



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Υδροδυναμική παραμετρική διερεύνηση της
επίδρασης της γεωμετρίας θαλάμου πλωτής
συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας
ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στην απόδοσή
της**

**Hydrodynamic parametric investigation of the
chamber's geometry on the efficiency of floating
Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy
Devices**

Διπλωματική εργασία

Ανάργυρου Σ. Μαυράκου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Κ. Χατζηγεωργίου

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Υδροδυναμική παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας θαλάμου πλωτής συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στην απόδοσή της” αποτελεί μια προσπάθεια να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας του θαλάμου ταλάντωσης της υδάτινης στήλης στην απόδοση πλωτών κυματικών μετατροπέων του τύπου της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (Oscillating Water Column, OWC) που έχουν εκ περιστροφής συμμετρική γεωμετρία με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας.

Εξετάστηκαν θάλαμοι, απλής, σύνθετης κυλινδρικής, σφαιρικής και κωνικής γεωμετρίας, καθώς και θάλαμοι με απλές ή και επάλληλες ομοαξονικές δακτυλιοειδείς επιφάνειες ταλάντωσης της υδάτινης στήλης. Προσδιορίστηκαν οι δυνάμεις διέγερσης σε κάθε συσκευή, οι υδροδυναμικοί συντελεστές, οι περιοχές που εμφανίζονται συντονισμοί της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό των θαλάμων ταλάντωσης, καθώς και οι αντίστοιχες αναμενόμενες ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας στο εσωτερικό τους. Από την σύγκριση της σχετικής ανύψωσης της υδάτινης στήλης μέσα σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες γεωμετρίες εκτιμάται η βέλτιστη γεωμετρία της κυματικής μηχανής για τη μεγιστοποίηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας.

Κατά την διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας του θαλάμου της πλωτής συσκευής ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης στην απόδοσή της, η συσκευή υποτέθηκε ακίνητη (restrained) υπό την επίδραση των θαλάσσιων κυματισμών και ανοικτού θαλάμου. Για την υδροδυναμική ανάλυση των συσκευών χρησιμοποιήθηκαν υπάρχοντα λογισμικά πακέτα του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που επιλύουν τα προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας για τυχαίας μορφής εκ περιστροφής συμμετρικών σωμάτων με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας (υπολογιστικό πρόγραμμα “CYLINDER”), καθώς και για ομόκεντρους (concentric), ανεξάρτητα κινούμενους κυλίνδρους (υπολογιστικό πρόγραμμα “CON.CYLINDER”). Μέσω της περαιτέρω επέκτασης του υπολογιστικού προγράμματος “CON.CENTRIC”, εξετάστηκε η επίδραση της γεωμετρίας κάθε ενός συμμετέχοντος σώματος στην ομόκεντρη διάταξη κυλίνδρων στην θέση της συχνότητας συντονισμού της υδάτινης στήλης που περικλείουν και υπολογίστηκε η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε αυτή.

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, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την ανάλυση των μετατροπέων κυματικής ενέργειας ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης που μελετήθηκαν. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων και προτείνονται μελλοντικές έρευνες.

Abstract

The present diploma thesis entitled as "Hydrodynamic parametric investigation of the effect of the chamber's geometry of Floating Oscillating Water Column Wave Energy Devices in their performance" is an attempt to investigate the influence of the geometry of the water column oscillation chamber on the performance of floating wave energy converters of the type of the Oscillating Water Column (OWC) having a rotationally symmetrical geometry with a vertical axis of symmetry.

Chambers of simple, composite cylindrical, spherical and conical geometry are examined as well as chambers with single or even coaxial annular oscillation surfaces of the water column. Wave exciting forces on each device are determined, along with the hydrodynamic coefficients, the wave frequencies where resonances of the water column inside the chambers appear, as well as the corresponding expected elevations of the free surface inside them. From the comparison of relative elevation of the water column in each of the geometries under consideration, the most efficient geometry of the device's oscillating chamber is also assessed.

When investigating the effect that the chamber geometry on its performance has, the device is assumed to be restrained under the influence of sea waves with an open chamber to the atmosphere. For the hydrodynamic analysis of the devices, existing in-house software of the Laboratory of Floating Structures and Mooring Systems of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of the National Technical University of Athens is being used, which solves the diffraction and radiation problems for arbitrarily shaped vertical axisymmetric bodies (software "CYLINDER"), as well as for concentric, independently moving cylinders (software "CON.CYLINDER"). Through the further expansion of the "CON.CENTRIC" software, the effect of the geometry of each cylindrical body, that is a part of a multi-concentric cylinder arrangement, on the location of the resonance frequency of the trapped water column inside the oscillating chamber is examined and the elevation of the free surface is being calculated.

The first chapter of the present manuscript, is dealing with a brief description/introduction of the renewable energy sources. Subsequently, the second chapter refers to the technologies of the wave energy recovery mechanisms/devices, whereas, the third chapter presents the theoretical background of the method used for the hydrodynamic analysis of the devices under consideration. In the fourth chapter the numerical results concerning the analysis of the investigated oscillating water column devices waves are presented. Finally, the fifth chapter presents the final conclusions and proposes future research.

Ευχαριστίες

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

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών 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 στους Καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου, κ.κ. Γρ. Γρηγορόπουλο και Γ. Τριανταφύλλου ως μέλη της τριμελούς επιτροπής της 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.

Ακόμη ευχαριστίες οφείλω στον κ. Θωμά Π. Μαζαράκο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Τον ευχαριστώ για τον απεριόριστο χρόνο που μου αφιέρωσε καθώς και για τη διάθεση που επεδείκνυε σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής πορείας μου, ώστε να με καθοδηγήσει επιστημονικά.

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	19
1.4.1	Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ	19
1.4.2	Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ	19
1.5	Εξεταζόμενες ΑΠΕ.....	20
2	Συσκευές Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Σ.Α.Κ.Ε.).....	21
2.1	Κυματική ενέργεια	21
2.2	Κυματικό δυναμικό	22
2.2.1	Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών.....	22
2.2.2	Κατανομή κυματικού δυναμικού	23
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας .	25
2.3.1	Πλεονεκτήματα	25
2.3.2	Μειονεκτήματα	26
2.4	Ιστορική αναδρομή Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας.....	28
2.5	Τεχνολογίες Συσκευών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας	29
2.5.1	Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers).....	31
2.5.2	Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης (Oscillating Wave pitch Converter)	35
2.5.3	Συσκευές Υπερχείλισης του Νερού (Overtopping Device).....	35
2.5.4	Pelamis	38
2.5.5	Βυθισμένες Συσκευές Διαφοράς Πίεσης (Submerged Pressure Differential). 39	
2.5.6	Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)	40
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο	44
3.1	Γενικά.....	44
3.2	Διατύπωση του υδροδυναμικού προβλήματος πρώτης τάξης (προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας).....	46
3.3	Γραμμικοποιημένες οριακές συνθήκες.....	47
	Οριζόντια όρια.....	48
	Κατακόρυφα όρια	49

3.4	Δυναμικά ταχύτητας περίθλασης και ακτινοβολίας για διαφορετικούς τύπους δακτυλιοειδών στοιχείων.....	50
3.5	Περίπτωση συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης με θαλάμους αποτελούμενους από ομόκεντρους κυλίνδρους.....	53
3.6	Δυνάμεις διέγερσης και υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης	54
3.7	Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.....	57
4	Κώδικας υπολογισμού	59
4.1	Περιγραφή των παραμέτρων του αρχείου δεδομένων.....	59
4.2	Περιγραφή αρχείου εξαγόμενων αποτελεσμάτων.....	65
4.3	Γεωμετρικές μορφές θαλάμων συμπίεσης που εξετάστηκαν και αρχεία εισαγωγής δεδομένων προγράμματος cylinder3.f	66
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 1 ^η περίπτωση	69
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 2 ^η περίπτωση	69
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 3 ^η περίπτωση	70
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 4 ^η περίπτωση	70
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 5 ^η περίπτωση	71
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Concentric” για την 4 ^η περίπτωση	71
	Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Concentric” για την 5 ^η περίπτωση	72
5	Αποτελέσματα	73
5.1	Δυνάμεις Διέγερσης	73
5.2	Υδροδυναμικοί Συντελεστές	79
5.3	Ανύψωση Ελεύθερης Επιφάνειας.....	90
6	Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	95
7	Βιβλιογραφία	98

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 εμφάνιση 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^{ου} 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/ΕΚ 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 θερμοκλινοῦς. 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

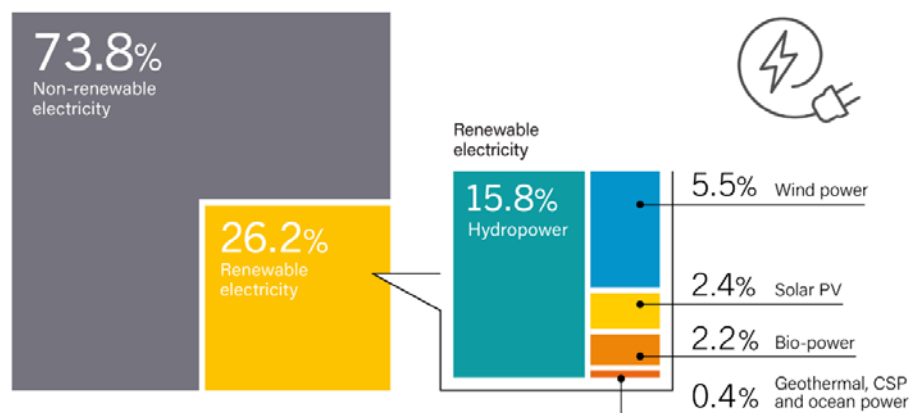
Ως μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι νοούνται οι εξής :

- 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 [67].

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται σύμφωνα με την [3] 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-2018



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

REN21 RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.1 Το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια [3]

1.3 Διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων

Όπως προαναφέρθηκε, 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 βόρεια – 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 παλιρροϊκό δυναμικό ανέρχεται σε 10.000 TWh/yr περίπου, το ενεργειακό δυναμικό που οφείλεται στο θερμοκλινές περίπου σε 44.000TWh/yr και το κυματικό δυναμικό σε 29.500 TWh/yr.

