ τα δυναμικά ακτινοβολίας λόγω κίνησης και πίεσης γράφονται, αντίστοιχα :

$$\varphi_j(r, \theta, z) = \Psi_{j,m}(r, z) \cos(m\theta) \Big|_{j=1,3,5} \quad (3.8\alpha)$$

$$\varphi_p(r, \theta, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \Psi_{p,j}(r, z) \cos(m\theta) \quad (3.8b)$$

Η ροή του ρευστού, που προκαλείται από την ταλαντωτική κίνηση της συσκευής, σε ήρεμο νερό για την περίπτωση εξαναγκασμένης κίνησής της στον  $xx'$ -άξονα (surge,  $j=1$ ) και για την περιστροφή γύρω από τον  $yy'$  άξονα (pitch,  $j=5$ ) είναι συμμετρική με αναφορά το επίπεδο  $\vartheta = 0^\circ$  και αντισυμμετρική αναφορικά με το επίπεδο  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$ , ενώ είναι συμμετρική

αναφορικά και με τα δύο επίπεδα για την καθ' ύψος κίνηση στον άξονα  $zz'$  (heave,  $j=3$ ). Η πίεση εντός της συσκευής μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη καθ' όλη την επιφάνεια του θαλάμου. Επομένως, αφού η δύναμη που ασκεί στη συσκευή, η εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού είναι ανεξάρτητη του  $\vartheta$ , το δυναμικό ακτινοβολίας λόγω πίεσης, το οποίο προκύπτει από την εσωτερική ταλαντευόμενη πίεση αέρα, είναι, κατ' αντιστοιχία με την καθ' ύψος κίνηση (heave), συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα της συσκευής, περιλαμβάνοντας μόνο τον όρο  $m = 0$ . Επομένως οι σχέσεις 3.8α και 3.8b γράφονται:

$$\varphi_1(r, \theta, z) = \Psi_{1,1}(r, z) \cos(\theta)$$

$$\varphi_3(r, \theta, z) = \Psi_{3,0}(r, z) \quad (3.9\alpha)$$

$$\varphi_5(r, \theta, z) = \Psi_{5,1}(r, z) \cos(\theta)$$

$$\varphi_p(r, \theta, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \Psi_{p,0}(r, z) \quad (3.9b)$$

Στις συναρτήσεις  $\Psi_{jm}$  των εξισώσεων (3.7), (3.9α), (3.9b) ο πρώτος δείκτης  $j = D, 1, 3, 5, p$  δηλώνει το αντίστοιχο πρόβλημα οριακών τιμών, ενώ ο δεύτερος τις τιμές  $m$  που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Για τον λόγο αυτό οι συναρτήσεις  $\Psi_{D,m} (m = 0, 1, 2, \dots), \Psi_{1,1}, \Psi_{3,0}, \Psi_{5,1}, \Psi_{p,0}$  παραμένουν οι βασικοί άγνωστοι του προβλήματος.



### 3.3 Γραμμικοποιημένες οριακές συνθήκες

Τα μιγαδικά δυναμικά της ταχύτητας  $\varphi_j (j = D, 1, 3, 5, p)$  πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω σχέσεις :

$$\Delta \varphi_j = \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (3.10)$$

(εξίσωση Laplace) σε όλο τον όγκο ελέγχου του ρευστού

$$\omega^2 \varphi_j - g \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{όταν } r \geq a, & j = D, 1, 3, 5, p \\ 0 & \text{όταν } 0 \leq r \leq b, & j = D, 1, 3, 5 \\ -\frac{i\omega}{\rho} & \text{όταν } 0 \leq r \leq b, & j = p \end{cases} \quad \text{για } z = d \quad (\text{συνθήκη} \\ \text{ελεύθερης επιφανείας}) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{για } z = 0 \quad (\text{συνθήκη για τον πυθμένα της θάλασσας}) \quad (3.12)$$

Επιπλέον τα δυναμικά  $\varphi_j$  με  $j = 1, 3, 5, 7, p$  πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη ακτινοβολίας:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left( \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} - ik \varphi_j \right) = 0 \quad (3.13)$$

Τέλος οι κινηματικές συνθήκες για την βρεχόμενη επιφάνεια, ως προς την μέση θέση ισορροπίας του σώματος, διατυπώνονται τις εξισώσεις :

$$\left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} \right|_{S_0} = 0, \quad (j = D, p) \quad (3.14)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} \right|_{S_0} = n_j, \quad (j = 1, 3, 5) \quad (3.15)$$

Στις εξισώσεις (3.14) και (3.15) το  $\partial/\partial n$  δηλώνει την κατά την κατεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος  $n$  παράγωγο του δυναμικού ταχύτητας, με το κάθετο διάνυσμα να έχει κατεύθυνση προς τα έξω, πάνω στη επιφάνεια  $S_0$  του σώματος, οι δε συνιστώσες του γενικευμένου καθέτου διανύσματος,  $n_j$ , προσδιορίζονται ως:

$$(n_1, n_2, n_3) = n, \quad (n_4, n_5, n_6) = r \times n \quad (3.16)$$

όπου  $r$  είναι το διάνυσμα θέσης αναφορικά με την αρχή των αξόνων.

Λαμβάνοντας υπόψη τη συγκεκριμένη γεωμετρία με την οποία έχουν προσεγγιστεί οι αξονοσυμμετρικές κυματικές συσκευές, η συνθήκη μη εισχώρησης της βρεχόμενης επιφάνειας όπως αυτή εκφράστηκε στις εξισώσεις (3.14) και (3.15) μπορεί να διατυπωθεί για το πρόβλημα περίθλασης ( $j = D$ ) και τα προβλήματα κίνησης και πίεσης ακτινοβολίας ( $j = 1, 3, 5, p$ ) όπως φαίνεται παρακάτω για τα οριζόντια και τα κατακόρυφα όρια της:

Οριζόντια όρια:

$$\frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial z} = V_k \quad (3.17)$$

όπου:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial z} = 0 & \text{όταν } k = D, 1, p \\ \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial z} = 1 & \text{όταν } k = 3 \\ \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial z} = -r & \text{όταν } k = 5 \end{cases} \quad (3.18)$$

για  $b \leq r \leq a$  και  $z=h$  για την OWC και  $r \leq a$  και  $z=h$  για τον σημειακό απορροφητήρα.

Κάθετα όρια:

$$\frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial r} = U_k \quad (3.19)$$

όπου:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial r} = 0 & \text{όταν } k = D, 3, p \\ \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial r} = 1 & \text{όταν } k = 1 \\ \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial r} = (z - e) & \text{όταν } k = 5 \end{cases} \quad (3.20)$$

για  $r = a, b$  και  $h \leq z \leq d$  για την OWC και  $r = a$  και  $h \leq z \leq d$  για τον σημειακό απορροφητήρα.

Η εξαναγκασμένη περιστροφική κίνηση της κατασκευής περί τον  $y$  άξονα ( $j = 5$ ), θεωρείται ότι εκτελείται γύρω από οριζόντιο άξονα ο οποίος βρίσκεται σε τυχαία απόσταση από τον πυθμένα  $z = e$ .

Επιπλέον, το δυναμικό της ταχύτητας καθώς και η παράγωγός του  $\partial \varphi_j / \partial r$ , ( $j = D, 1, 3, 5$ ), πρέπει να είναι συνεχείς στα κάθετα όρια των γειτονικών περιοχών ρευστού. Κατά συνέπεια:

Για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης:

$$\Psi_{i,m}^{II}(b, z) = \Psi_{i,m}^{III}(b, z) \quad (3.21)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^{II}}{\partial r} \right|_{r=b} = \left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^{III}}{\partial r} \right|_{r=b} \quad (3.22)$$

$$\Psi_{i,m}^I(a, z) = \Psi_{i,m}^{II}(a, z) \quad (3.23)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^I}{\partial r} \right|_{r=a} = \left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^{II}}{\partial r} \right|_{r=a} \quad (3.24)$$

Για τον σημειακό απορροφητήρα:

$$\Psi_{i,m}^I(a, z) = \Psi_{i,m}^{II}(a, z) \quad (3.25)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^I}{\partial r} \right|_{r=a} = \left. \frac{\partial \Psi_{i,m}^{II}}{\partial r} \right|_{r=a} \quad (3.26)$$

Στην παραπάνω ανάλυση οι εκθέτες *I* και *III* σχετίζονται με τα «άπειρο»-εξωτερικό μακροστοιχείο και το μακροστοιχείο που αναφέρεται στην εσωτερικό πεδίο ροής, αντίστοιχα, ενώ ο εκθέτης *II* για το μακροστοιχείο που αναφέρεται στο από «κάτω πεδίο» ροής.

Ξεκινώντας με την μέθοδο χωριζομένων μεταβλητών της διαφορικής εξίσωσης Laplace, μπορούν να βρεθούν κατάλληλες εκφράσεις για τα δυναμικά ταχύτητας  $\psi_{jm}$  σε κάθε μακροστοιχείο. Οι εκφράσεις αυτές αναλυμένες σε σειρές Fourier επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται:

- η κινηματική οριακή συνθήκη στα οριζόντια τοιχώματα της κυματικής συσκευής,
- η γραμματικοποιημένη συνθήκη στην επιφάνεια τις θάλασσας,
- η κινηματική συνθήκη για τον πυθμένα,
- η συνθήκη ακτινοβολίας σε μεγάλη απόσταση από το σώμα.

### 3.4 Δυναμικά ταχύτητας περίθλασης και ακτινοβολίας για διαφορετικούς τύπους δακτυλιοειδών στοιχείων

Το δυναμικό ταχύτητας πρώτης τάξης είναι υπέρθεση των δυναμικών περίθλασης και ακτινοβολίας όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.1). Για κάθε είδος μακροστοιχείου παράγονται οι ακόλουθες εκφράσεις για τις συναρτήσεις  $\Psi_{D,m}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\Psi_{1,1}, \Psi_{3,0}, \Psi_{5,1}, \Psi_{p,0}$  οι οποίες εισήχθησαν στις εξισώσεις (3.7), (3.9a,b).

**(a)** απειροστό δακτυλιοειδές στοιχείο Τύπου *I*, ( $r \geq \alpha, 0 \leq z \leq d$ )

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^I(r, z) = g_{jm}^I(r, z) + \sum_{i=0}^{\infty} F_{j,m,i}^{(I)} \frac{K_m(a_i r)}{K_m(a_i \alpha)} Z_i(z) \quad (3.27)$$

με

$$g_{Dm}^I(r, z) = \left\{ J_m(kr) - \frac{J_m(k\alpha)}{H_m(k\alpha)} H_m(kr) \frac{Z_0(z)}{d \cdot Z_0'(d)} \right\} \quad (3.28)$$

$$g_{1,1}^I(r, z) = g_{3,0}^I(r, z) = g_{5,1}^I(r, z) = g_{p,0}^I(r, z) = 0 \quad (3.29)$$

$$\delta_D = \delta_1 = \delta_3 = d, \delta_5 = d^2, \delta_p = 1 \quad (3.30)$$

Όπου  $H_m$  και  $K_m$  είναι οι συναρτήσεις Hankel πρώτου είδους και  $m$  τάξης και οι τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel δεύτερου είδους  $m$  τάξης αντίστοιχα.

Επιπλέον  $Z_i(z)$  είναι οι ορθοκανονικές συναρτήσεις στο διάστημα  $[0, d]$  οι οποίες ορίζονται ως εξής :

$$Z_k(z) = N_k^{-1/2} \cosh(kz) \quad (3.31)$$

$$Z_i(z) = N_i^{-1/2} \cos(a_i z), a_i \text{ πραγματικός αριθμός} \quad (3.32)$$

Όπου

$$N_k = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \quad (3.33)$$

$$N_i = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\sin(2a_i d)}{2a_i d} \right], a_i \text{ πραγματικός αριθμός} \quad (3.34)$$

και  $a_i$  είναι οι ρίζες της εξίσωσης:

$$\frac{\omega^2}{g} + a_i \tan(a_i d) = 0 \quad (3.35)$$

Η εξίσωση (3.35) έχει μια φανταστική και άπειρο αριθμό πραγματικών λύσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνονται υπ' όψη η φανταστική ρίζα  $a_0 = -ik, k > 0$  και οι θετικές πραγματικές ρίζες. Αντικαθιστώντας το  $a_0 = -ik$  στις εξισώσεις (3.32) και (3.34), παράγονται άμεσα οι εξισώσεις (3.31) και (3.33).

**(b1)** δακτυλιοειδές στοιχείο Τύπου II για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης ( $b \leq r \leq a, 0 \leq z \leq h$ )

Για τον τύπο δακτυλιοειδούς στοιχείου αυτού η συνάρτηση δυναμικού  $\psi_{jm}^{II}(r, z)$  προσεγγίζεται ως εξής :

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^{II}(r, z) = g_{jm}^{II}(r, z) + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n [R_{mn}(r) F_{j,m,n}^{II} + R_{mn}^*(r) F_{j,m,n}^{*II}] \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \quad (3.36)$$

όπου το  $\delta_j$  προσδιορίζεται στην εξίσωση (3.30).

$$g_{Dm}^{II}(r, z) = g_{11}^{II}(r, z) = g_{P0}^{II}(r, z) = 0 \quad (3.37)$$

$$g_{30}^{II}(r, z) = \frac{z^2 - 0.5r^2}{2hd} \quad (3.38)$$

$$g_{51}^{II}(r, z) = \frac{-r(z^2 - 0.25r^2)}{2hd^2} \quad (3.39)$$

$$R_{m0}(r) = \frac{\left(\frac{r}{b}\right)^m - \left(\frac{b}{r}\right)^m}{\left(\frac{a}{b}\right)^m - \left(\frac{b}{a}\right)^m}, m \neq 0, n = 0; R_{m0}^*(r) = \frac{\left(\frac{a}{r}\right)^m - \left(\frac{r}{a}\right)^m}{\left(\frac{a}{b}\right)^m - \left(\frac{b}{a}\right)^m}, m \neq 0, n = 0; \quad (3.40a)$$

$$R_{00}(r) = \frac{\ln\left(\frac{r}{b}\right)}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}, m = n = 0; R_{00}^*(r) = \frac{\ln\left(\frac{a}{r}\right)}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}, m = n = 0 \quad (3.40b)$$

$$R_{mn}(r) = \frac{K_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) I_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right) - I_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) K_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right)}{K_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) I_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right) - I_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) K_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right)}, m, n \neq 0 \quad (3.41)$$

$$R_{mn}^*(r) = \frac{I_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right) K_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right) - K_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right) I_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right)}{K_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) I_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right) - I_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right) K_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right)}, m, n \neq 0 \quad (3.42)$$

Όπου,  $I_m$  είναι οι τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους  $m$  τάξης.

**(b2)** δακτυλιοειδές στοιχείο Τύπου II για τον σημειακό απορροφητήρα ( $0 \leq r \leq a, 0 \leq z \leq h$ )

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^{II}(r, z) = g_{jm}^{II}(r, z) + \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n R_{mn}(r) F_{j,m,n}^{II} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \quad (3.43)$$

$$R_{mn}(r) = \frac{I_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right)}{I_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right)}, m, n \neq 0, R_{m0}(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^m, m \neq 0, n = 0, \quad (3.44a)$$

$$R_{00}(r) = 1, m = n = 0 \quad (3.44b)$$

Οι όροι  $\delta_j, g_{jm}^{II}$  προσδιορίζεται στις εξισώσεις (3.30), (3.37) – (3.39).

**(c)** Το δυναμικό της ταχύτητας στο εσωτερικό πεδίο ροής τύπου III ( $0 \leq r \leq b, 0 \leq z \leq d$ ) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^{III}(r, z) = g_{jm}^{III}(r, z) + \sum_{i=0}^{\infty} F_{j,m,i}^{III} \frac{I_m(a_i r)}{I_m(a_i b_1)} Z_i(z) \quad (3.45)$$

όπου

$$g_{1,1}^{III}(r, z) = g_{3,0}^{III}(r, z) = g_{5,1}^{III}(r, z) = g_{D,m}^{III}(r, z) = 0, g_{p,0}^{III}(r, z) = 1 \quad (3.46)$$

Στην (3.45) οι ορθοκανονικές συναρτήσεις  $Z_i(z)$ , ορίζονται με την (3.31) και (3.32) για  $i = 0$  και  $i \geq 1$ , αντίστοιχα και  $a_i$  δίνονται από την εξίσωση (3.35).

Οι συναρτήσεις δυναμικού  $\psi_{Dm}$  που εκφράστηκαν μέσω των εξισώσεων (3.27), (3.36), (3.43) και (3.45) έχουν το πλεονέκτημα ότι ανάγονται για όλες τις οριακές συνθήκες στα κάθετα τοιχώματα  $r = b$  και  $r = a$  με χρήση απλής σειράς Fourier όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^I(a, z) = \sum_{i=0}^{\infty} F_{D,m,i} Z_i(z), \text{ για } 0 \leq z \leq d \quad (3.47)$$

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^{II}(b, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n F_{D,m,n}^{*II} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \text{ για } 0 \leq z \leq h \quad (3.48)$$

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^{II}(a, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n F_{D,m,n}^{II} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \text{ για } 0 \leq z \leq h \quad (3.49)$$

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^{III}(b, z) = \sum_{i=0}^{\infty} F_{D,m,i}^{III} Z_i(z) \text{ για } 0 \leq z \leq d \quad (3.50)$$

Επιπλέον οι λύσεις για τις συναρτήσεις  $\psi_{jm}$  ( $j = D, 1, 3, 5, p$ ) έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι οριακές συνθήκες σε όλα τα οριζόντια όρια πάνω στην επιφάνεια του σώματος να ικανοποιούνται εκ των προτέρων. Οι κινηματικές συνθήκες στα κάθετα

τοιχώματα του σώματος (εξίσωση 3.19), καθώς και η απαίτηση για συνέχεια της συνάρτησης δυναμικού και της παραγώγου του, εξισώσεις (3.21) - (3.26), στα κάθετα όρια των γειτονικών μακροστοιχείων απομένουν να εκπληρωθούν. Με βάση αυτά παράγεται ένα σύστημα εξισώσεων για τους άγνωστους συντελεστές Fourier. Από τη στιγμή που οι συντελεστές αυτοί προσδιοριστούν, οι συναρτήσεις  $\psi_{jm}(r, z)$  και αντίστοιχα τα δυναμικά ταχύτητας για όλες τις περιοχές του ρευστού είναι δυνατόν να προσδιοριστούν. Η μεθοδολογία έχει παρουσιαστεί λεπτομερώς στις εργασίες [66], [67], [68] και δεν θα υπεισέλθουμε σε αυτή περαιτέρω.

### 3.5 Δυνάμεις διέγερσης και υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης

Οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται πάνω στην εξεταζόμενη κυματική συσκευή προκύπτουν από την ολοκλήρωση της πίεσης πάνω στη βρεχόμενη επιφάνεια της συσκευής. Η πίεση δίνεται από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli:

$$P(r, \theta, z; t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \rho \phi e^{-i\omega t} \quad (3.51)$$

όπου  $\phi$  είναι το δυναμικό ταχύτητας της ροής σε κάθε πεδίο *I*, *II*, *III* (βλέπε παραγράφους 3.2 και 3.3)

Ολοκληρώνοντας τη σχέση της πίεσης στη βρεχόμενη επιφάνεια  $S_0$  της συσκευής, προκύπτουν οι δυνάμεις διέγερσης,  $F_{x,z} = \text{Re}\{f_{x,z} \cdot e^{-i\omega t}\}$ , που ασκούνται στη πλωτή συσκευή:

$$\begin{aligned} F_k(t) &= -\iint_{S_0} p n_k dS = -i\omega \rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \phi_D n_k dS \\ &= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\theta) n_k dS \quad \text{για } k=1,3 \end{aligned} \quad (3.52)$$

Για την περίπτωση συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης προκύπτουν από:

$$f_x = f_{x_{out}} - f_{x_{in}} = -i\omega \rho a \int_{z=h}^{z=d} \int_0^{\theta=2\pi} \varphi^I \cos \theta d\theta dz + i\omega \rho b \int_{z=h}^{z=d} \int_0^{\theta=2\pi} \varphi^{III} \cos \theta d\theta dz \quad (3.53)$$

$$f_z = -i\omega \rho \int_{r=b}^{r=a} \int_0^{\theta=2\pi} \varphi^{II} (-1) r d\theta dr \quad (3.54)$$

Ενώ, για την περίπτωση του σημειακού απορροφητήρα οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης μπορούν να γραφούν ως:

$$f_x = f_{x_{out}} = -i\omega \rho a \int_{z=h}^{z=d} \int_0^{\theta=2\pi} \varphi^I \cos \theta d\theta dz \quad (3.55)$$

$$f_z = -i\omega \rho \int_{r=0}^{r=a} \int_0^{\theta=2\pi} \varphi^{II} (-1) r d\theta dr \quad (3.56)$$

Η ροπή ανατροπής των εξεταζόμενων συσκευών περί άξονα που απέχει από τον πυθμένα της θάλασσας απόσταση  $z = e$ , υπολογίζεται ως το πραγματικό μέλος της σχέσης  $F_5 e^{-i\omega t}$ , όπου ο όρος  $F_5$  αποτελείται από τους επιμέρους όρους  $M_1, M_3$  που προκύπτουν από την διαταραχή λόγω πίεσης στα κάθετα τοιχώματα και στον πυθμένα της συσκευής, αντίστοιχα.

$$F_5 = M_1(t) + M_3(t) \quad (3.57)$$

όπου

$$\begin{aligned} M_k(t) &= -\iint_{S_0} p(r \times n_k) dS = -i\omega \rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \varphi_D(r \times n_k) dS \\ &= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS \end{aligned} \quad (3.58)$$

Επιπλέον, οι υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης  $F_1^r(t)$  και  $F_3^r(t)$  και οι επιμέρους  $M_1^r(t)$  και  $M_3^r(t)$  της υδροδυναμικής ροπής αντίδρασης  $F_5^r(t)$  δίνονται :

$$F_k^r(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5} x_{j_0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) n_k dS \quad \text{για } k = 1, 3 \quad (3.59)$$

και

$$F_5^r(t) = M_1^r(t) + M_3^r(t) \quad (3.60)$$

με

$$M_k^r(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5} x_{j_0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS \quad (3.61)$$

Η δύναμη αντίδρασης  $F_k^r(t)$  εξίσωση (3.59) μπορεί να γραφτεί συναρτήσει των συντελεστών υδροδυναμικής μάζας και απόσβεσης, μέσω της οποίας και υπολογίζονται:

$$F_k^r(t) = (\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij}) e^{-i\omega t} \quad (3.62)$$

Αντίστοιχα, οι υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης και ροπές,  $F_{p,i}(t)$  που ασκούνται στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στην  $i$ -διεύθυνση, λόγω ύπαρξης ταλαντευόμενης πίεσης εντός του θαλάμου, εκφράζονται σαν το πραγματικό μέλος της σχέσης:  $f_{p,i} \cdot e^{-i\omega t}$ , όπου αντίστοιχα με τη σχέση (3.59) γράφονται ως:

$$f_{p,i} = -p_{in0} i\omega \rho \iint_{S_0} \varphi_p^q n_i dS, \quad q = I, II, III \quad (3.63)$$

Όπως στη σχέση (3.62) το μιγαδικό μέγεθος,  $f_{p,i}$ , μπορεί να γραφεί ως:

$$F_{p,i}(t) = (-e_{pi} + id_{pi}) p_{in0} e^{-i\omega t} \quad (3.64)$$

Οι όροι  $e_{pi}$  και  $d_{pi}$  μπορούν κατά παραδοχή, σε αντιστοιχία με τους όρους  $a_{ij}$  και  $b_{ij}$ , να θεωρηθούν η υδροδυναμική μάζα και απόσβεση, αντίστοιχα, στην  $i$ -διεύθυνση λόγω ύπαρξης ταλαντευόμενης πίεσης εντός του θαλάμου της συσκευής. Εξαιτίας του ότι μόνο ο όρος  $m = 0$  εμφανίζεται στο πρόβλημα ακτινοβολίας λόγω μεταβαλλόμενης πίεσης στο

εσωτερικό του θαλάμου, υφίσταται μόνο η υδροδυναμική δύναμη αντίδρασης,  $f_{p,3}$ , στη κατακόρυφη διεύθυνση.

### 3.6 Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης

Κατά την ταλάντωση της υδάτινης στήλης στον εσωτερικό θάλαμο της συσκευής, αυξομειώνεται η πίεση εντός αυτού και παρατηρείται ροή αέρα προς και από τον αεροστρόβιλο. Ορίζεται ως παροχή αέρα το μέγεθος  $Q(t) = \text{Re}\{q \cdot e^{-i\omega t}\}$  όπου:

$$q = \iint_{S_i} u_z dS_i = \iint_{S_i} u_z(r, \theta, z = d) r dr d\theta = \iint_{S_i} \frac{\partial \varphi}{\partial z} r dr d\theta \quad (3.65)$$

$u_z$  η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού στην εσωτερική επιφάνεια αυτού και  $S_i$  η εσωτερική επιφάνεια του ρευστού εντός του θαλάμου ταλάντωσης της συσκευής.

Λόγω της ανάλυσης του δυναμικού ταχύτητας της ροής σε τρεις όρους (βλέπε παράγραφο 3.1), από τη σχέση (3.1) η ολική παροχή αέρα  $q$ , μπορεί να αναλυθεί αντίστοιχα σε τρεις συνιστώσες, την παροχή αέρα λόγω του προβλήματος περίθλασης,  $q_D$ , την παροχή αέρα από το πρόβλημα ακτινοβολίας λόγω κίνησης,  $q_R$ , το οποίο προκύπτει από την ταλάντωση της συσκευής, και την παροχή αέρα από το πρόβλημα ακτινοβολίας λόγω πίεσης,  $q_P$ , το οποίο προκύπτει λόγω ύπαρξης μοναδιαίου μέτρου ταλαντευόμενης εσωτερικής πίεσης εντός του θαλάμου:

$$q = q_D + q_R + p_{in0} \cdot q_P \quad (3.66)$$

Θεωρώντας ομοιόμορφη διαταραχή της πίεσης εντός του θαλάμου, μόνο ο όρος  $m = 0$  επηρεάζει την παροχή του αέρα λόγω του προβλήματος ακτινοβολίας λόγω πίεσης. Αντίστοιχα, αντικαθιστώντας τη σχέση (3.7) στη (3.45) και εν συνεχεία στη σχέση (3.65), προκύπτει ότι μόνο ο όρος  $m = 0$  επηρεάζει και την παροχή αέρα λόγω του προβλήματος

περίθλασης, αφού:  $\int_0^{2\pi} \cos(m\theta) d\theta \neq 0$ , όταν  $m = 0$ . Επιπλέον, η παροχή αέρα από το πρόβλημα

ακτινοβολίας λόγω κίνησης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της σχετικής μετατόπισης μεταξύ της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας εντός του θαλάμου και των μεταφορικών και περιστροφικών κινήσεων της συσκευής. Λόγω του ότι οι οριζόντιες και περιστροφικές κινήσεις της συσκευής δεν επηρεάζουν την παροχή αέρα εντός του θαλάμου ταλάντωσης, μόνο το δυναμικό της ταχύτητας της ροής εξαιτίας της κατακόρυφης μετατόπισης της συσκευής μεταβάλλει την παροχή αέρα στο θάλαμο, δηλαδή:

$$q_R = \dot{x}_{30} q_3 - \dot{x}_{30} S_i \quad (3.67)$$

όπου  $S_i$  ισούται με  $S_i = \pi \cdot b^2$ .

Θεωρώντας αεροστρόβιλο τύπου Wells, στη συσκευή OWC, τοποθετημένο μεταξύ του θαλάμου ταλάντωσης και της ατμόσφαιρας, η παροχή αέρα  $Q$  μπορεί να γραφεί, συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης, ως εξής:

$$Q(t) = \Lambda \cdot P_{in}(t) \quad (3.68)$$

$\Lambda$  σταθερός μιγαδικός αριθμός ο οποίος περιγράφει τον αεροστρόβιλο και ισούται με:



$$\Lambda = g_T + (-i\omega) \frac{V_0}{\gamma P_a} \quad (3.69)$$

$$\text{όπου: } g_T = \frac{KD}{\rho_a N}$$

Στη σχέση (3.69)  $V_0$  είναι ο όγκος του αέρα εντός του θαλάμου σε αδιατάραχτες συνθήκες,  $\gamma$  η αδιαβατική σταθερά,  $\gamma = 1.4$ ,  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση,  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος του ρότορα του αεροστροβίλου,  $N$  είναι η ταχύτητα περιστροφής των λεπίδων του αεροστροβίλου,  $\rho_a$  είναι η πυκνότητα του αέρα και  $K$  είναι σταθερό μέγεθος για δεδομένης γεωμετρίας αεροστρόβιλο.

### 3.7 Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δίδεται από τη σχέση:

$$\zeta(t) = \text{Re}\left\{ |Z| e^{i\varphi_z} \cdot e^{-i\omega t} \right\} = |Z| \cos(\omega t - \varphi_z) \text{ για δεδομένο } r \text{ και } \theta$$

Για  $\omega t = 0$  θα γίνει:

$$\zeta(t) = |Z| \cos(\varphi_z)$$

Για  $\omega t = \pi/2$

$$\zeta(t) = |Z| \sin(\varphi_z)$$

$$\text{Όπου } Z(r, \vartheta, h) = |Z| e^{i\varphi_z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=h} = \frac{i\omega}{g} \varphi(r, \vartheta, h) e^{-i\omega t} \quad (3.70)$$

Το δυναμικό ταχύτητας αναφέρεται στο πεδίο *III* ή αντίστοιχα στο πεδίο *I* ανάλογα που θέλουμε να υπολογίσουμε την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός και εκτός της Σ.Α.Κ.Ε υπολογίζεται από την οριακή συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια, σχέση (3.11). Επομένως, στα πεδία *I* και *III*, αντίστοιχα, ισούται με:

$$Z^I(r, \theta, d; t) = \text{Re}\left\{ \zeta^I(r, \theta, d) \cdot e^{-i\omega t} \right\} = \text{Re}\left\{ \left( \frac{i\omega}{g} \phi^I(r, \theta, d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\} \quad (3.71)$$

$$Z^{III}(r, \theta, d; t) = \text{Re}\left\{ \zeta^{III}(r, \theta, d) \cdot e^{-i\omega t} \right\} = \text{Re}\left\{ \left( \frac{i\omega}{g} \varphi^{III}(r, \theta, d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\} \quad (3.72)$$

Οι σχέσεις (3.71), (3.72) για την περίπτωση απλής Σ.Α.Κ.Ε, γράφονται:

$$Z^I(r, \theta, d; t) = \text{Re}\left\{ \left( \frac{\omega^2 d H}{g} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} N_j^{-1/2} \Lambda_{m,j} \frac{K_m(a_j r)}{K_m(a_j a)} \cos(m\theta) \cos(a_j d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\}$$

[*m*]

$$Z^{III}(r, \theta, d; t) = \text{Re} \left\{ \left( \frac{\omega^2 d}{g} \frac{H}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} N_i^{-1/2} \Lambda_{n,i} \frac{I_n(a_i r)}{I_n(a_i b)} \cos(n\theta) \cos(a_i d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\}$$

[m] (3.73)

όπου  $\Lambda_{m,j}, \Lambda_{n,i}$  ισούται με:

$$\Lambda_{m,j} = \delta_{0,m} \frac{X_{30,g}}{H/2} F_{3,0,j}^I + \delta_{1,m} \left( \frac{X_{10,g}}{H/2} F_{1,1,j}^I + \frac{d \cdot x_{50}}{H/2} F_{5,1,j}^I \right) + \varepsilon_m i^m F_{D,m,j}^I$$

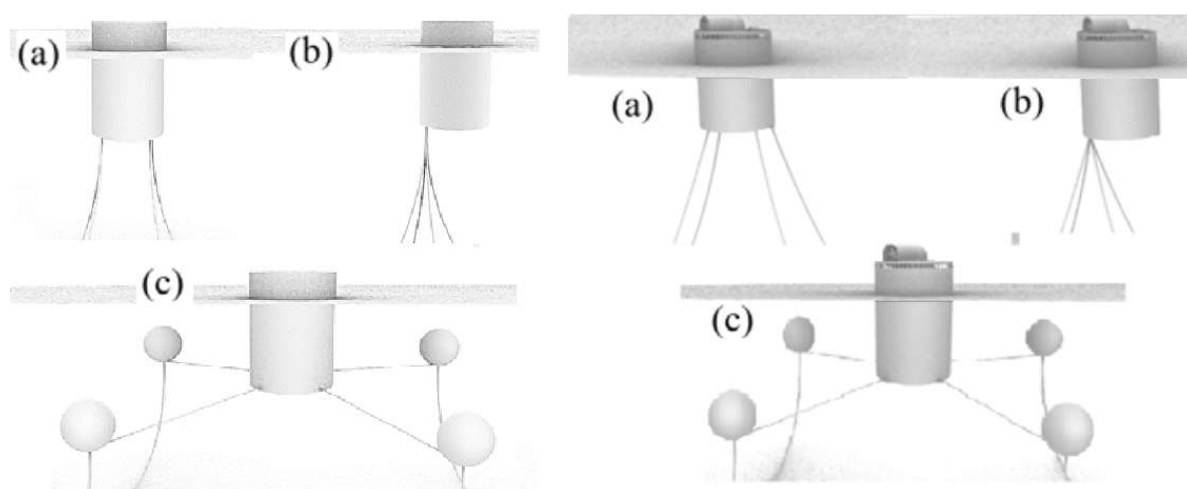
$$\Lambda_{m,j} = \delta_{0,m} \frac{X_{30,g}}{H/2} F_{3,0,j}^{III} + \delta_{1,m} \left( \frac{X_{10,g}}{H/2} F_{1,1,j}^{III} + \frac{d \cdot x_{50}}{H/2} F_{5,1,j}^{III} \right) + \varepsilon_m i^m F_{D,m,j}^{III} \quad (3.74)$$

## 4 Ανάλυση του συστήματος αγκύρωσης

### 4.1 Γενικά

Το σύστημα αγκύρωσης αποτελεί, όπως και για κάθε είδους πλωτή κατασκευή, κρίσιμη παράμετρο κατά την σχεδίαση πλωτών συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Πέραν της επιβίωσης της κατασκευής που θα πρέπει να εξασφαλίζει στις δυσμενέστερες συνθήκες περιβάλλοντος στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της, θα πρέπει να περιορίζει την όποια ενδεχόμενη αρνητική επίδραση στην απορρόφηση κυματικής ενέργειας από την συσκευή.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζονται τρεις διαμορφώσεις του συστήματος αγκύρωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1 Διαμορφώσεις των συστημάτων αγκύρωσης πολλαπλών κλάδων που εξετάστηκαν για τις εξεταζόμενες κυματικές συσκευές του σημειακού απορροφητήρα και της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης: (α) σύστημα αγκύρωσης 4 γραμμών συνδεδεμένων με τη συσκευή σε διαφορετικά σημεία, (β) σύστημα αγκύρωσης 4 γραμμών συνδεδεμένων με τη συσκευή σε ένα σημείο, (γ) σύστημα αγκύρωσης 4 γραμμών, με χρήση ανωστικών σωμάτων

Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 4.1α), οι τέσσερις κλάδοι αγκύρωσης προσδένονται σε τέσσερα διαφορετικά σημεία της πλωτής κατασκευής, στην δεύτερη περίπτωση (Σχήμα 4.1 β) συγκρατούνται και οι τέσσερις από ένα κοινό σημείο στην πλωτή κατασκευή, ενώ στην τρίτη περίπτωση (Σχήμα 4.1γ) στο σύστημα αγκύρωσης έχουν προστεθεί ανωστικά σώματα κατά μήκος κάθε κλάδου. Στην περίπτωση αυτή το κατώτερο τμήμα του κλάδου αγκύρωσης που είναι συνδεδεμένο με την άγκυρα αποτελείται από αλυσίδα, ενώ το ανώτερο τμήμα που είναι συνδεδεμένο με τον πλωτήρα αποτελείται από συνθετικό υλικό. Μεταξύ των δύο τμημάτων παρεμβάλλεται ενδιάμεσος ανωστικός πλωτήρας διαμέτρου 1.85m και μάζας 170Kg.

Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των κλάδων αγκύρωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.1

**Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης**

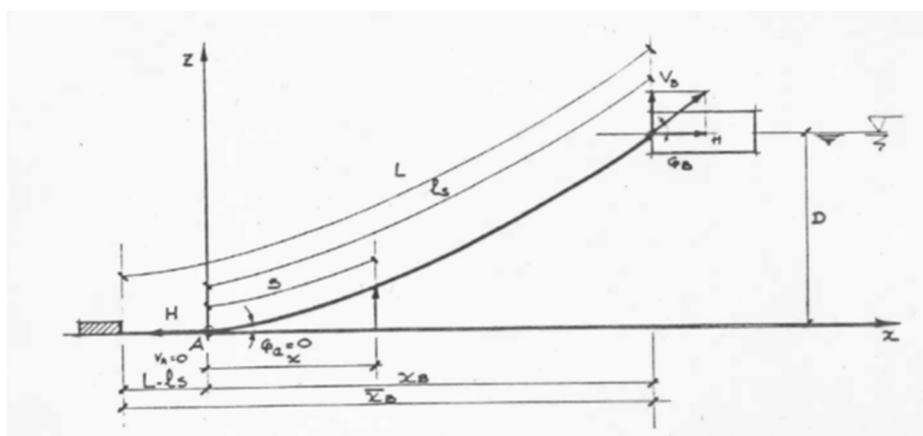
<b>Διαμόρφωση α και β</b>		
$c_{11}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην x-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην x-διεύθυνση	1.215 kN/m
$c_{22}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην γ-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην γ-διεύθυνση	0.288 kN/m
$c_{33}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην z-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην z-διεύθυνση	1.272 kN/m
$c_{13}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην x-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην z-διεύθυνση	0.912 kN/m
$L$	Μήκος του κλάδου (αλυσίδα)	100 m
$m$	Μάζα της αλυσίδας ανά μονάδα μήκους	60 Kg/m
$w$	Βάρος της αλυσίδας στο νερό ανά μονάδα μήκους	0.5431 kN/m
$EA$	Ακαμψία στην διαμήκη διεύθυνση	100 MN
$P_x$	Προένταση στη x-κατεύθυνση	10 kN
$P_z$	Προένταση στην z-κατεύθυνση	32.9 kN
<b>Διαμόρφωση γ</b>		
$c_{11}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην x-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην x-διεύθυνση	0.692 kN/m
$c_{22}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην γ-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην γ-διεύθυνση	0.079 kN/m
$c_{33}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην z-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην z-διεύθυνση	0.221 kN/m
$c_{13}^m$	Ακαμψία του κλάδου στην x-διεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του σημείου συγκράτησής του στην z-διεύθυνση	0.164 kN/m
$L_1$	Μήκος αλυσίδας	100 m
$L_2$	Μήκος συνθετικού τμήματος	40 m
$m_1$	Μάζα της αλυσίδας ανά μονάδα μήκους	60 Kg/m
$m_2$	Μάζα του συνθετικού κλάδου ανά μονάδα μήκους	8.6 Kg/m
$w_1$	Βάρος της αλυσίδας στο νερό, ανά μονάδα μήκους	0.5431 kN/m
$w_2$	Βάρος του συνθετικού κλάδου στο νερό ανά μονάδα μήκους	0.0013 kN/m
$z_1$	Προβολή του ανυψωμένου τμήματος της αλυσίδας στην κατακόρυφη διεύθυνση	45 m
$z_2$	Προβολή του ανυψωμένου συνθετικού τμήματος στην κατακόρυφη κατεύθυνση	0 m
$EA_1$	Ακαμψία της αλυσίδας στην διαμήκη διεύθυνση	100 MN
$EA_2$	Ακαμψία του συνθετικού τμήματος στην διαμήκη διεύθυνση	10 MN
$P_x$	Προένταση στη x-κατεύθυνση	10 kN
$P_z$	Προένταση στην z-κατεύθυνση (πριν από τον πλωτήρα)	32.9 kN

Σε όλες τις περιπτώσεις των συστημάτων αγκύρωσης που εξετάστηκαν, η απόσταση του σημείου πρόσδεσης του κλάδου στην πλωτή κυματική μηχανή από τον πυθμένα της θάλασσας υποτέθηκε ίση με 45m. Σημειώνεται επίσης ότι οι τιμές των ακαμψιών που παρουσιάζονται στον πιο πάνω πίνακα, όπως και οι προεντάσεις των κλάδων στη κατακόρυφη κατεύθυνση έχουν προκύψει από την στατική ανάλυση του κάθε κλάδου αγκύρωσης, όπως αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 4.2.

## 4.2 Στατική ανάλυση ενός κλάδου ακύρωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των εξισώσεων που διέπουν την στατική ισορροπία ενός κλάδου ακύρωσης που ισορροπεί υπό την επίδραση του βάρους του, χωρίς την επίδραση επ' αυτού εξωτερικών υδροδυναμικών φορτίσεων από τυχόν υφιστάμενα θαλάσσια ρεύματα στην περιοχή. Η στατική διαμόρφωση που λαμβάνει ο κλάδος ακύρωσης υπό την επίδραση του βάρους του και μόνον είναι γνωστή ως αλυσοειδής καμπύλη [72].

Θα υποθέσουμε ακόμη ότι ο κλάδος ακύρωσης είναι μη ελαστικός, οπότε οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την ισορροπία του δέχονται κλειστή λύση [72]. Υποθέτουμε ένα κλάδο ακύρωσης, η στατική διαμόρφωση του οποίου στο 2D επίπεδο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2



Σχήμα 4.2: Στατική διαμόρφωση κλάδου ακύρωσης σε διδιάστατο επίπεδο. Περίπτωση κλάδου, τμήμα του οποίου επικάθεται στον πυθμένα [72]

Με  $L$  συμβολίζεται το ολικό μήκος του κλάδου ακύρωσης, με  $l_s$  το ανυψωμένο μήκος του, με  $D$  η κατακόρυφη απόσταση του σημείου πρόσδεσης του κλάδου ακύρωσης στην πλωτή κατασκευή από τον πυθμένα της θάλασσας, με  $x_B$  συμβολίζεται η οριζόντια προβολή του ολικού ανυψωμένου μήκους του κλάδου ακύρωσης  $l_s$  μεταξύ του σημείου πρόσδεσής του στην πλωτή κατασκευή μέχρι το σημείο της πρώτης επαφής του κλάδου ακύρωσης με τον πυθμένα. Η αντίστοιχη οριζόντια απόσταση τυχαίου σημείου κατά μήκος του ανυψωμένου μήκους του κλάδου ακύρωσης με απόσταση κατά μήκος της γραμμής  $s$  από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων (συμπίπτει με το σημείο της πρώτης επαφής του κλάδου ακύρωσης με τον πυθμένα), συμβολίζεται με  $x$ . Στην περίπτωση της μη ελαστικής αλυσοειδούς, τμήμα της οποίας επικάθεται στον πυθμένα, το τμήμα αυτό έχει μήκος ίσο με  $L - l_s$ .

Από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων στατικής ισορροπίας του κλάδου ακύρωσης στο νερό, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις [72]

$$x(s) = \frac{H}{w} \sinh^{-1}(\tan \varphi) = \frac{H}{w} \sinh^{-1}\left(\frac{ws}{H}\right) \quad (4.1)$$

$$z(s) = \frac{H}{w} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{ws}{H}\right)^2} - 1 \right\} \quad (4.2)$$

$$\tan \varphi (s) = \frac{V}{H} = \frac{ws}{H} \quad (4.3)$$

$$T(s) = H\sqrt{1 + \tan^2 \varphi} = H\sqrt{1 + \left(\frac{ws}{H}\right)^2} = \sqrt{H^2 + (ws)^2} \quad (4.4)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις, με  $x(s)$  και  $z(s)$  συμβολίζονται οι αποστάσεις ενός τυχαίου σημείου της γραμμής αγκύρωσης κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων που συμπίπτει με το σημείο της πρώτης επαφής της γραμμής με το πυθμένα, με  $w$  συμβολίζεται το ανά μονάδα μήκους βάρος του κλάδου στο νερό. Η οριζόντια δύναμη που ασκείται πάνω στον κλάδο συμβολίζεται με  $H$ . Η γωνία  $\varphi_A$  στο σημείο της πρώτης επαφής του κλάδου αγκύρωσης με τον πυθμένα είναι μηδενική όταν το ανυψωμένο μήκος,  $l_s$ , είναι μικρότερο από το ολικό,  $L$ , δηλαδή όταν μέρος του κλάδου επικάθεται στον πυθμένα ή όταν παρουσιάζεται οριακή ανύψωση, όπως η περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Επίσης με  $V$ , συμβολίζεται η κατακόρυφη δύναμη που δρα επάνω στον κλάδο σε τυχαίο σημείο κατά το μήκος του και οφείλεται αποκλειστικά στο ίδιο βάρος του, ενώ  $V_B$  είναι η κατακόρυφη δύναμη στο ανώτερο σημείο της γραμμής. Ακόμα με  $T$  συμβολίζεται η δύναμη κατά μήκος του κλάδου αγκύρωσης.

Με γνωστά το βάρος της γραμμής ανά μονάδα μήκους στο νερό,  $w$ , την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στην πλωτή κατασκευή ως προς τον βυθό,  $D$ , το συνολικό μήκος του κλάδου αγκύρωσης,  $L$ , και την συνιστώσα της οριζόντιας δύναμης  $H$ , μπορεί μέσω μετασχηματισμών των εξισώσεων (4.1) και (4.4), να προκύψουν το ανυψωμένο μήκος του κλάδου αγκύρωσης από την σχέση (4.5) και η προβολή του στο οριζόντιο επίπεδο,  $x_s$ , στην εξής μορφή:

$$l_s = \frac{H}{w} \left\{ \sqrt{\left(1 + \frac{Dw}{H}\right)^2 - 1} \right\} \quad (4.5)$$

$$x_B = \frac{H}{w} \operatorname{cosh}^{-1} \left( \frac{wD}{H} + 1 \right) \quad (4.6)$$

Τέλος η οριζόντια απόσταση του σημείου πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στο πλωτό από την άγκυρα δίνεται από την σχέση:

$$\bar{x}_B = L - l_s + x_B \quad (4.7)$$

Οι σχέσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν όπως θα δούμε στην συνέχεια για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης του κλάδου αγκύρωσης που εκφράζει την οριζόντια δύναμη που ασκείται την κορυφή του κλάδου συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης του σημείου εφαρμογής της δύναμης αυτής από την άγκυρα, ενώ παράλληλα θα χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό των συντελεστών επαναφοράς που προσφέρει ο κλάδος αγκύρωσης στην πλωτή κατασκευή πάνω στην οποία προσδένεται.

### 4.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες οριζόντιας δύναμης – μετατόπισης. Συντελεστές ακαμψίας στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης

Με βάση τους τύπους που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι δυνατόν να χαραχθεί η καμπύλη οριζόντιας δύναμης που ασκείται στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης του σημείου εφαρμογής της δύναμης αυτής από την άγκυρα. Ο τύπος που εκφράζει την απόσταση αυτή είναι ο (4.7). Στη συνέχεια

μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής ακαμψίας που προσφέρει ο κλάδος αγκύρωσης στην κατασκευή ως η εφαπτομένη της καμπύλης στο εκάστοτε σημείο της.

Η διαδικασία περιγράφεται με τα διαδοχικά βήματα που αναφέρονται στην συνέχεια. Υποτίθενται γνωστά (α) το ανά μονάδα μήκους βάρος του καλωδίου στο νερό,  $w$ , (β) η κατακόρυφη απόσταση του σημείου πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στην κατασκευή από τον πυθμένα της θάλασσας,  $D$ , καθώς και (γ) το μήκος του κλάδου αγκύρωσης.

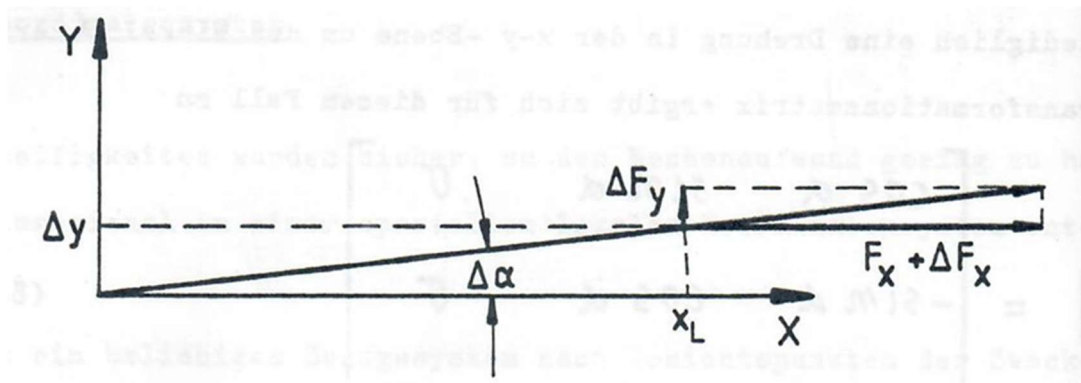
1. Για την εκάστοτε επιλεγμένη τιμή της οριζόντιας δύναμης,  $H$ , υπολογίζεται από την (4.5) το ανυψωμένο μήκος του κλάδου αγκύρωσης,  $l_s$ .
2. Υπολογίζεται η κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο σημείο πρόσδεσης του κλάδου στην πλωτή κατασκευή, σχέση (4.3),  $V_B = wl_s$ .
3. Στη συνέχεια από την εξίσωση (4.6) υπολογίζεται η οριζόντια προβολή του ανυψωμένου τμήματος του κλάδου αγκύρωσης.
4. Τέλος, από την σχέση (4.7), υπολογίζεται η οριζόντια απόσταση του σημείου πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στην κατασκευή (fairlead) από την άγκυρα.
5. Με τον τρόπο αυτό, από το πρώτο και το τρίτο βήμα βρίσκονται τα ζεύγη τιμών οριζόντιας δύναμης – απόστασης από την άγκυρα,  $(H, \bar{x}_B)$ , ενώ από το δεύτερο και τρίτο τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών κατακόρυφης δύναμης – απόστασης από την άγκυρα,  $(V_B, \bar{x}_B)$  και μπορούν να χαραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συστήματος αγκύρωσης.
6. Με βάση τις καμπύλες αυτές μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές ακαμψίας  $c_{11}^m$ ,  $c_{31}^m$  στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης, ως οι εφαπτόμενες των χαρακτηριστικών καμπυλών. Ο πρώτος εκφράζει τον συντελεστή επαναφοράς στην οριζόντια κατεύθυνση  $x$ , λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου στην κατεύθυνση αυτή, ενώ ο δεύτερος εκφράζει τον συντελεστή επαναφοράς στην κατακόρυφη κατεύθυνση  $z$  λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση  $x$ . Από πρακτική άποψη οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τις διαφορικές μεταβολές της οριζόντιας και κατακόρυφης δύναμης σε σχέση με την διαφορική μετακίνηση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση  $x$ , δηλαδή:

$$c_{11}^m = \frac{\delta H}{\delta \bar{x}_B} \text{ και } c_{31}^m = \frac{\delta V_B}{\delta \bar{x}_B}, c_{22}^m = \frac{H}{x_B} \quad (4.8)$$

Σε ότι αφορά στον εκτός επιπέδου του κλάδου αγκύρωσης συντελεστή επαναφοράς,  $c_{22}^m$  για τον υπολογισμό του θα γίνει χρήση του σχήματος 4.3, απ' όπου προκύπτει:

$\frac{\Delta y}{x_L} = \frac{\Delta F_y}{F_x + \Delta F_x}$ . Η σχέση αυτή εκφράζει τον λόγο της μικρής μετατόπισης ως προς τον άξονα  $y$  που υφίσταται το άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης προς την προβολή του ανυψωμένου τμήματος του κλάδου αγκύρωσης,  $x_L$ , κατά την αύξηση της οριζόντιας δύναμης στην κορυφή. Με την παραδοχή μικρής μετατόπισης ως προς τον άξονα  $y$ , μπορεί να παραλειφθεί η μεταβολή  $\Delta F_x$  έναντι της  $F_x$  οπότε με χρήση του διαφορικού τελεστή προκύπτει:

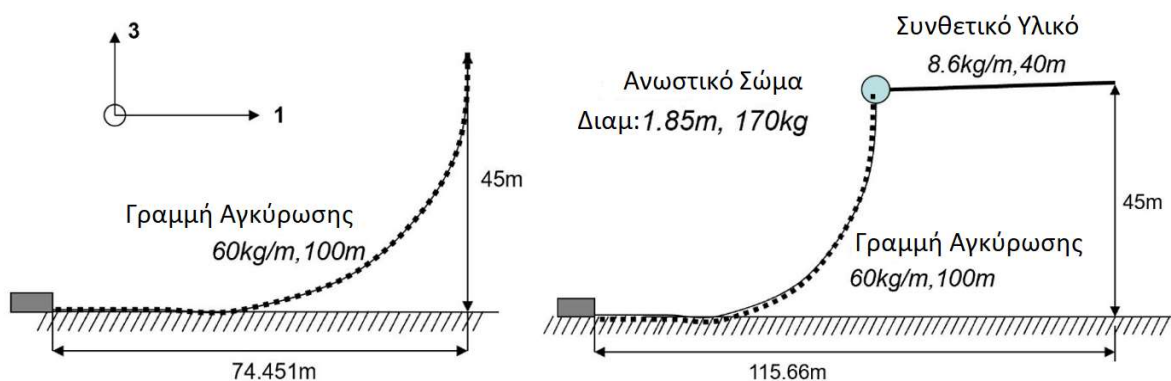
$$c_{22}^m = \frac{\partial F_y}{\partial y} = \frac{F_x}{x_L} = \frac{H}{x_B} \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.3. Κάτοψη κλάδου αγκύρωσης. Παραγωγή του συντελεστή επαναφοράς  $c_{22}^m$ . Συμβολισμοί

Στη σχέση (4.9), ο τελευταίος λόγος έχει προκύψει με χρήση των συμβολισμών που έχουμε εισάγει για την οριζόντια δύναμη στην κορυφή και για την οριζόντια προβολή του ανυψωμένου τμήματος του κλάδου αγκύρωσης.

Τα βήματα αυτά ακολουθήσαμε για τους κλάδους αγκύρωσης, τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον πίνακα 4.1 και απεικονίζονται στο σχήμα 4.4.

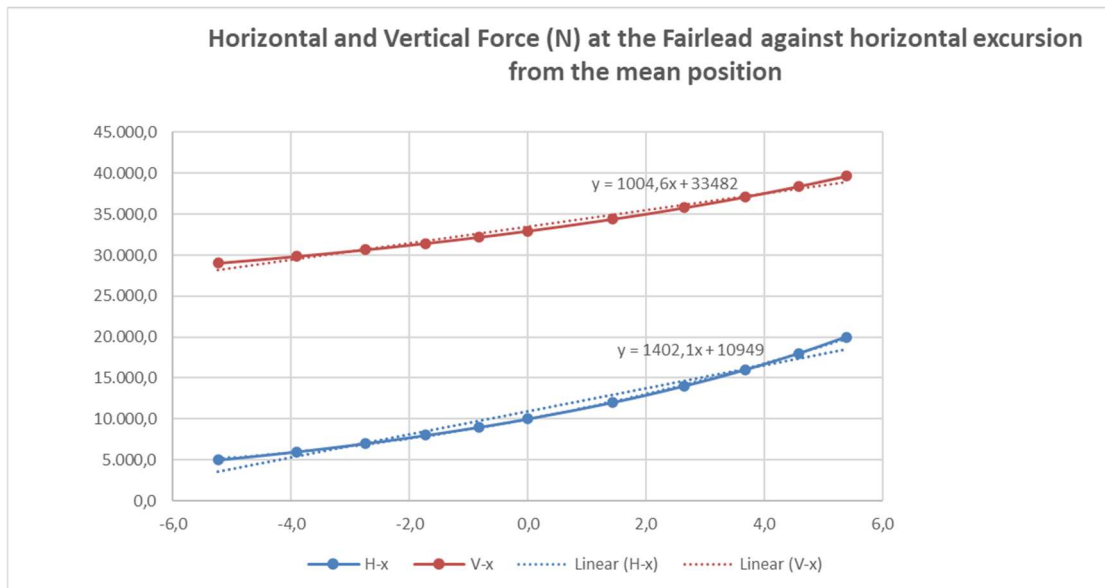


Σχήμα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση των δύο τύπων κλάδων αγκύρωσης του Πίνακα 4.1

Ειδικότερα για τον πρώτο τύπο κλάδου (αριστερό γράφημα στο Σχήμα 4.4), που είναι κατασκευασμένος από αλυσίδα, με οριζόντια δύναμη στην κορυφή ίση με  $H = 10\text{kN}$  στην κατάσταση στατικής ισορροπίας του, το ανυψωμένο μήκος του (σχέση 4.5) είναι:  $l_s = 60,681\text{m}$ , η οριζόντια προβολή του ανυψωμένου τμήματος (σχέση 4.6) είναι ίση με  $x_B = 35,131\text{m}$  και η απόσταση από την άγκυρα (σχέση 4.7) ίση με  $\bar{x}_B = 74,451\text{m}$ .

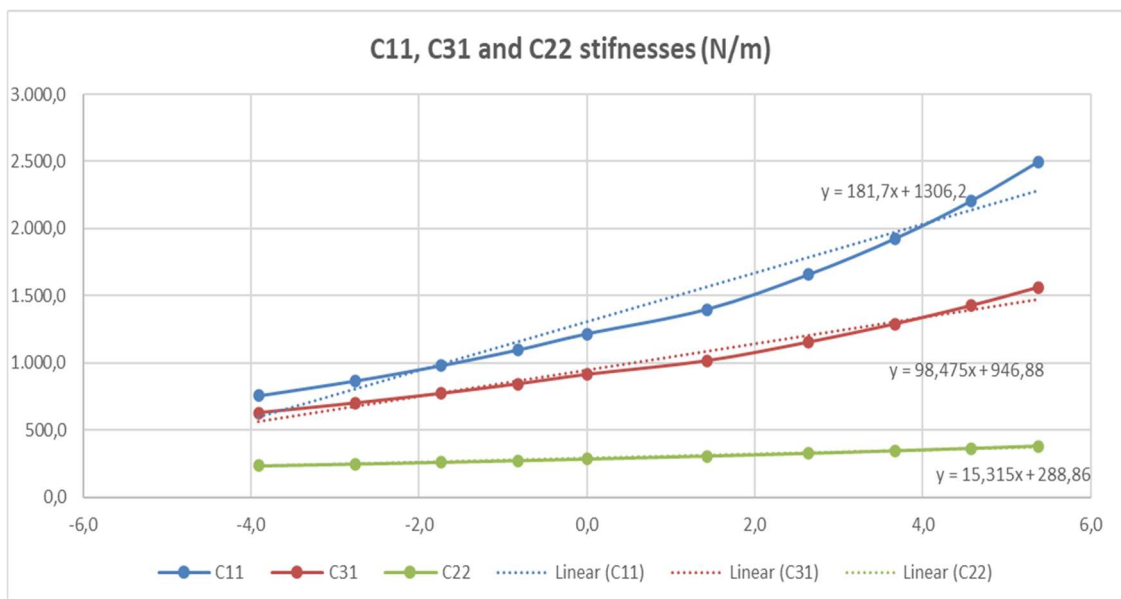
Στο σχήμα 4.5, ακολουθώντας τα βήματα 1 – 5, κατασκευάζεται το γράφημα της οριζόντιας και της κατακόρυφης δύναμης που ασκείται στο σημείο πρόσδεσης του κλάδου στην κατασκευή συναρτήσει της μετατόπισης της τελευταίας από την μέση θέση ισορροπίας της. Η μετατόπιση αυτή προκύπτει από την διαφορά μεταξύ της εκάστοτε απόστασης του σημείου πρόσδεσης του κλάδου αγκύρωσης στην κατασκευή από την άγκυρα από την αντίστοιχη τιμή της στην κατάσταση στατικής ισορροπίας του κλάδου, ήτοι της τιμής  $\bar{x}_B = 74,451\text{m}$ , για την περίπτωση του πρώτου τύπου κλάδου αγκύρωσης. Στο ίδιο γράφημα δίνεται και η μαθηματική διατύπωση της γραμμικής εξίσωσης που προσεγγίζει την ελαφρά μη γραμμική καμπύλη των δυνάμεων επαναφοράς συναρτήσει της μετατόπισης. Παρατηρούμε ότι για δεδομένη μετατόπιση, η οριζόντια δύναμη στην κορυφή του κλάδου λαμβάνει πολύ μεγαλύτερες τιμές από την αντίστοιχη κατακόρυφη δύναμη.





Σχήμα 4.5: Οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης συναρτήσει της οριζόντιας απομάκρυνσης του σημείου πρόσδεσης από την μέση θέση ισορροπίας του.

Στο Σχήμα 4.6, ακολουθώντας το τελευταίο βήμα της διαδικασίας (βήμα 6) όπως περιγράφηκε προηγούμενα, εξίσωση (4.8), παρουσιάζονται σε γραφική μορφή οι συντελεστές επαναφοράς  $c_{11}^m$ ,  $c_{31}^m$  και  $c_{22}^m$  μαζί με την γραμμική προσέγγισή τους.



Σχήμα 4.6: Συντελεστές επαναφοράς στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση x, καθώς και συντελεστής επαναφοράς στην κάθετη προς το επίπεδο του κλάδου διεύθυνση λόγω κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην διεύθυνση αυτή.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι δυνάμεις επαναφοράς στην οριζόντια και την κατακόρυφη κατεύθυνση που ασκούνται από τον κλάδο αγκύρωσης στην πλωτή κατασκευή κατά την μετακίνηση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Κατά την μετακίνηση αυτή, θα υποθέσουμε ότι η οριζόντια απόσταση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης από την άγκυρα παραμένει σταθερή και ίση με αυτή που βρέθηκε για την κατάσταση ισορροπίας της κατασκευής με  $D = 45m$  και  $H = 10kN$ . Αυτό είναι μια λογική υπόθεση που συμβαδίζει και με την κινηματική συμπεριφορά της αγκυρωμένης

κατασκευής, σύμφωνα με την οποία η τελευταία λόγω των πολλαπλών κλάδων συγκράτησής της γύρω από την κατασκευή όταν αυτή μετακινηθεί στην κατακόρυφη κατεύθυνση, θα παραμείνει σταθερή στην οριζόντια διεύθυνση δεδομένου ότι οι κλάδοι αγκύρωσης που βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά εκείνου που εξετάζεται, την συγκρατούν από τη μετακίνηση στον  $x$  άξονα. Σημειώνεται ότι το αντίστοιχο είχε υποτεθεί και κατά την εξέταση της μεταβολής της θέσης της κατασκευής κατά την οριζόντια κατεύθυνση, όπου η κατακόρυφη απόσταση του σημείου συγκράτησης του κλάδου από την κατασκευή είχε διατηρηθεί σταθερή και ίση με  $D = 45m$ .

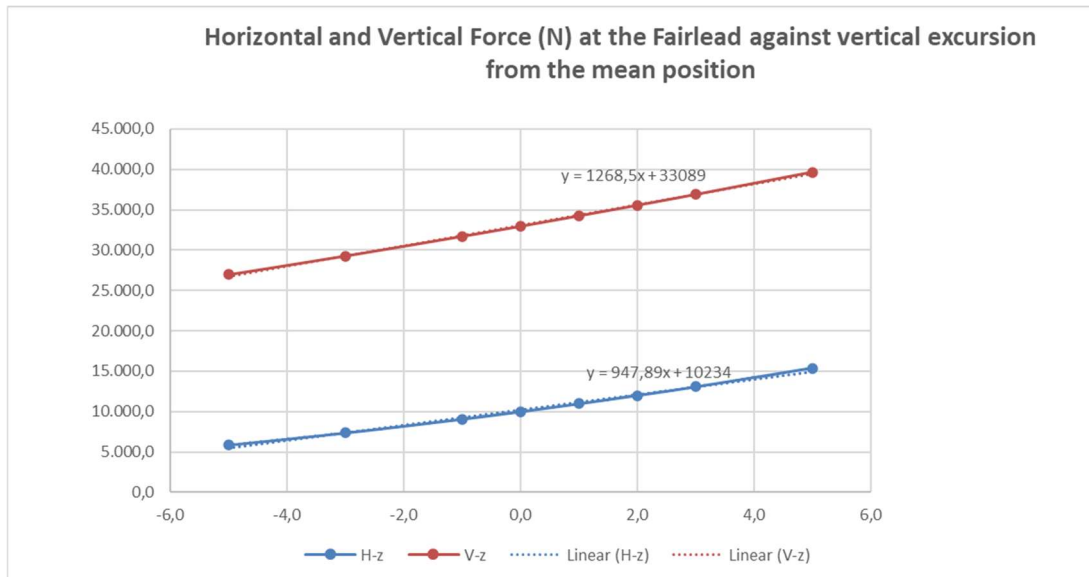
Η μέθοδος εύρεσης της οριζόντιας και κατακόρυφης δύναμης στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την κατακόρυφη μετακίνησή του, απαιτεί τα εξής βήματα που περιλαμβάνουν επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης.

1. Για την εκάστοτε εξεταζόμενη κατακόρυφη απόσταση του άνω άκρου του κλάδου (fairlead) από τον πυθμένα της θάλασσας, υποθέτουμε μια οριζόντια δύναμη  $H$
2. Με βάση την δύναμη αυτή, υπολογίζονται από τις (4.5), (4.6) και (4.7) το ανυψωμένο μήκος του κλάδου αγκύρωσης, η οριζόντια προβολή του και η απόσταση του άνω σημείου του κλάδου αγκύρωσης από την άγκυρα, αντίστοιχα.
3. Ελέγχουμε κατά πόσον η απόσταση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης από την άγκυρα  $\bar{x}_B$  συμπίπτει εντός των ορίων της επιθυμητής ακρίβειας με την αντίστοιχη απόσταση στη κατάσταση ισορροπίας της κατασκευής, η οποία για την περίπτωση του κλάδου αγκύρωσης από αλυσίδα, έχει βρεθεί ίση με  $\bar{x}_B = 74,451m$  με οριζόντια δύναμη προέντασης στην κορυφή ίση με  $10kN$  και απόσταση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης από τον πυθμένα ίση με  $45m$ .
4. Εάν η υπολογισθείσα τιμή της  $\bar{x}_B$  αποκλίνει από την επιθυμητή περισσότερο από την τεθείσα ακρίβεια, τότε τα βήματα 1-3 επαναλαμβάνονται με νέα τιμή για το  $H$  έως ότου επιτευχθεί για το  $\bar{x}_B$  η επιθυμητή ακρίβεια.
5. Στην κατάσταση που έχει επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια είναι γνωστή η  $H$ , το ανυψωμένο μήκος του κλάδου αγκύρωσης από την εξ. (4.5) και εξ' αυτού και η κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στην κορυφή του,  $V_B = w l_s$ .
6. Με τον τρόπο αυτό, από το πρώτο μέχρι το πέμπτο βήμα βρίσκονται τα ζεύγη τιμών οριζόντιας δύναμης – κατακόρυφης μετακίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης,  $(H, z_B)$ , και τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών κατακόρυφης δύναμης – κατακόρυφης μετακίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης,  $(V_B, z_B)$  και μπορούν να χαραχθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συστήματος αγκύρωσης.
7. Με βάση τις καμπύλες αυτές μπορούν να υπολογιστούν στη συνέχεια οι συντελεστές ακαμψίας  $c_{33}^m$ ,  $c_{13}^m$  στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης, ως οι εφαπτόμενες των χαρακτηριστικών καμπυλών. Ο πρώτος εκφράζει τον συντελεστή επαναφοράς στην κατακόρυφη κατεύθυνση  $z$ , λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου στην κατεύθυνση αυτή, ενώ ο δεύτερος εκφράζει τον συντελεστή επαναφοράς στην οριζόντια κατεύθυνση  $x$  λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση  $z$ . Από πρακτική άποψη οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τις διαφορικές μεταβολές της οριζόντιας και κατακόρυφης δύναμης σε σχέση με την διαφορική μετακίνηση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση  $z$ , δηλαδή:

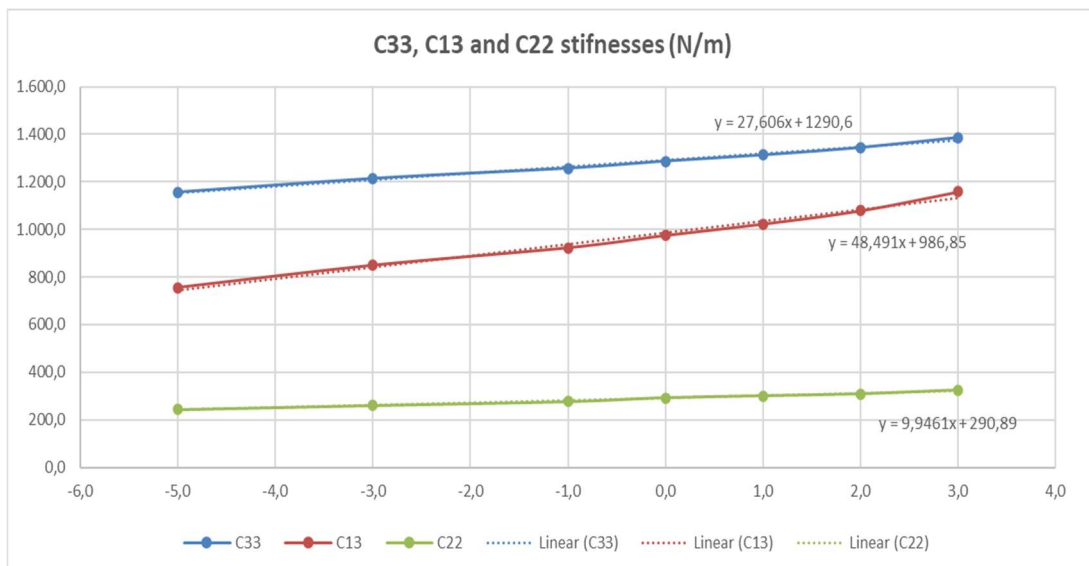
$$c_{33}^m = \frac{\delta V_B}{\delta z_B} \text{ και } c_{13}^m = \frac{\delta H}{\delta z_B}, c_{22}^m = \frac{H}{x_B} \quad (4.10)$$

Με βάση την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένα στα βήματα 1-6, στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η κατακόρυφη και οριζόντια δύναμη στην κορυφή του κλάδου

αγκύρωσης συναρτήσει της κατακόρυφης μετακίνησης του σημείου πρόσδεσης του κλάδου στη κατασκευή. Τέλος, στο σχήμα 4.8, παρουσιάζονται οι συντελεστές επαναφοράς στην κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση λόγω μοναδιαίας μετακίνησης του άνω άκρου του κλάδου ακύρωσης στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στους συντελεστές  $c_{13}^m$  και  $c_{31}^m$ , όπως υπολογίζονται από τις (4.10) και (4.9), λόγω ελαφράς μη γραμμικότητας που εμφανίζει η δύναμη επαναφοράς.



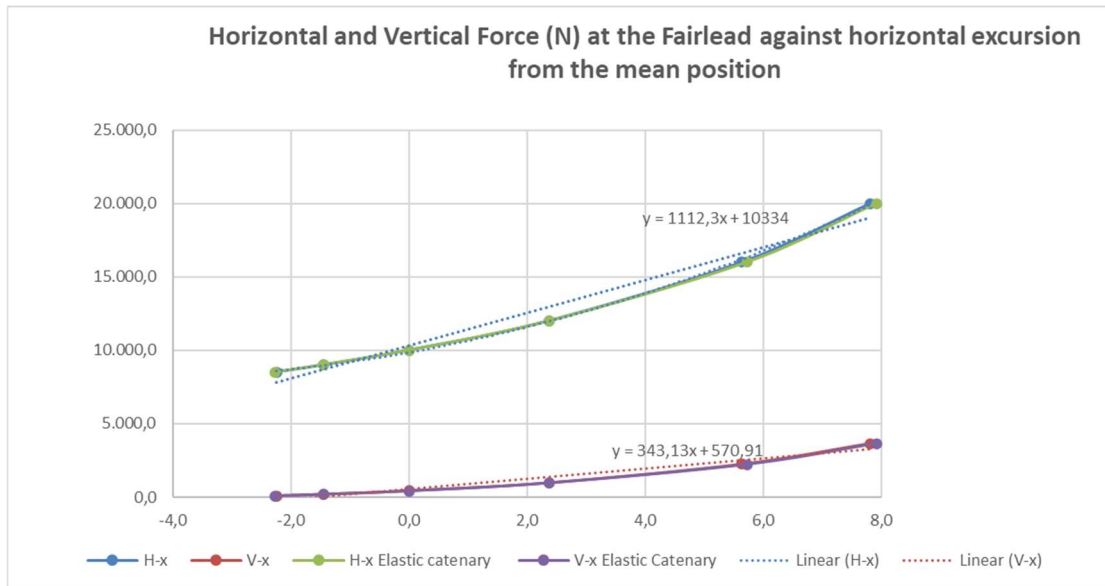
Σχήμα 4.7: Οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης λόγω μοναδιαίας μετακίνησης του τελευταίου στην κατακόρυφη κατεύθυνση z.



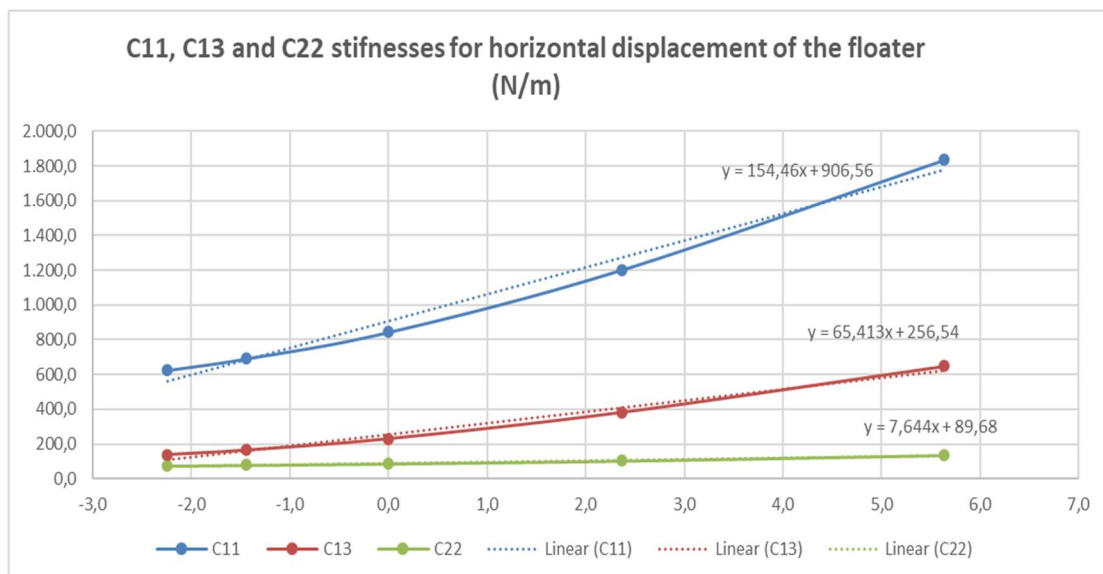
Σχήμα 4.8: Συντελεστές επαναφοράς στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση z.