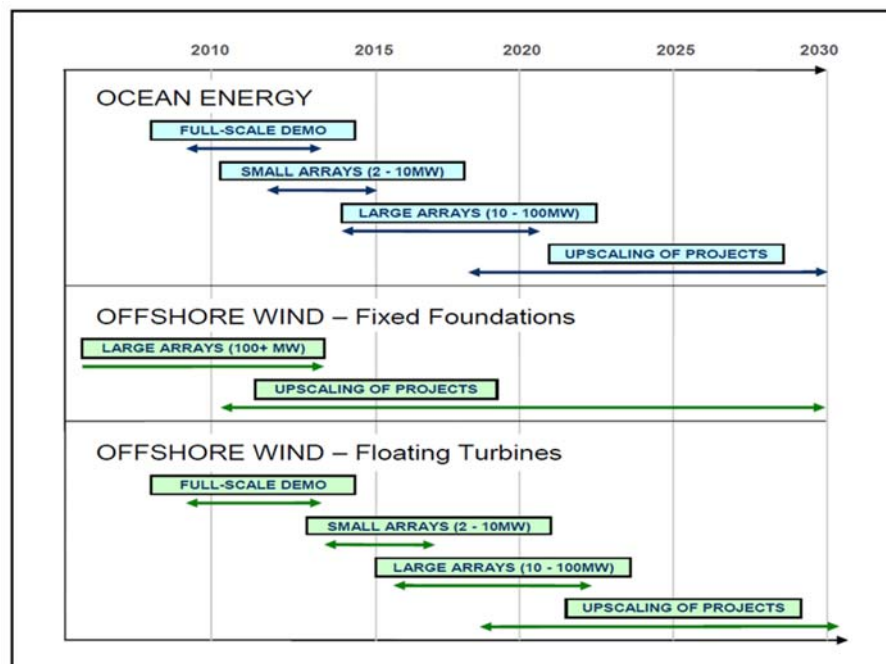
Το παγκόσμια διατιθέμενο ωκεάνιο ενεργειακό δυναμικό ανέρχεται σε περίπου τέσσερις φορές την παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία για το 2008 ήταν 16.819TWh/yr και είναι συγκρίσιμο με το ήμισυ της πρωτογενώς παραγόμενης ενέργειας που για το 2008 ήταν 143.851 TWh/yr [17].

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/y εκ των οποίων εκμεταλλεύσιμα είναι τα 1.170 TWh/y [18], ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο το αντίστοιχο ποσό είναι περίπου 70 TWh/y [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.



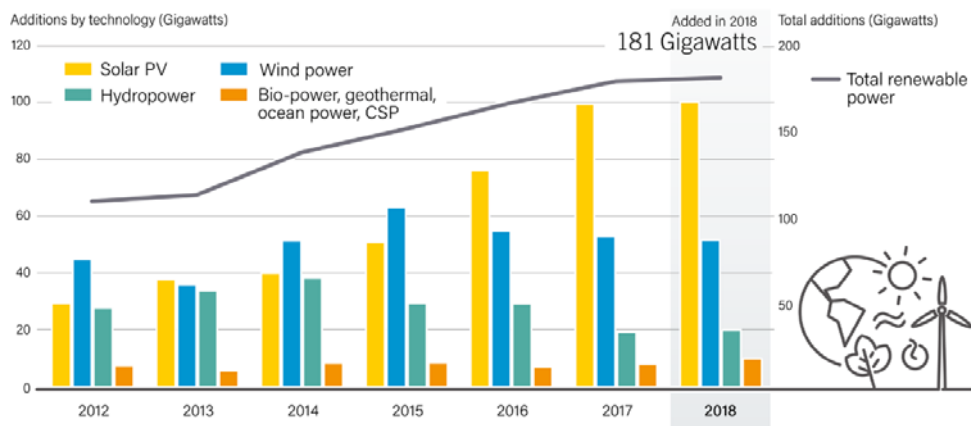
Εικόνα 1.2 Αναμενόμενη εξέλιξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης θαλάσσιων ενεργειακών πόρων [23]

Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζεται σύμφωνα με την [3], η ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου, ενώ στην εικόνα 1.4 σύμφωνα με την ίδια πηγή, 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, 2012-2018

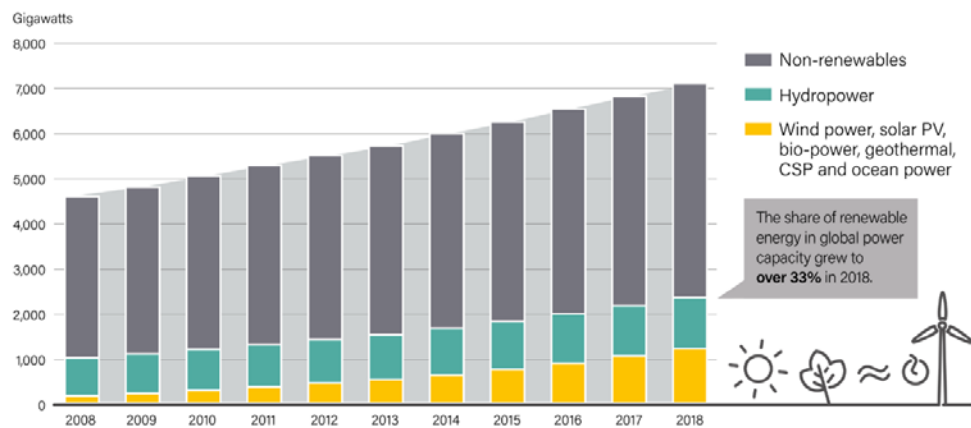


Note: Solar PV capacity data are provided in direct current (DC).

REN21 RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT

Εικόνα 1.3 Η ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ανά κατηγορία ανανεώσιμου ενεργειακού πόρου [3]

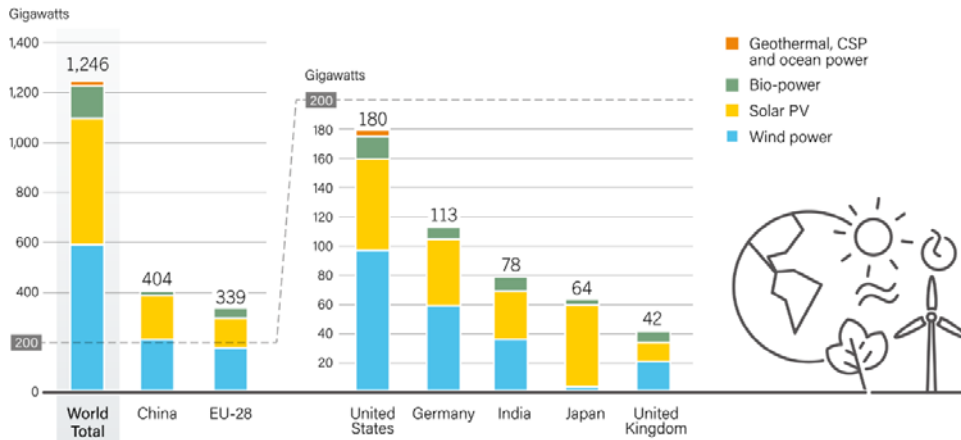
Global Power Generating Capacity, by Source, 2008-2018



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 ποσοστά παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου και τα αντίστοιχα ποσοστά της ενεργειακής κατανάλωσης έχουν αναχθεί σε ισοδύναμους ενεργειακά τόνους πετρελαίου.

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

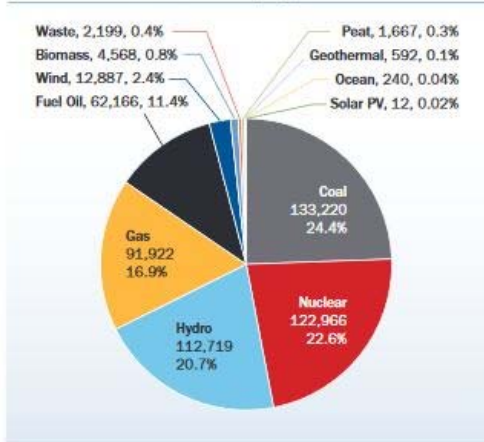
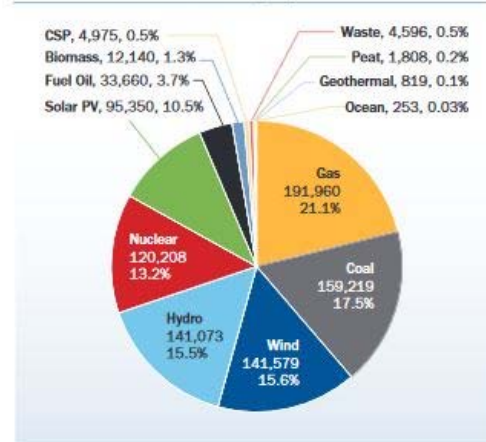


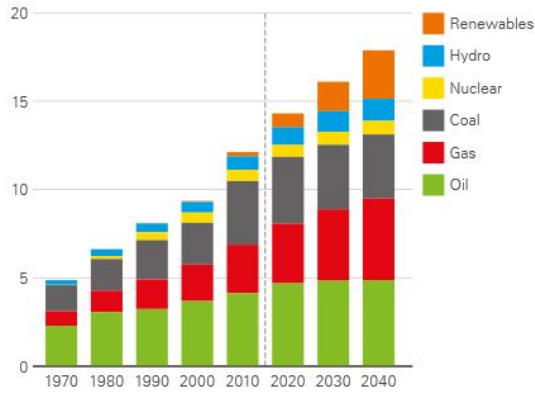
FIGURE 8: EU POWER MIX 2015 (MW)



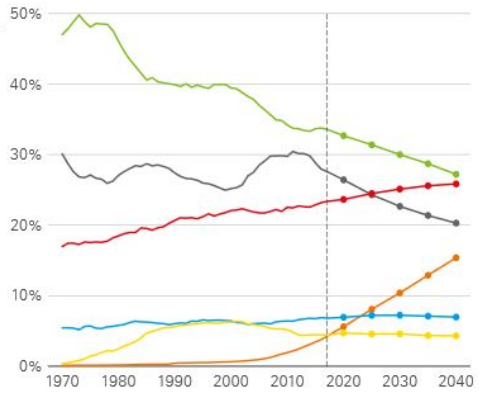
Εικόνα 1.6 Ποσοστά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου στην Ε.Ε. για τα έτη 2000 και 2015 [24]

Primary energy consumption by fuel

Billion toe



Shares of primary energy



Εικόνα 1.7 Προβλεπόμενα ποσοστά παραγόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου, παγκοσμίως για το 2040 και ποσοστά καταναλισκόμενης ενέργειας ανά κατηγορία ενεργειακού πόρου σε παγκόσμιο επίπεδο μετρήσιμα σε δισεκατομμύρια ισοδύναμους ενεργειακά τόνους πετρελαίου. Btoe: billion tons of oil equivalent [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 τεchnοοικονομικά 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 προηγουμένα, 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 Συσσκευές 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:

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

όπου: ρ 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:

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

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.