Αντίστοιχα αποτελέσματα για τον δεύτερο τύπο του κλάδου αγκύρωσης που εξετάζεται με ενδιάμεσο ανωστικό σώμα και συνθετικό τμήμα (βλέπε, δεξιό γράφημα στο σχήμα 4.4), παρουσιάζονται στα σχήματα 4.9 – 4.12. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την χάραξη των καμπυλών είναι αντίστοιχη αυτής που περιγράφηκε για τον κλάδο αγκύρωσης από αλυσίδα. Εδώ, λόγω ύπαρξης και του συνθετικού τμήματος στον κλάδο

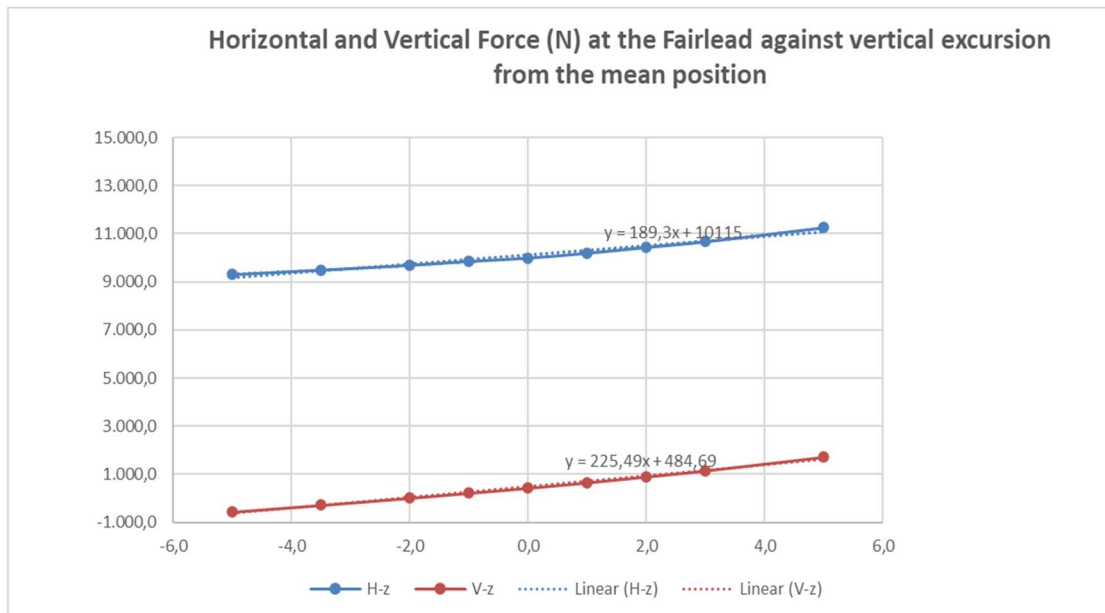
αγκύρωσης ελέγχθηκε η ακρίβεια της μεθοδολογίας που προαναφέρθηκε και με την χρήση του προγράμματος STATMOOR που λαμβάνει υπόψη την ελαστικότητα του κλάδου. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων φαίνονται ότι συγκρίνονται πολύ καλά μεταξύ τους (Σχήμα 4.9).



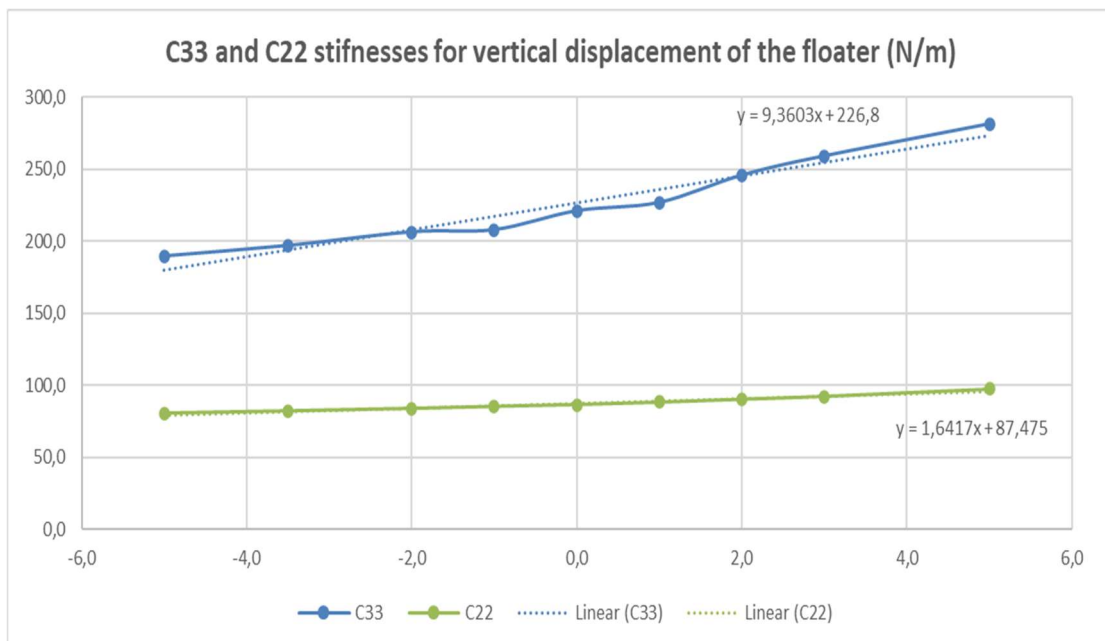
Σχήμα 4.9: Οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης συναρτήσει της οριζόντιας απομάκρυνσης του σημείου πρόσδεσης από την μέση θέση ισορροπίας του. Δεύτερος τύπος κλάδου αγκύρωσης



Σχήμα 4.10: Συντελεστές επαναφοράς στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση x, καθώς και συντελεστής επαναφοράς στην κάθετη προς το επίπεδο του κλάδου διεύθυνση λόγω κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην διεύθυνση αυτή. Δεύτερος τύπος κλάδου αγκύρωσης.



Σχήμα 4.11: Οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης λόγω μοναδιαίας μετακίνησης του τελευταίου στην κατακόρυφη κατεύθυνση z. Δεύτερος τύπος κλάδου αγκύρωσης.

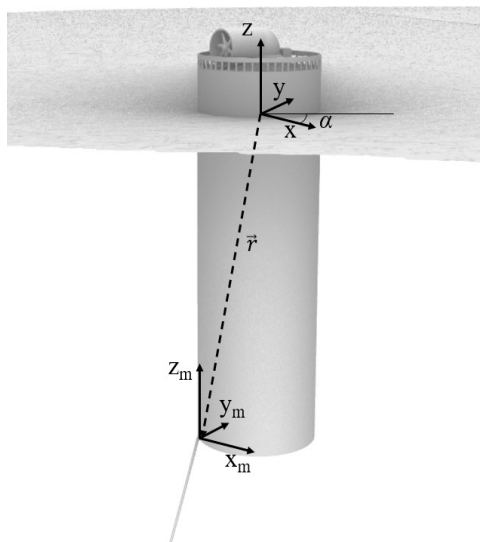


Σχήμα 4.12: Συντελεστές επαναφοράς στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση λόγω μοναδιαίας κίνησης του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στην κατεύθυνση z. Δεύτερος τύπος συστήματος αγκύρωσης.

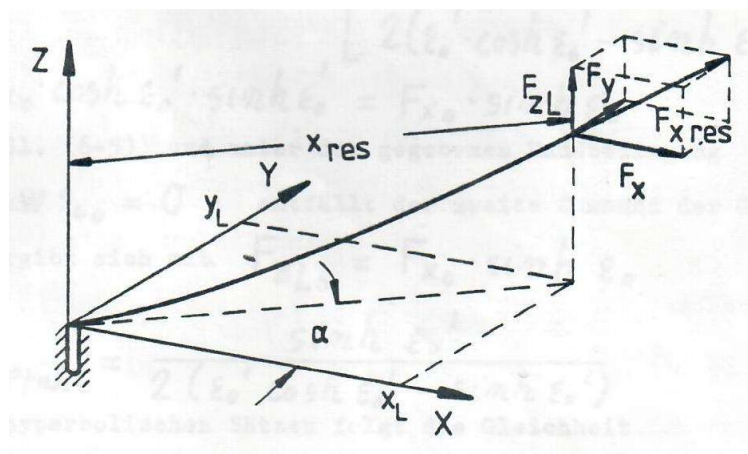
Παρατηρούμε από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ακαμψίες που προσφέρουν οι δύο τύποι των κλάδων αγκύρωσης που εξετάστηκαν, ότι ο πρώτος τύπος που αποτελείται από την αλυσίδα (σχήματα 4.5 – 4.8) προσδίδει μεγαλύτερη ακαμψία στην πλωτή κατασκευή σχέση με αυτήν του δεύτερου τύπου του κλάδου αγκύρωσης με το ανωστικό σώμα (σχήματα 4.9 – 4.12), γεγονός που σημαίνει ότι το δεύτερο σύστημα αγκύρωσης δίνει μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης στον κυματικό μετατροπέα.

#### 4.4 Αναγωγή στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων κίνησης της πλωτής κατασκευής

Στο κεφάλαιο 4.3 υπολογίστηκαν οι συντελεστές επαναφοράς ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του κλάδου αγκύρωσης. Για την διατύπωση των εξισώσεων της κίνησης της αγκυρωμένης κατασκευής εν τούτοις, απαιτείται η διατύπωσή τους ως προς το σύστημα συντεταγμένων που υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής. Το τοπικό και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων απεικονίζονται στα Σχήμα 4.13. Η γωνία  $\alpha$  ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζει ο θετικός ημιάξονας  $x$  του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων με τον θετικό ημιάξονα  $x_m$  του τοπικού συστήματος συντεταγμένων στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης (ως προς το οποίο έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές επαναφοράς που προσφέρει ο εξεταζόμενος κλάδος στην πλωτή κατασκευή) κατά την περιστροφή του πρώτου με φορά αντίθετη αυτής των δεικτών του ωρολογίου έως όπου συμπίπτει με τον θετικό ημιάξονα  $x_m$ . Βλέπε σχετικά και Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.13. Τοπικό  $(x_m, y_m, z_m)$  – στον κλάδο – και αδρανειακό  $(x, y, z)$  –στην κατασκευή- σύστημα συντεταγμένων



Σχήμα 4.14. Τοπικό  $(x_L, y_L, z_L)$  – στο επίπεδο του κλάδου – και αδρανειακό  $(x, y, z)$  –στην κατασκευή- σύστημα συντεταγμένων. Έχει χρησιμοποιηθεί εναλλακτικός συμβολισμός για το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του κλάδου.

Το 3 X 3 μητρώο των συντελεστών επαναφοράς στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων θα το συμβολίζουμε με  $[\bar{c}^m]$  και ο υπολογισμός του αντιστοιχεί σε στροφή του συστήματος, η οποία εκφράζεται μέσω της ακόλουθης μητρωϊκής σχέσης:

$$[\bar{c}^m] = [\lambda]^T [c^m] [\lambda] \quad (4.11)$$

Όπου  $[c^m]$  είναι οι συντελεστές επαναφοράς στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων,  $[\bar{c}^m]$  οι συντελεστές επαναφοράς στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων,  $[\lambda]$  μητρώο μετασχηματισμού που περιέχει τα ημίτονα και συνημίτονα της γωνίας  $a$  και  $[\lambda]^T$  το ανάστροφο μητρώο του  $[\lambda]$ . Το μητρώο  $[\lambda]$  ορίζεται ως εξής:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Το δε μητρώο των συντελεστών επαναφοράς στο επίπεδο του κλάδου αγκύρωσης είναι:

$$[c^m] = \begin{bmatrix} c_{11}^m & 0 & c_{13}^m \\ 0 & c_{22}^m & 0 \\ c_{31}^m & 0 & c_{33}^m \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Μετά την εκτέλεση των πράξεων με τα μητρώα, βλέπε σχέση (4.11), τα στοιχεία του 3 X 3 μητρώου των συντελεστών επαναφοράς στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων δίνονται από τις εξής σχέσεις (βλέπε [72], κεφάλαιο 8.5.2):

$$\bar{c}_{11}^m = c_{11}^m \cos a^2 + c_{22}^m \sin a^2 \quad (4.14)$$

$$\bar{c}_{12}^m = c_{11}^m \cos a \cdot \sin a - c_{22}^m \cos a \cdot \sin a \quad (4.15)$$

$$\bar{c}_{13}^m = c_{13}^m \cos a \quad (4.16)$$

$$\bar{c}_{22}^m = c_{11}^m \sin a^2 + c_{22}^m \cos a^2 \quad (4.17)$$

$$\bar{c}_{23}^m = c_{13}^m \sin a \quad (4.18)$$

$$\bar{c}_{33}^m = c_{33}^m \quad (4.19)$$

$$\bar{c}_{21}^m = \bar{c}_{12}^m, \bar{c}_{31}^m = \bar{c}_{13}^m, \bar{c}_{32}^m = \bar{c}_{23}^m \quad (4.20)$$

Έχοντας υπολογίσει το 3 X 3 μητρώο των συντελεστών επαναφοράς του κλάδου αγκύρωσης ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, μπορούμε να υπολογίσουμε το 6 X 6 μητρώο που θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημα εξισώσεων κίνησης της πλωτής αγκυρωμένης κατασκευής. Οι σχέσεις υπολογισμού των υπόλοιπων στοιχείων του 6 X 6 μητρώου δίνονται στο κεφάλαιο 7.3 του [72] και είναι:

$$\bar{c}_{41}^m = \bar{c}_{31}^m \cdot y_2 - \bar{c}_{21}^m \cdot z_2 \quad (4.21)$$

$$\bar{c}_{51}^m = \bar{c}_{11}^m \cdot z_2 - \bar{c}_{31}^m \cdot x_2 \quad (4.22)$$

$$\bar{c}_{61}^m = \bar{c}_{21}^m \cdot x_2 - \bar{c}_{11}^m \cdot y_2 \quad (4.23)$$

$$\bar{c}_{42}^m = \bar{c}_{32}^m \cdot y_2 - \bar{c}_{22}^m \cdot z_2 \quad (4.24)$$

$$\bar{c}_{52}^m = \bar{c}_{21}^m \cdot z_2 - \bar{c}_{32}^m \cdot x_2 \quad (4.25)$$

$$\bar{c}_{62}^m = \bar{c}_{22}^m \cdot x_2 - \bar{c}_{21}^m \cdot y_2 \quad (4.26)$$

$$\bar{c}_{43}^m = \bar{c}_{33}^m \cdot y_2 - \bar{c}_{32}^m \cdot z_2 \quad (4.27)$$

$$\bar{c}_{53}^m = \bar{c}_{31}^m \cdot z_2 - \bar{c}_{33}^m \cdot x_2 \quad (4.28)$$

$$\bar{c}_{63}^m = \bar{c}_{32}^m \cdot x_2 - \bar{c}_{31}^m \cdot y_2 \quad (4.29)$$

$$\bar{c}_{44}^m = \bar{c}_{33}^m \cdot y_2^2 - 2 \cdot \bar{c}_{32}^m \cdot y_2 \cdot z_2 + \bar{c}_{22}^m \cdot z_2^2 \quad (4.30)$$

$$\bar{c}_{54}^m = \bar{c}_{31}^m \cdot y_2 \cdot z_2 - \bar{c}_{21}^m \cdot z_2^2 - \bar{c}_{33}^m \cdot y_2 \cdot x_2 + \bar{c}_{32}^m \cdot x_2 \cdot z_2 \quad (4.31)$$

$$\bar{c}_{64}^m = \bar{c}_{32}^m \cdot x_2 \cdot y_2 - \bar{c}_{31}^m \cdot y_2^2 - \bar{c}_{22}^m \cdot x_2 \cdot z_2 + \bar{c}_{21}^m \cdot y_2 \cdot z_2 \quad (4.32)$$

$$\bar{c}_{55}^m = \bar{c}_{11}^m \cdot z_2^2 - 2 \cdot \bar{c}_{31}^m \cdot x_2 \cdot z_2 + \bar{c}_{33}^m \cdot x_2^2 \quad (4.33)$$

$$\bar{c}_{65}^m = \bar{c}_{21}^m \cdot x_2 \cdot y_2 - \bar{c}_{32}^m \cdot x_2^2 - \bar{c}_{11}^m \cdot y_2 \cdot z_2 + \bar{c}_{31}^m \cdot x_2 \cdot y_2 \quad (4.34)$$

$$\bar{c}_{66}^m = \bar{c}_{22}^m \cdot x_2^2 - 2 \cdot \bar{c}_{21}^m \cdot x_2 \cdot y_2 + \bar{c}_{11}^m \cdot y_2^2 \quad (4.35)$$

Στις πιο πάνω σχέσεις με  $(x_2, y_2, z_2)$  συμβολίζεται η συντεταγμένη του σημείου πρόσδεσης του εκάστοτε κλάδου αγκύρωσης στην πλωτή κατασκευή ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, ως προ το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής. Σημειώνεται ακόμα ότι οι σχέσεις (4.21) – (4.35) ισχύουν για κάθε κλάδο του συστήματος αγκύρωσης και θα πρέπει κατά συνέπεια να αθροιστούν για όλους του κλάδους ώστε να μας δώσουν το 6 X 6 μητρώο του συνολικού συντελεστή επαναφοράς (ή της συνολικής ακαμψίας) που προσδίδει το σύστημα αγκύρωσης στην πλωτή κατασκευή.

#### 4.5 Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει αναφορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά του πρώτου τύπου του κλάδου αγκύρωσης, αυτού που αποτελείται από αλυσίδα (σχήμα 4.4 αριστερά), με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού προγράμματος DYNMOOR που επιλύει το σύστημα εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας του κλάδου στο επίπεδό του στο πεδίο των συχνοτήτων με ισοδύναμη γραμμικοποίηση των μη γραμμικών δυνάμεων αντίστασης που ασκούνται επάνω του, όταν αυτός διεγείρεται με ημιτονοειδή κίνηση στο άνω σημείο συγκράτησής του στην οριζόντια και την κατακόρυφη κατεύθυνση. Το πρόβλημα της επίλυσης των μη γραμμικών δυναμικών εξισώσεων της κίνησης ενός κλάδου αγκύρωσης με ή χωρίς ενδιαμέσο ανωστικό πλωτήρα έχει παρουσιαστεί σε πληθώρα δημοσιεύσεων, μερικές των οποίων αναφέρονται εδώ ([73]-[76]), στις οποίες και περιγράφεται η θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται η αριθμητική επίλυσή του μέσω του προγράμματος DYNMOOR. Στην [76] γίνεται αναφορά στην απόσβεση που επιβάλλεται στην πλωτή κατασκευή από το σύστημα αγκύρωσης (mooring line damping) και συσχετίζεται στο πεδίο των συχνοτήτων με το φανταστικό μέρος της δύναμης που ασκείται στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την εξαναγκασμένη κίνηση του τελευταίου στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση.

Η δύναμη που ασκείται στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης, ανηγμένη στο πλάτος της ταλάντωσης  $A_j$  στη κατεύθυνση  $j$ , όταν αυτός διεγείρεται σε περιοδική κίνηση στο επίπεδό του, μπορεί να γραφεί:

$$F_{m,ij}/A_j = (C_{m,ij} + iB_{m,ij}) \quad (4.36)$$

η οποία στη συνέχεια ακολουθώντας τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς που ακολουθήσαμε για την αναγωγή των συντελεστών ακαμψίας από το τοπικό σύστημα στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (βλέπε κεφ. 4.4, σχέση 4.11 και 4.21-4.35), μπορεί να



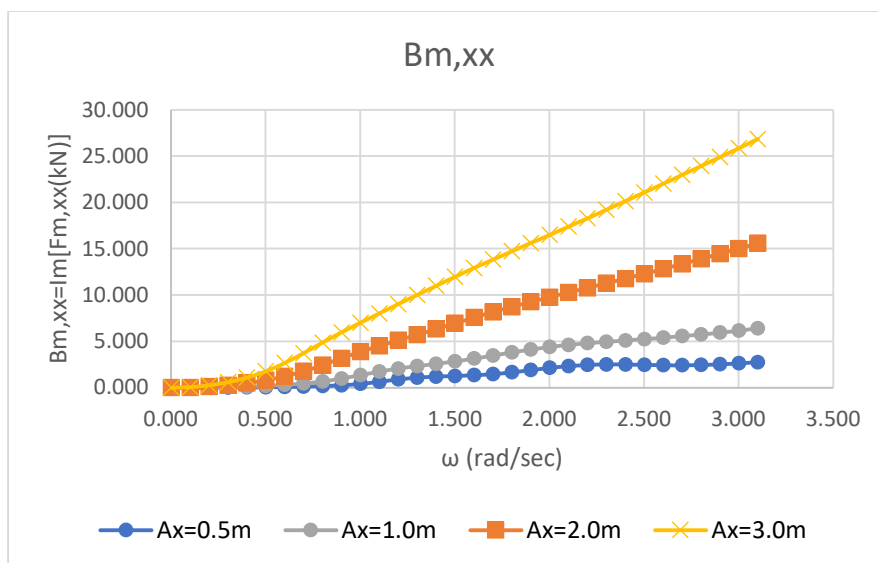
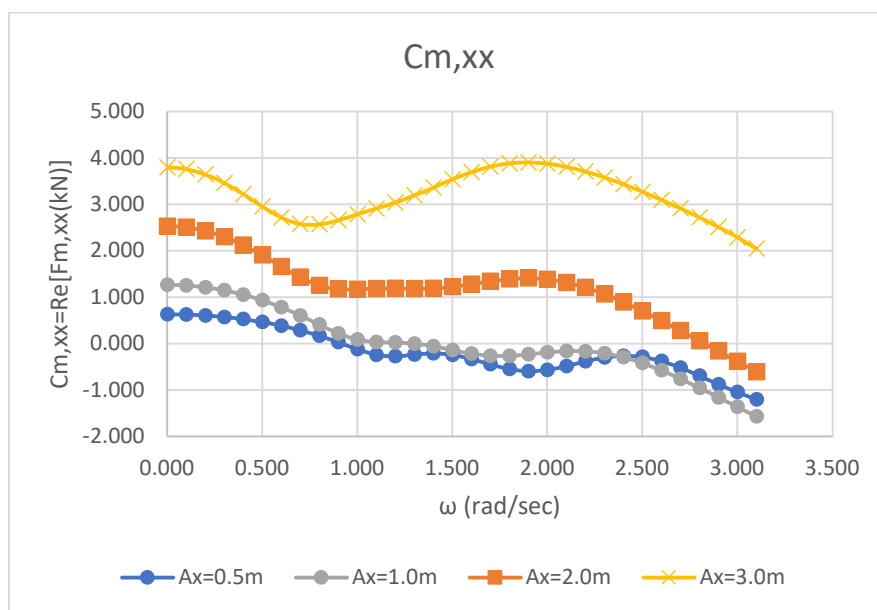
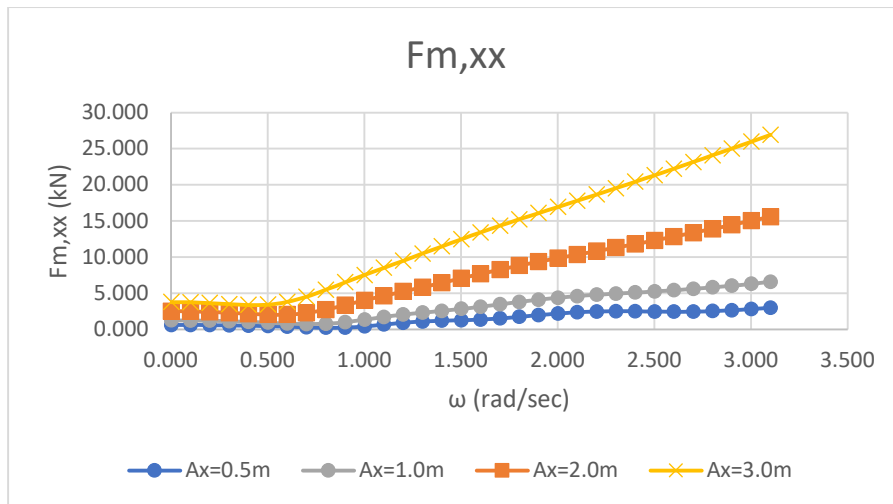
γραφεί συναρτήσει των κινήσεων της αγκυρωμένης κατασκευής στους έξι βαθμούς ελευθερίας της,  $\xi_{j0}$ :

$$f_i^m = (\overline{c_{ij}^m} + i\omega\overline{b_{ij}^m})\xi_{j0} \quad (4.37)$$

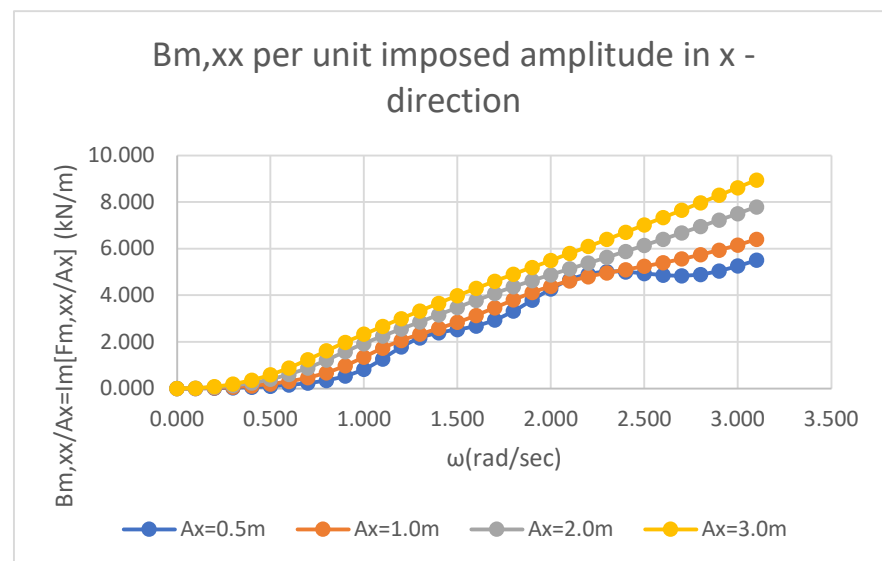
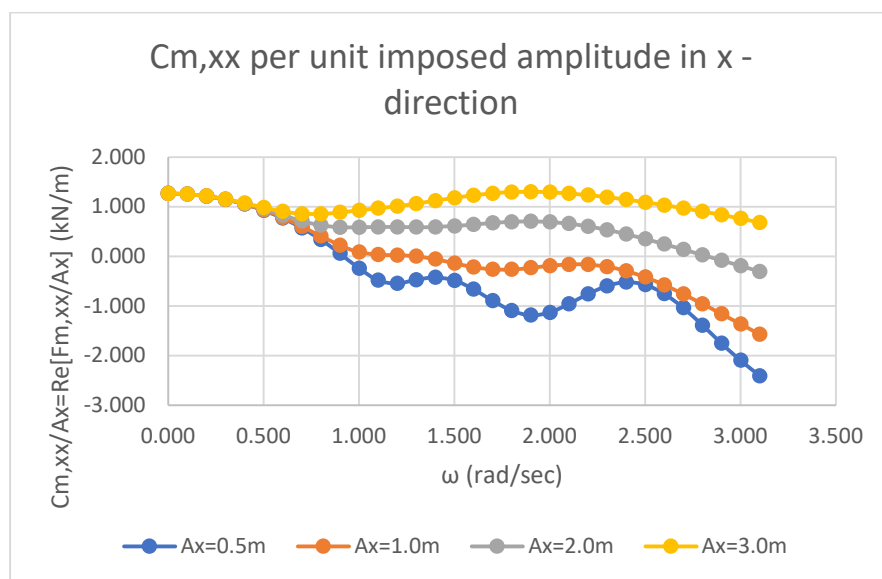
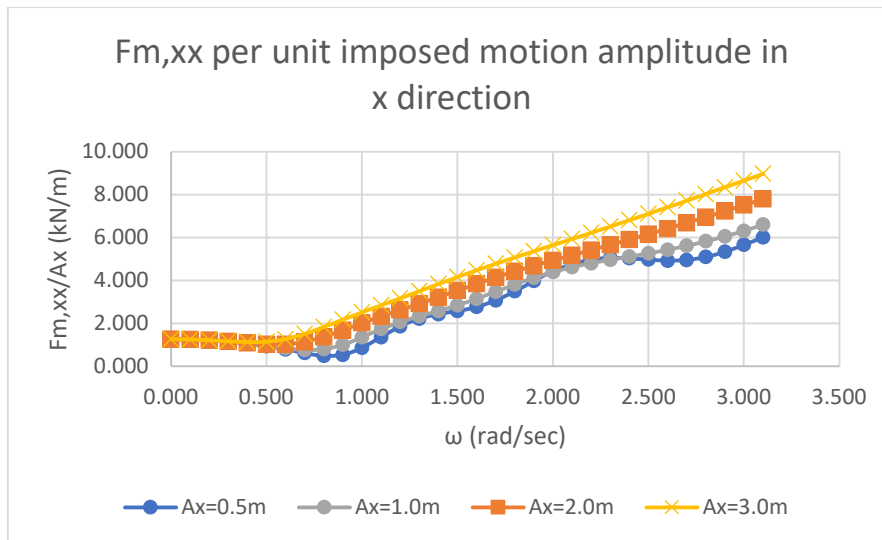
Ο όρος  $\overline{c_{ij}^m}$  δηλώνει τους συντελεστές ακαμψίας λόγω των γραμμών αγκύρωσης για τον υπολογισμό των οποίων όμως, σε αντίθεση με εκείνους που περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο 4.3 της μεταπτυχιακής που υπολογίστηκαν με βάση την στατική επίλυση του κλάδου αγκύρωσης, έχει ληφθεί υπόψη η δυναμική τους, ενώ αντίστοιχα τα  $\overline{b_{ij}^m}$  είναι οι συντελεστές απόσβεσης που προκαλείται από τους κλάδους αγκύρωσης και είναι συνέπεια της δυναμικής συμπεριφοράς τους.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η απόλυτη τιμή της οριζόντιας δύναμης  $F_{m,xx}$  που ασκείται στον κλάδο αγκύρωσης στην κορυφή του κατά την εξαναγκασμένη κίνηση του άνω σημείου συγκράτησής του με διάφορα πλάτη διεγέρσεων στην κατεύθυνση x, δηλαδή  $Ax = 0.5m, 1.0m, 2.0m$  και  $3.0m$ , καθώς και τα αντίστοιχα πραγματικά  $C_{m,ij}$  και φανταστικά  $B_{m,ij}$  τμήματα της δύναμης αυτής (σχέση 4.36), ενώ στο σχήμα 4.16 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα ανηγμένα στο πλάτος της οριζόντιας κίνησης διέγερσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.17 για την κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την οριζόντια κίνηση της κορυφής του κλάδου  $F_{m,zz}$  με τα πλάτη διέγερσης που αναφέρθηκαν πριν. Αντίστοιχα στο σχήμα 4.18 τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται ανηγμένα ανά μονάδα πλάτους της οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή του κλάδου.

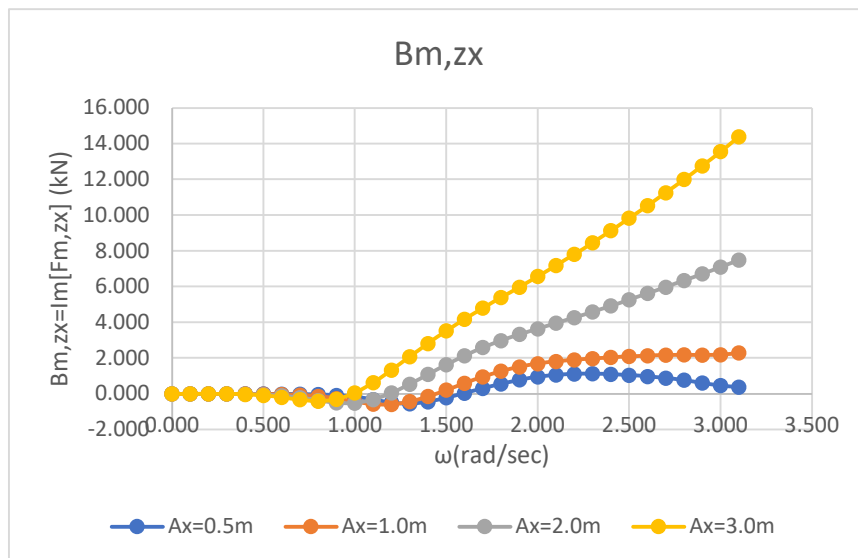
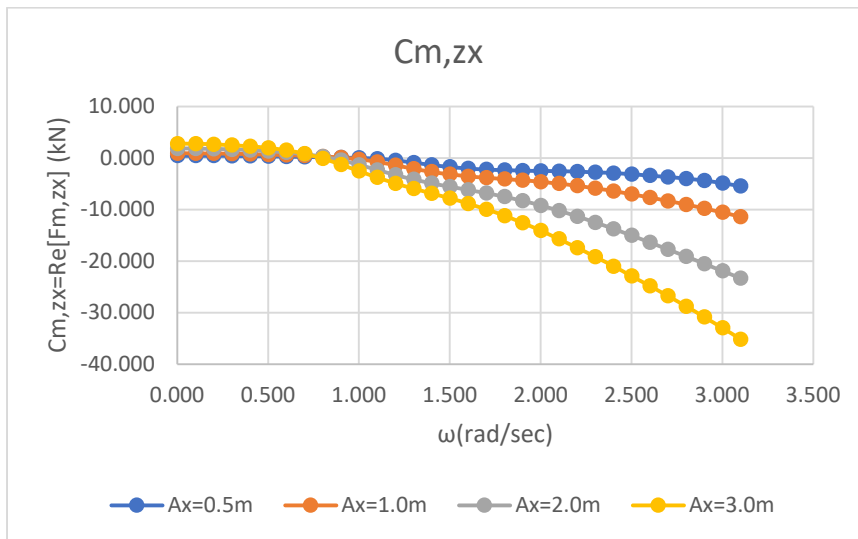
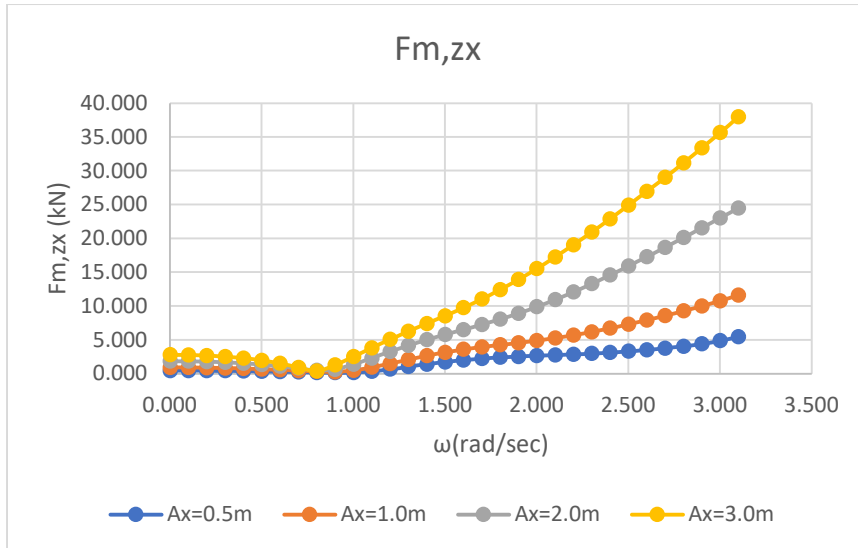
Στα σχήματα (4.19) – (4.22) εξετάζονται τα δυναμικά μεγέθη της δύναμης στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την εξαναγκασμένη κατακόρυφη κίνηση της κορυφής του κλάδου με διάφορα πλάτη διέγερσης, δηλαδή:  $Az = 0.5m, 1.0m, 2.0m$  και  $3.0m$ . Ειδικότερα στο σχήμα (4.19) παρουσιάζεται το μέτρο της κατακόρυφης συνιστώσας της δυναμικής τάσης στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την κίνησή του στην κατακόρυφη κατεύθυνση,  $F_{m,zz}$  με πλάτη  $Az = 0.5m, 1.0m, 2.0m$  και  $3.0m$ , ενώ στο σχήμα (4.20) παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα ανηγμένα στην ανά μονάδα πλάτους κατακόρυφης κίνησης της κορυφής του κλάδου. Τέλος στα σχήματα (4.21) και (4.22) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οριζόντιας συνιστώσας της δύναμης στην κορυφή του κλάδου αγκύρωσης κατά την κατακόρυφη κίνηση του τελευταίου στην κατεύθυνση αυτή  $F_{m,xz}$  με πλάτη αυτά που αναφέρθηκαν προηγούμενα (σχήμα 4.21) καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα ανηγμένα στην ανά μονάδα πλάτους κατακόρυφη κίνηση (σχήμα 4.22).