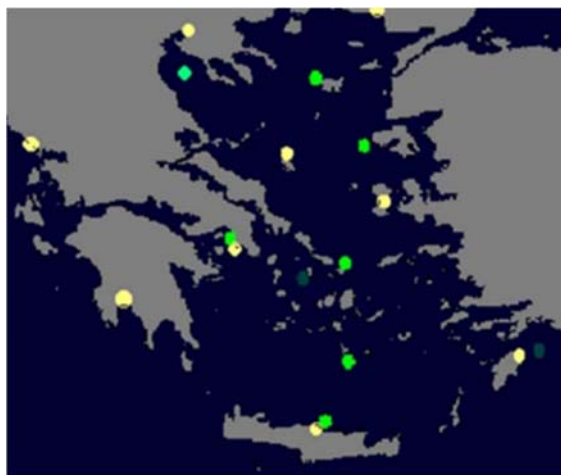
2.2 Κυματικό δυναμικό

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 [27].

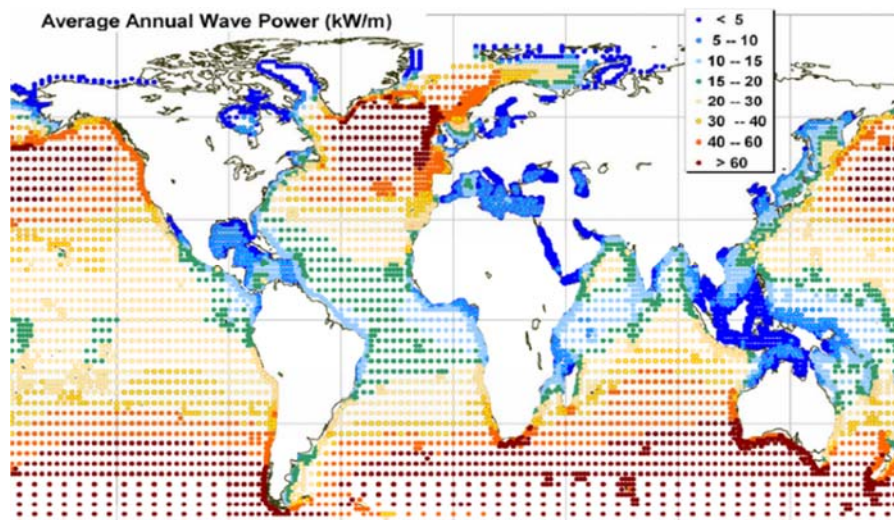


Εικόνα 2.1 Δίκτυο πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών [27]

2.2.2 Κατανομή κυματικού δυναμικού

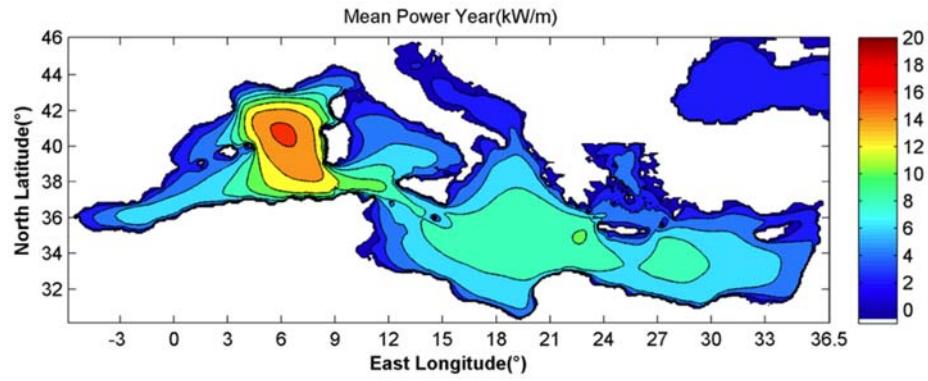
Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.3 το παγκόσμιο κυματικό ενεργειακό δυναμικό εκτιμάται σε 29.500 TWh/yr, εκ των οποίων το 10% βρίσκεται στην Ευρώπη. Οι διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες έχουν γενικά ακτογραμμές με διαφορετική πυκνότητα προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας ανά km ακτογραμμής. Οι διαφορές μπορεί 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 κατανεμημένη 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.

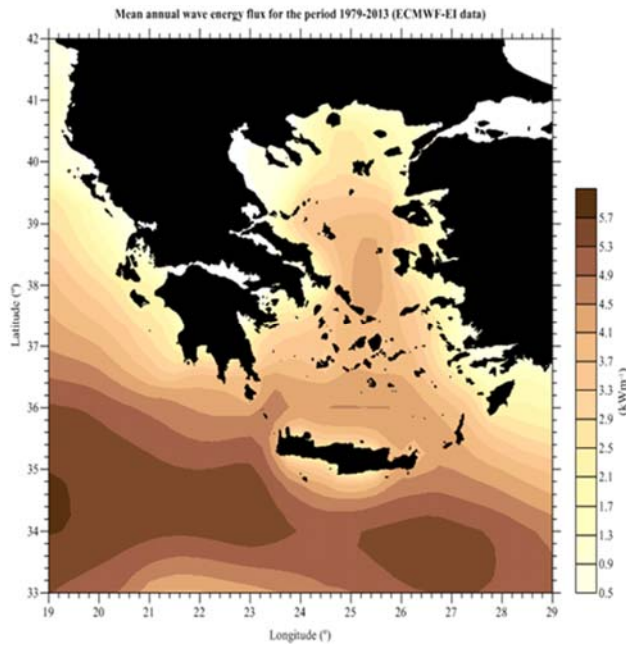


Εικόνα 2.2 Ετήσιο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό [28]

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 [29], 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 [29]



Εικόνα 2.4 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό ανά μήκος μετώπου κύματος [30]

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 [31]. 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 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 [32]
- 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 [32].
- Παρατηρείται μια φυσική εποχική μεταβλητότητα της κυματικής ενέργειας, η οποία ακολουθεί και την ηλεκτρική ζήτηση στα εύκρατα κλίματα [31].
- 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 καλωδίωσης 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 [33] [34]: (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 μετατροπών, 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 [35].

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 [36] σε προγράμματα κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας. Εν τούτοις το ποσοστό της χρηματοδότησης για την έρευνα και την ανάπτυξης 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].

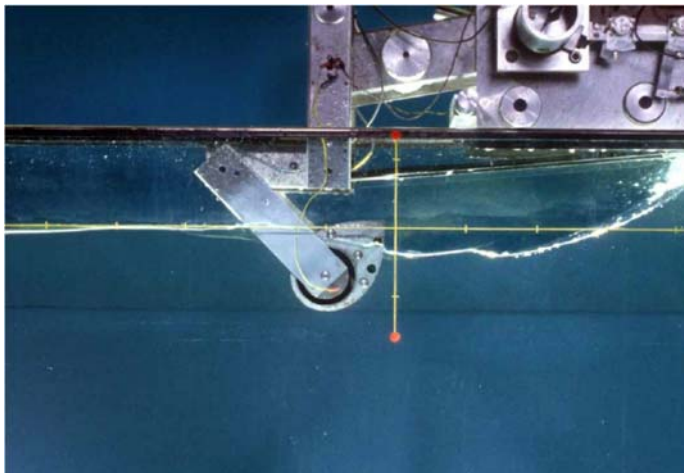
- (iv) διαθεσιμότητα του δικτύου: Η έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου διασύνδεσης της ενέργειας, που μπορεί να οφείλεται στο κανονιστικό πλαίσιο, στην ασυμβατότητα με υπάρχουσες υποδομές ή ακόμα και με την έλλειψη πολιτικής βούλησης δημιουργεί πρόβλημα στην επιτάχυνση της ανάπτυξης των τεχνολογιών και στην 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 Vochaux-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 [32]. 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 [32]

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 [31]. Παρά τον μεγάλο αριθμό συσκευών που διακρίνονται ως προς την σχεδίασή τους, εν τούτοις μπορεί να καταταχθούν σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασή τους και την αρχή λειτουργίας τους.

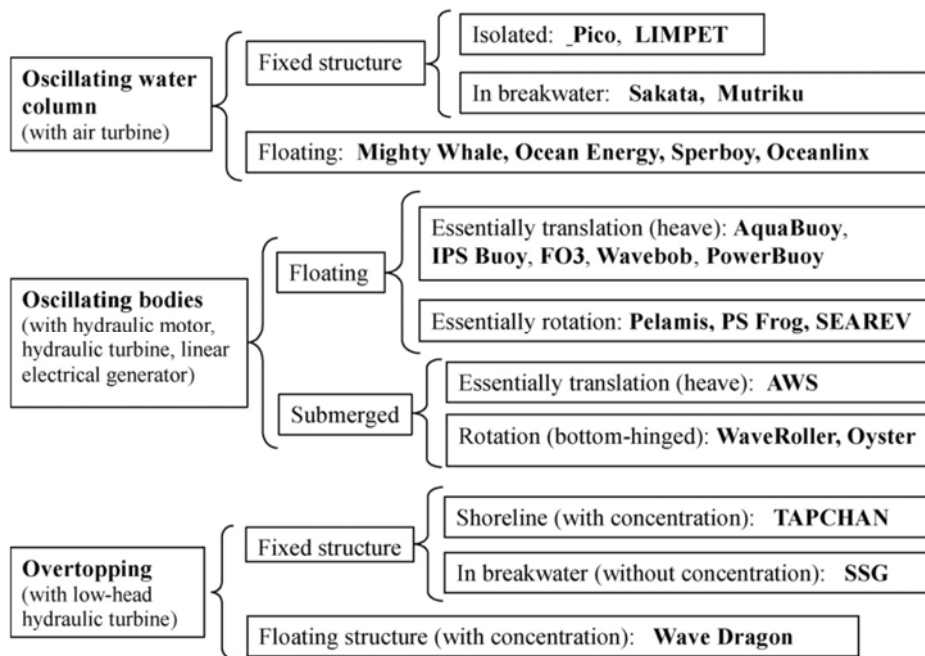
Σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασής τους οι Σ.Α.Κ.Ε διακρίνονται σε:

- (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 [37]:

- (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 [37], 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.