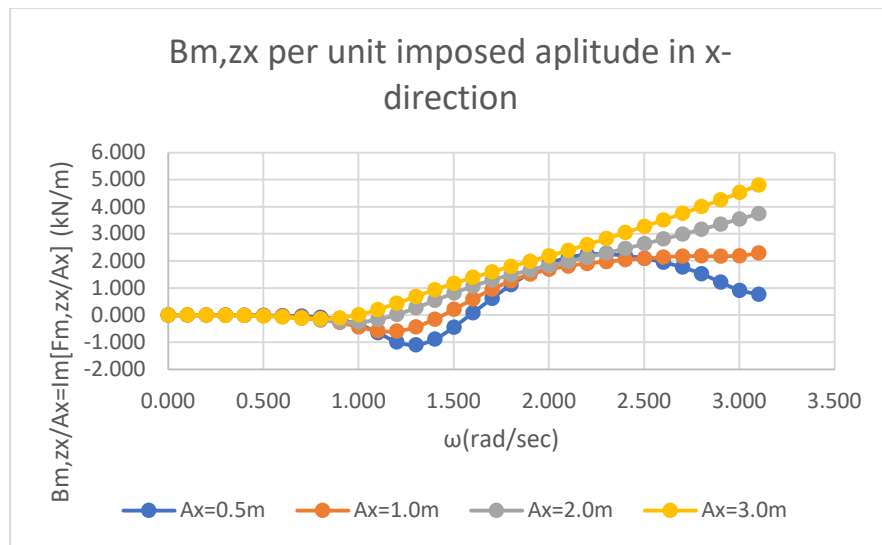
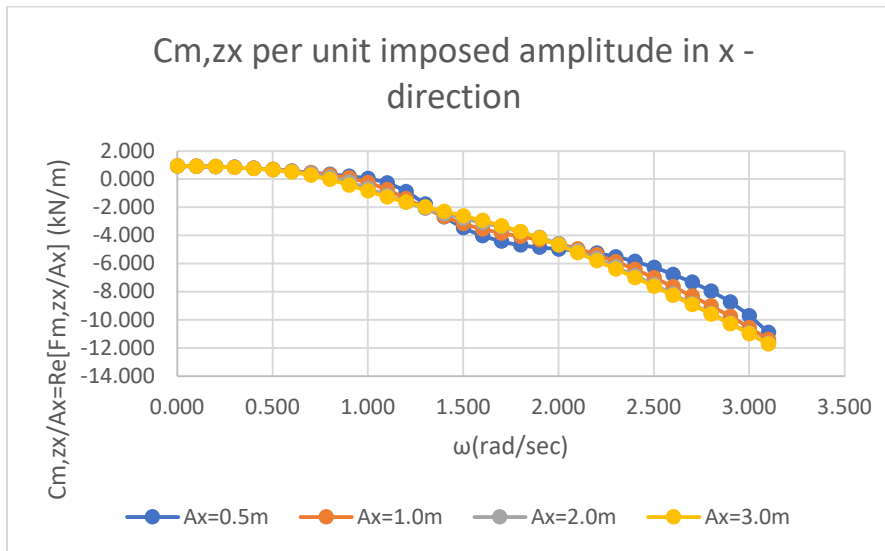
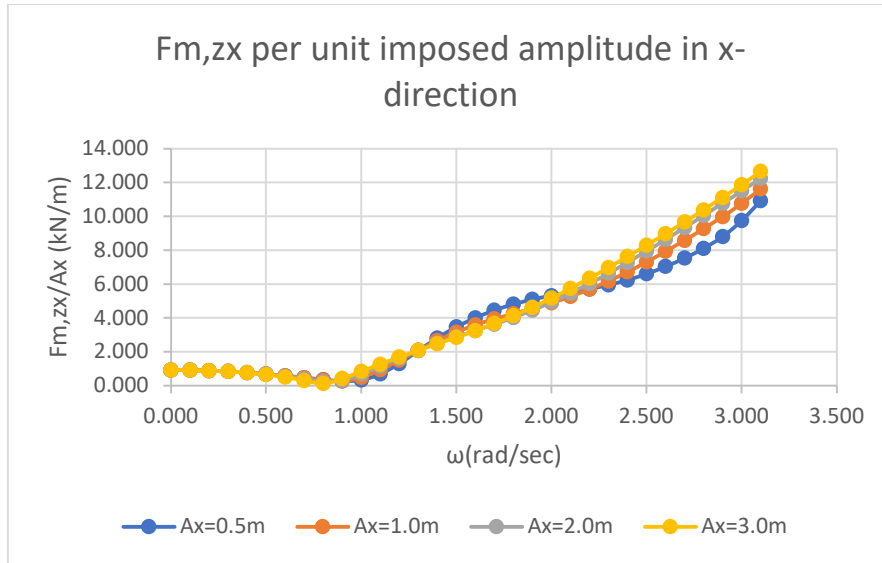
Σχήμα 4.15: Δύναμη στην οριζόντια κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην οριζόντια κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε σχέση (4.36)



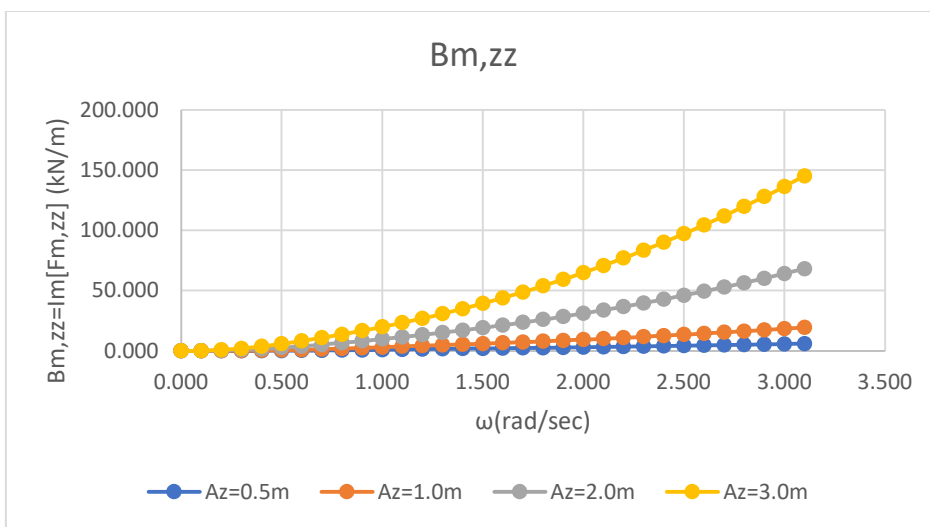
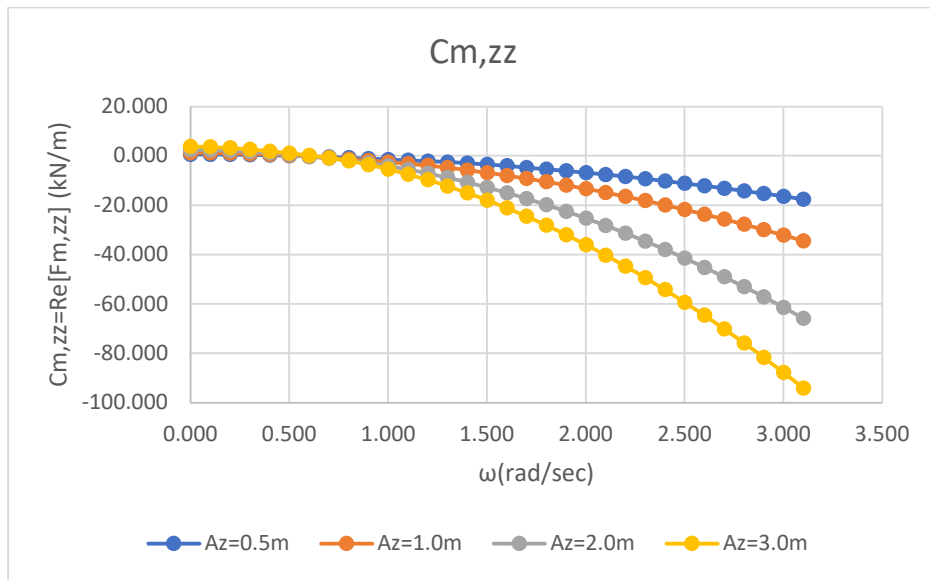
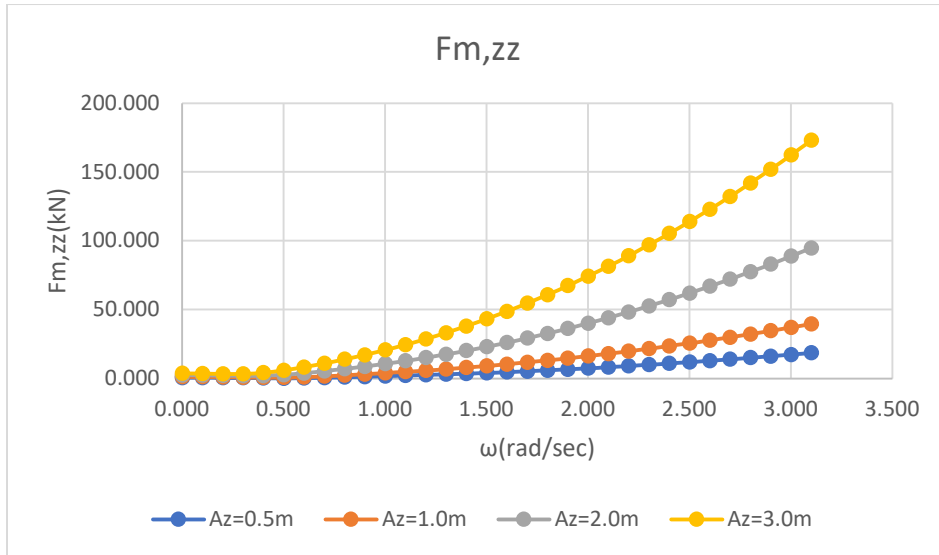
Σχήμα 4.16: Ανά μονάδα πλάτους δύναμη στην οριζόντια κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην οριζόντια κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε σχέση (4.36)



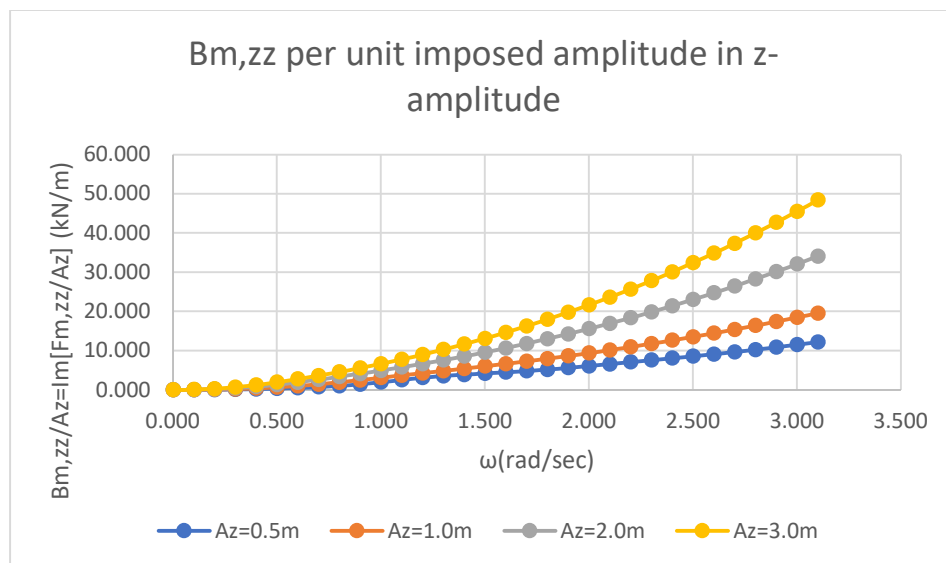
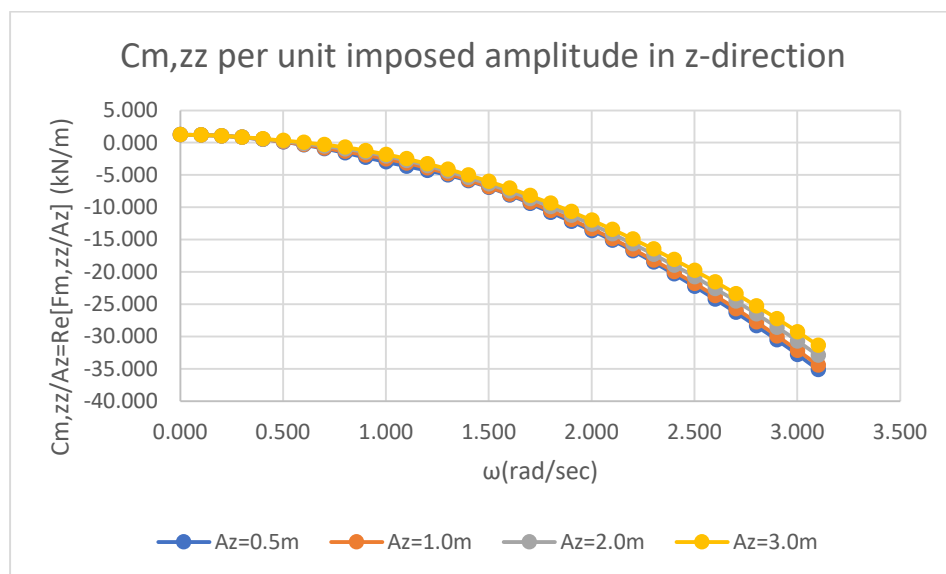
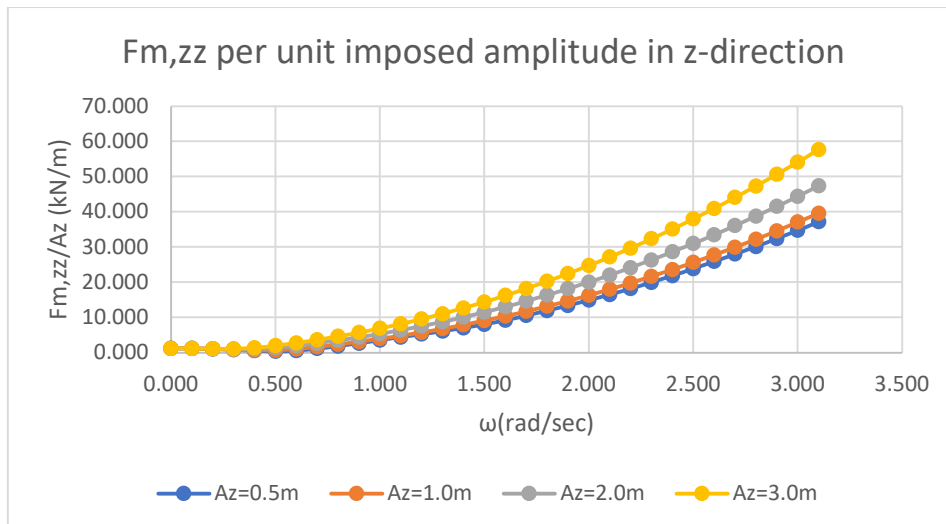
Σχήμα 4.17: Δύναμη στην κατακόρυφη κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην οριζόντια κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε σχέση (4.36)



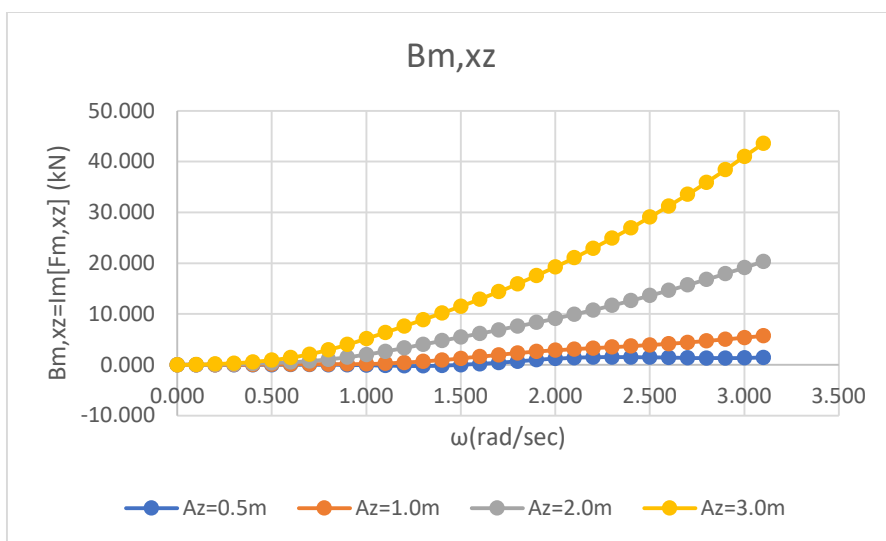
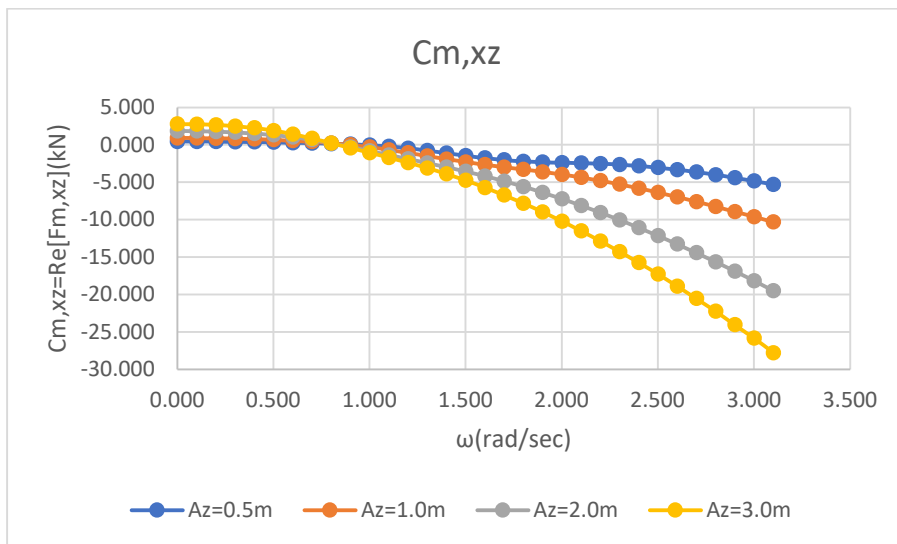
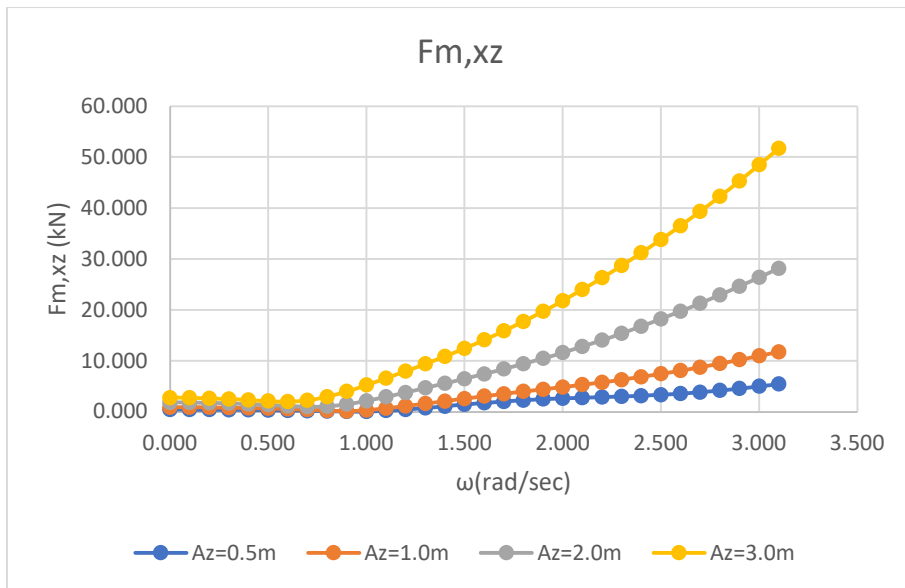
Σχήμα 4.18: Ανά μονάδα πλάτους δύναμη στην κατακόρυφη κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην οριζόντια κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε (4.36)



Σχήμα 4.19: Δύναμη στην κατακόρυφη κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε σχέση (4.36)

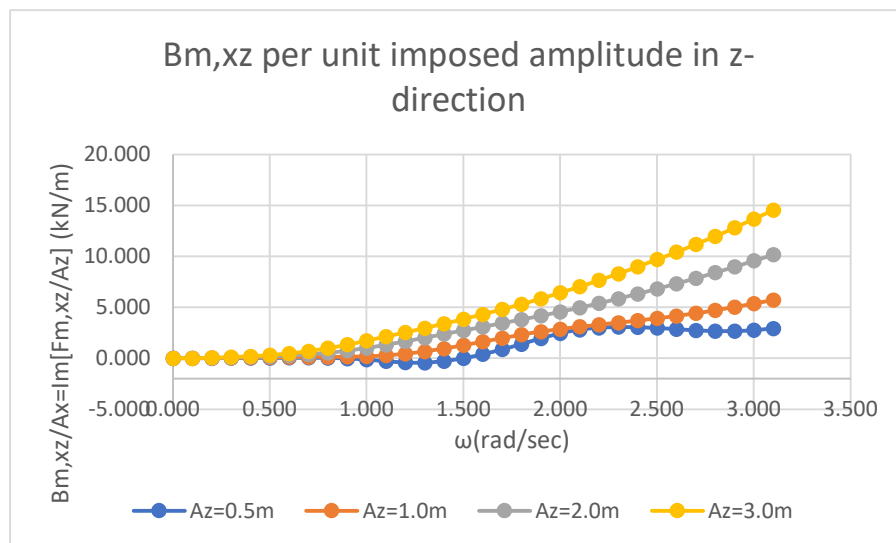
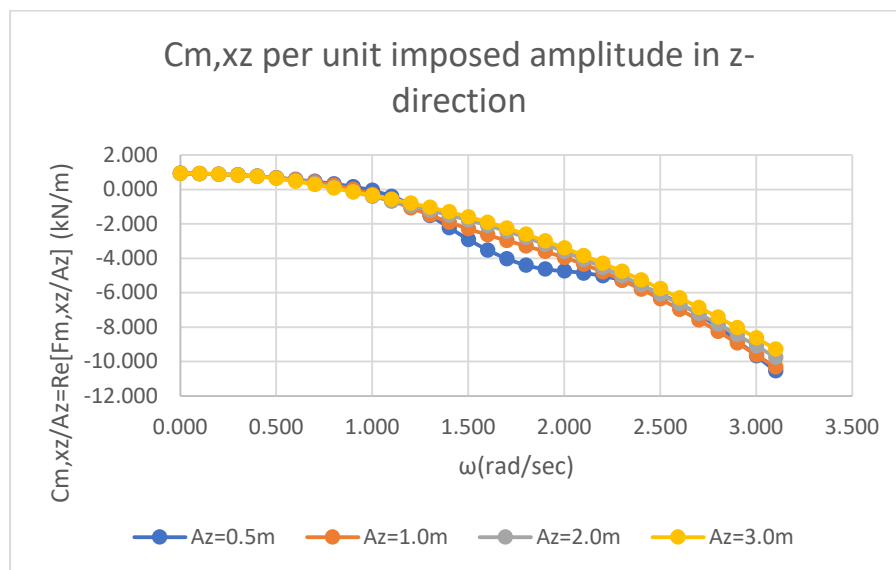
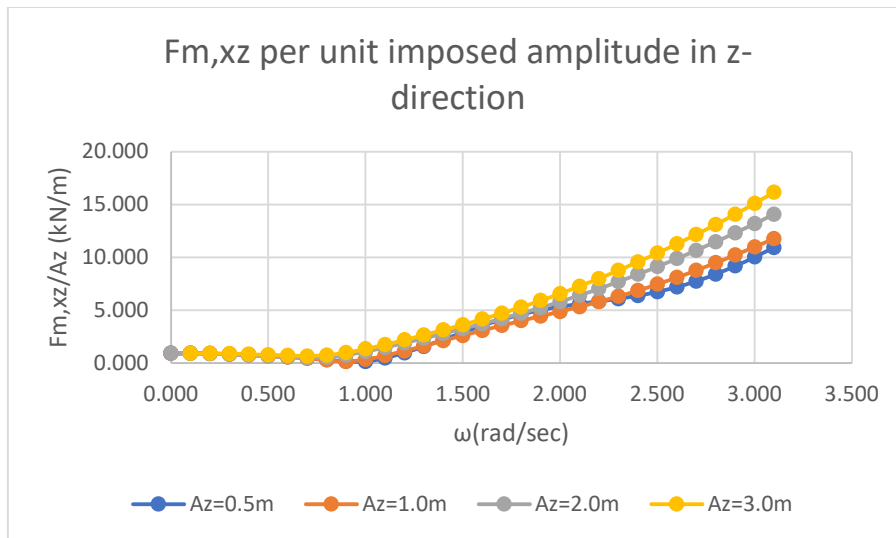


Σχήμα 4.20: Ανά μονάδα πλάτους δύναμη στην κατακόρυφη κατεύθυνση στη κορυφή του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε (4.36)



Σχήμα 4.21: Δύναμη στην οριζόντια κατεύθυνση στο άνω άκρο του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε σχέση (4.36)





Σχήμα 4.22: Ανά μονάδα πλάτους δύναμη στην οριζόντια κατεύθυνση στη κορυφή του κλάδου αγκύρωσης για διάφορα πλάτη εξαναγκασμένων ταλαντώσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Μέτρο, πραγματικό και φανταστικό τμήμα αντίστοιχα, βλέπε (4.36)

## 5 Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης. Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας.

### 5.1 Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης

Η υδροδυναμική ανάλυση της πλωτής αγκυρωμένης συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας, απαιτεί την σύζευξη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλωτήρα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης καθώς και με τα χαρακτηριστικά της ταλαντευόμενης πίεσης εντός του θαλάμου ταλάντωσης σε περίπτωση κυματικού μετατροπέα που βασίζεται στην αρχή της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Το σύστημα των συζευγμένων εξισώσεων στην γενική περίπτωση κίνησης αξονοσυμμετρικού κυματικού μετατροπέα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας που κινείται στο επίπεδο πρόσπτωσης του κυματισμού και εκτελεί δυο μεταφορικές (surge,  $j = 1$ , και heave,  $j = 3$ ) και μία περιστροφική κίνηση (pitch,  $j = 5$ ) μπορεί να γραφτεί με βάση τις εξισώσεις ως ακολούθως [77]:

(α) για την περίπτωση πλωτής συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης

$$\sum_{j=1,3,5} (m_{ij} + a_{ij})\ddot{\xi}_{j0} + (b_{ij} + \overline{b}_{ij}^m)\dot{\xi}_{j0} + (c_{ij}^h + \overline{c}_{ij}^m)\xi_{j0} + \delta_{i,3}F_{p,i}p_{in0} = F_{exc,i} + \delta_{i,3}F_{MP} \quad (5.1)$$

Στην εξίσωση (5.1),  $\xi_{j0}$  είναι το άνωμα των μετατοπίσεων της κατασκευής στους τρεις βαθμούς ελευθερίας,  $m_{ij}$  είναι το γενικευμένο μητρώο της μάζας που δίνεται από την σχέση (5.2) πιο κάτω,  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης στην κατεύθυνση  $i$  λόγω της κίνησης της κατασκευής στην κατεύθυνση  $j$ ,  $c_{ij}^h$  είναι το μητρώο των υδροστατικών συντελεστών επαναφοράς, που δίνεται από το τη σχέση (5.3) πιο κάτω,  $\overline{c}_{ij}^m$  οι συντελεστές επαναφοράς στην κατεύθυνση  $i$  λόγω της κίνησης της κατασκευής στην κατεύθυνση  $j$  που οφείλονται στο σύστημα αγκύρωσης και ορίστηκαν στο κεφάλαιο 4. Περαιτέρω  $F_{p,i}$ , βλέπε κεφάλαιο 3.5, σχέση (3.64), που αναφέρεται στην υδροδυναμική ανάλυση της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, είναι η δύναμη ακτινοβολίας που προκαλείται στη συσκευή από την χρονικά μεταβαλλόμενη εσωτερική πίεση,  $p_{in0}$ ,  $\delta_{i,3}$  είναι το σύμβολο του Kronecker,  $F_{exc,i}$  είναι η δύναμη διέγερσης στην συσκευή στην κατεύθυνση  $i$  και  $F_{MP}$  είναι η δύναμη λόγω της εσωτερικής πίεσης στον θάλαμο που ισούται με:  $F_{MP} = S_i p_{in0}$  [64]) και  $S_i$  είναι η εγκάρσια επιφάνεια της εσωτερικής επιφάνειας του νερού εντός της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης.

Οι όροι  $\overline{b}_{ij}^m$ , που υπεισέρχονται στην εξίσωση (5.1) υποδηλώνουν την απόσβεση που προέρχεται από το σύστημα αγκύρωσης (mooring line damping) και οφείλεται στην δύναμη αντίστασης που ασκείται πάνω στον κλάδο αγκύρωσης κατά την κίνησή του στο νερό, βλέπε και κεφάλαιο 4.5. Και για τους όρους αυτούς ισχύουν οι γενικές σχέσεις του κεφ. 4.4 για την αναγωγή τους από το τοπικό σύστημα του κλάδου αγκύρωσης, ως προς το οποίο έχουν υπολογιστεί, στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων ως προς το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής

Το γενικευμένο μητρώο μάζας στην εξίσωση (5.1) για τους έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης της κατασκευής είναι:

$$m_{ij} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m \cdot X_{g3} & 0 \\ 0 & m & 0 & -m \cdot X_{g3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m \cdot X_{g3} & 0 & J_{44} & 0 & -J_{46} \\ m \cdot X_{g3} & 0 & 0 & 0 & J_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα της συσκευής,  $J_{ii}$  οι ροπές αδρανείας,  $J_{46} = J_{64}$  γινόμενο αδρανείας, αντίστοιχα,  $(0,0,X_{g3})$  η θέση του κέντρου βάρους της κατασκευής ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων  $0 - xyz$  ως προς το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής (συνήθως στην μέση ηρεμούσα ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού), πάνω στον νοητό άξονα συμμετρίας της συσκευής.

Το μητρώο με τους υδροστατικούς συντελεστές επαναφοράς δίνεται από την (5.3)

$$c_{ij}^h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_{wp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g \nabla(\overline{GM}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho g \nabla(\overline{GM}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Όπου  $A_{wp}$  είναι η επιφάνεια της ισάλου,  $\overline{GM}$  το μετακεντρικό ύψος και  $\nabla$  ο εκτοπιζόμενος όγκος της συσκευής.

Για να επιλυθεί η εξίσωση (5.1), δηλαδή ένα σύστημα τριών εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους, δηλαδή τις τρεις μετατοπίσεις και την πίεση στον θάλαμο συμπίεσης,  $\xi_{j0}$ ,  $j=1,3,5$ ,  $p_{in0}$ , το σύστημα των εξισώσεων συμπληρώνεται με την εξίσωση της παροχής αέρα, βλέπε εξισώσεις (3.66) και (3.67) που μπορεί να γραφτούν στην μορφή:

$$(S_i - q_3)\ddot{\xi}_{30} + (\Lambda - q_P)p_{in0} = q_D \quad (5.4)$$

Όλα τα μεγέθη που εμφανίζονται στην εξίσωση αυτή έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 3.5 της υδροδυναμικής ανάλυσης της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης.

#### (β) περίπτωση πλωτού κυματικού μετατροπέα κατακόρυφης αξονοσυμμετρικής μορφής

Η εξίσωση (5.1) που περιγράφει τις εξισώσεις κίνησης πλωτής κατακόρυφης κυλινδρικής συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας βασιζόμενη στην αρχή της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, απλοποιείται στην περίπτωση κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών κυματικών μετατροπέων, λόγω της απουσίας των όρων που εκφράζουν την πίεση στον θάλαμο ταλάντωσης, όπως και των δυνάμεων ακτινοβολίας που δημιουργούνται από αυτήν. Έτσι στην περίπτωση αυτή η ανωτέρω εξίσωση (5.1) γράφεται ως:

$$\sum_{j=1,3,5} (m_{ij} + a_{ij})\ddot{\xi}_{j0} + (b_{ij} + b_{PTO,i} + b_{ij}^m)\dot{\xi}_{j0} + (c_{ij}^h + c_{ij}^m)\xi_{j0} = F_{exc,i} \quad (5.5)$$

Όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην εξίσωση (5.5), έχουν οριστεί προηγουμένα. Στην εξίσωση (5.5), ο μηχανισμός απόληψης ενέργειας (power take off mechanism) στην  $i$  κατεύθυνση έχει προσομοιαστεί με τον συντελεστή απόσβεσης  $b_{PTO,i}$ . Για την παρουσίαση

των αριθμητικών αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 7, υποτέθηκε ίσος με τον συντελεστή της υδροδυναμικής απόσβεσης στην συχνότητα συντονισμού στην αντίστοιχη κίνηση του πλωτήρα.

## 5.2 Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς

Έχοντας προσδιορίσει τις κινήσεις του πλωτού κυματικού μετατροπέα και την αντίστοιχη πίεση στον θάλαμο ταλάντωσης,  $\xi_{jo}$  and  $p_{ino}$ , μέσω της επίλυσης των εξισώσεων (5.1) και (5.4) για την περίπτωση της συσκευής ταλαντευόμενης στήλης νερού και την εξίσωση (5.5) για την περίπτωση κατακόρυφου αξονοσυμμετρικού κυματικού μετατροπέα, οι απορροφούμενες κυματικές ισχύεις δίνονται από τους τύπους:

(α) περίπτωση πλωτής συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης

$$P(\omega) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\Lambda |p_{ino}|^2] \quad (5.6)$$

Το  $\Lambda$  αποτελεί την χαρακτηριστική σταθερά του αεροστροβίλου, εκφράζει τη σχέση μεταξύ πίεσης και παροχής, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, και στην γενική περίπτωση είναι μιγαδικός αριθμός. Το πραγματικό μέρος του  $\Lambda$  συσχετίζεται με την πτώση της πίεσης στον αεροστρόβιλο, ενώ το φανταστικό κομμάτι εκφράζει την επίδραση της συμπιεστότητας του αέρα εντός του θαλάμου [12, 64]. Στα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7, ο συντελεστής  $\Lambda$  υποτέθηκε ότι λαμβάνει για όλες τις συχνότητες την τιμή του  $\Lambda_{opt}$ , που αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού της εσωτερικής υδάτινης στήλης (rumping resonance), όπως παρουσιάστηκε στο [78].

(β) περίπτωση πλωτού σημειακού απορροφητήρα

$$P_i(\omega) = \frac{1}{2} b_{PTO,i} \omega^2 |\xi_{io}|^2 \quad (5.7)$$

Όπου  $P_i$  η απορροφούμενη κυματική ισχύς στην  $i$  κατεύθυνση,  $\xi_{io}$  το πλάτος της κίνησης στην  $i$  κατεύθυνση,  $b_{PTO,i}$  ο συντελεστής απόσβεσης του μηχανισμού απόληψης της κυματικής ενέργειας, ο οποίος στα πλαίσια των αριθμητικών υπολογισμών της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, λαμβάνεται ίσος με τον με τον συντελεστή της υδροδυναμικής απόσβεσης στην συχνότητα συντονισμού στην αντίστοιχη κίνηση του πλωτήρα.

Έχοντας ορίσει μέσω των εξισώσεων (5.6) και (5.7) την απορροφούμενη κυματική ισχύ για την περίπτωση των δύο τύπων κυματικών μετατροπέων που εξετάζονται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, μπορούμε να ορίσουμε και το σχετικό πλάτος της απορρόφησης (relative capture width) ή την απόδοση της συσκευής [79]:

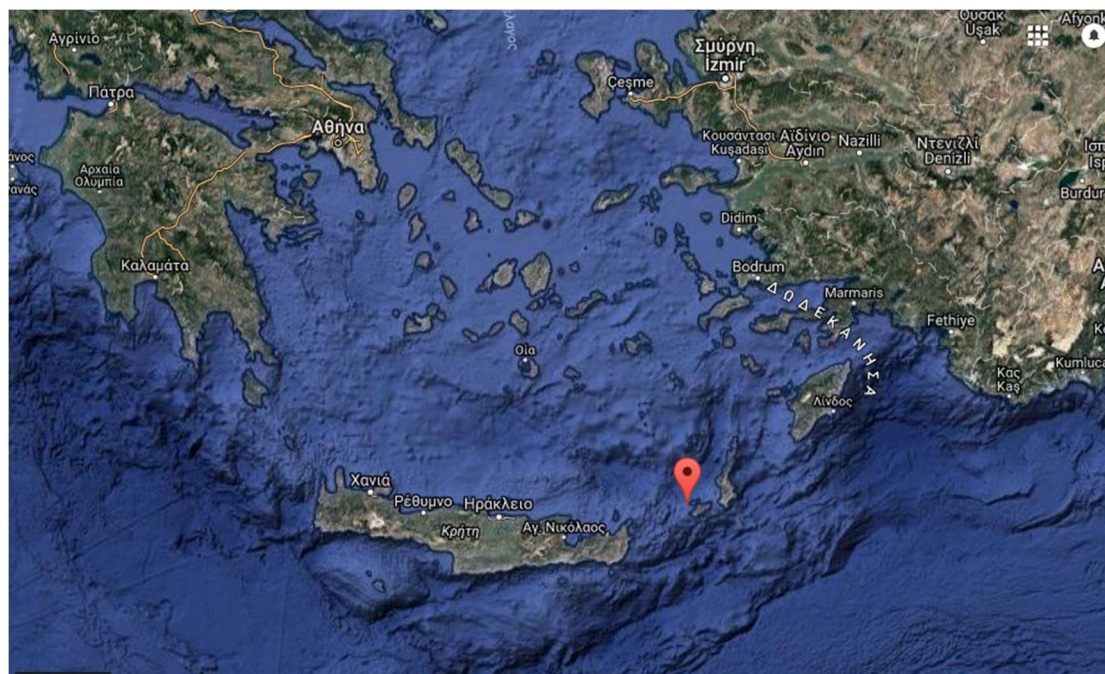
$$E_f = \frac{P(\omega)}{2bP_w} \quad (5.8)$$

Όπου  $P_w$  είναι η μέση κυματική ισχύς (υπολογισμένη ως μέση τιμή σε μια περίοδο) ανά μονάδα πλάτους της κορυφής του κύματος ενός μονοχρωματικού αρμονικού κυματισμού, πλάτους  $H/2$  και συχνότητας  $\omega$ , δηλαδή,  $P_w = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 C_g$ , όπου  $C_g$  είναι η ταχύτητα ομάδας και  $b$  χαρακτηριστική διάσταση της κατασκευής που για την περίπτωση συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης είναι η ακτίνα της εσωτερικά δημιουργούμενης ελεύθερης

επιφάνειας του ρευστού, ενώ για την περίπτωση των ταλαντευόμενων κυματικών μετατροπένων, αξονοσυμμετρικής γεωμετρίας με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας μπορεί να είναι η διάμετρος ή η ακτίνα του αξονοσυμμετρικού σώματος [80]. Η σχέση (5.8) εκφράζει το ποσοστό της κυματικής ισχύος που «διέρχεται» μέσω της συσκευής και απορροφάται από αυτήν.