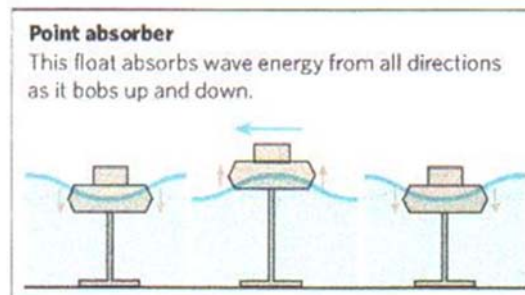
Εικόνα 2.6: Οι κατηγορίες των διαφόρων τεχνολογιών ανάκτησης κυματικής ενέργειας Πηγή [37]

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

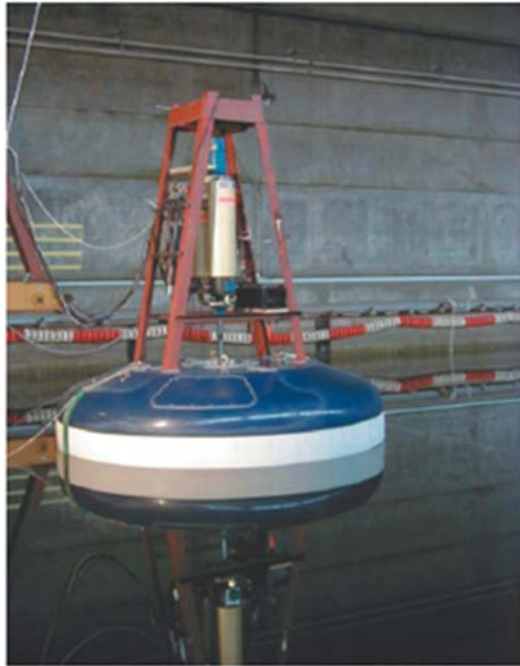
2.5.1 Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers)

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 κοιλιάδα 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 [37].

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 [38].

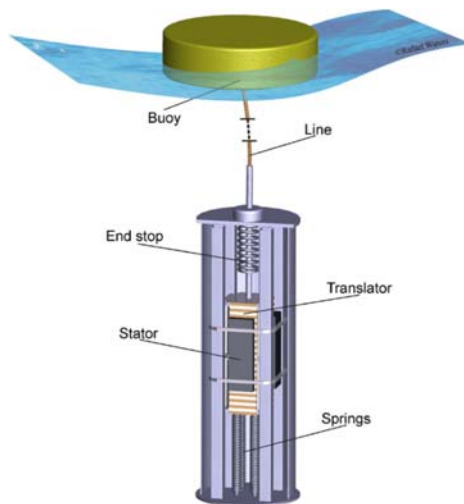


Εικόνα 2.7: Αρχή λειτουργίας σημειακών απορροφητήρων [39]



Εικόνα 2.8: Σημειακός απορροφητήρας με υδραυλικό μηχανισμό απόληψης ενέργειας [38]

Παραλλαγή του σημειακού απορροφητήρα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αποτελεί η διάταξη που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Uppsala [40], 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 [40] 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 [37]

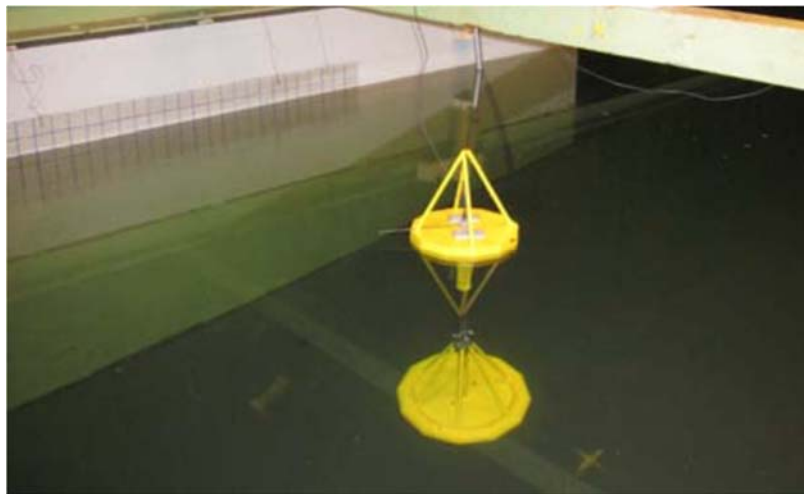
Η διάταξη του ενός καθ' ύψος κινούμενου σώματος που λειτουργεί ως σημειακός απορροφητήρας κυματικής ενέργειας, μπορεί να εμφανίζει δυσκολίες λόγω του βάθους του νερού ή παλιρροϊκών κινήσεων που αυξομειώνουν την στάθμη της θάλασσας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με διατάξεις δυο σωμάτων, στα 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 [41], [42], [43], [44], [45] ενώ εμφανίζουν και ειδικά προβλήματα ελέγχου της μεταξύ τους κίνησής τους [37].

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 [37].



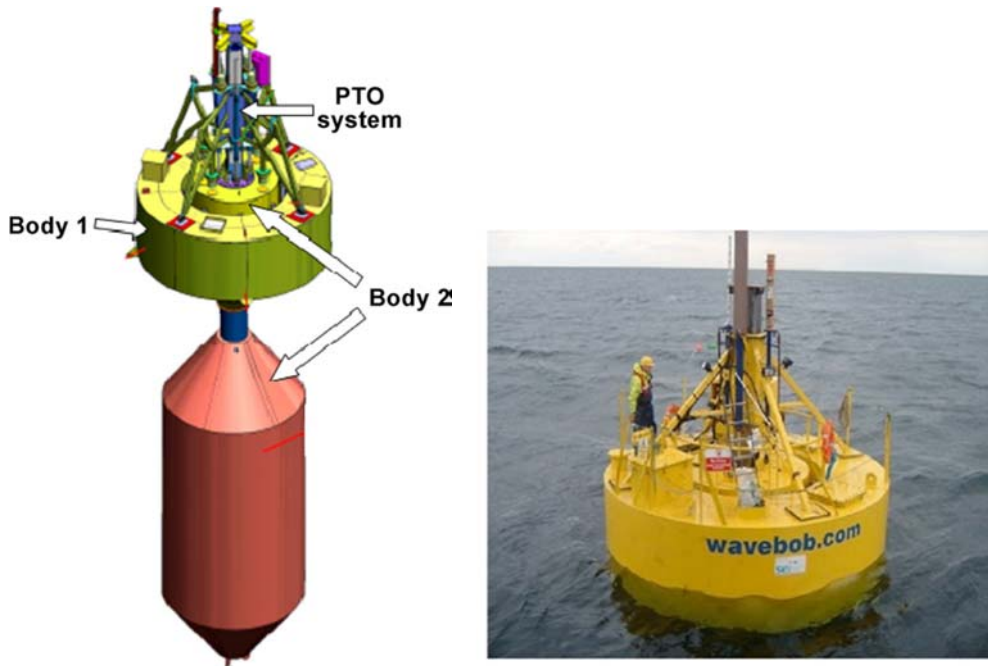
Εικόνα 2.10: Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [46], [37]



Εικόνα 2.11: Υπό κλίμακα διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [46]

Μια άλλη διάταξη δύο καθ' ύψος ταλαντευόμενων σωμάτων είναι ο πλωτήρας που φέρει το όνομα WaveBob [47] 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 [47], [37]

Σε σχέση με τους σημειακούς απορροφητήρες απορρόφησης ενέργειας έχουν γίνει τις τελευταίες δεκαετίες πολλές έρευνες ([48], [49], [50], [51]) 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.

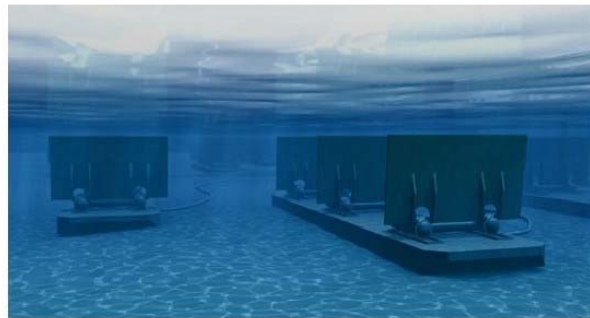
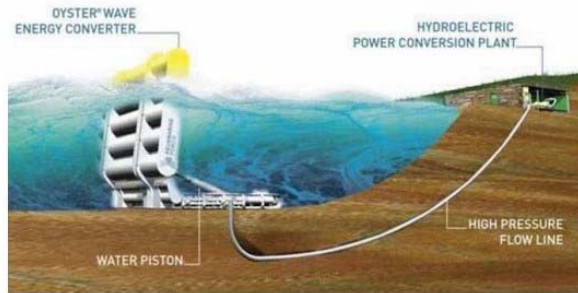
2.5.2 Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης (Oscillating Wave pitch Converter)

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 [39].

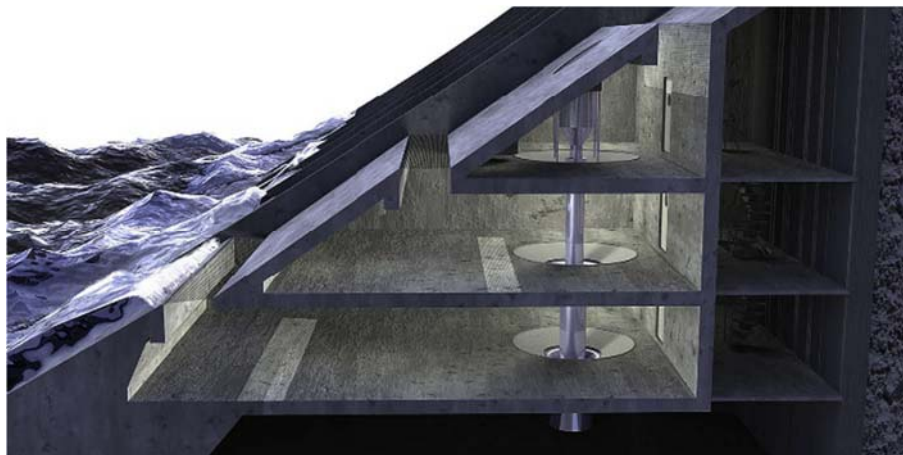
2.5.3 Συσκευές Υπερχείλισης του Νερού (Overtopping Device)

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 υδροστροβίλου, 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 [52] (βλέπε Εικόνα 2.14, για επάκτια κατασκευή) και το Wave Dragon [39] (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, Langlee, Waveroller [53]



Εικόνα 2.14 Επάκτια συσκευή υπερχειλίσσης για την ανάκτηση κυματικής ενέργειας. SSG Wave Energy Converter [52]



Εικόνα 2.15 Υπεράκτια συσκευή υπερχειλίσας για την ανάκτηση κυματικής ενέργειας. Wave Dragon [39]