### 5.3 Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς

Στο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ο υπολογισμός της παραγόμενης κυματικής ισχύος σε πραγματικές καταστάσεις θάλασσας. Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται η θαλάσσια περιοχή ανοιχτά της Κάσου (βλέπε σχήμα 5.1), τα μακροχρόνια χαρακτηριστικά σημαντικών τιμών και περιόδων κύματος μελετήθηκαν στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος REFOS [83] και αφορούν χρονική διάρκεια 31 ετών. Η θέση χαρακτηρίζεται από συντεταγμένες 35.34° N, 26.80° E.



Σχήμα 5.1 Θέση στο Αιγαίο Πέλαγος με συντεταγμένες 35.34° N, 26.80° E [84]

Στη σχετική έκθεση του προγράμματος αναλύονται τα αποτελέσματα εκτιμήσεων τρίωρων καταγραφών για χρονικό διάστημα 31 ετών και αφορούν χρονο-ιστορίες του σημαντικού ύψους κύματος,  $H_s$  (m), της μέσης διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού,  $\theta_H$  (deg), της ταχύτητας ανέμου,  $U_M$  (m/s), της μέσης διεύθυνσης πνοής του ανέμου,  $\theta_U$  (deg) και της περιόδου κορυφής φάσματος,  $T_p$  (sec)

Ο Πίνακας 5.1 δίνει για την περιοχή της Κάσου το πλήθος των τρίωρων εκτιμήσεων για συνδυασμούς ζευγών σημαντικού ύψους κύματος και περιόδου κορυφής φάσματος, με την βοήθεια του οποίου μπορεί να παραχθεί για κάθε ζεύγος τιμών το αντίστοιχο φάσμα βραχυχρόνιας περιγραφής της κατάστασης θάλασσας [83]

**Πίνακας 5.1** Συχνότητα εμφάνισης κάθε ζεύγους τιμών  $H_s-T_p$  για την περιοχή της Κάσου

Frequency of occurrence of each $T_p-H_s$ pair								
	$H_s$	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$								
2-3		221	0	0	0	0	0	0
3-4		6702	7	0	0	0	0	0
4-5		<b>24291</b>	1634	0	0	0	0	0
5-6		18937	11619	41	0	0	0	0
6-7		6869	11028	1498	1	0	0	0
7-8		462	2492	2328	223	1	0	0
8-9		100	463	747	517	30	0	0
9-10		24	58	76	121	57	7	0
10-11		0	9	8	5	3	3	0
11-12		0	1	1	0	0	0	0

Όπως παρατηρούμε από τον πιο πάνω πίνακα το ζεύγος τιμών  $H_s-T_p$  με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στα 31 χρόνια, είναι  $T_p=4-5$  sec και  $H_s=0-1$  m για την περιοχή της Κάσου.

Για να υπολογίσουμε την πραγματικά παραγόμενη ισχύ στην θέση που εξετάζουμε, θα χρησιμοποιήσουμε το φάσμα JONSWAP [81] για την περιγραφή των βραχυχρόνιων καταστάσεων θάλασσας. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ισχύ στη διάρκεια των 31 ετών. Η μαθηματική διατύπωση του φάσματος, βλέπε σχέση (5.9), προγραμματίστηκε στο Matlab.

$$S(\omega) = A_\gamma \frac{5}{16} \frac{\omega_p^4 \cdot H_s^2}{\omega^5} e^{-\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4} \gamma^a} \quad (5.9)$$

Όπου:

$$a: e^{-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\omega_p^2\sigma^2}}$$

$\omega$ : συχνότητα σε rad / sec

$\omega_p$ : συχνότητα κορυφής σε rad / sec

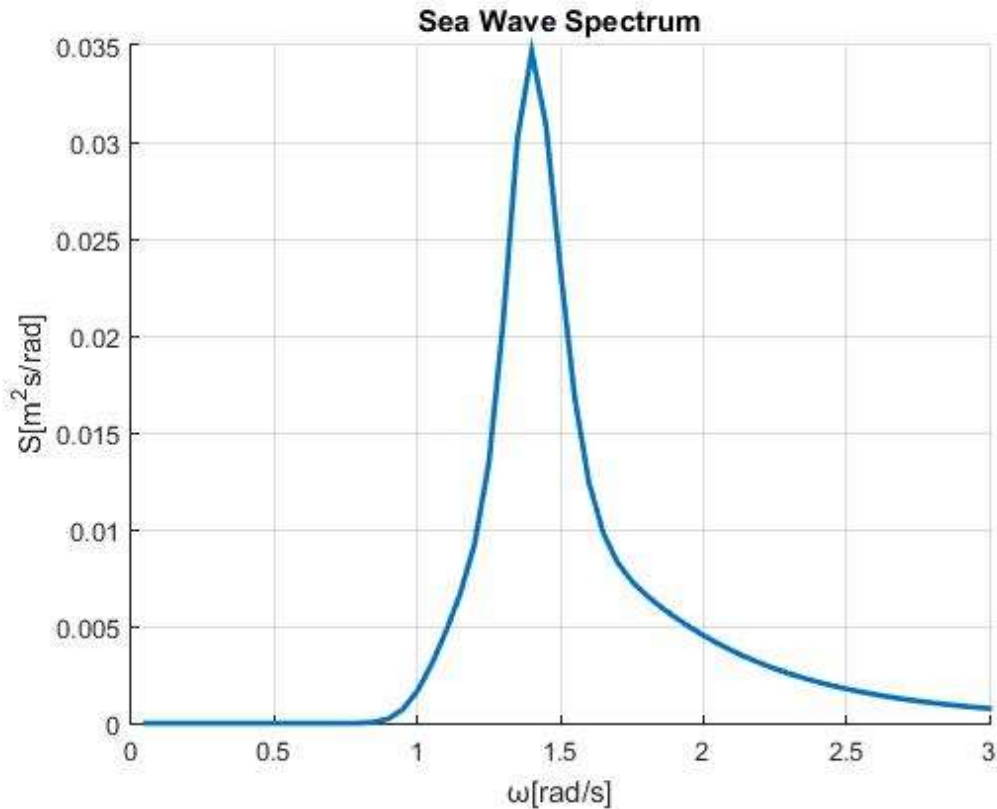
$H_s$ : Σημαντική τιμή ύψους κύματος σε m

$A_\gamma$ : 1- 0,287ln( $\gamma$ )

$$\gamma: \text{αδιάστατη παράμετρος κορυφής φάσματος} \begin{cases} 5 & \text{if } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}) & \text{if } 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \\ 1 & \text{if } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \geq 5 \end{cases}$$

$$\sigma: \begin{cases} 0,07 & \text{if } \omega < \omega_p \\ 0,09 & \text{if } \omega > \omega_p \end{cases}$$

Η μορφή του φάσματος για την συχνότερα εμφανιζόμενη κατάσταση θάλασσας στην διάρκεια των 31 ετών, απεικονίζεται στο σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2. Μορφή του φάσματος για το ζεύγος τιμών  $T_p=4-5$  sec και  $H_s=0-1$  m

Οι απορροφούμενες κυματικές ισχύεις για την περίπτωση της παλλόμενης στήλης νερού (oscillating water column) και της καθ' ύψος κινούμενης κατακόρυφης αξονοσυμμετρικής συσκευής δίνονται από τις σχέσεις (5.6) και (5.7), αντίστοιχα και εκφράζονται σε KW/m<sup>2</sup> (κιλοβάτ ανά τετράγωνο πλάτους του προσπίπτοντος αρμονικού κυματισμού).

Η κυματική ισχύς σε απόλυτες τιμές, που απορροφάται σε κάθε μια κατάσταση θάλασσας που χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τιμών σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου κορυφής, του πίνακα 5.1 δίνεται από την σχέση [79], [82]:

$$P = \int 2 \cdot E_{abs} \cdot S(\omega) d\omega \quad (5.10)$$

Όπου  $E_{abs}$  η ανά τετράγωνο πλάτους του κυματισμού κυματική ισχύς που δίνεται από τις σχέσεις (5.6) ή (5.7) και  $S(\omega)$  το φάσμα της θάλασσας. Το ολοκλήρωμα (5.10) θα πρέπει να επαναληφθεί για κάθε ένα συνδυασμό τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου που εμφανίζεται στον Πίνακα 5.1, τα επί μέρους αποτελέσματα να προστεθούν για να υπολογίσουμε την συνολικά απορροφούμενη κυματική ισχύ στην διάρκεια των 31 χρόνων. Επειδή το πλήθος των σημειούμενων για κάθε συνδυασμό τιμής σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου κορυφής αναφέρεται σε τριώρες εκτιμήσεις, θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν τα αποτελέσματα της (5.10) με τρεις ώρες για να προκύψουν τα αποτελέσματα σε ώρες και στη συνέχεια να διαιρεθούν με 31 για να προκύψει η μέση ετήσια απορροφούμενη κυματική ισχύς. Η ολοκλήρωση που παρουσιάζεται στην σχέση (5.10) έγινε με χρήση του κανόνα του Simpson.

## 6 Κώδικας υπολογισμού

Ο υπολογιστικό κώδικας που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο (λογισμικό “cylinder3.f”) υπολογίζει τις δυνάμεις διέγερσης και τις κινήσεις που προκαλούνται σε αξονοσυμμετρικά σώματα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας τα οποία διεγείρονται από αρμονικούς κυματισμούς. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran. Σύμφωνα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, η ροή γύρω από το σώμα χωρίζεται σε περιοχές δακτυλιοειδούς σχήματος, για κάθε μια εκ των οποίων το δυναμικό ταχύτητας γράφεται με την μορφή σειράς Fourier κάνοντας χρήση των σχέσεων ορθοκανονικότητας που ικανοποιούνται από τις ορθοκανονικές ιδιοσυναρτήσεις  $Z_j(z)$ . Οι άγνωστοι υδροδυναμικοί συντελεστές προσδιορίζονται από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος, που δημιουργείται από την απαίτηση ικανοποίησης των συνθηκών συνέχειας για το δυναμικό και τη ταχύτητα της ροής στα όρια παρακείμενων δακτυλιοειδών περιοχών, καθώς και από την εκπλήρωση των οριακών συνθηκών στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος.

Το πρόγραμμα επεκτάθηκε για λαμβάνει υπόψη του και την ακαμψία του συστήματος αγκύρωσης κατά την επίλυση των εξισώσεων της κίνησης, βλέπε εξισώσεις (5.1) και (5.5), καθώς και την απόσβεση που προκαλεί αυτό στην πλωτή κατασκευή. Με δεδομένα τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε κλάδου του συστήματος αγκύρωσης στο επίπεδο του κλάδου, γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, ως προς το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής. Η μεθοδολογία περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.4 της μεταπτυχιακής εργασίας. Σε ότι αφορά στα δυναμικά χαρακτηριστικά των κλάδων του συστήματος αγκύρωσης, η εισαγωγή τους στην υπολογιστική διαδικασία επίλυσης των συζευγμένων εξισώσεων κίνησης της αγκυρωμένης κατασκευής γίνεται επαναληπτικά, δεδομένου ότι λόγω των μη γραμμικών όρων της δύναμης αντίστασης, ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής εξαρτάται από το πλάτος της κίνησης. Έτσι, για την επίλυση του προβλήματος θεωρούμε ως αρχική τιμή εκκίνησης για τον υπολογισμό των κινήσεων, τις κινήσεις των σημείων πρόσδεσης των κλάδων αγκύρωσης που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος χωρίς την συμπερίληψη της δύναμης αντίστασης, δηλαδή τις κινήσεις εκείνες που προκύπτουν από την θεώρηση των στατικών ακαμψιών του συστήματος αγκύρωσης που προκύπτουν από την επίλυση των στατικών εξισώσεων ισορροπίας κάθε κλάδου.

Στη συνέχεια, οι προκύπτουσες τιμές των κινήσεων του σώματος εισάγονται ως νέες τιμές εισόδου για τον υπολογισμό των κινήσεων των σημείων πρόσδεσης των κλάδων αγκύρωσης και εξ' αυτών υπολογίζονται με παρεμβολή οι νέες τιμές του συντελεστή επαναφοράς και της αντίστοιχης απόσβεσης του εκάστοτε κλάδου αγκύρωσης από πίνακα τιμών που έχει δημιουργηθεί εκ των προτέρων με την χρήση των προγραμμάτων δυναμικής ανάλυσης εκάστου κλάδου αγκύρωσης, βλέπε κεφ. 4.5, για επιλεγμένα πλάτη οριζόντιων και κατακόρυφων κινήσεων του σημείου πρόσδεσης των κλάδων αγκύρωσης. Ο πίνακας αυτός αποτελεί αρχείο εισόδου για τον κώδικα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το πλάτος της αρχικής και της τελικά προκύπτουσας ανηγμένης μετατόπισης ευρίσκονται εντός δεδομένης τιμής σφάλματος. Εδώ έχει οριστεί ως τιμή το  $1 \cdot 10^{-4}$ . Οι επαναλήψεις που απαιτούνται κάθε φορά εξαρτώνται από την συχνότητα των κυματισμού (ή ισοδύναμα από τον κυματαριθμό) και για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στις περισσότερες των περιπτώσεων ήταν μεταξύ 10 και 12.



Στη συνέχεια θα γίνει μια περιγραφή του αρχείου δεδομένων και θα δοθούν τα αντίστοιχα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πλωτήρων που εξετάστηκαν.

## 6.1 Περιγραφή των παραμέτρων του αρχείου δεδομένων

Τα δεδομένα εισόδου (input data) θα πρέπει να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο το όνομα του οποίου δεν πρέπει να ξεπερνά τους πέντε χαρακτήρες. Στα επόμενα περιγράφονται οι γραμμές δεδομένων που πρέπει να εισαχθούν, οι οποίες αναφέρονται με τον όρο 'κάρτα':

### Κάρτα 1η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητή</i>
Alphanumeric	Τίτλος προβλήματος

### Κάρτα 2η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
2F10.0, I5	TIEF: βάθος νερού RADIUS: μεγαλύτερη ακτίνα του υπό μελέτη σώματος NEAUSS: Αριθμός συντελεστών Fourier του δυναμικού ταχύτητας στην κάθετη κατεύθυνση στο εξωτερικό πεδίο. Για τιμές του λόγου βυθίσματος $d$ προς την ακτίνα $r$ του σώματος $d/a \leq 10$ η τιμή της μεταβλητής ισούται με 19. Για $10 \leq d/a \leq 30$ NEAUSS=39 ενώ για $d/a \geq 30$ πρέπει NEAUSS=79 (μέγιστη τιμή της μεταβλητής είναι 79)

### Κάρτα 3η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
6L7	LBN: =.TRUE. για σώματα που έχουν βρεχόμενη επιφάνεια πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους =.FALSE. για σώματα που δεν έχουν βρεχόμενη επιφάνεια πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους, για παράδειγμα σώματα που πλέουν με την μεγαλύτερη ακτίνα τους LNT: =.TRUE. για σώματα που έχουν βρεχόμενη επιφάνεια κάτω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους =.FALSE. για σώματα που δεν έχουν βρεχόμενη επιφάνεια κάτω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους, για παράδειγμα σώματα που εφάπτονται στον πυθμένα της θάλασσας με την μεγαλύτερη ακτίνα τους LBN3:

	<p>=.TRUE. για σώματα που επιπλέουν στην ελεύθερη επιφάνεια, η γάστρα τους δηλαδή διαπερνά την ελεύθερη επιφάνεια</p> <p>=.FALSE. για σώματα που πλέουν κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια</p> <p>LNT3:</p> <p>=.TRUE. για σώματα που εφάπτονται στον πυθμένα της θάλασσας</p> <p>=.FALSE. για σώματα που δεν εφάπτονται στον πυθμένα της θάλασσας</p> <p>LMOOV:</p> <p>=.TRUE. για ελεύθερα πλέον σώμα. Υπολογίζονται οι δυνάμεις διέγερσης, οι υδροδυναμικοί συντελεστές (πρόσθετη μάζα και απόσβεση) και ροπές, και επιλύονται οι εξισώσεις κίνησης.</p> <p>=.FALSE. για ακίνητο σώμα. Υπολογίζονται μόνο οι δυνάμεις διέγερσης και οι ροπές.</p> <p>LPRINT:</p> <p>=.TRUE. για λεπτομερές αρχείο παραγόμενων αποτελεσμάτων και δυνάμεων σε κάθε ξεχωριστή επιφάνεια του σώματος</p> <p>=.FALSE. για συνοπτικό αρχείο παραγόμενων αποτελεσμάτων. Εξ' ορισμού το LPRINT θεωρείται . FALSE.</p>
--	---

Οι υπόλοιπες τέσσερις κάρτες περιλαμβάνονται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων μόνο αν LBN =.TRUE.

#### Κάρτα 4η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητή</i>
15	NMAXOB: συνολικός αριθμός δακτυλιοειδών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση της άνω επιφάνειας του σώματος, της επιφάνειας δηλαδή του σώματος πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα του. Στην αρίθμηση δεν προσμετράται το μεσαίο στοιχείο της άνω επιφανείας. Αυτό σημαίνει ότι για έναν σύνθετο κύλινδρο η τιμή της μεταβλητής είναι 1 ενώ στην περίπτωση κυλινδρικού σώματος που αιωρείται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια η τιμή της μεταβλητής είναι 0. Η μέγιστη τιμή της μεταβλητής ορίζεται ίση με 10.

#### Κάρτα 5η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
---------------	-------------------

8F10.0	<p>HOBMT: απόσταση της κατώτατης οριζόντιας επιφάνειας του κεντρικού δακτυλιοειδούς στοιχείου της άνω επιφάνειας, μετρούμενη από την πυθμένα</p> <p>HOB (I), I=1, NMAXOB: αποστάσεις των οριζόντιων επιφανειών των υπολοίπων δακτυλιοειδών στοιχείων της άνω επιφάνειας μετρούμενες από τον πυθμένα</p>
--------	---

**Κάρτα 6η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
16I5	<p>NEOBMT: Αριθμός των ορθοκανονικών συναρτήσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση του δυναμικού ταχύτητας για το κεντρικό δακτυλιοειδές στοιχείο της άνω επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός συνήθως ισούται με 19 ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του είναι 79.</p> <p>NEOB (I), I=1, NMAXOB: Αριθμός των ορθοκανονικών συναρτήσεων στην κατακόρυφη κατεύθυνση που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση του δυναμικού ταχύτητας για τα I δακτυλιοειδή στοιχεία της άνω επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός συνήθως ισούται με 19 ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του είναι 79.</p>

**Κάρτα 7η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητή</i>
8F10.0	ROB(I), I=1, NMAXOB+1: Ακτίνες των δακτυλιοειδών στοιχείων της άνω επιφάνειας, μετρούμενες από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά πεδία του ρευστού

Οι υπόλοιπες τέσσερις κάρτες περιλαμβάνονται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων μόνο αν LNT =.TRUE.

**Κάρτα 8η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητή</i>
I5	NMAXUN: συνολικός αριθμός δακτυλιοειδών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση της κάτω επιφάνειας του σώματος, της επιφάνειας δηλαδή του σώματος κάτω από την μεγαλύτερη ακτίνα του. Στην αρίθμηση δεν προσμετράται το μεσαίο στοιχείο της κάτω επιφάνειας. Αυτό σημαίνει ότι για έναν απλό κύλινδρο με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας ο οποίος πλέει είτε στην επιφάνεια είτε κάτω από αυτή η τιμή της μεταβλητής είναι 0. Η μέγιστη τιμή της μεταβλητής ορίζεται ίση με 11.

**Κάρτα 9η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
8F10.0	<p>HUNMT: απόσταση της ανώτατης οριζόντιας επιφάνειας του κεντρικού δακτυλιοειδούς στοιχείου της κάτω επιφάνειας, μετρούμενη από την πυθμένα</p> <p>HUN(I), I=1, NMAXUN: αποστάσεις των οριζόντιων επιφανειών των υπολοίπων δακτυλιοειδών στοιχείων της κάτω επιφάνειας μετρούμενες από τον πυθμένα</p>

**Κάρτα 10η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
16I5	<p>NEUNMT: Αριθμός συντελεστών Fourier που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του δυναμικού ταχύτητας στο κεντρικό δακτυλιοειδές στοιχείο της κάτω επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός συνήθως ισούται με 49 για <math>d/a \leq 10</math> (κάρτα 2). Για <math>10 \leq d/a \leq 30</math> επιλέγεται NEUNMT=99 ενώ για <math>d/a \geq 30</math> επιλέγεται NEUNMT=199 που είναι και η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του.</p> <p>NEUN(I), I=1, NMAXUN: Αριθμός συντελεστών Fourier που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του δυναμικού ταχύτητας στα I δακτυλιοειδή στοιχεία της κάτω επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός συνήθως ισούται με 49 ενώ η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του είναι 199. Για διαφοροποίηση της τιμής της μεταβλητής γίνεται χρήση των παραπάνω παρατηρήσεων.</p>

**Κάρτα 11η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
8F10.0	RUN(I), I=1, NMAXUN+1: Ακτίνες των δακτυλιοειδών στοιχείων της κάτω επιφάνειας, μετρούμενες από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά πεδία του ρευστού

**Κάρτα 12η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
2I5	<p>KFRAGE:</p> <p>=1 αν δίνεται ως δεδομένο ο αδιάστατος κυματικός αριθμός ka, όπου a είναι η μεγαλύτερη ακτίνα του σώματος</p> <p>=0 αν δίνονται οι τιμές της κυκλικής συχνότητας <math>\omega</math></p> <p>MAL : πλήθος διαφορετικών τιμών του ka ή <math>\omega</math></p>

**Κάρτα 13η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
8F10.0	OMEGA(I): τιμές συχνοτήτων $\omega$ KA(I), I=1,MAL : τιμές αδιάστατου κυματικού αριθμού ka

**Κάρτα 14η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
4F10.0	HEBEL: κάθετη απόσταση του σημείου αναφοράς των κινήσεων, το οποίο βρίσκεται στον κάθετο άξονα συμμετρίας του σώματος, μετρούμενη από των πυθμένα [m]  ZEGE: κάθετη απόσταση του κέντρου βάρους του σώματος μετρούμενη από το σημείο αναφοράς των κινήσεων (η μεταβλητή ZEGE πρέπει να είναι αρνητική αν το κέντρο βάρους βρίσκεται κάτω από το σημείο αναφοράς των κινήσεων του σώματος) [m]  TRAEGM: μαζική ροπή αδράνειας του σώματος ως προς το σημείο αναφοράς των κινήσεων [tn.m2]  RHWAVE: Ύψος κύματος [m] (για την γραμμική λύση, τα ανά μονάδα ύψους κύματος παραγόμενα αποτελέσματα για τις κινήσεις του σώματος είναι ανεξάρτητα από αυτό, για την περίπτωση όμως που λαμβάνονται υπόψη αποσβέσεις του συστήματος αγκύρωσης και χρησιμοποιείται κατά συνέπεια ισοδύναμη γραμμικοποίηση των δυνάμεων αντίστασης στους κλάδους αγκύρωσης, τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται από το ύψος του κύματος)

**Κάρτα 15η**

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
8I5	Ikraft2: =1 υπολογίζονται οι μέσες δευτεροτάξιες δυνάμεις και ροπές στο σώμα (mean drift forces and moments) =0 δεν υπολογίζονται οι δυνάμεις αυτές  Ipoten: =1 υπολογίζονται ανυψώσεις τις ελεύθερης επιφάνειας ή πιέσεις στην βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής, οπότε αποθηκεύονται όλοι οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του δυναμικού ταχύτητας γύρω από το σώμα ώστε να χρησιμοποιηθούν ανάλογα =0 δεν αποθηκεύονται οι συντελεστές

	<p>iplott:</p> <p>=1 δημιουργείται αρχείο πινακοποιημένων αποτελεσμάτων έτοιμο για χρήση σε πρόγραμμα εξαγωγής γραφημάτων</p> <p>=0 δεν παράγεται κανένα αρχείο</p> <p>itape 5:</p> <p>=1 αν απαιτείται η αποθήκευση των ποσοτήτων πρώτης τάξης σε αρχείο, που δημιουργείται αυτόματα, διαθέσιμο για περαιτέρω επεξεργασία</p> <p>=0 δεν δημιουργείται κανένα αρχείο</p> <p>IDAMP:</p> <p>=1 αν δίνεται τιμή για το PTO στην περίπτωση σημειακών απορροφητήρων κυματικής ενέργειας</p> <p>=0 αν δεν δίνεται τιμή</p> <p>IPWER:</p> <p>=1 αν υπολογίζεται η απορροφούμενη κυματική ισχύς του σημειακού απορροφητήρα. Σε περίπτωση που η τιμή του IPWER=1, αλλά το IDAMP=0, υπολογίζεται η απορροφούμενη ισχύς με βάση τις βέλτιστες τιμές για την απόσβεση του μηχανισμού απόληψης ενέργειας, δηλαδή για την τιμή της υδροδυναμικής απόσβεσης που αντιστοιχεί στην συχνότητα συντονισμού στην καθ' ύψος και την περιστροφική κίνηση της κατασκευής. Σε περίπτωση που δίνονται συγκεκριμένες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για τον μηχανισμό απόληψης ενέργειας, δηλαδή IDAMP=1, τότε ο κώδικας υπολογίζει επιπρόσθετα και τις τιμές της απορροφούμενης ενέργειας για τις βέλτιστες τιμές των συντελεστών απόσβεσης, όπως ορίστηκαν προηγούμενα</p> <p>=0 αν δεν υπολογίζεται</p> <p>NMOOR:</p> <p>= 0 αν δεν υπάρχουν κλάδοι αγκύρωσης που να συγκρατούν την κατασκευή</p> <p>= πλήθος των κλάδων αγκύρωσης για την συγκράτηση της κατασκευής</p> <p>INPMOOR:</p> <p>=0 αν τα στατικά χαρακτηριστικά ακαμψίας των κλάδων του συστήματος αγκύρωσης θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα (βλέπε και στη συνέχεια κάρτα δεδομένων, υπ' αριθμ. 17)</p>
--	---

	<p>=1 αν τα δεδομένα για τα στατικά χαρακτηριστικά των κλάδων του συστήματος αγκύρωσης θα δοθούν από εξωτερικό αρχείο δεδομένων που προκύπτει από πρόγραμμα στατικής ανάλυσης του συστήματος που έχει «τρέξει» προηγούμενα</p> <p>&gt;=2 υποδηλώνει ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης λαμβάνονται υπόψη. Η τιμή του INPMOOR υποδηλώνει το πλήθος των πλατών κίνησης στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση του άνω άκρου του κλάδου αγκύρωσης στο επίπεδό του για το οποίο έγινε δυναμική ανάλυση του κλάδου. Στην περίπτωση που για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα πλάτη στην οριζόντια και τέσσερα πλάτη στην κατακόρυφη κατεύθυνση, τότε το INPMOOR θα είναι 8.</p>
--	---

Η επόμενη κάρτα περιλαμβάνεται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων μόνο αν IDAMP=1

#### Κάρτα 16η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
3F10.0	<p>BPTO1: η ισοδύναμη απόσβεση του μηχανισμού απόληψης ενέργειας στην surge κίνηση [kN.s/m]</p> <p>BPTO3: η ισοδύναμη απόσβεση του μηχανισμού απόληψης ενέργειας στην heave κίνηση [kN.s/m]</p> <p>BPTO5: η ισοδύναμη απόσβεση του μηχανισμού απόληψης ενέργειας στην pitch κίνηση [kN.m.s/rad]</p>

Οι επόμενες τρεις κάρτες για κάθε ένα κλάδο αγκύρωσης (δηλαδή συνολικά 3 X το πλήθος των κλάδων κάρτες), περιλαμβάνονται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων μόνο αν NMOOR είναι διάφορο του μηδενός

#### Κάρτα 17η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
4F10.0	<p>XF(i): η x- συντεταγμένη του σημείου πρόσδεσης του i κλάδου αγκύρωσης ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων [m]</p> <p>YF(i): η y- συντεταγμένη του σημείου πρόσδεσης του i κλάδου αγκύρωσης ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων [m]</p> <p>ZF(i): η z- συντεταγμένη του σημείου πρόσδεσης του i κλάδου αγκύρωσης ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων [m]</p> <p>RMALPHA(i): η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του i κλάδου με τον θετικό ημίξονα του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων, όταν ο τελευταίος περιστρέφεται κατά φορά</p>

	αντίθετη των δεικτών του ωρολογίου για να συμπέσει με το επίπεδο του κλάδου
--	---

#### Κάρτα 18η

<b>Format</b>	<b>Μεταβλητές</b>
4F10.0	<p>CXX2D(i) : συντελεστής ακαμψίας στο επίπεδο του κλάδου i στην x- κατεύθυνση όταν το άνω άκρο του μετατοπίζεται με μοναδιαία μετατόπιση στην κατεύθυνση αυτή (kN/m)</p> <p>CYY2D(i): συντελεστής ακαμψίας κάθετα στο επίπεδο του κλάδου i στην y- κατεύθυνση όταν το άνω άκρο του μετατοπίζεται με μοναδιαία μετατόπιση στην κατεύθυνση αυτή (kN/m)</p> <p>CZZ2D(i): συντελεστής ακαμψίας στο επίπεδο του κλάδου i στην z- κατεύθυνση όταν το άνω άκρο του μετατοπίζεται με μοναδιαία μετατόπιση στην κατεύθυνση αυτή (kN/m)</p> <p>CXZ2D(i): συντελεστής ακαμψίας στο επίπεδο του κλάδου i στην x- κατεύθυνση όταν το άνω άκρο του μετατοπίζεται με μοναδιαία μετατόπιση στην z- κατεύθυνση (kN/m)</p>

#### Κάρτα 19η

<b>Format</b>	<b>Μεταβλητές</b>
2F10.0	<p>XVSPG2D(i): οριζόντια προένταση του κλάδου i στο επίπεδό του (kN)</p> <p>ZVSPG2D(i): κατακόρυφη προένταση του κλάδου i στο επίπεδό του (kN)</p>

## 6.2 Περιγραφή αρχείου εξαγόμενων αποτελεσμάτων

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος “cylinder3.f” παράγεται ένα αρχείο αποτελεσμάτων “result.xxxxx” το οποίο έχει κατάληξη ίδια με εκείνη του ονόματος του εισαγόμενου αρχείου. Οι δυνάμεις διέγερσης, οι υδροδυναμικές παράμετροι, οι αποκρίσεις της κυματικής συσκευής, η παραγόμενη κυματική ισχύς καθώς και οι παροχές αέρα προς τον αεροστρόβιλο, στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, τυπώνονται σε αδιάστατη μορφή όπως περιγράφεται ακολούθως.

### Δυνάμεις διέγερσης (exciting forces)

$$f_{j0} = \frac{F_{j0}}{\rho \cdot g \cdot a^2 \cdot (H/2)}$$

Για j=1,3 για την οριζόντια και κάθετη δύναμη διέγερσης αντίστοιχα και

$$f_{50} = \frac{F_{50}}{\rho \cdot g \cdot a^3 \cdot (H/2)}$$



για την διεγείρουσα ροπή περί τον κάθετο άξονα περιστροφής του σώματος. Στις παραπάνω εκφράσεις  $\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $(H/2)$  είναι το πλάτος του κύματος και  $a$  είναι η μεγαλύτερη ακτίνα του υπό εξέταση σώματος.

#### Υδροδυναμικές Παράμετροι (hydrodynamic parameters)

$$\alpha_{jj} = \frac{A_{jj}}{\rho \cdot \alpha^3}, b_{jj} = \frac{B_{jj}}{\rho \cdot \omega \cdot \alpha^3}$$

για  $j=1,3$  στις κινήσεις surge και heave,

$$\alpha_{ij} = \frac{A_{ij}}{\rho \cdot \alpha^4}, b_{ij} = \frac{B_{ij}}{\rho \cdot \omega \cdot \alpha^4}$$

για  $i < 4; j > 3$ ,

$$a_{55} = \frac{A_{55}}{\rho \cdot \alpha^5}, b_{55} = \frac{B_{55}}{\rho \cdot \omega \cdot \alpha^5}$$

$j=5$  για την περιστροφή γύρω από τον κάθετο άξονα (pitch).

#### Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο (volume flow)

$$q_D = \frac{q_D}{(\omega \cdot \alpha^2 \cdot H/2)}, q_P = \frac{q_P}{(\omega \cdot \alpha^2 / (\rho \cdot g))}$$

#### Μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις (device's responses)

$$x_{j0} = \frac{x_{j0}}{H/2}, j = 1,3; \quad x_{j0} = \frac{x_{j0}}{kH/2}, j = 5$$

### 6.3 Γεωμετρικές μορφές των κυματικών συσκευών που εξετάστηκαν και αρχεία εισαγωγής δεδομένων προγράμματος cylinder3.f

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γεωμετρικές μορφές των δύο κυματικών συσκευών που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, ενός σημειακού απορροφητήρα και μιας συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Ο εξεταζόμενος σημειακός απορροφητήρας, έχει τη μορφή κατακόρυφου κυλινδρικού σώματος, με εξωτερική ακτίνα  $a=2.5\text{m}$  και βύθισμα  $d-h=5\text{m}$ , σε βάθος νερού  $d=50\text{m}$ . Η μάζα του ισούται με  $100.63\text{t}$ , ενώ η ροπή αδρανείας ως προς το κέντρο βάρους της συσκευής ισούται με  $1235.79 \text{ t}\cdot\text{m}^2$  (Σχήμα 3.1). Στον πίνακα 6.1A παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης κυματικής συσκευής. Για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης προτιμήθηκε ένας κατακόρυφος κυλινδρικός θάλαμος ταλάντωσης ίσης εξωτερικής ακτίνας με αυτή του σημειακού απορροφητήρα ( $a=2.5\text{m}$ ), με εσωτερική ακτίνα ( $b=1.5\text{m}$ ), βυθίσματος ( $d-h=5\text{m}$ ), σε νερό βάθους  $d=50\text{m}$ . Η μάζα της συσκευής ισούται με  $64.4\text{t}$  (Σχήμα 3.1). Ο πίνακας 6.1B παρουσιάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συσκευής OWC.

Οι δύο εξεταζόμενες κυματικές συσκευές συγκρατούνται με τα ίδια συστήματα αγκύρωσης. Η διάταξη 1 και η διάταξη 2 (conf\_a και conf\_b) αποτελούνται από 4 αλυσοειδείς γραμμές αγκύρωσης, ενώ στην διάταξη 3 (conf\_c) οι 4 γραμμές αγκύρωσης συνδυάζονται με 4 γραμμές από συνθετικό υλικό οι οποίες προσδένονται στις συσκευές. Ανάμεσα από τα διαφορετικά υλικά των γραμμών αγκύρωσης προσαρμόζονται τέσσερα ανωστικά σώματα, διαμέτρου 1.85m και μάζας 170kg (Σχήμα 4.1) Η στατική ισορροπία για κάθε μια εξεταζόμενη διάταξη έχει επιλεγεί για οριζόντια φόρτιση ίση με 10kN. Στον Πίνακα 6.2 εμφανίζονται τα σημεία πρόσδεσης των γραμμών αγκύρωσης στις κυματικές συσκευές ως προς το ενιαίο σύστημα συντεταγμένων (Σχήμα 4.13).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1Α

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗΡΑ

<i>a</i>	Εξωτερική ακτίνα	2.5 m
<i>d</i>	Βάθος νερού	50 m
<i>d-h</i>	Βύθισμα συσκευής	5 m
<i>m</i>	Μάζα συσκευής	100.63 t
<i>I</i>	Ροπή αδρανείας ως προς το Κ.Β	1235.7t.m <sup>2</sup>
<i>C.G</i>	Κέντρο βάρους από την ε.ε.	-2.430 m

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1Β

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗΣ ΥΔΑΤΙΝΗΣ ΣΤΗΛΗΣ

<i>a</i>	Εξωτερική ακτίνα	2.5 m
<i>b</i>	Εσωτερική ακτίνα	1.5 m
<i>d</i>	Βάθος νερού	50 m
<i>d-h</i>	Βύθισμα συσκευής	5 m
<i>m</i>	Μάζα συσκευής	64.4 t
<i>I</i>	Ροπή αδρανείας ως προς το Κ.Β	1235 t.m <sup>2</sup>
<i>C.G</i>	Κέντρο βάρους από την ε.ε.	-2.430 m

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2

ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Conf	Γραμμή 1	Γραμμή 2	Γραμμή 3	Γραμμή 4
<i>a</i>	180°	270°	0°	90°
<i>x<sub>m</sub></i>	-2.5	0	2.5	0
<i>z<sub>m</sub></i>	-5	-5	-5	-5
Conf b	Γραμμή 1	Γραμμή 2	Γραμμή 3	Γραμμή 4
<i>a</i>	180°	270°	0°	90°
<i>x<sub>m</sub></i>	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
<i>z<sub>m</sub></i>	-5	-5	-5	-5
Conf c	Γραμμή 1	Γραμμή 2	Γραμμή 3	Γραμμή 4
<i>a</i>	180°	270°	0°	90°
<i>x<sub>m</sub></i>	-2.5	0	2.5	0
<i>z<sub>m</sub></i>	-5	-5	-5	-5

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα "Cylinder3H" για την περίπτωση του σημειακού απορροφητήρα με και χωρίς την συμπερίληψη των δυναμικών φαινομένων στους κλάδους αγκύρωσης. Τα δεδομένα αντιστοιχούν στο σύστημα αγκύρωσης τύπου α (σύστημα αποτελούμενο από τέσσερις αλυσίδες)

Αρχείο δεδομένων με στατική θεώρηση του συστήματος αγκύρωσης

VERTICAL CYLINDER, CONVENTIONALLY MOORED, WITH STATIC STIFFNESS OF THE MOORING,  
WAVE POWER EVALUATION WITH OPTIMAL DAMPING

50.00 2.500 19

.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..true. .TRUE.

0 0

45.00

49

2.500

0 30

0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.400 0.4500 0.500

0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800 0.850 0.900

0.950 1.000 1.250 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900

2.000 2.100 2.200 2.300 2.400 2.500

50.00 -2.430 1830.0 2.000

0 0 1 0 0 1 4 0

-2.50 0.00 -5.00 180.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

0.00 -2.50 -5.00 270.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

2.50 0.00 -5.00 0.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

0.00 2.50 -5.00 90.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

- Αρχείο δεδομένων με δυναμική θεώρηση του συστήματος αγκύρωσης

VERTICAL CYLINDER, CONVENTIONALLY MOORED WITH DYNAMIC STIFFNESS OF THE MOORING, WAVE POWER EVALUTION WITH OPTIMUM DAMPING, H=2.0M

50.00 2.500 19

.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..true. .TRUE.

0 0

45.00

49

2.500

0 30

0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.400 0.4500 0.500

0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800 0.850 0.900

0.950 1.000 1.250 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900

2.000 2.100 2.200 2.300 2.400 2.500

50.00 -2.430 1830.0 2.000

0 0 1 0 0 1 4 8

-2.50 0.00 -5.00 180.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

0.00 -2.50 -5.00 270.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

2.50 0.00 -5.00 0.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

10.00 32.90

0.00 2.50 -5.00 90.00

1.2165 0.28886 1.2724 0.9125

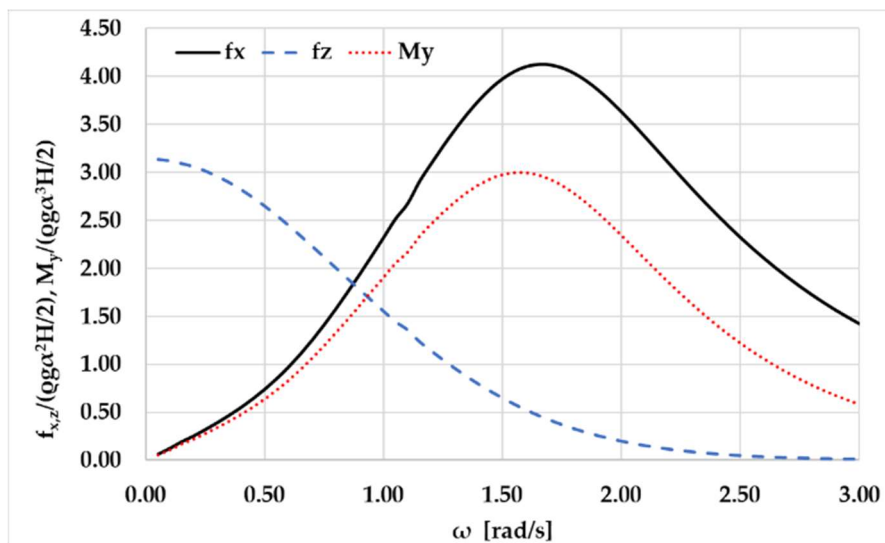
10.00 32.90

## 7 Αποτελέσματα

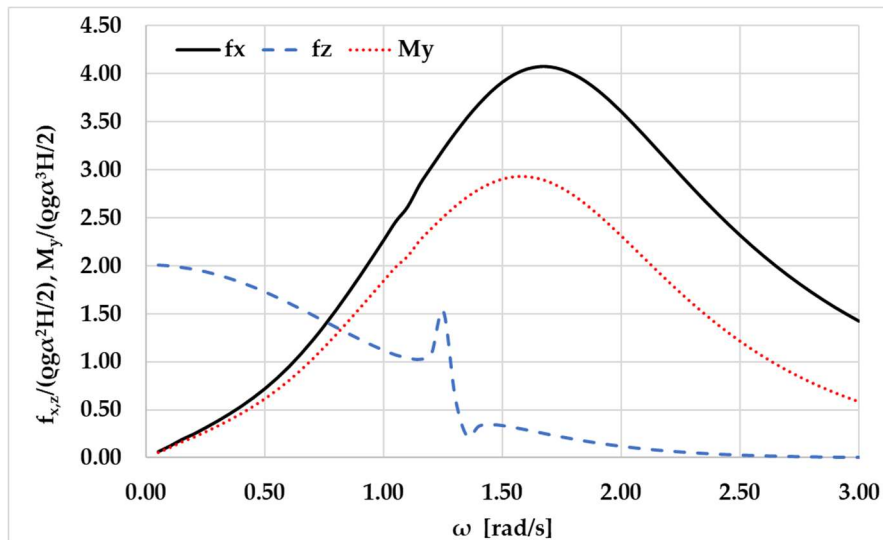
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής ανάλυσης των κυματικών συσκευών, που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 3, 4, 5 της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται στα κεφάλαια 7.1, 7.2, 7.3 και 7.4 οι δυνάμεις διέγερσης, οι υδροδυναμικοί συντελεστές, οι παροχές αέρα προς τον αεροστρόβιλο της OWC συσκευής, καθώς και οι μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις των κυματικών συσκευών, αντίστοιχα. Οι αδιαστατοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των φυσικών μεγεθών εμφανίζονται στο κεφάλαιο 6.2. Τέλος παρουσιάζεται (Κεφάλαιο 7.5) η ενεργειακή απόδοση των συσκευών για την επιλεγμένη περιοχή εγκατάστασης και συγκρίνεται για τα διαφορετικά εξεταζόμενα είδη των κυματικών συσκευών και των συστημάτων αγκύρωσης.

### 7.1 Δυνάμεις Διέγερσης

Οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης καθώς και οι ροπές ανατροπής (pitch moments) περί τον άξονα  $y$ , που ασκούνται στον σημειακό απορροφητήρα, παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1 συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος κυματισμού, ενώ οι αντίστοιχες δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, στο σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.1: Οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις και ροπές ανατροπής (pitch) ασκούμενες στον σημειακό απορροφητήρα, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 7.2: Οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις και ροπές ανατροπής (pitch) ασκούμενες στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ως προς την κυματική συχνότητα

Παρατηρούμε ότι οι οριζόντιες δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στον σημειακό απορροφητήρα (Σχήμα 7.1) είναι όμοιες με εκείνες που ασκούνται στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι δύο κυματικές συσκευές έχουν όμοια εξωτερική ακτίνα και βύθισμα, ενώ πλέουν σε ίδιο βάθος νερού. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαφορά στον όγκο των δύο συσκευών ( $98.18\text{m}^3$  του σημειακού απορροφητήρα έναντι  $62.83\text{m}^3$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης) δεν επηρεάζει τις ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης, λόγω του ότι το πρόβλημα περίθλασης θεωρεί το εξεταζόμενο σώμα ακίνητο στην πρόσπτωση του κύματος.

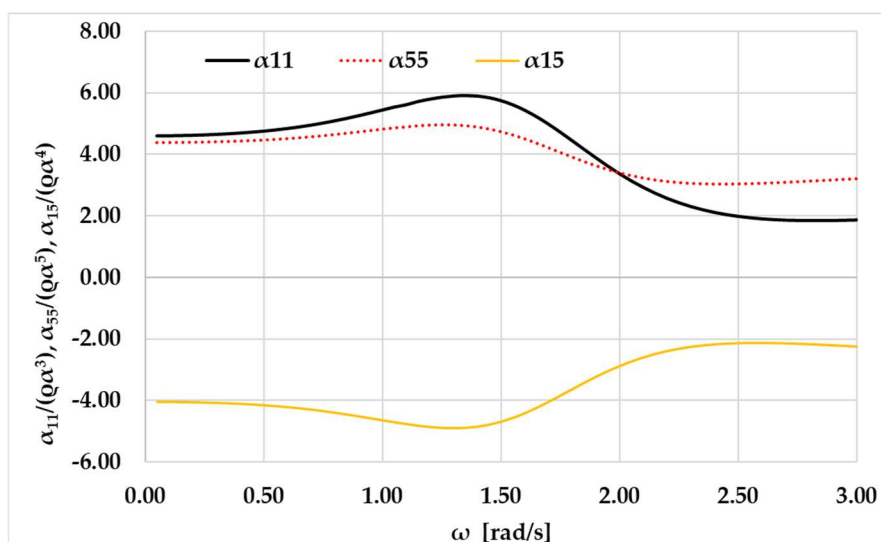
Σχετικά με τις κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης παρατηρούμε πως αυτές διαφοροποιούνται μεταξύ των δύο κυματικών συσκευών. Οι δυνάμεις που ασκούνται στον σημειακό απορροφητήρα (Σχήμα 7.1) παρουσιάζουν μια ομαλή φθίνουσα μεταβολή, η οποία ξεκινά από την οριακή τιμή 1, για  $\omega$  τείνοντος στο μηδέν, ενώ για μεγάλες τιμές της κυματικής συχνότητας, τείνει στο μηδέν. Αντίθετα, παρατηρείται πως οι κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται πάνω στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Σχήμα 7.2), εμφανίζουν μια ιδιόμορφη συμπεριφορά στο  $\omega \approx 1.25$  rad/s, σε σχέση με τις τιμές των δυνάμεων για τις υπόλοιπες κυματικές συχνότητες, καθώς και με τις αντίστοιχες τιμές των κατακόρυφων δυνάμεων στον σημειακό απορροφητήρα. Στην περιοχή αυτή ( $\omega \approx 1.25$  rad/s) υπάρχει ένα τοπικό μέγιστο της ασκούμενης κατακόρυφης δύναμης που οφείλεται σε καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό του θαλάμου συμπίεσης (rumping mode). Ο συντονισμός είναι υδροστατικής φύσης [69] και για τον υπολογισμό της συχνότητας στην οποία εμφανίζεται έχουν προταθεί διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι, οι οποίες όμως δεν βρίσκουν γενική εφαρμογή. Μια από αυτές θεωρεί την υδάτινη μάζα στο εσωτερικό του θαλάμου «παγωμένη», ως ένα κύλινδρο που εκτελεί καθ' ύψος κίνηση, η ιδιοσυχνότητα της οποίας καθορίζει και την ιδιοσυχνότητα που εμφανίζεται το rumping mode της κίνησης του ρευστού. Ο αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης στήλης [70] που επηρεάζει τις οριζόντιες δυνάμεις και ροπές δεν εμφανίζεται στο γράφημα αυτό, δεδομένου ότι παρουσιάζεται σε υψηλότερες τιμές της συχνότητας  $\omega$ .

## 7.2 Υδροδυναμικοί Συντελεστές

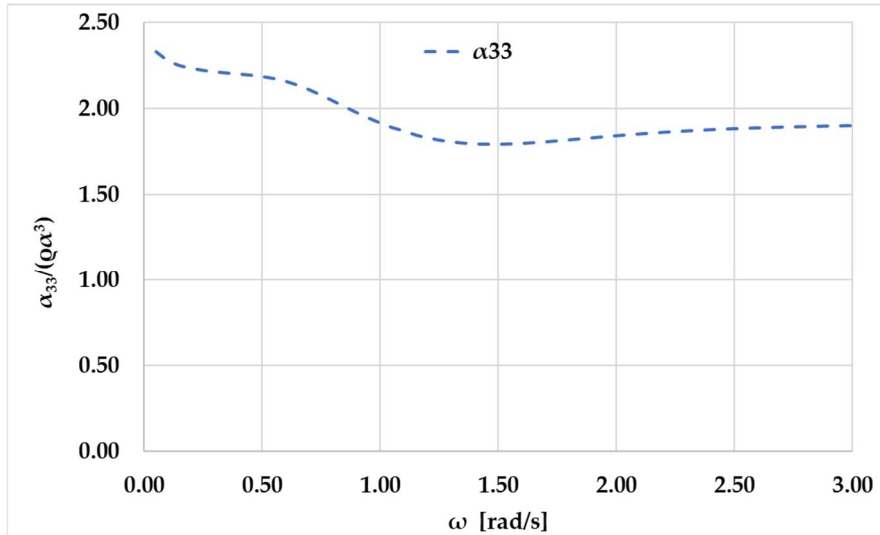
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος ακτινοβολίας λόγω κίνησης των συσκευών καθώς και λόγω πίεσης που αναπτύσσεται στον θάλαμο ταλάντωσης, για τις περιπτώσεις γεωμετριών που εξετάστηκαν, με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τους αντίστοιχους υδροδυναμικούς συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης. Τα σχήματα 7.3 – 7.6 αναφέρονται στους υδροδυναμικούς συντελεστές του σημειακού απορροφητήρα.

Ειδικότερα, στα σχήμα 7.3 δίδονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές πρόσθετης μάζας στην οριζόντια μεταφορική κίνηση (surge), στην περιστροφή (pitch), και στην οριζόντια διεύθυνση (surge) λόγω περιστροφής (pitch), ενώ στο σχήμα 7.4 απεικονίζεται η πρόσθετη μάζα του σημειακού απορροφητήρα στην καθ' ύψος κίνηση (heave). Αντίστοιχα, στα σχήματα 7.5, 7.6 απεικονίζονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης στις αντίστοιχες κινήσεις.

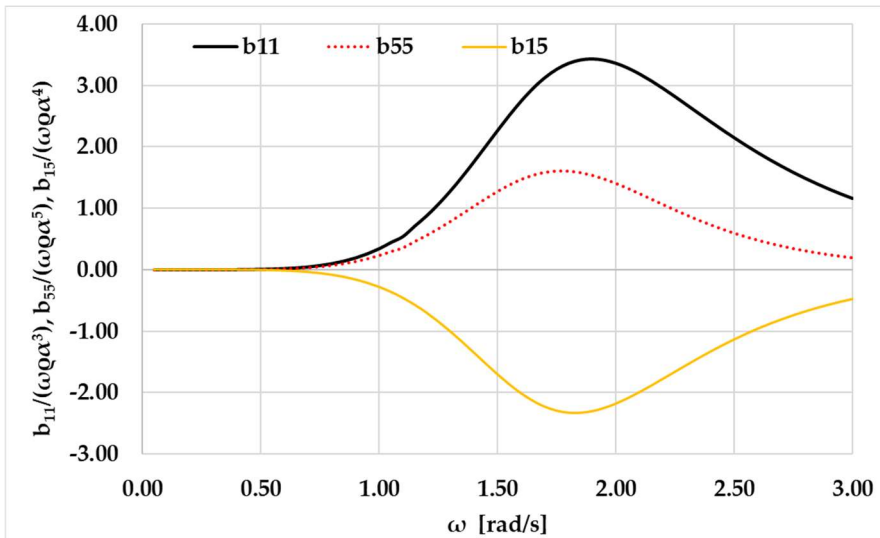
Στη συνέχεια (Σχήματα 7.7 – 7.10) παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι υδροδυναμικοί συντελεστές (πρόσθετης μάζας και απόσβεσης) για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Συγκεκριμένα, στο σχήματα 7.7 και 7.8 αναπαριστάνονται τα μεγέθη της πρόσθετης μάζας,  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{55}$ ,  $\alpha_{15}$  και  $\alpha_{33}$ , αντίστοιχα, ενώ στα σχήματα 7.9 και 7.10 οι συντελεστές απόσβεσης  $b_{11}$ ,  $b_{55}$ ,  $b_{15}$  και  $b_{33}$ , αντίστοιχα.



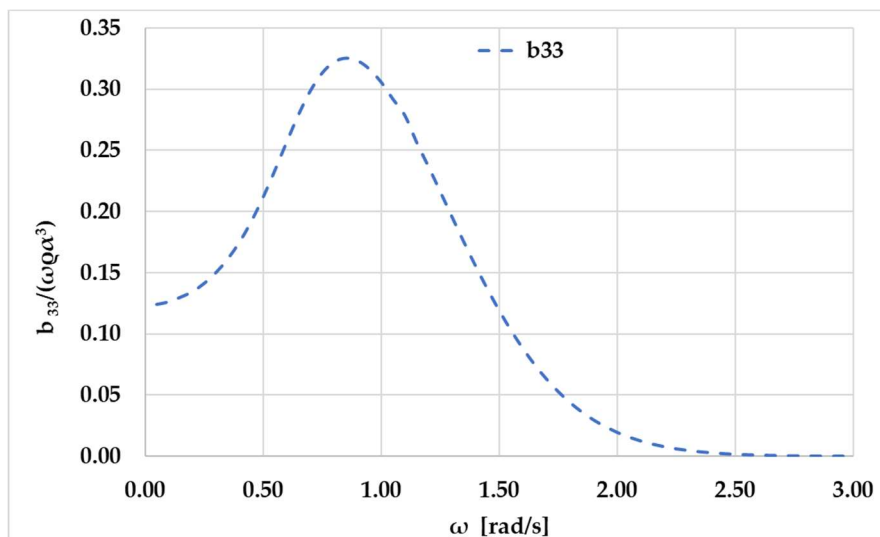
Σχήμα 7.3: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{55}$ ,  $\alpha_{15}$  του σημειακού απορροφητήρα, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 7.4: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα  $\alpha_{33}$  του σημειακού απορροφητήρα, ως προς την κυματική συχνότητα

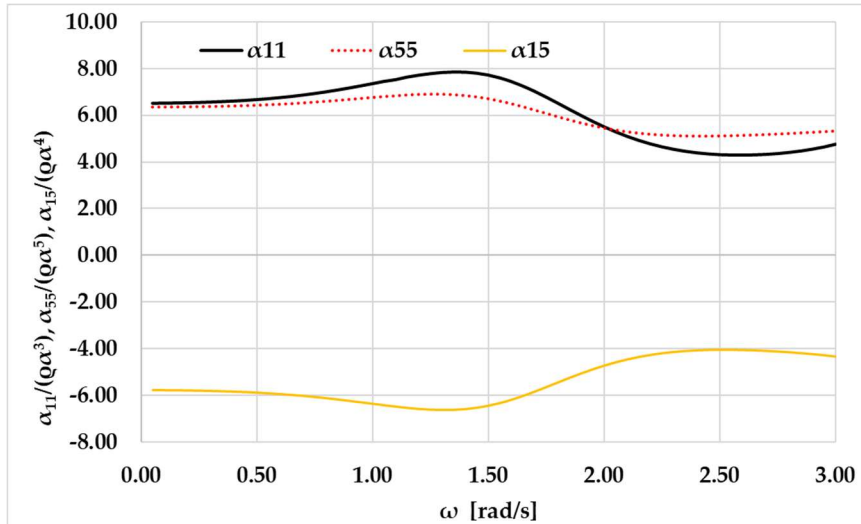


Σχήμα 7.5: Υδροδυναμική απόσβεση  $b_{11}$ ,  $b_{55}$ ,  $b_{15}$  του σημειακού απορροφητήρα, ως προς την κυματική συχνότητα

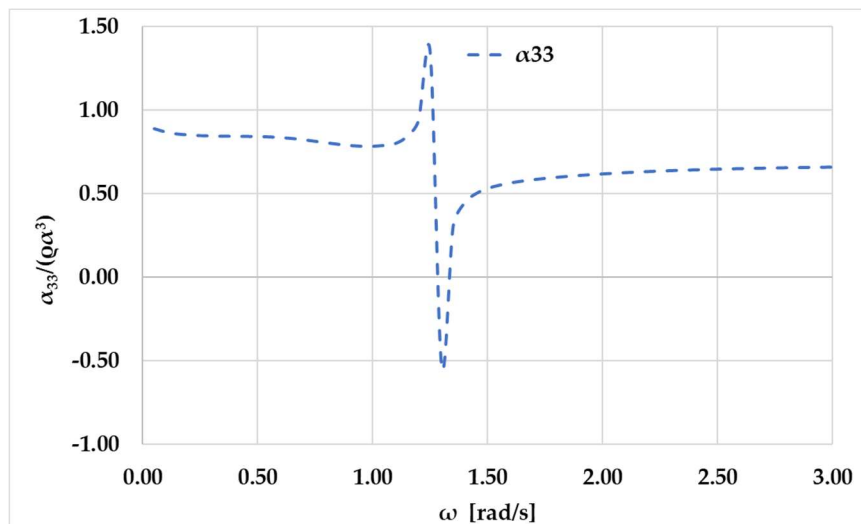


Σχήμα 7.6: Υδροδυναμική απόσβεση  $b_{33}$  του σημειακού απορροφητήρα, ως προς την κυματική συχνότητα

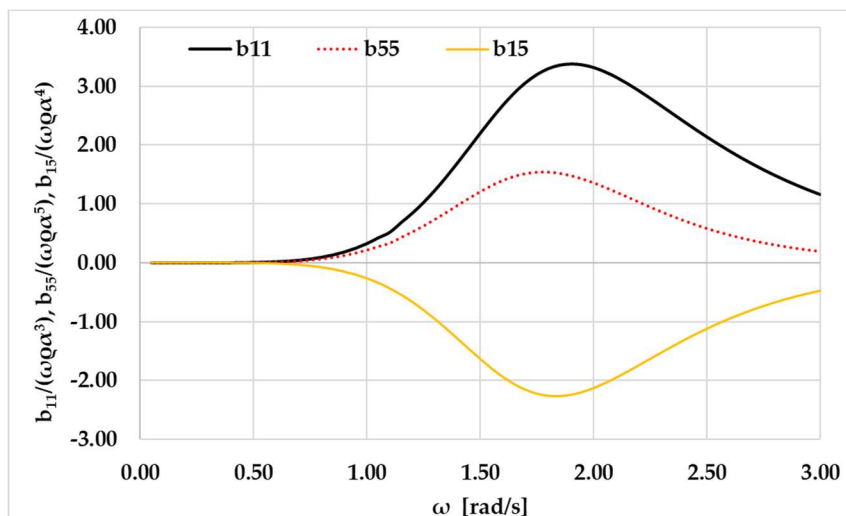




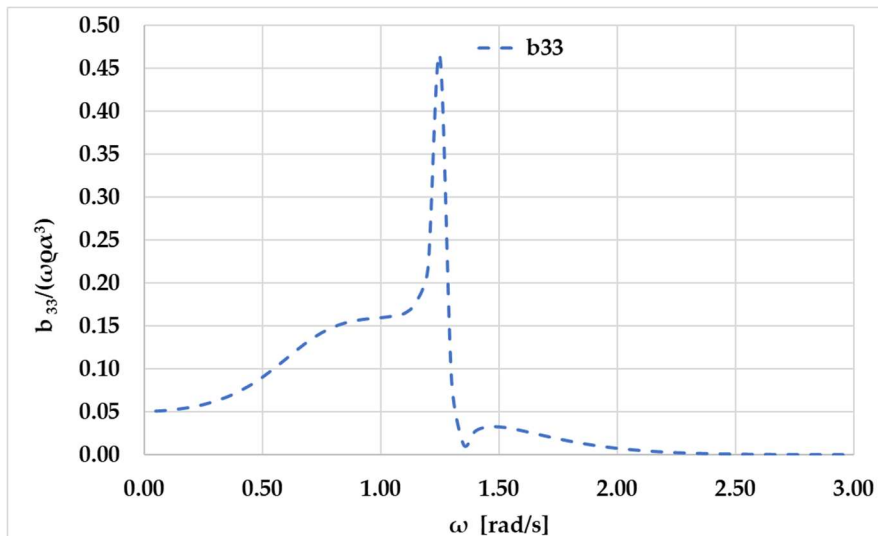
Σχήμα 7.7: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{55}$ ,  $\alpha_{15}$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 7.8: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα  $\alpha_{33}$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 7.9: Υδροδυναμική απόσβεση  $b_{11}$ ,  $b_{55}$ ,  $b_{15}$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ως προς την κυματική συχνότητα



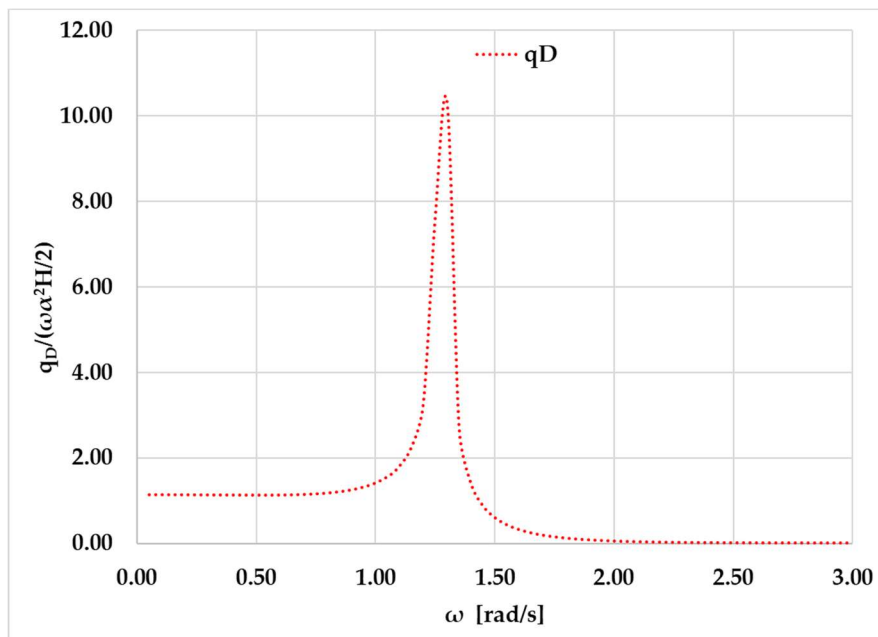
Σχήμα 7.10: Υδροδυναμική απόσβεση  $b_{33}$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ως προς την κυματική συχνότητα

Συγκρίνοντας τις πρόσθετες μάζες,  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{55}$ ,  $\alpha_{15}$ , των δύο κυματικών συσκευών (Σχήματα 7.3 και 7.7) παρατηρούμε πως παρουσιάζουν μια παρόμοια μεταβολή. Ωστόσο, οι συντελεστές πρόσθετης μάζας  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{55}$  για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές ως προς τις αντίστοιχες του σημειακού απορροφητήρα, ενώ αντίθετα, οι όροι της πρόσθετης μάζας  $\alpha_{15}$  της OWC λαμβάνουν μικρότερες τιμές. Σε ότι αφορά τις υδροδυναμικές μάζες των εξεταζόμενων κυματικών συσκευών στην καθ' ύψος κίνηση, παρατηρούμε πως παρουσιάζουν μια διαφορετική μεταβολή. Από τη μια πλευρά, η  $\alpha_{33}$  του σημειακού απορροφητήρα αναπαρίσταται ως μια ομαλή καμπύλη (Σχήμα 7.4), ενώ από την άλλη πλευρά, η πρόσθετη μάζα της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης παρουσιάζει μια ιδιόμορφη συμπεριφορά για  $\omega \approx 1.25$  rad/s (Σχήμα 7.8). Παρατηρείται ότι στο σημείο που συμβαίνει αυτή η συμπεριφορά, οι αντίστοιχες κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης εμφανίζουν τοπικό μέγιστο (Σχήμα 7.2). Όπως εξηγήθηκε στο Σχήμα 7.2, στη συγκεκριμένη κυματική συχνότητα εμφανίζονται συμμετρικοί συντονισμοί (rumping) της υδάτινης στήλης εντός του θαλάμου συμπίεσης, με αποτέλεσμα αυτό να επιδρά και την κατακόρυφη πρόσθετη μάζα της συσκευής.

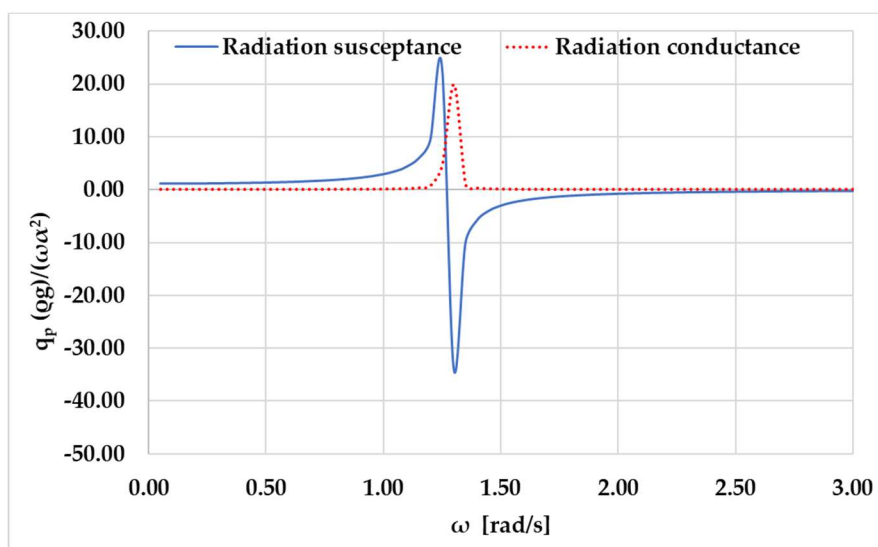
Σε ότι αφορά στις τιμές των υδροδυναμικών αποσβέσεων  $b_{11}$ ,  $b_{55}$ ,  $b_{15}$  (Σχήματα 7.5, 7.9), για τις εξεταζόμενες κυματικές συσκευές, παρατηρούμε πως αυτές δεν μεταβάλλονται, εν αντιθέσει με τις τιμές των κατακόρυφων υδροδυναμικών αποσβέσεων,  $b_{33}$  (Σχήματα 7.6, 7.10), οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς το είδος της κυματικής συσκευής. Χαρακτηριστικός είναι ο συντονισμός του  $b_{33}$  της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στον συμμετρικό συντονισμό (rumping) για  $\omega \approx 1.25$  rad/s, κάτι που δεν εμφανίζεται στο σημειακό απορροφητήρα.

### 7.3 Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο

Η παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο από την επίλυση του προβλήματος περίθλασης και πίεσης ακτινοβολίας παρουσιάζεται στα σχήματα 7.11 και 7.12, αντίστοιχα, συναρτήσει της κυματικής συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 7.11 απεικονίζεται το μέτρο της παροχής αέρα λόγω του προβλήματος περίθλασης,  $q_D$ , όπως αδιαστατοποιήθηκε στην παράγραφο 6.2, ενώ στο Σχήμα 7.12 απεικονίζεται το πραγματικό (radiation conductance) και φανταστικό (radiation susceptance) κομμάτι της παροχής αέρα από το πρόβλημα ακτινοβολίας λόγω πίεσης [64].



Σχήμα 7.11: Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, από την επίλυση του προβλήματος περίθλασης, ως προς την κυματική συχνότητα



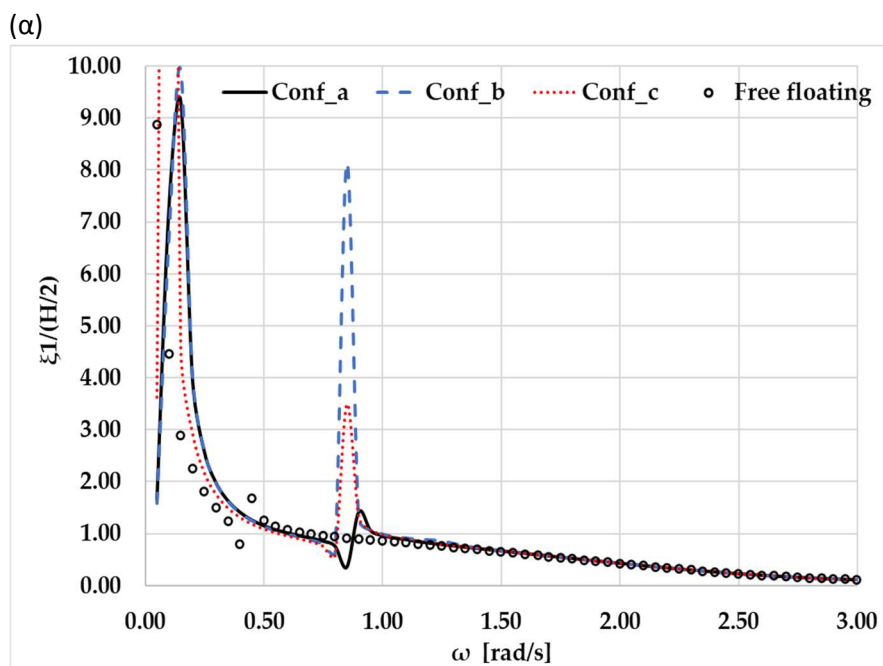
Σχήμα 7.12: Παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, από την επίλυση του προβλήματος πίεσης ακτινοβολίας, ως προς την κυματική συχνότητα

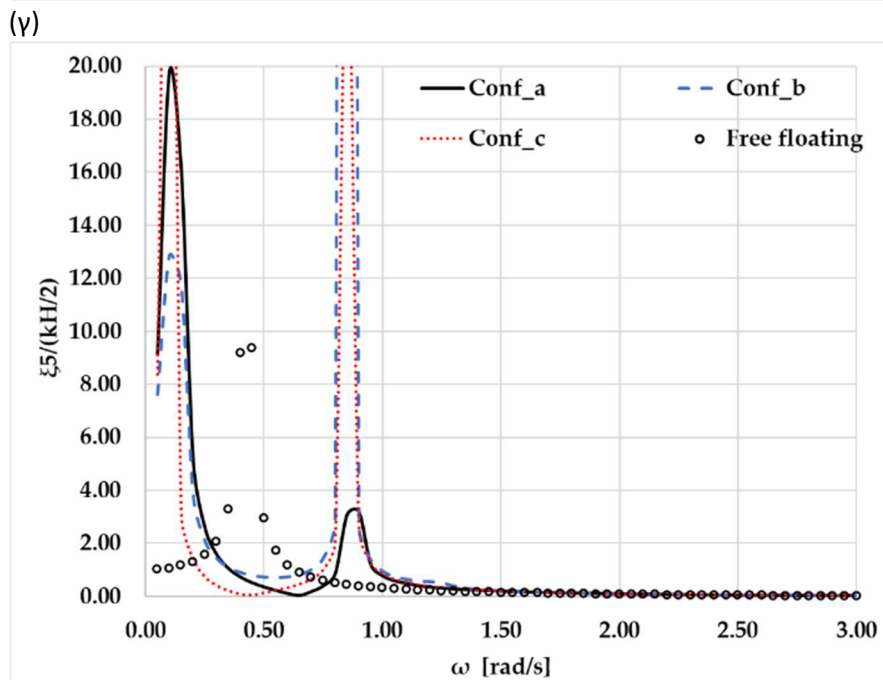
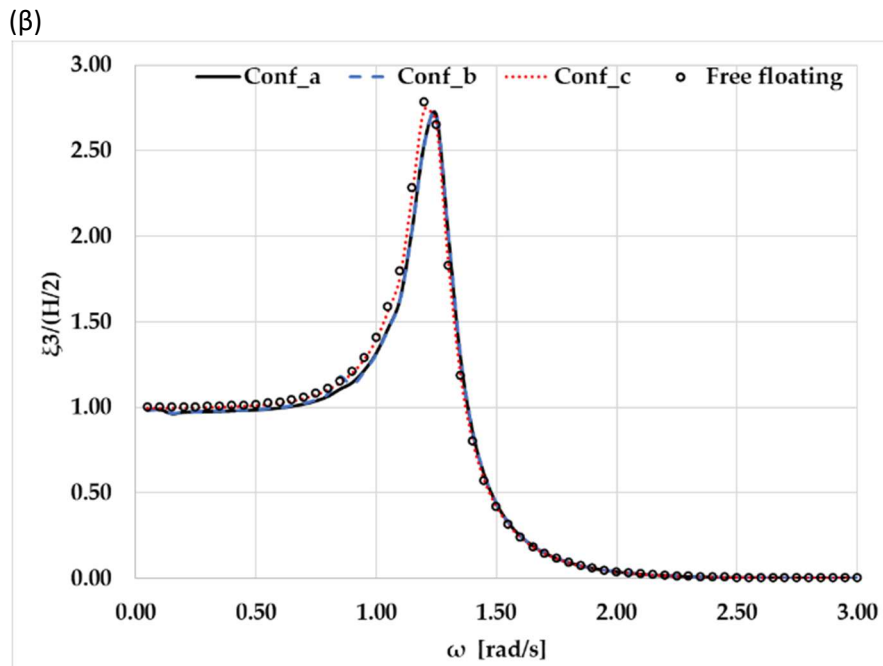
Παρατηρούμε από τα Σχήματα 7.11 και 7.12, ότι για  $\omega \approx 1.25$  rad/s παρουσιάζεται η συμμετρική ταλάντωση της υδάτινης στήλης εντός της συσκευής (βλέπε σχήμα 7.2, 7.8, 7.10).

Στη συγκεκριμένη κυματική συχνότητα η παροχή αέρα λόγω του προβλήματος περίθλασης παρουσιάζει ολικό μέγιστο. Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζει και το πραγματικό μέλος της παροχής αέρα λόγω του προβλήματος πίεσης ακτινοβολίας, μεγιστοποιώντας τις τιμές του, ενώ όσον αφορά το φανταστικό μέλος της παροχής, παρατηρούμε πως αλλάζει πρόσημο στην κυματική συχνότητα που αντιστοιχεί στο συντονισμό της εσωτερική υδάτινης στήλης (Σχήμα 7.12).

#### 7.4 Κινήσεις των κυματικών συσκευών

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της επίλυσης των εξισώσεων κίνησης για τις περιπτώσεις των κυματικών συσκευών που εξετάστηκαν και θα παρουσιαστούν οι αντίστοιχες μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις τους. Το σχήμα 7.13 αναφέρεται στις αποκρίσεις (μεταφορικές κινήσεις και περιστροφές) του σημειακού απορροφητήρα κατά την πρόσπτωση του κύματος για τα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης, ενώ στο σχήμα 7.14 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης.