2.5.4 Pelamis

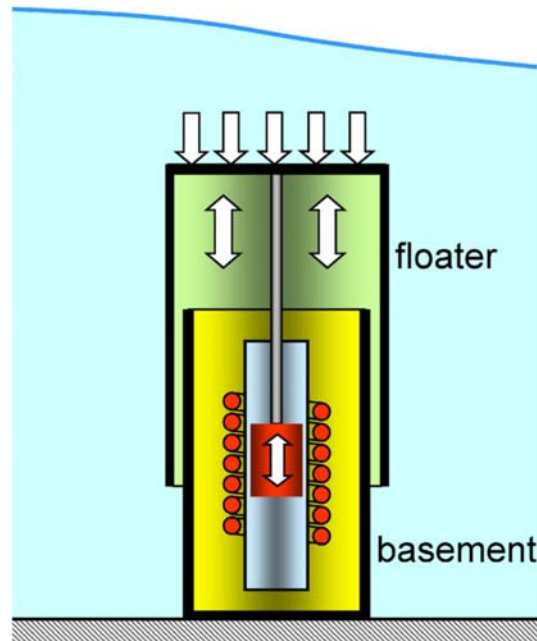
Ανήκει στην κατηγορία των ταλαντευόμενων συσκευών, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της Εικόνας 2.6 πιο πάνω, και έχει αναπτυχθεί από την Power Technologies [54]. Χαρακτηριστική μορφή της παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16. Αποτελείται από ενωμένα μεταξύ τους κυλινδρικά τμήματα μεγάλου μήκους και μικρής μετωπικής 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 [54]

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 [37]

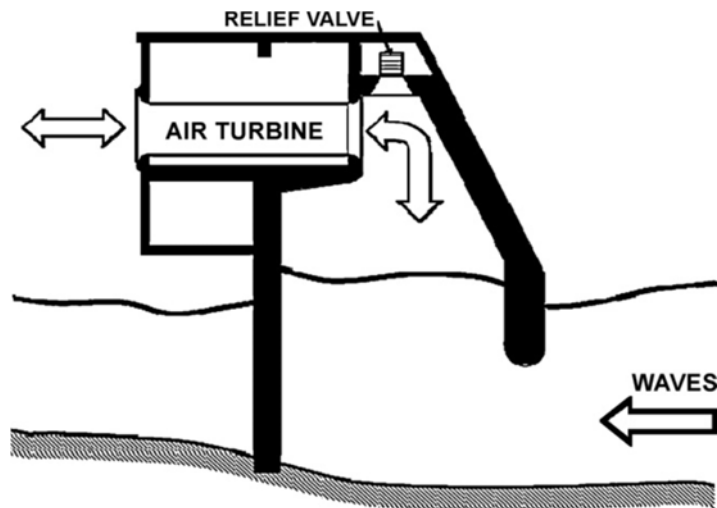
Ο πλωτήρας «αντιλαμβάνεται» τη διαφοροποίηση στη πίεση που του ασκείται, ανάλογα αν βρίσκεται κάτω από την κορυφή ή την κοιλάδα του κύματος. Πιέζεται προς τα κάτω όταν βρίσκεται κάτω από την κορυφή του κύματος και κινείται προς τα πάνω όταν βρίσκεται κάτω από την κοιλάδα του κύματος. Η ελεύθερη καθ' 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) [55]

2.5.6 Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)

Αποτελούν κατασκευές ημβυθισμένες, 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 [37]

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 αεροστροβίλου 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)



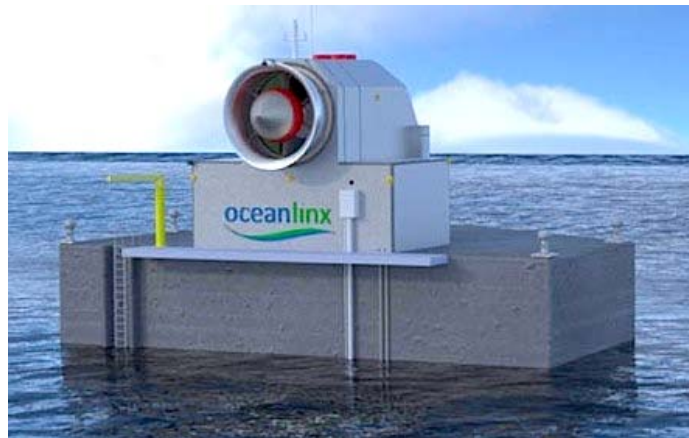
Εικόνα 2.20: Εγκατάσταση στο Pico στις Αζόρες (άνω) και ο αεροστρόβιλος της εγκατάστασης (κάτω) [39]

- (ii) Η εγκατάσταση Limpet OWC που αναπτύχθηκε από την WaveGen Ltd (UK) [39] 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)

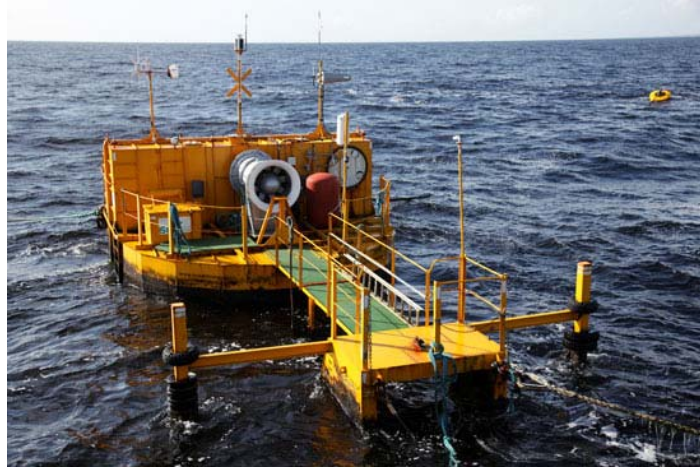


Εικόνα 2.21: Εγκατάσταση Limpet OWC στο νησί Islay [39]

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).

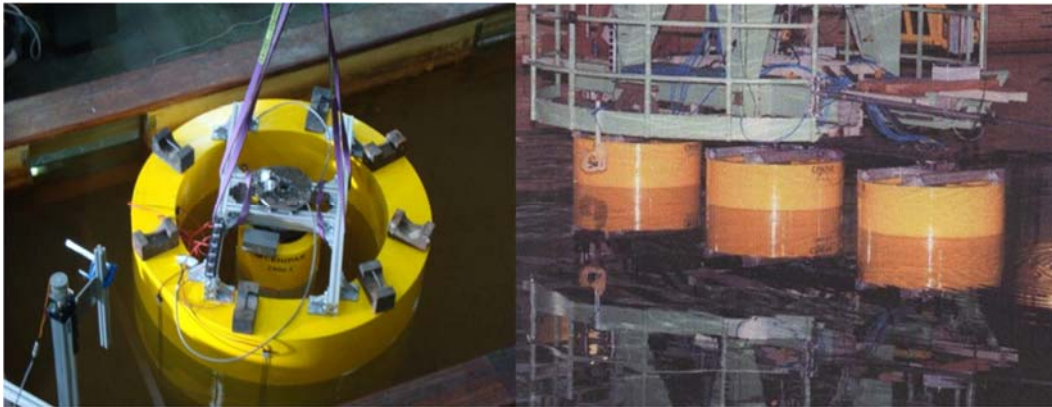


Εικόνα 2.22: Πλωτή συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης Oceanlix [56]



Εικόνα 2.23 Πλωτή συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης Ocean Energy Buoy [57]

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 [58], [59], [60].



Εικόνα 2.24 Πλωτή συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης. Θάλαμος δημιουργούμενος από μεμονωμένους ή συστοιχία ομοαξονικών κυλίνδρων [44]

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.

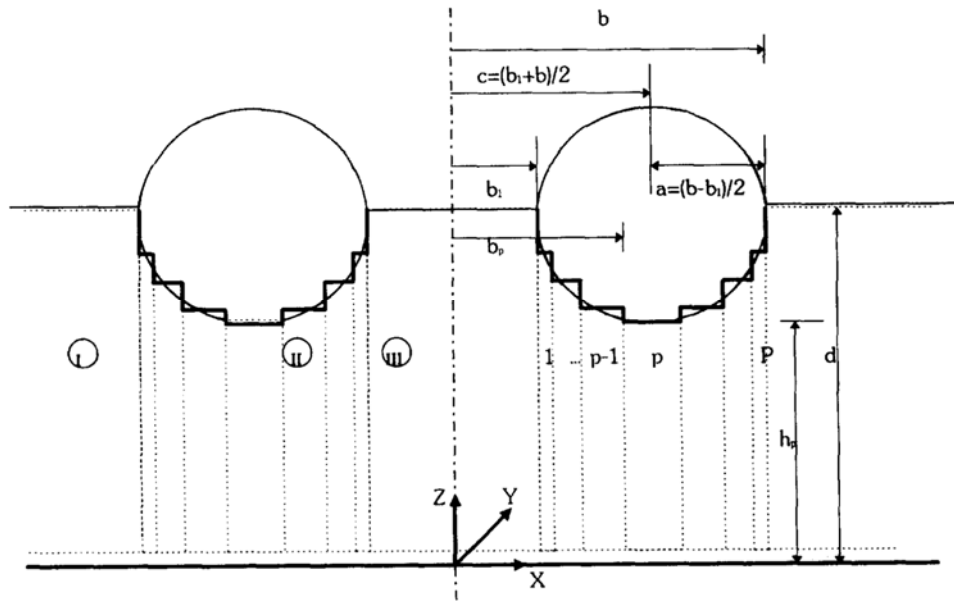
3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

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 στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης του νερού (oscillating water column – OWC), με στόχο να εκτιμηθεί η επίδραση της γεωμετρίας του θαλάμου ταλάντωσης του νερού στην απόδοση των συσκευών. Οι συσκευές που εξετάζονται είναι εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, όπως και οι θάλαμοι ταλάντωσης της υδάτινης στήλης.

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 [61]. Στην παρούσα εργασία, με δεδομένο ότι έχουμε να αντιμετωπίσουμε την περίπτωση τυχαίας μορφής 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 [61] και θα επεκτείνουμε τη μεθοδολογία όπως παρουσιάστηκε στις [62], [63], [64] 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 τα οποία δημιουργούνται όταν προσεγγίζουμε την γενέτειρα του σώματος με κατάλληλη «κλιμακοειδή» καμπύλη (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 «απείρου 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 3.1).