Σχήμα 7.13: Μεταφορικές κινήσεις και περιστροφές του σημειακού απορροφητήρα για τα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης: (α) οριζόντια μεταφορική κίνηση, (β) κατακόρυφη μεταφορική κίνηση, (γ) περιστροφή περί τον οριζόντιο  $y$ - άξονα (pitch). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ελεύθερα πλέοντος σημειακού απορροφητήρα

Από το Σχήμα 7.13 προκύπτει πως το είδος του συστήματος αγκύρωσης επηρεάζει τις μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις της κυματικής συσκευής. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε για την ελεύθερα πλέουσα συσκευή, ότι στο  $\omega \approx 0.45$  rad/s παρουσιάζει τοπικό μέγιστο η οριζόντια μετατόπιση surge και η περιστροφή pitch. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα της συσκευής στην pitch κίνηση, η οποία προκύπτει από τη σχέση:

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho g V \overline{GM}}{I_{55} + a_{55}}}$$

Όπου  $V$  ο όγκος της συσκευής,  $\overline{GM}$  το μετακεντρικό ύψος,  $I_{55}$  η ροπή αδρανείας και  $a_{55}$  ο συντελεστής πρόσθετης ροπής αδρανείας στο pitch.

Η επίδραση του συντονισμού στο pitch της συσκευής στην οριζόντια μετατόπισή της (surge),  $\xi_1/(H/2)$ , έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση συντονισμού και στο surge και οφείλεται στην σύζευξη των μεταφορικών με τις περιστροφικές κινήσεις, όπως αυτή διατυπώνεται στην Εξίσωση 5.5. Η εισαγωγή των συντονισμών στις χαμηλές συχνότητες του προσπίπτοντος κυματισμού, οφείλεται στο σύστημα αγκύρωσης. Ειδικότερα σε ότι αφορά στην οριζόντια κίνηση, είναι γνωστό ότι η οριακή τιμή της για μικρές τιμές του  $\omega$  και για ελεύθερα πλέουσα συσκευή τείνει στο άπειρο, λόγω απουσίας δύναμης επαναφοράς. Όταν όμως εισάγεται η ακαμψία του συστήματος αγκύρωσης, τότε δημιουργείται συντονισμός στις μικρές συχνότητες  $\omega$ , όπως απεικονίζεται και στο σχήμα. Αντίστοιχος συντονισμός εμφανίζεται και στις περιστροφικές κινήσεις για μικρές τιμές της κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Όταν το σώμα είναι ελεύθερο, η αδιάστατη τιμή της περιστροφικής κίνησης, ανηγμένης στο  $k^*H/2$ , τείνει στην μονάδα, όπως προκύπτει και από το γράφημα 7.13γ. Η εισαγωγή του συστήματος αγκύρωσης με την ακαμψία που προσφέρει δημιουργεί τις κινήσεις συντονισμού γύρω στο  $\omega \approx 0.15 \text{ rad/sec}$ .

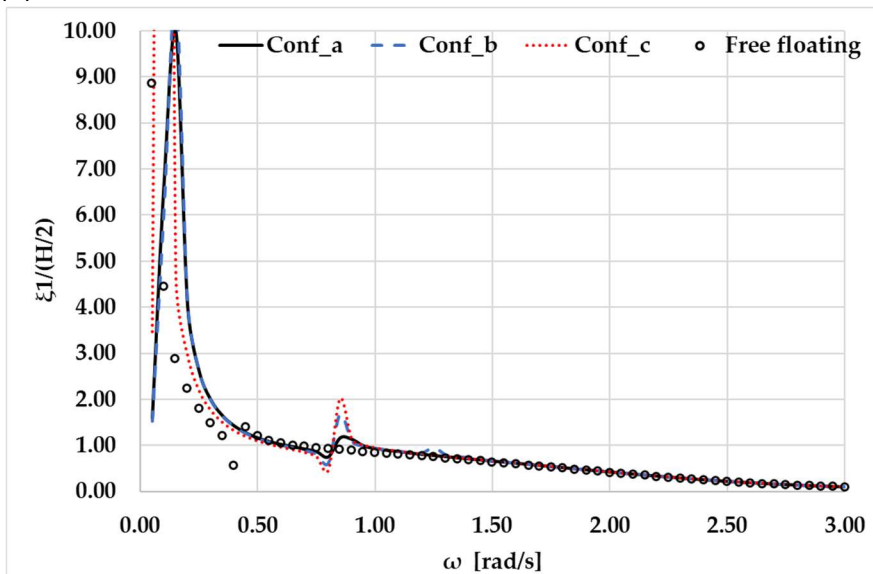
Παρατηρείται επιπλέον ότι λόγω της παρουσίας των εξεταζόμενων συστημάτων αγκύρωσης, η οριζόντια μετατόπιση της συσκευής εμφανίζει έναν συντονισμό στο  $\omega \approx 0.9 \text{ rad/s}$ . Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή δεν εμφανίζεται στην περίπτωση του ελεύθερα πλέοντος σώματος. Ο συντονισμός αυτός οφείλεται στην έντονη σύζευξη της surge και pitch κίνησης με το σύστημα αγκύρωσης. Εμφανίζεται επίσης στην ίδια κυματική συχνότητα και στην pitch περιστροφή. Συνεχίζοντας με την κατακόρυφη μεταφορική κίνηση (Σχήμα 7.13β), παρατηρείται πως το είδος των εξεταζόμενων συστημάτων αγκύρωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει την κατακόρυφη ταλαντωτική κίνηση της συσκευής, παρουσιάζοντας όμοια αποτελέσματα και με αυτά της ελεύθερα πλεύουσας συσκευής. Αξίζει να επισημανθεί η οριακή τιμή (η τιμή της  $x_{30}/(H/2)$  τείνει στο 1) που λαμβάνει η κατακόρυφη μετατόπιση για  $\omega$  τείνοντος στο μηδέν, καθώς και η ιδιοσυχνότητα στην heave διεύθυνση για  $\omega \approx 1.2 \text{ rad/s}$ . Τέλος, από το γράφημα της περιστροφής περί τον γγ' (pitch motion) (Σχήμα 7.13γ) προκύπτει όμοια συμπεριφορά των συστημάτων αγκύρωσης ως προς αυτή της οριζόντιας μετατόπισης της συσκευής (Σχήμα 7.13α), εμφανίζοντας τη σύζευξη των συγκεκριμένων κινήσεων με το σύστημα αγκύρωσης για  $\omega \approx 0.9 \text{ rad/s}$ . Τέλος, παρατηρείται ο συντονισμός της περιστροφής της ελεύθερα πλεύουσας συσκευής για την pitch ιδιοσυχνότητα  $\omega \approx 0.47 \text{ rad/s}$ .

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 7.14α – 7.14γ, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις κινήσεις (μεταφορικές και περιστροφική) της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, όταν αυτή αγκυρωθεί με τους διάφορους τύπους συστημάτων αγκύρωσης που εξετάζονται.

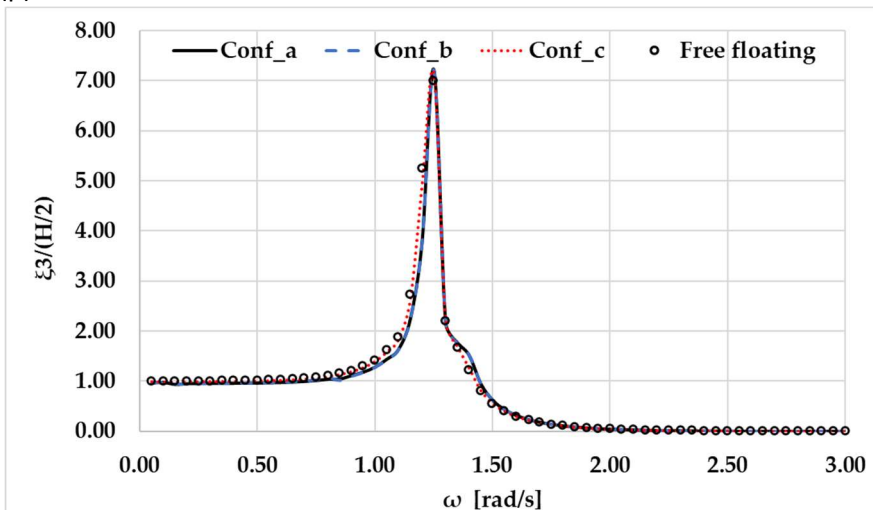
Ειδικότερα, από το Σχήμα 7.14 προκύπτει πως το σύστημα αγκύρωσης έχει επίδραση ανάλογη εκείνης που παρουσιάστηκε προηγουμένως για την περίπτωση του σημειακού απορροφητήρα, στις μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις της κυματικής συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Πιο συγκεκριμένα, η οριζόντια μετατόπιση της συσκευής εμφανίζει έναν συντονισμό στο  $\omega \approx 0.9 \text{ rad/s}$ , για κάθε εξεταζόμενο σύστημα αγκύρωσης, χωρίς η συμπεριφορά αυτή να εμφανίζεται στην περίπτωση του ελεύθερα πλέοντος

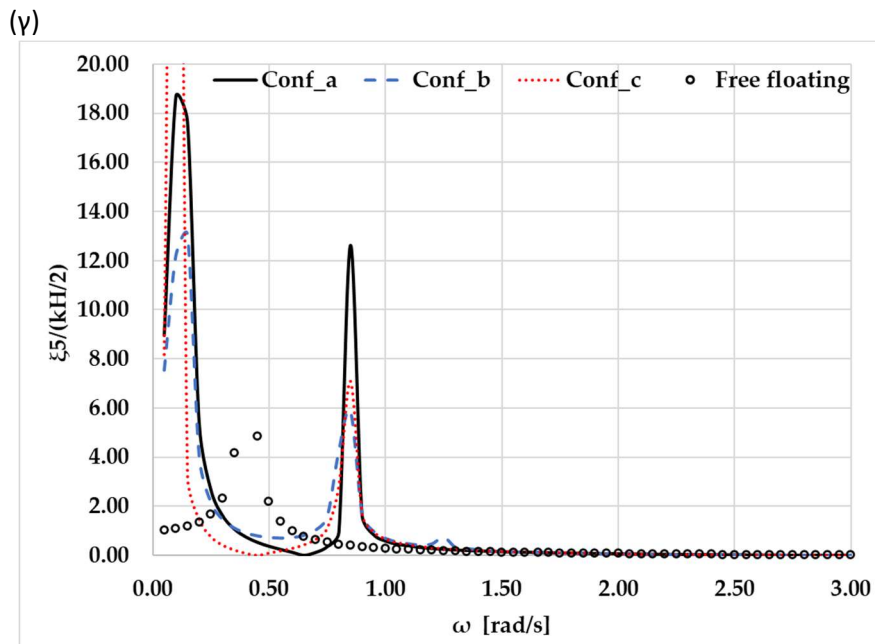
σώματος. Όμοια συμπεριφορά προκύπτει και στο γράφημα της περιστροφής περί τον  $\gamma\gamma'$  (pitch motion).

(α)



(β)





Σχήμα 7.14: Μεταφορικές κινήσεις και περιστροφές της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης για τα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης: (α) οριζόντια μεταφορική κίνηση, (β) κατακόρυφη μεταφορική κίνηση, (γ) περιστροφή περί τον οριζόντιο γ-άξονα (pitch). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ελεύθερα πλέουσας συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του σημειακού απορροφητήρα, ο συντονισμός οφείλεται στη σύζευξη της surge και pitch κίνησης με το σύστημα αγκύρωσης. Σχετικά με την κατακόρυφη κίνηση της κυματικής συσκευής το είδος των εξεταζόμενων συστημάτων αγκύρωσης δεν φαίνεται να την επηρεάζει αφού όλες οι εξεταζόμενες διατάξεις εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα. Τέλος, παρατηρείται η επίδραση της ιδιοσυχνότητας στην περιστροφική κίνηση της συσκευής (pitch) στην οριζόντια μετατόπιση και περιστροφή της ελεύθερα πλέουσας συσκευής, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο σχήμα 7.13 για  $\omega \approx 0.45$  rad/s.

Στην μέχρι τώρα ανάλυση, δεν εξετάστηκε η επίδραση των δυναμικών φαινομένων και της απόσβεσης από το σύστημα αγκύρωσης στις κινήσεις των κυματικών συσκευών ανάκτησης ενέργειας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της απόσβεσης που εισάγεται στο σύστημα από τους κλάδους αγκύρωσης στις μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις της συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.15 παρουσιάζονται οι κινήσεις ενδεικτικά του σημειακού απορροφητήρα για την 1<sup>η</sup> εξεταζόμενη διάταξη αγκύρωσης (Conf\_a). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα που προκύπτουν χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη ο συντελεστής απόσβεσης από τους κλάδους αγκύρωσης, καθώς και με εκείνα για μια ελεύθερα πλέουσα συσκευή.

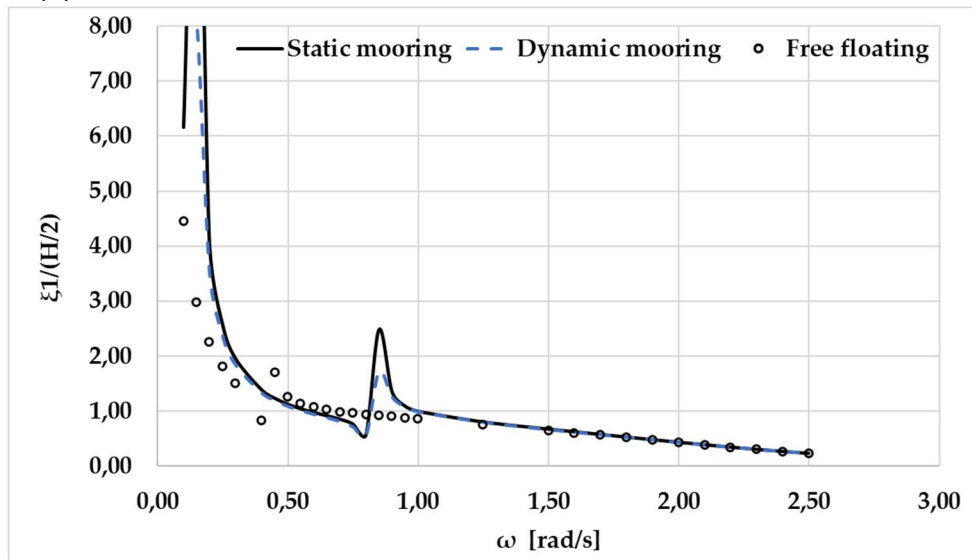
Από το Σχήμα 7.15 προκύπτει πως η απόσβεση λόγω των αγκυρώσεων δεν προκαλεί μεγάλες μεταβολές στην οριζόντια και την περιστροφική κίνηση της συσκευής (σχήματα 7.15α και 7.15γ, αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα έχουν παραχθεί για ύψος κύματος  $H = 2\text{m}$ . Σχετικά με την οριζόντια μεταφορική κίνηση surge και την στροφή pitch παρατηρείται πως για  $\omega \approx 0.9$  rad/s οι κινήσεις της συσκευής περιορίζονται όταν ο όρος της απόσβεσης λαμβάνεται υπόψη έναντι των αντίστοιχων κινήσεων από τη στατική επίδραση των κλάδων.



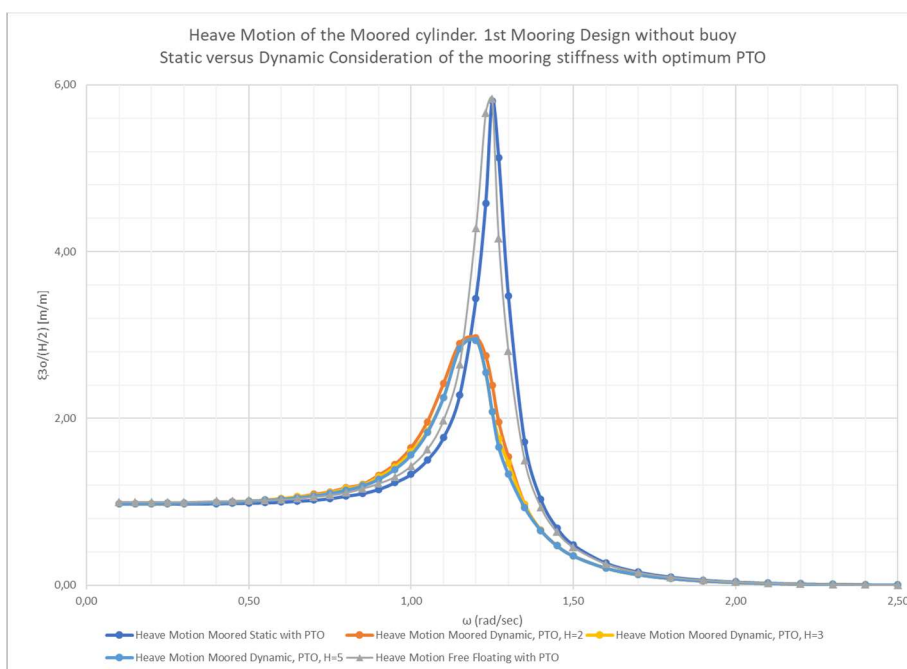
Σημαντικότερη μείωση παρατηρείται στην καθ' ύψος κίνηση του σημειακού απορροφητήρα στη συχνότητα συντονισμού όταν ληφθεί υπόψη η απόσβεση που εισάγει το σύστημα αγκύρωσης (βλέπε σχήμα 7.15β) έναντι της τιμής που εμφανίζει για την περίπτωση που η απόσβεση αυτή δεν ληφθεί υπόψη. Σημειώνεται επίσης ότι οι καθ' ύψος αποκρίσεις του πλωτήρα στην περίπτωση που αυτός πλέει ελεύθερα και στην περίπτωση που αυτός είναι αγκυρωμένος μεν, αλλά η απόσβεση του συστήματος αγκύρωσης δεν λαμβάνεται υπόψη, είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Στο σχήμα 7.15β παρουσιάζεται επίσης η απόκριση της συσκευής και για διαφορετικά ύψη κύματος του προσπίπτοντος κυματισμού και παρατηρείται ότι η καθ' ύψος κίνηση της συσκευής ανά μονάδα πλάτους του κυματισμού παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από την μεταβολή του ύψους κύματος.

Διαφορετική συμπεριφορά παρατηρήθηκε στην περίπτωση που το σύστημα αγκύρωσης περιείχε πλωτήρα κατά το μήκος του. Τα αποτελέσματα για την καθ' ύψος κίνηση με και χωρίς την συμπερίληψη της απόσβεσης από τους κλάδους αγκύρωσης, καθώς συγκρίσεις με την πρώτη σχεδίαση που αποτελείτο μόνο από αλυσίδα παρουσιάζονται στο σχήμα 7.16. Σε όλες τις περιπτώσεις για τον υπολογισμό της κίνησης του πλωτήρα, λήφθηκε υπόψη και η απόσβεση από τον μηχανισμό απόληψης της ενέργειας, ίση με την υδροδυναμική απόσβεση στην συχνότητα συντονισμού της καθ' ύψος κίνησης της συσκευής.

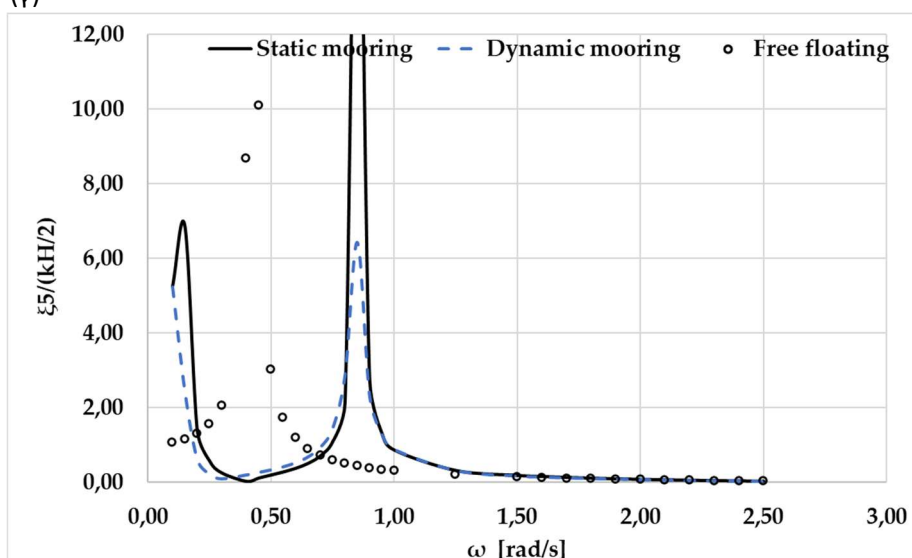
(α)



(β)



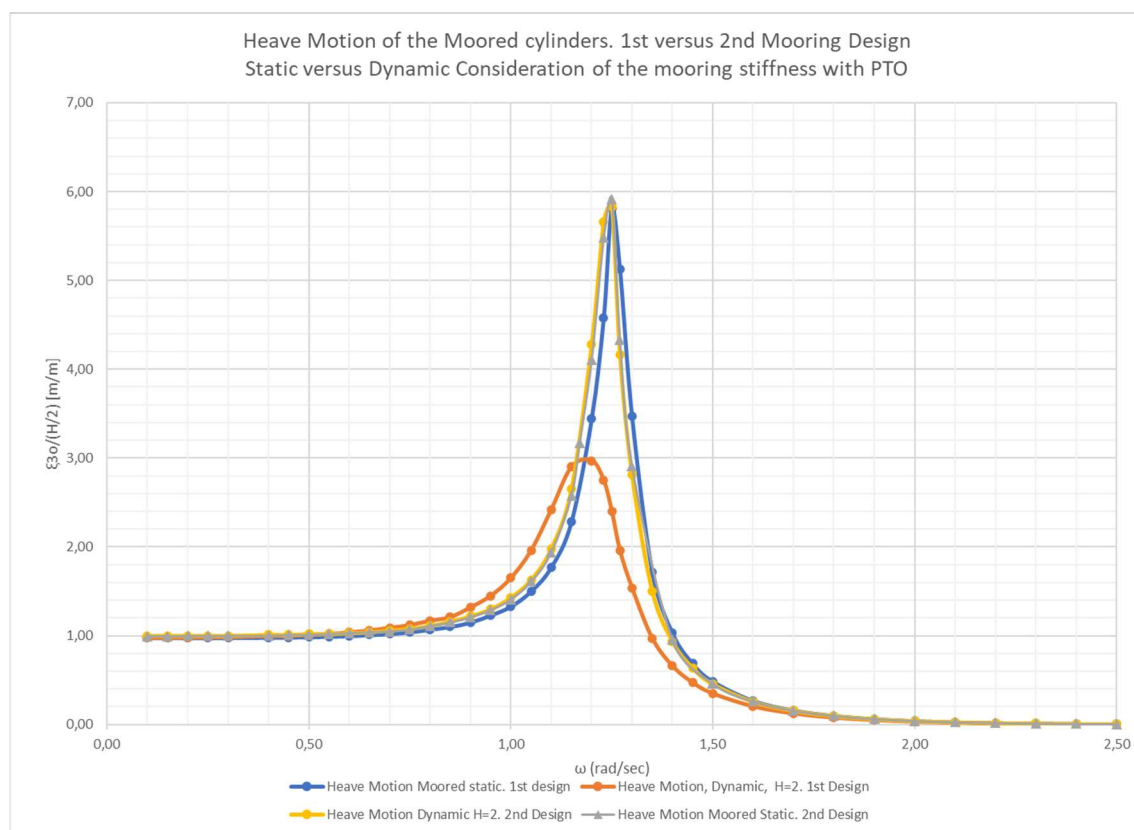
(γ)



Σχήμα 7.15: Μεταφορικές κινήσεις και περιστροφές του σημειακού απορροφητήρα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των συντελεστών απόσβεσης για την 1<sup>η</sup> διάταξη αγκυρώσεων (Conf\_a): (α) οριζόντια μεταφορική κίνηση, (β) κατακόρυφη μεταφορική κίνηση, (γ) περιστροφή (pitch) περί τον οριζόντιο γ- άξονα. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ελεύθερα πλέοντος σημειακού απορροφητήρα καθώς και αγκυρωμένου σημειακού απορροφητήρα υπό την στατική επίδραση των κλάδων αγκύρωσης

Παρατηρούμε από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για την καθ' ύψος κίνηση στις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς την ύπαρξη ενδιάμεσου ανωστικού πλωτήρα), Σχήμα 7.16, ότι οι κινήσεις στον συντονισμό είναι ελαφρά μεγαλύτερες στην περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης με τον ενδιάμεσο ανωστικό πλωτήρα με την στατική θεώρηση της ακαμψίας που προσφέρει το σύστημα αγκύρωσης. Όμως οι διαφορές αυτές γίνονται πολύ σημαντικές στην περίπτωση της δυναμικής θεώρησης της ακαμψίας με την συμπερίληψη δηλαδή της απόσβεσης από το σύστημα αγκύρωσης, που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση μέχρι και 50%

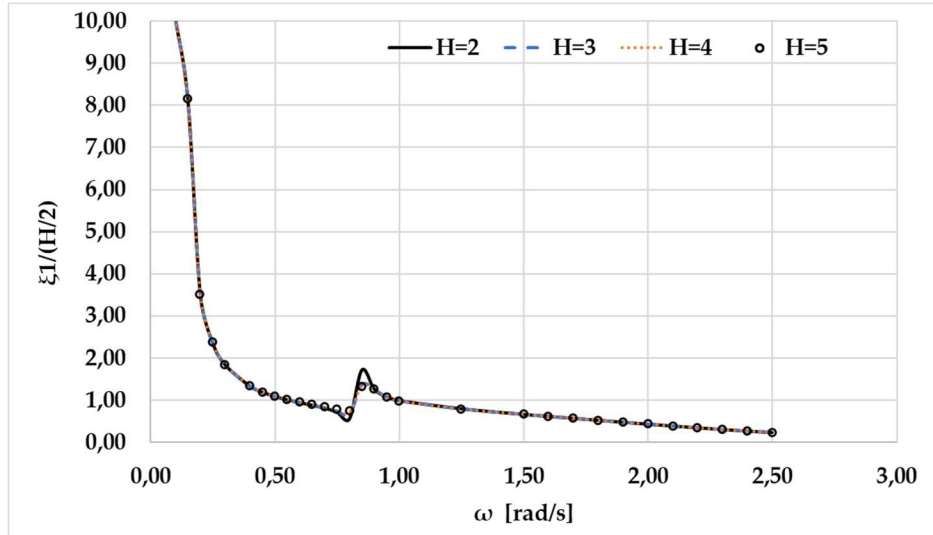
των κινήσεων συντονισμού της κατασκευής στη περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης που αποτελείται από αλυσίδες, χωρίς ανωστικούς πλωτήρες.



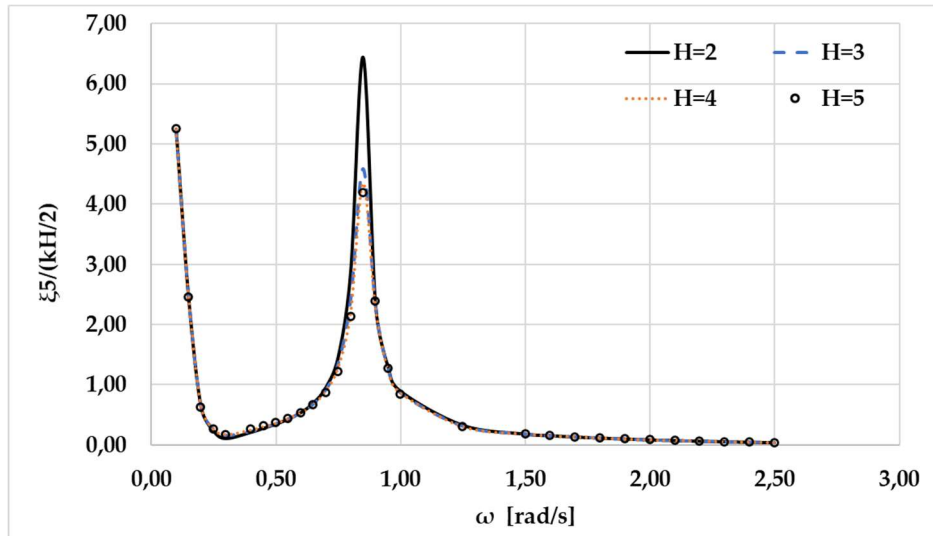
Σχήμα 7.16: Καθ' ύψος κίνηση του σημειακού απορροφητήρα με και χωρίς την συμπερίληψη της απόσβεσης από το σύστημα αγκύρωσης για την 3<sup>η</sup> διάταξη αγκυρώσεων (Conf\_c, 2<sup>η</sup> διαμόρφωση του κλάδου με ενδιάμεσο ανωστικό πλωτήρα). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για την περίπτωση χωρίς ενδιάμεσο πλωτήρα με στατική και δυναμική θεώρηση των χαρακτηριστικών της γραμμής.

Στο Σχήμα 7.17 παρουσιάζεται η επίδραση του ύψους κύματος στην οριζόντια μεταφορική κίνηση (surge) και την περιστροφή (pitch) του σημειακού απορροφητήρα για την 1<sup>η</sup> εξεταζόμενη διάταξη κλάδων αγκύρωσης (Conf\_a) λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των συντελεστών απόσβεσης λόγω των κλάδων αγκύρωσης. Η αντίστοιχη επίδραση του ύψους κύματος στην καθ' ύψος απόκριση της συσκευής, όταν αυτή είναι αγκυρωμένη με κλάδους αγκύρωσης χωρίς ενδιάμεσους ανωστικούς πλωτήρες (configuration a), παρουσιάστηκε στο σχήμα 7.15β. Στο σχήμα 7.16, παρουσιάζεται η καθ' ύψος απόκριση της συσκευής για την διαμόρφωση του συστήματος αγκύρωσης με τους ενδιάμεσους ανωστικούς πλωτήρες (configuration c, 2η διαμόρφωση του κλάδου αγκύρωσης), με και χωρίς την συμπερίληψη της απόσβεσης από το σύστημα αγκύρωσης, για H = 2m. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και σύγκριση των καθ' ύψος κινήσεων της συσκευής όταν αυτή είναι αγκυρωμένη με και χωρίς ενδιάμεσους ανωστικούς πλωτήρες (mooring line design 1 και mooring line design 2). Όπως και για την heave κίνηση (σχήμα 7.15β και 7.16), έτσι και για τις άλλες δύο κινήσεις που εξετάζονται στο 7.17α και στο 7.17β, η επίδραση του ύψους κύματος στις ανηγμένες με αυτό δυναμικές αποκρίσεις της κατασκευής είναι μικρή.

(α)



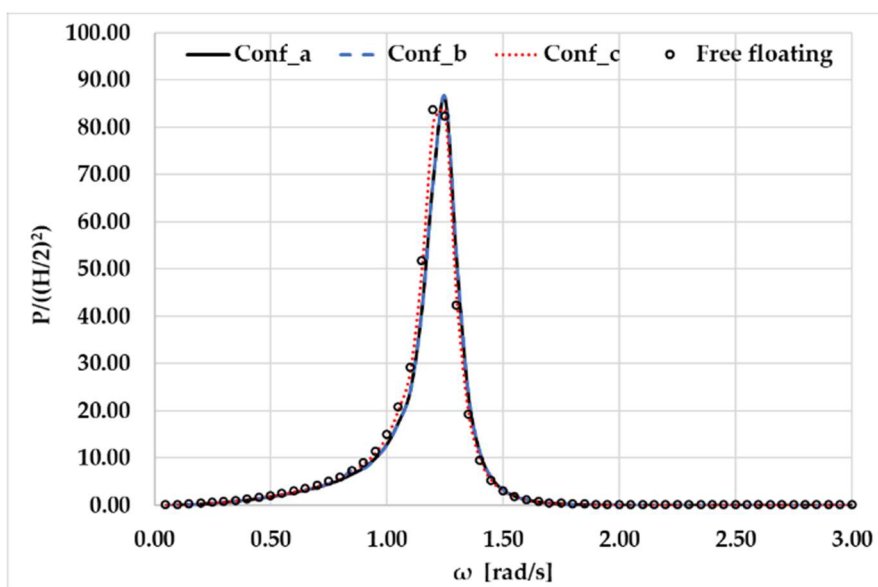
(β)



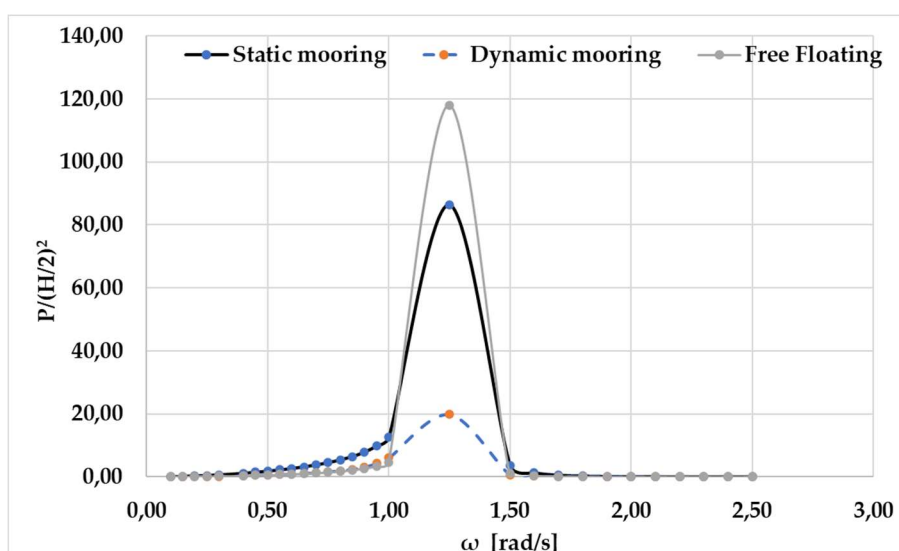
Σχήμα 7.17: Οριζόντια μεταφορική κίνηση και περιστροφή (pitch) του σημειακού απορροφητήρα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των συντελεστών απόσβεσης για την 1<sup>η</sup> διάταξη αγκυρώσεων (Conf\_a) για διάφορα ύψη κύματος: (α) οριζόντια μεταφορική κίνηση, (β) περιστροφή περί τον οριζόντιο άξονα  $\gamma$

## 7.5 Απορροφούμενη κυματική ισχύς

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η απορροφούμενη ισχύς από τις εξεταζόμενες κυματικές μηχανές για τα διάφορα συστήματα αγκύρωσης. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 7.18 απεικονίζεται η  $P_3(\omega)$  (βλέπε Εξίσωση 5.7) του σημειακού απορροφητήρα, συναρτήσει του τετραγώνου του πλάτους του κυματισμού, ενώ στο Σχήμα 7.19 παρουσιάζεται η επίδραση της απόσβεσης λόγω των κλάδων αγκύρωσης στην απόδοση της συσκευής. Τέλος στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η απορροφούμενη ισχύς  $P$  (βλέπε εξίσωση 5.10) από τη συσκευή, για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών ( $H_s$ ,  $T_p$ ).



Σχήμα 7.18: Απορροφούμενη κυματική ισχύς από τον σημειακό απορροφητήρα, συναρτήσει του πλάτους κύματος για τα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης



Σχήμα 7.19: Απορροφούμενη κυματική ισχύς από τον σημειακό απορροφητήρα, συναρτήσει του πλάτους κύματος λαμβάνοντας υπόψη της απόσβεση των κλάδων αγκύρωσης για την περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης με αλυσίδες

Από το Σχήμα 7.19 προκύπτει πως η απόδοση της κυματικής συσκευής μειώνεται σημαντικά λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση λόγω των κλάδων αγκύρωσης για την

περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης με αλυσίδες. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη κοντά στο σημείο συντονισμού της κατακόρυφης κίνησης ( $\omega \approx 1.25 \text{ rad/s}$ ). Κατά την εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας έχει επιβληθεί στο σύστημα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, απόσβεση λόγω του συστήματος απόληψης της ενέργειας (Power Take Off-PTO) που ισούται με την βέλτιστη τιμή της, αυτή που ισούται με την υδροδυναμική απόσβεση στο σημείο συντονισμού της καθ' ύψος κίνησης της κατασκευής. Το σύστημα αγκύρωσης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων του σχήματος 7.19 είναι το (α). Από τα αποτελέσματα του γραφήματος αυτού φαίνεται η ιδιαίτερη σημασία της επιλογής των χαρακτηριστικών του συστήματος αγκύρωσης σε τρόπο ώστε να περιοριστεί κατά το δυνατόν η αρνητική επίδρασή του στην απόδοση των σημειακών απορροφητήρων ενέργειας που βασίζεται στις καθ' ύψος κινήσεις συντονισμού τους για την αύξηση της απόδοσής τους.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η επίδραση του συστήματος αγκύρωσης στην απόδοση της συσκευής σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1

Απορροφούμενη κυματική ισχύς για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών ( $H_s, T_p$ )

7.1α: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_a								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03
3-4		0.05	0.30	0.84	1.65	2.73	4.08	5.70
4-5		0.42	4.33	12.06	23.64	39.08	58.38	81.53
5-6		0.65	6.92	24.99	48.97	80.95	120.93	168.90
6-7		0.60	5.41	13.62	24.88	41.14	61.45	85.83
7-8		0.48	4.36	11.51	19.35	28.88	43.14	60.26
8-9		0.38	3.38	9.39	16.68	24.26	32.55	45.12
9-10		0.29	2.63	7.31	14.32	21.08	28.37	36.23
10-11		0.23	2.08	5.77	11.30	18.48	24.93	32.09
11-12		0.19	1.67	4.63	9.08	15.01	21.96	28.07
7.1β: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_b								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03
3-4		0.05	0.31	0.85	1.66	2.75	4.11	5.74
4-5		0.42	4.35	12.11	23.73	39.22	58.59	81.84
5-6		0.64	6.91	24.91	48.83	80.72	120.58	168.42
6-7		0.60	5.41	13.58	24.79	40.97	61.21	85.49
7-8		0.48	4.36	11.53	19.47	29.16	43.55	60.83
8-9		0.38	3.39	9.42	16.74	24.39	32.76	45.42
9-10		0.29	2.64	7.33	14.37	21.16	28.48	36.39
10-11		0.23	2.08	5.79	11.35	18.56	25.03	32.22
11-12		0.19	1.67	4.65	9.12	15.07	22.05	28.19

7.1γ: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_c								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03
3-4		0.05	0.28	0.78	1.53	2.54	3.79	5.29
4-5		0.43	4.12	11.44	22.42	37.06	55.36	77.32
5-6		0.68	7.39	27.44	53.77	88.89	132.79	185.46
6-7		0.64	5.77	14.70	27.07	44.75	66.85	93.38
7-8		0.52	4.67	12.36	20.80	31.07	46.42	64.83
8-9		0.40	3.64	10.10	17.93	26.06	34.94	48.44
9-10		0.31	2.83	7.86	15.40	22.65	30.46	38.87
10-11		0.25	2.23	6.20	12.14	19.86	26.76	34.41
11-12		0.20	1.79	4.97	9.74	16.10	23.56	30.09

7.1δ: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Free floating								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03
3-4		0.05	0.28	0.77	1.51	2.50	3.73	5.21
4-5		0.43	4.08	11.32	22.18	36.66	54.77	76.49
5-6		0.68	7.49	27.96	54.80	90.59	135.32	189.00
6-7		0.65	5.85	14.94	27.56	45.56	68.06	95.06
7-8		0.53	4.74	12.54	21.12	31.55	47.13	65.83
8-9		0.41	3.69	10.26	18.21	26.46	35.47	49.18
9-10		0.32	2.87	7.98	15.64	23.00	30.92	39.45
10-11		0.25	2.26	6.29	12.33	20.17	27.16	34.92
11-12		0.20	1.82	5.04	9.89	16.34	23.91	30.54

Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των παραπάνω πινάκων 7.1α – 7.1δ, με τον Πίνακα 5.1 που παρουσιάζει τον αριθμό των εμφανίσεων κάθε ζεύγους (H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>) στη συνολική διάρκεια των 31 χρόνων, καθώς και με τον αριθμό των 3 ωρών που είναι η χρονική διάρκεια της κάθε εμφάνισης και διαιρώντας με τα 31 χρόνια, προκύπτει ο πίνακας 7.2 που εμφανίζει την κυματική ισχύ kWh ανά έτος για κάθε ζεύγος τιμών (H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>). Αθροίζοντας, εν συνεχεία, την ετήσια κυματική ισχύ για όλα τα ζεύγη τιμών (H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>) κάθε πίνακα, προκύπτει η ετήσια απόδοση του σημειακού απορροφητήρα στην περιοχή εγκατάστασης για κάθε εξεταζόμενο σύστημα αγκύρωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2

Απόδοση κυματικής συσκευής (kWh/έτος) για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών (H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>)

7.2α: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_a								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		35.07	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		997.37	685.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		1182.30	7777.43	99.14	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		399.62	5774.28	1974.26	2.41	0.00	0.00	0.00
7-8		21.64	1050.39	2593.48	417.65	2.79	0.00	0.00
8-9		3.64	151.54	679.14	834.65	70.43	0.00	0.00
9-10		0.68	14.77	53.74	167.71	116.28	19.22	0.00
10-11		0.00	1.81	4.46	5.47	5.37	7.24	0.00
11-12		0.00	0.16	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 25150.25 kWh/έτος

7.2β: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_b								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		35.27	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		998.51	687.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		1181.25	7764.51	98.85	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		399.39	5770.85	1969.22	2.40	0.00	0.00	0.00
7-8		21.66	1051.33	2598.20	420.15	2.82	0.00	0.00
8-9		3.65	151.89	680.72	837.62	70.80	0.00	0.00
9-10		0.68	14.81	53.92	168.27	116.71	19.29	0.00
10-11		0.00	1.82	4.48	5.49	5.39	7.27	0.00
11-12		0.00	0.16	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 25145.95 kWh/έτος

7.2γ: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_c								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		32.47	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		1005.34	652.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		1239.83	8304.37	108.86	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		425.98	6155.17	2131.53	2.62	0.00	0.00	0.00
7-8		23.22	1127.12	2784.17	448.97	3.01	0.00	0.00
8-9		3.91	162.97	730.37	897.26	75.67	0.00	0.00
9-10		0.73	15.88	57.81	180.39	124.96	20.63	0.00
10-11		0.00	1.94	4.80	5.88	5.77	7.77	0.00
11-12		0.00	0.17	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 26742.26 kWh/έτος

7.2δ: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Free floating								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		31.95	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		1006.99	645.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		1252.25	8417.13	110.93	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		431.73	6238.22	2166.36	2.67	0.00	0.00	0.00
7-8		23.56	1143.93	2825.97	455.85	3.05	0.00	0.00
8-9		3.97	165.48	741.63	911.03	76.82	0.00	0.00
9-10		0.74	16.13	58.70	183.17	126.87	20.94	0.00
10-11		0.00	1.97	4.87	5.97	5.85	7.88	0.00
11-12		0.00	0.18	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00

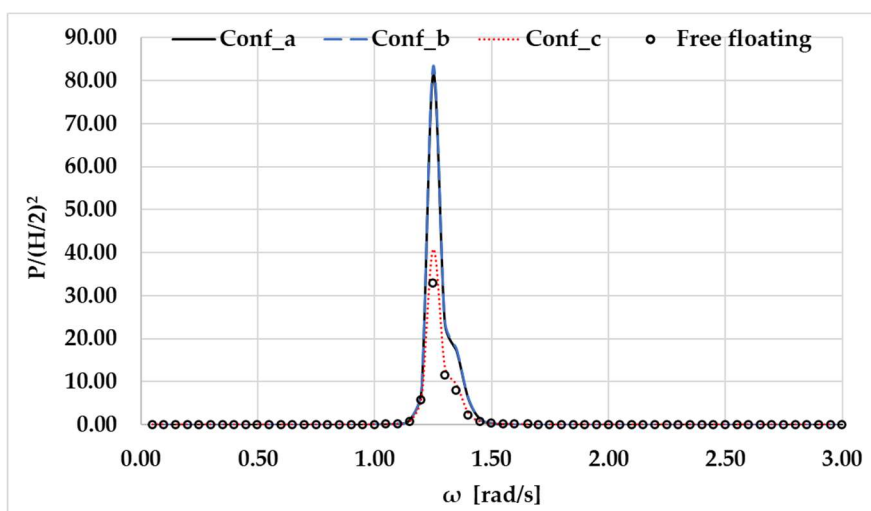
Συνολική ισχύς: 27088.91 kWh/έτος

Συγκρίνοντας τις κυματικές αποδόσεις του σημειακού απορροφητήρα (Πίνακες 7.2α – 7.2δ) προκύπτει πως τα δύο πρώτα συστήματα αγκύρωσης (τέσσερα διαφορετικά σημεία πρόσδεσης και ένα σημείο πρόσδεσης, αντίστοιχα) δεν παρουσιάζουν έντονες διαφορές στην απόδοση της συσκευής. Εν αντιθέσει στο σύστημα αγκύρωσης με χρήση ανωστικών σωμάτων, η ενεργειακή απόδοση είναι αυξημένη κατά 6% ως προς τις περιπτώσεις α και β, ενώ υπολείπεται αυτής του ελεύθερα πλέοντος σώματος κατά 1.28%. Προκύπτει επομένως



πως η χρήση ανωστικών σωμάτων στο σύστημα αγκύρωσης αυξάνει την κυματική απόδοση της συσκευής επιτρέποντας μεγαλύτερες κατακόρυφες ταλαντωτικές κινήσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα διάφορα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης, της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Πιο συγκεκριμένα το Σχήμα 7.20 απεικονίζει την  $P_3(\omega)$  (βλέπε Εξίσωση 5.6) της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, συναρτήσει του τετραγώνου του πλάτους του κυματισμού, ενώ στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζεται η απορροφούμενη ισχύς  $P$  (βλέπε εξίσωση 5.10) από τη συσκευή, για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών ( $H_s, T_p$ ).



Σχήμα 7.20: Απορροφούμενη κυματική ισχύς από τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, συναρτήσει του πλάτους κύματος για τα εξεταζόμενα συστήματα αγκύρωσης

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3

Απορροφούμενη κυματική ισχύς για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών ( $H_s, T_p$ )

7.3α: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_a								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		0.02	0.12	0.34	0.67	1.10	1.65	2.31
4-5		0.17	2.04	5.73	11.23	18.56	27.72	38.72
5-6		0.21	2.05	6.28	12.32	20.36	30.42	42.49
6-7		0.16	1.43	2.84	4.27	7.07	10.55	14.74
7-8		0.11	0.97	2.47	3.56	4.72	7.05	9.84
8-9		0.07	0.65	1.80	3.00	3.92	4.76	6.55
9-10		0.05	0.44	1.22	2.38	3.26	4.04	4.77
10-11		0.03	0.30	0.84	1.65	2.68	3.37	4.03
11-12		0.02	0.21	0.60	1.17	1.93	2.79	3.38

7.3β: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_b								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		0.03	0.13	0.35	0.69	1.13	1.69	2.37
4-5		0.18	2.09	5.87	11.50	19.01	28.41	39.67
5-6		0.21	2.10	6.42	12.58	20.79	31.05	43.37
6-7		0.16	1.46	2.90	4.37	7.23	10.79	15.08
7-8		0.11	0.99	2.52	3.64	4.82	7.21	10.07
8-9		0.07	0.66	1.84	3.06	4.01	4.86	6.70
9-10		0.05	0.45	1.24	2.44	3.33	4.13	4.87
10-11		0.03	0.31	0.86	1.68	2.74	3.44	4.12
11-12		0.02	0.22	0.61	1.19	1.97	2.85	3.45

7.3γ: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Conf_c								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		0.01	0.06	0.18	0.35	0.58	0.87	1.22
4-5		0.09	1.08	3.03	5.93	9.80	14.64	20.45
5-6		0.11	1.13	3.54	6.93	11.46	17.11	23.90
6-7		0.09	0.78	1.55	2.34	3.86	5.77	8.06
7-8		0.06	0.53	1.35	1.95	2.58	3.86	5.39
8-9		0.04	0.36	0.99	1.64	2.15	2.61	3.59
9-10		0.03	0.24	0.67	1.31	1.79	2.22	2.61
10-11		0.02	0.17	0.46	0.90	1.47	1.85	2.21
11-12		0.01	0.12	0.33	0.64	1.06	1.53	1.85

7.3δ: Απορροφούμενη Ισχύς [kW]: Free floating								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		0.01	0.05	0.15	0.30	0.49	0.73	1.02
4-5		0.08	0.91	2.54	4.98	8.24	12.31	17.19
5-6		0.10	0.95	2.99	5.86	9.69	14.48	20.22
6-7		0.07	0.66	1.31	1.97	3.25	4.85	6.78
7-8		0.05	0.45	1.14	1.64	2.17	3.24	4.53
8-9		0.03	0.30	0.83	1.38	1.81	2.19	3.02
9-10		0.02	0.20	0.56	1.10	1.51	1.87	2.20
10-11		0.02	0.14	0.39	0.76	1.24	1.55	1.86
11-12		0.01	0.10	0.28	0.54	0.89	1.29	1.56

Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των παραπάνω πινάκων 7.3α – 7.3δ, με τον Πίνακα 5.1 και με τον αριθμό των 3 ωρών και διαιρώντας με τα 31 χρόνια, όπως και στην περίπτωση του πίνακα 7.2, προκύπτει ο πίνακας 7.4 που εμφανίζει την κυματική ισχύ σε kWh ανά έτος για κάθε περιβαλλοντικό ζεύγος τιμών (H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>). Αθροίζοντας, εν συνεχεία, τις αποδόσεις σε όλα τα κελιά κάθε πίνακα προκύπτει η ετήσια απόδοση της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στην περιοχή εγκατάστασης για κάθε εξεταζόμενο σύστημα αγκύρωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4

Απόδοση κυματικής συσκευής (kWh/έτος) για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών ( $H_s$ ,  $T_p$ )

7.4α: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_a								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		15.88	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		402.51	323.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		379.70	2309.81	24.94	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		105.49	1524.32	411.34	0.41	0.00	0.00	0.00
7-8		4.82	234.10	556.24	76.90	0.46	0.00	0.00
8-9		0.70	29.01	130.02	149.85	11.38	0.00	0.00
9-10		0.11	2.46	8.94	27.90	17.99	2.74	0.00
10-11		0.00	0.26	0.65	0.80	0.78	0.98	0.00
11-12		0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 6754.95 kWh/έτος

7.4β: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_b								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		16.29	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		411.72	331.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		388.16	2360.00	25.46	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		107.83	1558.10	420.56	0.42	0.00	0.00	0.00
7-8		4.93	239.28	568.59	78.63	0.47	0.00	0.00
8-9		0.71	29.65	132.89	153.15	11.63	0.00	0.00
9-10		0.12	2.51	9.14	28.52	18.39	2.80	0.00
10-11		0.00	0.27	0.67	0.82	0.79	1.00	0.00
11-12		0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 6904.92 kWh/έτος

7.4γ: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Conf_c								
	$H_s$ [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
$T_p$ [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		8.34	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		217.31	170.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		207.11	1272.64	14.03	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		57.77	834.69	225.13	0.23	0.00	0.00	0.00
7-8		2.64	128.37	304.96	42.12	0.25	0.00	0.00
8-9		0.38	15.92	71.33	82.19	6.24	0.00	0.00
9-10		0.06	1.35	4.91	15.31	9.87	1.50	0.00
10-11		0.00	0.14	0.36	0.44	0.43	0.54	0.00
11-12		0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 3697.61 kWh/έτος

7.4δ: Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Free floating								
	H <sub>s</sub> [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T <sub>p</sub> [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		7.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		182.52	143.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		174.14	1071.86	11.87	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		48.60	702.19	189.37	0.19	0.00	0.00	0.00
7-8		2.23	108.02	256.59	35.43	0.21	0.00	0.00
8-9		0.32	13.39	60.02	69.16	5.25	0.00	0.00
9-10		0.05	1.13	4.13	12.88	8.30	1.26	0.00
10-11		0.00	0.12	0.30	0.37	0.36	0.45	0.00
11-12		0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς: 3111.49 kWh/έτος

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει πως σε αντίθεση με τον σημειακό απορροφητήρα, η αγκύρωση με τα ενδιάμεσα ανωστικά σώματα παρουσιάζει τη χαμηλότερη απόδοση λόγω μεγαλύτερης κινηματικής ελευθερίας που επιτρέπει στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ενώ οι αγκυρώσεις με 4 και με 1 σημεία σύνδεσης δείχνουν οι πιο αποδοτικές. Εν συνεχεία, συγκρίνοντας τις κυματικές αποδόσεις του σημειακού απορροφητήρα (Πίνακες 7.2α – 7.2δ) με αυτές της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Πίνακες 7.4α – 7.4δ) προκύπτει πως ο σημειακός απορροφητήρας είναι πιο αποδοτικός. Πιο συγκεκριμένα, για τα δύο πρώτα συστήματα αγκύρωσης (Conf\_a, Conf\_b), παρόλο που η απόδοση του σημειακού απορροφητήρα είναι μειωμένη, είναι περίπου 72% μεγαλύτερη από αυτή της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 86% για το 3<sup>ο</sup> σύστημα αγκύρωσης (Conf\_c). Η μεγάλη αυτή διαφορά στην απόδοση των δύο κυματικών συσκευών, οφείλεται στα επιλεγμένα συστήματα αγκύρωσης, τα οποία επιτρέπουν τις κατακόρυφες κινήσεις των συσκευών. Αυτό ενεργεί θετικά στην κυματική απόδοση του σημειακού απορροφητήρα, ενώ αρνητικά σε αυτή της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συσκευές ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης είναι αποδοτικότερες με συστήματα αγκύρωσης τα οποία περιορίζουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις της συσκευής, όπως TLP [64].

## 8 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων συστημάτων αγκύρωσης στην κυματική απόδοση πλωτών συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας δυναμικής ροής. Παρουσιάστηκε το υδροδυναμικό πρόβλημα περίθλασης και ακτινοβολίας και προσδιορίστηκαν οι ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης, οι υδροδυναμικοί συντελεστές, οι κινήσεις και οι κυματικές αποδόσεις δύο διαφορετικών τύπων συσκευών, ενός σημειακού απορροφητήρα και μιας συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, με στόχο το προσδιορισμό της επίδρασης των χαρακτηριστικών της αγκύρωσης στην απολήψιμη κυματική ενέργεια. Στην κατεύθυνση αυτή έγινε στατική και δυναμική ανάλυση των κλάδων αγκύρωσης που απαρτίζουν τα συστήματα αγκύρωσης που εξετάστηκαν και διερευνήθηκε η επίδραση της απόσβεσης που προκαλείται από το σύστημα αγκύρωσης στις κινήσεις της κατασκευής.

Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές διατάξεις συστημάτων αγκύρωσης που αφορούν: (α) τέσσερις αλυσοειδείς γραμμές προσδεμένες πάνω στη συσκευή σε τέσσερα διαφορετικά σημεία, (β) τέσσερις αλυσοειδείς γραμμές προσδεμένες σε ένα σημείο πάνω στη συσκευή, (γ) τέσσερις αλυσοειδείς γραμμές, με χρήση ενδιάμεσων ανωστικών σωμάτων. Από την σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

A) Το σύστημα αγκύρωσης με τα ενδιάμεσα ανωστικά σώματα, επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στην κατακόρυφη κίνηση των συσκευών, σε σχέση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κυματική απόδοση του σημειακού απορροφητήρα να είναι μεγαλύτερη όταν αγκυρώνεται με σύστημα αγκύρωσης που περιλαμβάνει ανωστικά σώματα.

B) Η συμπερίληψη της απόσβεσης των κλάδων αγκύρωσης (mooring line damping) στην κινηματική συμπεριφορά του σημειακού απορροφητήρα είναι σημαντική και μπορεί να επίδραση αρνητικά στην απόδοση της συσκευής, ιδιαίτερα στην περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης που αποτελείται από τέσσερις αλυσοειδείς γραμμές χωρίς ενδιάμεσους ανωστικούς πλωτήρες. Στη περίπτωση αυτή διαπιστώθηκε πώς η μείωση της καθ' ύψος κίνησης της συσκευής στην περιοχή του συντονισμού μπορεί να φθάσει και μέχρι το 50% της τιμής της στη περίπτωση που η απόσβεση του συστήματος αγκύρωσης δεν λαμβανόταν υπόψη. Στην περίπτωση ύπαρξης των ενδιάμεσων ανωστικών πλωτήρων φάνηκε ότι η επίδραση αυτή ήταν πολύ μικρή στην κινηματική συμπεριφορά του πλωτήρα.

Γ) Στην περίπτωση της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινη στήλης το σύστημα αγκύρωσης με τα ενδιάμεσα σώματα παρουσιάζει τη μικρότερη απόδοση από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στην αυξημένες κατακόρυφες κινήσεις της συσκευής, που περιορίζουν την απόδοσή της. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός πως η διαφορά στην απόδοση των δύο συσκευών όταν αγκυρώνονται με το συγκεκριμένο σύστημα αγκύρωσης μπορεί να ανέλθει στο 86% υπέρ του σημειακού απορροφητήρα.

Δ) Σε ότι αφορά το σύστημα αγκύρωσης 4 γραμμών, που προσδέονται είτε σε κοινό, είτε σε τέσσερα διαφορετικά σημεία σύνδεσης με τη συσκευή, προκύπτει πως δεν είναι τόσο ενεργειακά αποδοτικό σε σχέση με το σύστημα αγκύρωσης με τα ανωστικά σώματα για το σημειακό απορροφητήρα. Εν αντιθέσει, για τη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, τα συγκεκριμένα συστήματα αυξάνουν την κυματική της απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, η

διαφορά στην κυματική απόδοση των δύο συσκευών είναι 72%, με αποδοτικότερο τον σημειακό απορροφητήρα.

Ε) Τέλος, συγκρίνοντας τις διαφορετικές κυματικές συσκευές και τα είδη αγκύρωσης, προκύπτει πως η 3<sup>η</sup> διάταξη αγκύρωσης (conf\_3) σε συνδυασμό με τον σημειακό απορροφητήρα αποτελούν το πιο αποδοτικό σύστημα. Για να μπορέσει η συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης να καταστεί ενεργειακά ανταγωνίσιμη, θα πρέπει να περιοριστούν περαιτέρω οι κατακόρυφες μετατοπίσεις της. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με χρήση διαφορετικών συστημάτων αγκύρωσης, είτε με διαφορετική γεωμετρία θαλάμου ταλάντωσης, είτε με χρήση αεροστροβίλου μεταβλητού βήματος για τη βέλτιστη λειτουργία του σε περισσότερες από μια περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην κατεύθυνση εξέτασης του περιορισμού της καθ' ύψος κίνησης της συσκευής ταλαντευόμενης στήλης, θα πρέπει να διερευνηθεί επίσης και η πιθανή επίδραση της απόσβεσης του συστήματος αγκύρωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση κλάδων αγκύρωσης χωρίς ενδιάμεσους ανωστικούς πλωτήρες, που για την περίπτωση σημειακών απορροφητήρων φάνηκε ότι μπορεί να περιορίσει μέχρι και 50% τις κινήσεις συντονισμού της συσκευής.

Η παρούσα εργασία δύναται να επεκταθεί:

(α) με τη συστηματική παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της απόσβεσης του συστήματος αγκύρωσης στην κινηματική συμπεριφορά κυματικών απορροφητήρων για διάφορες διατάξεις συστημάτων αγκύρωσης και υλικά των κλάδων. Δημιουργία βάσης δεδομένων για την επίλυση των εξισώσεων της κίνησης στο πεδίο των συχνοτήτων.

(β) με την επίλυση των συζευγμένων εξισώσεων της κίνησης στο πεδίο του χρόνου και σύγκριση με τα αποτελέσματα της επίλυσης στο πεδίο των συχνοτήτων που παρουσιάστηκε.

(γ) με την εκτέλεση πειραμάτων υπό κλίμακα για την επιβεβαίωση των θεωρητικών προβλέψεων και της ακρίβειας των προγραμμάτων Η/Υ.

(δ) με την επέκταση των προγραμμάτων Η/Υ ώστε να λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση του συστήματος αγκύρωσης και στην περίπτωση συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, γεγονός που θα επιτρέψει την εξέταση της επίδρασής της στον περιορισμό των κινήσεων των συσκευών που με την σειρά του θα οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσής τους

(ε) με τη διερεύνηση μεθόδων αύξησης της απόδοσης της συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης ώστε να καταστεί ανταγωνιστική ως προς τους σημειακούς απορροφητήρες, με χρήση συμβατικών κλάδων αγκύρωσης.

## 9 Βιβλιογραφία

- [1] "Deepwater Horizon oil spill", Wikipedia, 2021. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater\\_Horizon\\_oil\\_spill](https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon_oil_spill). [Accessed 23 May 2021].
- [2] Borthwick, A., "Marine Renewable Energy Seascape", 2016, p. 69–78.
- [3] REN21, "Renewables 2019 Global Status Report: A comprehensive annual overview of the state of renewable energy", 2019. [Online]. Available: [https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/). [Accessed 23 May 2021].
- [4] Global Wind Energy Council. "Global Wind Report 2016—Annual Market Update", 2016.
- [5] Wind Europe Organization, "The European offshore wind industry - key trends and statistics 2018", Brussels, 2019.
- [6] Wind Europe Organization, "Wind Energy in Europe, Scenarios for 2030", Brussels, 2017.
- [7] Wind Europe Organization, "The European Offshore Wind Industry - Key Trends and Statistics 2016", Brussels, 2017.
- [8] Equinor, 2017. [Online]. Available: <https://www.statoil.com/en/news/worlds-first-floating-wind-farm-started-production.html>. [Accessed 22 May 2021].
- [9] IRENA, "Renewable capacity highlights", 2018.
- [10] World Energy Council, "Marine Energy 2016 report", 2016.
- [11] Wind Power Engineering, [Online]. Available: [www.windpowerengineering.com](http://www.windpowerengineering.com) [Accessed 23 May 2021].
- [12] Falnes, J., "Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction", Cambridge University Press, 2002.
- [13] McCormic, M.E., "Ocean Wave Energy Conversion", North Chelmsford, MA: Courier Corporation, 1982.
- [14] Pelc, R., Fujita, R.M., "Renewable energy from the ocean", *Marine Policy*, Vol 26, p. 471–479., 2002.
- [15] Thorpe, T., "A brief review of wave energy", Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, Didcot, UK., 1999.
- [16] Iyas, A., Kashif, S.A., Saqib, M.A., Asad, M.M., "Wave electrical energy systems: Implementation, challenges and environmental issues", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol 40, p. 260–268, 2014.
- [17] Nielsen, K., "Ocean Energy Technology Study", The Alliance for Offshore Renewables, 2012.
- [18] Jacobson, P.T., Hagerman, G., Scott, G., "Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource, No DOE/GO/18173-1", Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA., 2011.
- [19] The Crown Estate, "UK Wave and Tidal Key Resource Areas Project – Summary Report", 2012.
- [20] Tunde, A., Hua, L., "Ocean wave energy converters: status and challenges", *Energies*, Vol. 11, p. 1250, 2018.
- [21] EU, "Blue Energy Action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond", 2017 [Online]. Available: <http://eur->

[lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1396419828231&uri=CELEX:52014DC0008](http://lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1396419828231&uri=CELEX:52014DC0008)  
[Accessed 20 May 2021].

- [22] Magagna, D., Uihlein, A., “*Ocean energy development in Europe: current status and future perspectives*”, *Int. Journal of Marine Energy*, Vol 11, p. 84-104, 2015.
- [23] HM Government, [Online]. Available: [Marine Action Energy Plan 2010](#) [Accessed 15 May 2021].
- [24] EWEA - The European Wind Energy Association, “*Wind in power 2015 European statistics*”, February 2016. [Online]. Available:  
<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2015.pdf>. [Accessed 11 May 2021].
- [25] BP, “*BP Energy Outlook 2020 edition*”, BP, 2020. [Online]. Available:  
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>. [Accessed 23 May 2021].
- [26] EMEC, “*The European Marine Energy Centre LTD*”, [Online]. Available:  
<http://www.emec.org.uk/marine-energy/>. [Accessed 21 May 2021].
- [27] REN21, “*Renewables 2020 Global Status Report: A comprehensive annual overview of the state of renewable energy*”, 2020. [Online]. Available: [https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter_01/chapter_01/). [Accessed 23 May 2021].
- [28] HCMR, Hellenic Centre for Marine Research, [Online]. Available:  
<http://www.poseidon.hcmr.gr>. [Accessed 17 May 2021].
- [29] Taveira-Pinto, F., Silva, R., Pais – Barbosa, J., “*Coastal Erosion Along the Portuguese Northwest Coast Due to Changing Sediment Discharges from Rivers and Climate Change*”, *Coastal Research Library*, Dordrecht, Springer, vol 1, p. 135-151, 2011
- [30] Soukissian, T.H., “*Blue Energy in the Medirerranean Sea*”, Athens: Interreg PELAGOS, 2017.
- [31] Soukissian, T.H., “*Assessment of offshore wind and wave potential for the Hellenic Seas and the optimal marine spatial planning regarding offshore wind farms*”, Research Program AVRA, WP1, 2012.
- [32] Soukissian, T.H., Denaxa, D., Karathanasi, F., Prospathopoulos, A., Sarantakos, K., Iona, A., Georgantas, K., Mavrakos, S.A., “*Marine Renewable Energy in the Mediterranean Sea: Status and Perspectives*”, *Energies*, Issue 10, October 2017, p. 1512, MDPI. Available:  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1512>. [Accessed 23 May 2021].
- [33] Clément, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, B.-O., Sjöström, P., Sørensen, H.C., and Thorpe, T., “*Wave energy in Europe: current status and perspectives*”, *Renew. Sust. Energy Rev.*, Vol. 6, No. 5, p. 405–431, 2002.
- [34] Drew, B., Plummer, A.R., Sahinkaya, M.N., “*A review of wave energy converter technology*”, *Proc. IMechE: J. Power and Energy*, Vol. 223 Part A, p. 887-902, 2009.
- [35] Mofor, L., Goldsmith, J., Jones, F., “*Ocean Energy. Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook*”, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2014.



- [36] MacGillivray, A., Jeffrey H., Hanmer, C., Magagna, D., Raventos, A., Badcock-Broe, A., *“Ocean Energy Technology: Gaps and Barriers”*, Strategic Initiative for Ocean Energy (SI Ocean), 2013. Available: [www.si-ocean.eu](http://www.si-ocean.eu)
- [37] Sheng, S., *“Report on Wind Turbine Subsystem Reliability – A Survey of Various Databases”*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.
- [38] Corsatea, T.D., Magagna, D., *“Overview of European innovate on activities in marine energy technology”*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013.
- [39] Falcao, A.F., *“Wave Energy Utilization: A review of the technologies”*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, p. 899-918, 2010.
- [40] Nielsen, K., Smed, P.F., *“Point absorber—optimization and survival testing”*, In: *3rd European Wave Energy Conference*, 1998.
- [41] Center for Renewable Energy Sources, *“Ocean Energy Conversion in Europe”*, Center for Renewable Energy Sources, Athens, 2006.
- [42] Waters, R, Stalberg, M, Danielsson, O, Svensson, O, Gustafsson, S, Stromstedt, E, *“Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system”*, *Applied Physical Letters*, Vol. 90, No. 3, 2007.
- [43] Falnes, J., *“Wave-energy conversion through relative motion between two - single mode oscillating bodies”*, *J Offshore Mech Arctic Eng* 1999, 1999.
- [44] Mavrakos, S. A., *“Hydrodynamic coefficients in heave of two concentric surface-piercing truncated circular cylinders”*, *Applied Ocean Research*, Vol. 26, No. 3-4, p. 84-97, 2004.
- [45] Mavrakos, S.A., Katsaounis, G., *“Effects of floater’s Hydrodynamics on the performance of tightly moored wave energy converters”*, *Journal IET Renewable Power Generation*, Vol. 4, No. 6, p. 531 – 544, 2010.
- [46] Mavrakos, S., Chatjigeorgiou, I., Mazarakos, T., Konispoliatis D., Maron, A., *“Hydrodynamic forces and wave run-up on concentric vertical cylinders forming piston-like arrangements”*, 26th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Athens, Greece, 2011.
- [47] Mavrakos, S.A., Chatjigeorgiou, I.K., *“Second-order hydrodynamic effects on an arrangement of two concentric truncated vertical cylinders”*, *Marine Structures*, Vol. 22, No. 3, p. 545 – 575, 2009.
- [48] Yu, Y.H., Li, Y., *“A RANS Simulation of the Heave Response of a Two-Body Floating-Point Wave Absorber”*, ISOPE, Hawaii, 2011.
- [49] Weber, J, Mouwen, F., Parish, A., Robertson, D., *“Wavebob—research & development network and tools in the context of system engineering”*, 8th European Wave Tidal Energy Conference, Uppsala, 2009.
- [50] McIver, P., *“Some hydrodynamic aspects of arrays of wave-energy devices”*, *Applied Ocean Research*, Vol. 16, p. 61-69, 1994.
- [51] Mavrakos, S.A., McIver, P., *“Comparison of methods for computing hydrodynamic characteristics of arrays of wave power devices”*, *Applied Ocean Research*, Vol. 19, p. 283-291, 1998.
- [52] Mavrakos, S.A., Kalofonos, A., *“Power absorption by arrays of interacting vertical axisymmetric wave-energy devices”*, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 119, p. 244-251, 1997.

- [53] Fitzgerald, C., Tomas, G., “A preliminary study on the optimal formation of an array of wave power devices”, 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [54] Margheritini, L., Vicinanza, D., Frigaard, P., “SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device”, *Renewable Energy*, Vol. 34, p. 1371-1380, 2009.
- [55] Paul Evans, “Oyster ocean power system to provide 1 GW by 2020”, newatlas.com, 8 March 2009. [Online]. Available: <https://newatlas.com/oyster-ocean-power-system/11180/>. [Accessed 23 May 2021].
- [56] OpenEI, “Langlee Wave Energy Converter”, [Online]. Available: [https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Technology\\_Database/Devices/Langlee\\_Wave\\_Energy\\_Converter](https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Technology_Database/Devices/Langlee_Wave_Energy_Converter). [Accessed 23 May 2021].
- [57] Aw-energy, “WaveRoller”, [Online]. Available: <https://aw-energy.com/waveroller/>. [Accessed 17 May 2021].
- [58] Verdict Media Limited, “Pelamis, World’s First Commercial Wave Energy Project, Agucadoura”, *Power Technology*, 2021. [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/>. [Accessed 17 May 2021].
- [59] Prado, M., Gardner, F., “Deployment of AWS”, In: *Coordinated Action in Ocean Energy*, Amsterdam, 2006.
- [60] Peixe, J., “Australia Set to Deploy the World’s Largest Wave Energy Device”, oilprice.com, 29 October 2013. [Online]. Available: <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Australia-Set-to-Deploy-the-Worlds-Largest-Wave-Energy-Device.html>. [Accessed 17 May 2021].
- [61] Ocean Energy, “Products - oe12”, Ocean Energy, 2020. [Online]. Available: <https://oceanenergy.ie/oe12/>. [Accessed 17 May 2021].
- [62] Konispoliatis, D., Mavrakos, S., “Hydrodynamics of arrays of OWC’s devices constituting of concentric cylinders restrained in waves”, 10th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013), International Conference Ocean , Aalborg, Denmark, 2013.
- [63] Konispoliatis, D.N., Mavrakos, S.A., Mazarakos, T.P., “Hydrodynamic analysis of three-unit arrays of floating annular oscillating–water–column wave energy converters”, *Applied Ocean Research* , Vol. 61, p. 42-64, 2016.
- [64] Konispoliatis, D.N., Mavrakos, S.A., “Hydrodynamic analysis of an array of interacting free-floating oscillating water column (OWC’s) devices”, *Ocean Engineering*, Vol. 111, p. 179 - 197, 2016.
- [65] Kokkinowrachos, K., Mavrakos, S.A., Asorakos, S., “Behavior of vertical bodies of revolution in waves”, *Ocean Engineering*, Vol. 13, No. 6, p. 505 - 538, 1986.
- [66] Mavrakos, S.A., “Wave loads on a stationary floating bottomless cylindrical body with finite wall thickness”, *Applied Ocean Research*, Vol. 7, No. 4, p. 213-224, 1985.
- [67] Mavrakos, S. A., “Hydrodynamic Coefficients for a thick-walled bottomless cylindrical body floating in water of finite depth”, *Ocean Engineering*, Vol. 15, No. 3, p. 213-229, 1988.
- [68] Mavrakos, S.A., “Hydrodynamic characteristics of floating toroidal bodies”, *Ocean Engineering*, Vol. 24, No. 4, p. 381-399, 1997.
- [69] Faltinsen, O.M., “Sea loads on ships and offshore structures”, Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 1992.

- [70] Silverman, S., Abrmanson, N.H., “*Lateral sloshing in moving containers*”, The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, Washington, D.C.: NASA, 1966.
- [71] “*Fossil fuel*”, Wikipedia, 2021. [Online]. Available: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%81%CF%85%CE%BA%CF%84%CE%AC\\_%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%81%CF%85%CE%BA%CF%84%CE%AC_%CE%BA%CE%B1%CF%8D%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1). [Accessed 17 May 2021].
- [72] Μαυράκος, Σ.Α., Χατζηγεωργίου, Ι.Κ., “*Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών*”, ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- [73] Mavrakos, S.A., Papazoglou, V.J., Triantafyllou, M.S., Chatjigeorgiou, J., “*Deep Water Mooring Dynamics*”, Marine Structures, 9, 1996, 181-209.
- [74] Mavrakos, S.A., Chatjigeorgiou, J., “*Dynamic behavior of deep water mooring lines with submerged buoys*”, Computers and Structures, 64 (1 – 4), 1997, 819 – 835.
- [75] Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., “*Comparative evaluation of numerical schemes for 2D mooring dynamics*”, International Journal of Offshore and Polar Engineering. 10(4), 2000, 301-309.
- [76] Mavrakos, S.A., Chatjigeorgiou, J., “*Mooring-induced damping on floating structures*”, Proceedings, 1<sup>st</sup> International Conference on Marine Industry (MARIND’ 96), Varna Bulgaria, 1996, Vol. II, 365-378.
- [77] Konispoliatis, D.N., Mavrakos, A.S., Mavrakos.S.A, Chatjigeorgiou, I.K. “*Effect of moorings on the efficiency of a floating Oscillating Water Column Device*”. 14<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference Series (EWTEC 2021), Plumouth, U.K.
- [78] Evans, D.V.; Porter, R., “*Efficient calculation of hydrodynamic properties of O.W.C type devices*”, In Proceedings of 15<sup>th</sup> Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1996), Part B, pp.123 – 132; Florence, Italy, 16–20 June 1996.
- [79] Cruz, J. “*Ocean wave energy*”, Springer, 2010, Berlin, Heidelberg, Germany.
- [80] Babarit, A. “*A database of capture width ratio of wave energy converters*”, Renewable Energy 80 (2015) 610 – 628.
- [81] DNVGL-RP-C205, “*Environmental conditions and environmental loads, Recommended Practice*”, October 2010.
- [82] Vijfhuizen W., 2006, “*Design of wind and wave power barge*”, Master Thesis.
- [83] “*REFOS Project*”, European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation Programme, [Online]. Available: [www.refos-project.eu](http://www.refos-project.eu). [Accessed 31 May 2021]..
- [84] “*Google Maps*”, Google, 2021. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/place/35%C2%B020'24.0%22N+26%C2%B048'00.0%22E/@37.2474761,22.8970269,6.92z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d35.34!4d26.8>. [Accessed 31 May 2021].