Σχήμα 3.1: Διαχωρισμός ροής γύρω από τυχαίας μορφής αξονοσυμμετρικό σώμα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας και εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια [64]

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

Θεωρούμε ένα ελεύθερα επιπλέον εκ περιστροφής συμμετρικό στερεό σώμα, όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1, το οποίο δέχεται προσπίπτοντα αρμονικό κυματισμό. Για την περίπτωση κατασκευής αυτής της μορφής, εισάγεται ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση, έχει την αρχή του στον πυθμένα της θάλασσας. Επίσης θεωρούμε ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο και ότι τα φαινόμενα συνεκτικότητας δεν λαμβάνονται υπόψη. Θεωρείται ότι το βάθος του νερού d , είναι σταθερό και ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι άπειρη προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι κινήσεις του σώματος 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 κατανομημένη 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, z_3) και μια περιστροφή γύρω από τον άξονα z_5, 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 [61]:

$$\Phi(r, \vartheta, z, t) = \phi_0(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t} + \phi_7(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t} + \sum_{j=1,3,5} \dot{x}_{j0} \phi_j(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t} \quad (3.1)$$

όπου $\phi_0(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t}$ είναι το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος απλού αρμονικού κυματισμού, $\phi_7(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t}$ είναι το δυναμικό σκέδασης (scattered wave potential) γύρω από το σώμα όταν αυτό είναι ακίνητο στον κυματισμό, $\phi_j e^{-i\omega t}$, ($j = 1, 3, 5$) είναι το δυναμικό ακτινοβολίας, το οποίο προκύπτει από την εξαναγκασμένη κίνηση του σώματος στην j -διεύθυνση της κίνησης με μοναδιαίο πλάτος ταχύτητας και \dot{x}_{j0} είναι το μιγαδικό πλάτος ταχύτητας της κίνησης του σώματος στην j -διεύθυνση.

Το δυναμικό της περίθλασης (diffraction potential) περιγράφεται:

$$\Phi_D(r, \vartheta, z, t) = \phi_D e^{-i\omega t} = (\phi_0 + \phi_7) e^{-i\omega t} \quad (3.2)$$

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

$$\phi_0(r, \vartheta, z) e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2k} \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m J_m(kr) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (3.3)$$

όπου J_m είναι συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και m τάξης και ϵ_m είναι το σύμβολο του Neumann για το οποίο ισχύει :

$$\epsilon_0 = 1, \epsilon_m = 2(m \geq 1) \quad (3.4)$$

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

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.5)$$

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

$$\phi_D e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2} \left[\sum_{m=0}^x \epsilon_m i^m \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (3.6a)$$

ενώ τα δυναμικά ακτινοβολίας γράφονται :

$$\phi_j e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2} \left[\sum_{m=0}^x \epsilon_m i^m \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) \right]_{j=1,3,5} e^{-i\omega t} \quad (3.6b)$$

Η ροή του ρευστού, που προκαλείται από την ταλαντωτική κίνηση του σώματος, σε ήρεμο νερό για την περίπτωση εξαναγκασμένης κίνησής του στον xz' -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, $j=3$). Για το λόγο αυτό τα αντίστοιχα δυναμικά ταχύτητας για τις τρεις γενικευμένες κινήσεις, μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\phi_1 e^{-i\omega t} = \psi_{11}(r, z) \cos \vartheta e^{-i\omega t} \quad (3.7)$$

$$\phi_3 e^{-i\omega t} = \psi_{30}(r, z) e^{-i\omega t} \quad (3.8)$$

$$\phi_5 e^{-i\omega t} = \psi_{51}(r, z) \cos \vartheta e^{-i\omega t} \quad (3.9)$$

Στις συναρτήσεις ψ_{jm} των εξισώσεων (3.6) - (3.9) ο πρώτος δείκτης $j = D, 1, 3, 5$ 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 ψ_{Dm} ($m = 0, 1, 2, \dots$), ψ_{11} , ψ_{30} και ψ_{51} παραμένουν οι βασικοί άγνωστοι του προβλήματος.

3.3 Γραμμικοποιημένες οριακές συνθήκες

Τα μιγαδικά δυναμικά της ταχύτητας ϕ_j ($j = 0, 1, 3, 5, 7$) (βλέπε Σχέση (3.6a) και (3.6b)) πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω σχέσεις :

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

(εξίσωση Laplace) σε όλο τον όγκο ελέγχου του ρευστού

$$-\omega^2 \varphi_j + g \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{για } z = d \quad (\text{συνθήκη ελεύθερης επιφανείας}) \quad (3.11)$$

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

Επιπλέον τα δυναμικά φ_j με $j = 1, 3, 5, 7$ 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 :

$$\left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} \right|_{S_0} = - \left. \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \right|_{S_0} \quad \text{ή} \quad \left. \frac{\partial \varphi_D}{\partial n} \right|_{S_0} = 0 \quad (3.14)$$

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

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 (κλιμακοειδής προσέγγιση του περιγράμματος της κατασκευής) με την οποία έχει προσεγγιστεί η αξονοσυμμετρική κατασκευή, 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 ακτινοβολίας ($j = 1, 3, 5$) όπως φαίνεται παρακάτω για τα οριζόντια και τα κατακόρυφα όρια της δεξαμενής:

Οριζόντια όρια

Για $p = 1, 2, \dots, P$ $b_{p+1} = b$ (βλέπε Σχήμα 3.1)

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = V_j \quad \text{στο } z = h_p \quad \text{για } b_p \leq r \leq b_{p+1} \quad (3.17)$$

όπου $V_D = V_1 = 0$, $V_3 = 1$ και $V_5 = -r$

Κατακόρυφα όρια

Για $p=1,2,\dots,P(h_0=d)$:

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = U_j \quad \text{στο } r = b_p \text{ για } \min\{h_p, h_{p-1}\} \leq z \leq \max\{h_p, h_{p-1}\} \quad (3.18)$$

$$\text{και στο } r = b \text{ για } h_p \leq z \leq d$$

$$\text{όπου } U_D = U_1 = 0, U_3 = 1, U_5 = (z - e) \quad (3.19)$$

Η εξαναγκασμένη περιστροφική κίνηση της κατασκευής περί τον γ 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:

$$\psi_{jm}^I(b, z) = \psi_{jm}^{(P)}(b, z) \text{ για } 0 \leq z \leq h_p \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \psi_{jm}^I}{\partial r} = \frac{\partial \psi_{jm}^{(P)}}{\partial r} \text{ για } r = b \quad (3.21)$$

$$\psi_{jm}^{(P)}(b_p, z) = \psi_{jm}^{(P-1)}(b_{p-1}, z) \text{ για } 0 \leq z \leq \min\{h_p, h_{p-1}\} \quad (3.22)$$

$$p = 2, 3, \dots, P$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p-1)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} \quad (3.23)$$

$$\psi_{jm}^{III}(b_1, z) = \psi_{jm}^{(1)}(b_1, z) \text{ για } 0 \leq z \leq h_1 \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \psi_{jm}^{III}}{\partial r} = \frac{\partial \psi_{jm}^{(1)}}{\partial r} \text{ για } r = b_1 \quad (3.25)$$

Στην παραπάνω ανάλυση ο εκθέτης p υποδηλώνει μεγέθη που αντιστοιχούν στο p -οστό μακροστοιχείο τύπου II , ενώ οι εκθέτες II και III σχετίζονται με τα «άπειρο»-εξωτερικό μακροστοιχείο και το μακροστοιχείο που αναφέρεται στην εσωτερικό πεδίο ροής.

Ξεκινώντας με την μέθοδο χωριζομένων μεταβλητών της διαφορικής εξίσωσης Laplace, μπορούν να βρεθούν κατάλληλες εκφράσεις για τα δυναμικά ταχύτητας ψ_{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 του εξιδανικευμένου σώματος,

- 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 $\psi_{Dm}, \psi_{11}, \psi_{30}$ και ψ_{51} οι οποίες εισήχθησαν στις εξισώσεις (3.6)-(3.9).

(α) απειροστό δακτυλιοειδές στοιχείο Τύπου I , όπου για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων πιο κάτω η μέγιστη εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου συμβολίζεται με α ($r \geq \alpha, 0 \leq z \leq d$)

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^I(r, z) = g_{jm}^I(r, z) + \sum_{i=0}^{\infty} F_{j,m,i}^{(I)} \frac{K_m(a_i r)}{K_m(a_i \alpha)} Z_i(z) \quad (3.26)$$

με

$$g_{jm}^I(r, z) = \left\{ J_m(kr) - \frac{J_m(ka)}{H_m(ka)} H_m(kr) \right\} \frac{Z_k(z)}{dZ'_k(z)} \quad (3.28)$$

$$g_{11}^I(t, z) = g_{30}^I(r, z) = g_{51}^I(r, z) = 0 \quad (3.29)$$

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

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 διασποράς :

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

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

(b) ρ -οστό δακτυλοειδές στοιχείο Τύπου II ($b_p \leq r \leq b_{p+1}$, $0 \leq z \leq h_p$, $p = 1, 2, \dots, P$)

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

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^{(p)}(r, z) = g_{jm}^{(p)}(r, z) + \sum_{n_p=0}^{\infty} \varepsilon_{n_p} \left[R_{mn_p}(r) F_{j,m,n_p}^{II(p)} + R_{mn_p}^*(r) F_{j,m,n_p}^{*II(p)} \right] \cos\left(\frac{n_p \pi z}{h_p}\right) \quad (3.36)$$

όπου το δ_j προσδιορίζεται στην εξίσωση (3.30).

$$g_{Dm}^{(p)}(r, z) = g_{i1}^{(p)}(r, z) = 0 \quad (3.37)$$

$$g_{30}^{(p)}(r, z) = \frac{z^2 - (1/2)r^2}{2h_p d} \quad (3.38)$$

$$g_{51}^{(p)}(r, z) = \frac{-r[z^2 - (4)r^2]}{2h_p d^2} \quad (3.39)$$

$$R_{m0}(r) = \frac{\left(\frac{r}{b_p}\right)^m - \left(\frac{b_p}{r}\right)^m}{\left(\frac{b_{p+1}}{b_p}\right)^m - \left(\frac{b_p}{b_{p+1}}\right)^m}, R_{m0}^*(r) = \frac{\left(\frac{b_{p+1}}{r}\right)^m - \left(\frac{r}{b_{p+1}}\right)^m}{\left(\frac{b_{p+1}}{b_p}\right)^m - \left(\frac{b_p}{b_{p+1}}\right)^m} \text{ για } n_p = 0 \quad (3.40)$$

$$R_{mn_p}(r) = \frac{K_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) I_m\left(\frac{n_p \pi r}{h_p}\right) - I_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi r}{h_p}\right)}{I_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) - I_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right)}, n_p \neq 0 \quad (3.41)$$

$$R_{mn_p}^*(r) = \frac{I_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi r}{h_p}\right) - K_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right) I_m\left(\frac{n_p \pi r}{h_p}\right)}{I_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) - I_m\left(\frac{n_p \pi b_p}{h_p}\right) K_m\left(\frac{n_p \pi b_{p+1}}{h_p}\right)}, n_p \neq 0 \quad (3.42)$$

(c) Το δυναμικό της ταχύτητας στο εσωτερικό πεδίο ροής τύπου III δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{j,m}^{III}(r, z) = g_{jm}^{III}(r, z) + \sum_{i=0}^{\infty} F_{j,m,i}^{III} \frac{I_m(a_i r)}{I_m(a_i b_1)} Z_i(z) \quad (3.43)$$

όπου

$$g_{Dm}^{III}(r, z) = g_{11}^{III}(r, z) = g_{30}^{III}(r, z) = g_{51}^{III}(r, z) = 0 \quad (3.44)$$

Στην (3.43) οι ορθοκανονικές συναρτήσεις $Z_i(z)$, ορίζονται με την (3.31) και (3.32) για $i = 0$ and $i \geq 1$, αντίστοιχα και a_i δίνονται από την εξίσωση (3.35). Επιπλέον, $F_{j,m,i}^{III}$ είναι οι άγνωστοι συντελεστές Fourier στη περιοχή της ροής III.

Οι συναρτήσεις δυναμικού ψ_{Dm} που εκφράστηκαν μέσω των εξισώσεων (3.27), (3.36) και (3.43) έχουν το πλεονέκτημα ότι ανάγονται για όλες τις οριακές συνθήκες στα κάθετα τοιχώματα $r = b_p$, ($p = 1, 2, \dots, P$) και $r = a$ με απλή σειρά Fourier όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^I(\alpha, z) = \sum_{i=0}^{\infty} F_{D,m,i} Z_i(z), \text{ για } 0 \leq z \leq d \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{d} \Psi_{Dm}^{(p)}(b_p, z) = \sum_{n_p=0}^{\infty} \epsilon_{n_p} F_{D,m,n_p}^{*(p)} \cos\left(\frac{n_p \pi z}{h_p}\right) \quad 0 \leq z \leq h_p \quad (3.46)$$

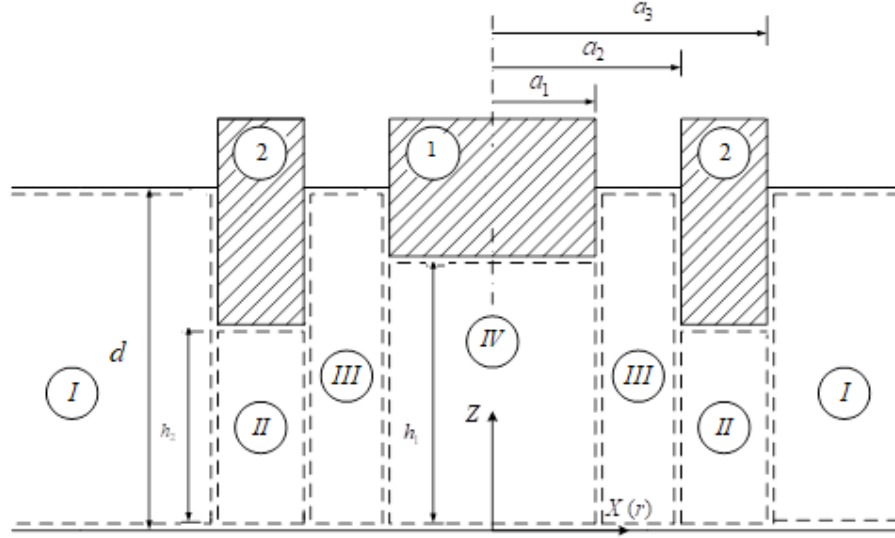
$$\frac{1}{d} \Psi_{Dm}^{(p)}(b_{p+1}, z) = \sum_{n_p=0}^{\infty} \epsilon_{n_p} F_{D,m,n_p}^{(p)} \cos\left(\frac{n_p \pi z}{h_p}\right) \quad 0 \leq z \leq h_p, \quad (3.47)$$

$$\frac{1}{d} \psi_{Dm}^{III}(b_1, z) = \sum_{i=0}^{\infty} F_{D,m,i}^{III} Z_i(z) \quad \text{για } 0 \leq z \leq d \quad (3.48)$$

Επιπλέον οι λύσεις για τις συναρτήσεις ψ_{jm} , ($j = D, 1, 3, 5$) 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 [62], [63], [64] και δεν θα υπεισέλθουμε σε αυτή περαιτέρω.

3.5 Περίπτωση συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης με θαλάμους αποτελούμενους από ομόκεντρους κυλίνδρους

Στη περίπτωση αυτή, η ενδεικτική γενική διάταξη του θαλάμου απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Σε σχέση με την γενική περίπτωση που εξετάσαμε στις παραγράφους 3.2 μέχρι 3.4, ο θάλαμος αυτός έχει ένα πεδίο ροής που συμβολίζεται με το γράμμα *IV*, κάτω από τον μεσαίο κύλινδρο και ένα πεδίο ροής με στον συμβολισμό *III* στο σχήμα 3.2 που δημιουργεί ελεύθερη επιφάνεια στο εσωτερικό του.



Σχήμα 3.2: Διάταξη θαλάμου ταλαντευόμενης στήλης σε συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας που απαρτίζεται από δυο ομόκεντρους κυλίνδρους [42]

Για λόγους πληρότητας, θα δώσουμε τις αναπαραστάσεις του δυναμικού στα πεδία με διακριτικά *IV* και *III*, ο τύπος του οποίων δεν είχε αντιμετωπιστεί προηγουμένα

Για την περιοχή *III* ($\alpha_2 \leq r \leq \alpha_1, 0 \leq z \leq d$)

Η αναπαράσταση της συνάρτησης $\Psi_{jm}^{III,(p)}(r, z)$ δίνεται από τη σχέση [42]:

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{jm}^{III,(p)}(r, z) = f_{jm}^{III,(p)} + \sum_{s=0}^{\infty} [R_{ms}^{III}(r) F_{j,m,s}^{III,(p)} + \tilde{R}_{ms}^{III}(r) \tilde{F}_{j,m,s}^{III,(p)}] Z_s(z), \quad p=1,2 \quad (3.49)$$

Όπου το δ_j έχει οριστεί με την (3.30), και

$$f_{Dm}^{III,(p)}(r, z) = f_{11}^{III,(p)}(r, z) = f_{30}^{III,(p)}(r, z) = f_{51}^{III,(p)}(r, z) = 0 \quad (3.50)$$

$$R_{ms}^{III}(r) = \frac{K_m(\alpha_s a_1) I_m(\alpha_s r) - K_m(\alpha_s r) I_m(\alpha_s a_1)}{K_m(\alpha_s a_1) I_m(\alpha_s a_2) - K_m(\alpha_s a_2) I_m(\alpha_s a_1)}, \quad s \neq 0 \quad (3.51)$$

$$\tilde{R}_{ms}^{III}(r) = \frac{K_m(\alpha_s r) I_m(\alpha_s a_2) - K_m(\alpha_s a_2) I_m(\alpha_s r)}{K_m(\alpha_s a_1) I_m(\alpha_s a_2) - K_m(\alpha_s a_2) I_m(\alpha_s a_1)}, \quad s \neq 0 \quad (3.52)$$

Εδώ I_m είναι οι m τάξης τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel function πρώτου είδους. Ακόμα, $Z_s(z)$ έχουν οριστεί με την (3.31) και (3.32) για $s = 0$ and $s \geq 1$, αντίστοιχα και a_s δίνονται από την εξίσωση Eq. (3.35).

Για την περιοχή τύπου IV ($0 \leq r \leq a_1, 0 \leq z \leq h_1$)

Η συνάρτηση του δυναμικού $\Psi_{jm}^{IV,(p)}(r, z)$ δίνεται από την σχέση:

$$\frac{1}{\delta_j} \Psi_{jm}^{IV,(p)}(r, z) = f_{jm}^{IV,(p)}(r, z) + \sum_{q=0}^{\infty} \varepsilon_q F_{j,m,q}^{IV,(p)} R_{mq}^{IV}(r) \cos\left(\frac{q\pi z}{h_1}\right), \quad p=1,2 \quad (3.53)$$

Όπου το δ_j έχει οριστεί με την (3.30), ε_q έχει οριστεί με την (3.4)

$$R_{mq}^{IV}(r) = I_m\left(\frac{q\pi r}{h_1}\right) / I_m\left(\frac{q\pi a_1}{h_1}\right), \quad q \neq 0 \quad (3.54)$$

$$f_{30}^{IV,(1)}(r, z) = \frac{z^2 - (1/2)r^2}{2(h_1)d}, \quad f_{51}^{IV,(1)}(r, z) = \frac{-r[z^2 - (1/4)r^2]}{2(h_1)d^2} \quad (3.55)$$

$$f_{Dm}^{IV,(p)}(r, z) = f_{11}^{IV,(1)}(r, z) = f_{11}^{IV,(2)}(r, z) = f_{30}^{IV,(2)}(r, z) = f_{51}^{IV,(2)}(r, z) = 0 \quad (3.56)$$

3.6 Δυνάμεις διέγερσης και υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης

Οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται πάνω στη συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης προκύπτουν από την ολοκλήρωση της πίεσης πάνω στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος. Η πίεση δίνεται από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli:

$$P(r, \theta, z; t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \rho \phi e^{-i\omega t} \quad (3.57)$$

όπου ϕ είναι το δυναμικό ταχύτητας της ροής σε κάθε πεδίο I, II, III, IV (βλέπε παραγράφους 3.5 και 3.6)

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:

$$\begin{aligned} F_k(t) &= -\iint_{S_0} p n_k dS = -i\omega \rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \phi_D n_k dS \\ &= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) n_k dS \quad \text{για } k=1,3 \end{aligned} \quad (3.58)$$

Ενδεικτικά για την περίπτωση συσκευής με κοίλο κυλινδρικό θάλαμο ταλάντωσης οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης προκύπτουν από:

$$f_x = f_{x_{out}} - f_{x_{in}} = -i\omega \rho a \int_{z=h}^{z=d} \int_0^{2\pi} \phi^I \cos \theta d\theta dz + i\omega \rho b \int_{z=h}^{z=d} \int_0^{2\pi} \phi^{III} \cos \theta d\theta dz \quad (3.59)$$

$$f_z = -i\omega\rho \int_{r=b}^{r=a} \int_0^{2\pi} \varphi^{II}(-1)rd\theta dr \quad (3.60)$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των δυναμικών $\varphi^i, i=I,II,III$, στις σχέσεις (3.59) και (3.60) προκύπτουν οι ακόλουθες δυνάμεις κατά τη διεύθυνση x και z :

$$\begin{aligned} f_x = & -i2\pi\rho\omega^2 a^2 \frac{H}{2} d \left[N_0^{-1/2} \left(F_{D,1,0}^I - \frac{b}{a} F_{D,1,0}^{III} \right) \left(\frac{\sinh(kd) - \sinh(kh)}{ka} \right) + \sum_{j=1}^{\infty} N_j^{-1/2} F_{D,1,j}^I \left(\frac{\sin(a_j d) - \sin(a_j h)}{a_j a} \right) \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^{\infty} N_i^{-1/2} \frac{b}{a} F_{D,1,i}^{III} \left(\frac{\sin(a_i d) - \sin(a_i h)}{a_i a} \right) \right] [N] \\ f_z = & 2\pi\rho\omega^2 a^2 \frac{H}{2} d \left[\frac{1}{2} F_{D,0,0}^{II} \left(1 - \frac{1-(b/a)^2}{2\ln(a/b)} \right) - \frac{1}{2} F_{D,0,0}^{*II} \left(\left(\frac{b}{a} \right)^2 - \frac{1-(b/a)^2}{2\ln(a/b)} \right) + 2 \sum_{q=1}^{\infty} (-1)^q \left(\frac{h}{q\pi a} \right)^2 \right. \\ & \left. \left[F_{D,0,q}^{II} (A_{0,q}^{II} - D_{0,q}^{II}) + F_{D,0,q}^{*II} (A_{0,q}^{*II} - D_{0,q}^{*II}) \right] \right] [N] \quad (3.61) \end{aligned}$$

όπου οι όροι $A_{0,q}^{II}, A_{0,q}^{*II}, D_{0,q}^{II}, D_{0,q}^{*II}$ υπολογίζονται ως

$$D_{0,q}^{II} = b \left. \frac{\partial R_{0q}^{II}}{\partial r} \right|_{r=b}, \quad D_{0,q}^{*II} = b \left. \frac{\partial R_{0q}^{*II}}{\partial r} \right|_{r=b}, \quad A_{0,q}^{II} = a \left. \frac{\partial R_{0q}^{II}}{\partial r} \right|_{r=a}, \quad A_{0,q}^{*II} = a \left. \frac{\partial R_{0q}^{*II}}{\partial r} \right|_{r=a} \quad (3.62)$$

όπου $R_{0q}^{II}, R_{0q}^{*II}$ υπολογίζονται στις σχέσεις (3.40)- (3.42).

Αντίστοιχα, οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στα εξωτερικά και εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου ταλάντωσης συσκευής, σύνθετης γεωμετρίας, η οποία αποτελείται από ομόκεντρο συμπαγές κυλινδρικό σώμα εντός του θαλάμου ταλάντωσης κοίλης κυματικής συσκευής ισούται με:

$$\begin{aligned} f_x = & f_{x_{OWC_Moonpool}} - i2\pi\rho\omega^2 a^2 \frac{H}{2} d \left[\frac{b_1}{a} N_0^{-1/2} F_{D,1,0}^{*III} \left(\frac{\sinh(kd) - \sinh(kh_1)}{ka} \right) + \frac{b_1}{a} \sum_{j=1}^{\infty} N_j^{-1/2} F_{D,1,j}^{*III} \left(\frac{\sin(a_j d) - \sin(a_j h_1)}{a_j a} \right) \right] \\ & [N] \\ f_z = & f_{z_{OWC_Moonpool}} + 2\pi\rho\omega^2 a^2 \frac{H}{2} d \left[\frac{1}{2} \frac{b_1^2}{a^2} F_{D,0,0}^{IV} + 2 \frac{b_1^2}{a^2} \sum_{q=1}^{\infty} \left(\frac{h_1}{q\pi b_1} \right) F_{D,0,q}^{IV} I_1 \left(\frac{q\pi b_1}{h_1} \right) \right] / I_0 \left(\frac{q\pi b_1}{h_1} \right) [N] \quad (3.63) \end{aligned}$$

όπου οι όροι $f_{x_{OWC_Moonpool}}, f_{z_{OWC_Moonpool}}$ είναι αντίστοιχα οι όροι f_x, f_z στη σχέση (3.61).

Η ροπή ανατροπής της εξεταζόμενης συσκευής 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.

$$F_5 = M_1(t) + M_3(t) \quad (3.64)$$

όπου

$$\begin{aligned}
M_k(t) &= -\iint_{S_0} p(r \times n_k) dS = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \varphi_D(r \times n_k) dS \\
&= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS
\end{aligned} \tag{3.65}$$

Ενδεικτικά για την περίπτωση συσκευής με κοίλο κυλινδρικό θάλαμο ταλάντωσης προκύπτουν οι ακόλουθες ροπές:

$$\begin{aligned}
F_5 &= -i2\pi\rho\omega^2 a^3 \frac{H}{2} d \left[N_0^{-1/2} \left(F_{D,1,0}^I - \frac{b}{a} F_{D,1,0}^{III} \right) \left(k(d-e)\sinh(kd) - k(h-e)\sinh(kh) - \cosh(kd) + \cosh(kh) \right) / (ka)^2 + \right. \\
&+ \sum_{j=1}^{\infty} N_j^{-1/2} F_{D,1,j}^I \left(a_j(d-e)\sin(a_j d) - a_j(h-e)\sin(a_j h) + \cos(a_j d) - \cos(a_j h) \right) / (a_j a)^2 - \frac{b}{a} \sum_{i=1}^{\infty} N_i^{-1/2} F_{D,1,i}^{III} \\
&\left. \left(a_i(d-e)\sin(a_i d) - a_i(h-e)\sin(a_i h) + \cos(a_i d) - \cos(a_i h) \right) / (a_i a)^2 \right] [N \cdot m] \tag{3.66}
\end{aligned}$$

Ενώ για την περίπτωση θαλάμου ταλάντωσης συσκευής ο οποίος συντίθεται από συμπαγές ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα, οι αντίστοιχες ροπές διέγερσης γράφονται:

$$\begin{aligned}
F_5 &= M_{S_{OWC_Moonpool}} -i2\pi\rho\omega^2 a^3 \frac{H}{2} d \left[\frac{b_1}{a} N_0^{-1/2} F_{D,1,0}^{*III} \left(k(d-e)\sinh(kd) - k(h_1-e)\sinh(kh_1) - \cosh(kd) + \cosh(kh_1) \right) / (ka)^2 \right. \\
&+ \left. \frac{b_1}{a} \sum_{j=1}^{\infty} N_j^{-1/2} F_{D,1,j}^{*III} \left(a_j(d-e)\sin(a_j d) - a_j(h_1-e)\sin(a_j h_1) + \cos(a_j d) - \cos(a_j h_1) \right) / (a_j a)^2 \right] \\
&[N \cdot m] \tag{3.67}
\end{aligned}$$

όπου οι όροι $M_{S_{OWC_Moonpool}}$ είναι ο όρος στη F_5 στη σχέση (3.66).

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 :

$$F_k^r(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5}^{\infty} x_{j_0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) n_k dS \text{ για } k=1,3 \tag{3.68}$$

και

$$F_5^r(t) = M_1^r(t) + M_3^r(t) \tag{3.69}$$

με

$$M_k^r(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5}^{\infty} x_{j_0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS \tag{3.70}$$

Η δύναμη αντίδρασης $F_k^T(t)$, εξίσωση (3.68) μπορεί να γραφτεί συναρτήσει των συντελεστών υδροδυναμικής μάζας και απόσβεσης, μέσω της οποίας και υπολογίζονται:

$$f_{ij} = (\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij})e^{-i\omega t} \quad (3.71)$$

3.7 Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δίδεται από τη σχέση:

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

Για $\omega t = 0$ θα γίνει:

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

Για $\omega t = \pi/2$

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

$$\text{Όπου } Z(r, \vartheta, h) = |Z| e^{i\varphi_z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=h} = \frac{i\omega}{g} \varphi(r, \vartheta, h) e^{-i\omega t} \quad (3.72)$$

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:

$$Z^I(r, \theta, d; t) = \text{Re}\{ \zeta^I(r, \theta, d) \cdot e^{-i\omega t} \} = \text{Re}\left\{ \left(\frac{i\omega}{g} \varphi^I(r, \theta, d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\} \quad (3.73)$$

$$Z^{III}(r, \theta, d; t) = \text{Re}\{ \zeta^{III}(r, \theta, d) \cdot e^{-i\omega t} \} = \text{Re}\left\{ \left(\frac{i\omega}{g} \varphi^{III}(r, \theta, d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\} \quad (3.74)$$

Οι σχέσεις (3.73), (3.74) για την περίπτωση κοίλης απλής Σ.Α.Κ.Ε, γράφονται:

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

$$Z^{III}(r, \theta, d; t) = \text{Re}\left\{ \left(\frac{\omega^2 d}{g} \frac{H}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} N_i^{-1/2} \Lambda_{n,i} \frac{I_n(a_i r)}{I_n(a_i b)} \cos(n\theta) \cos(a_i d) \right) \cdot (\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)) \right\} \quad [m] \quad (3.75)$$

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

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

$$\Lambda_{m,j} = \delta_{0,m} \frac{X_{30,g}}{H/2} F_{3,0,j}^{III} + \delta_{1,m} \left(\frac{X_{10,g}}{H/2} F_{1,1,j}^{III} + \frac{d \cdot x_{50}}{H/2} F_{5,1,j}^{III} \right) + \varepsilon_m i^m F_{D,m,j}^{III} \quad (3.76)$$

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας συσκευής OWC, σύνθετης γεωμετρίας, στα εξωτερικά τοιχώματά της υπολογίζεται από τη σχέση (3.73). Αντίστοιχα, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στο θάλαμο ταλάντωσης και στα τοιχώματα του ομόκεντρου κυλινδρικού σώματος, ισούται με:

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

[m] (3.77)

όπου $\Lambda_{n,i}, \Lambda_{n,i}^*, R_{ni}^{III}, R_{ni}^{*III}$ υπολογίζονται στις σχέσεις (3.76) και (3.51), (3.52).

4 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.

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

4.1 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 για την επίλυση του εξωτερικού πεδίου. 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	<p>LBN:</p> <p>=.TRUE. για σώματα που έχουν βρεχόμενη επιφάνεια πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους</p> <p>=.FALSE. για σώματα που δεν έχουν βρεχόμενη επιφάνεια πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους, για παράδειγμα σώματα που πλέουν με την μεγαλύτερη ακτίνα τους</p> <p>LNT:</p> <p>=.TRUE. για σώματα που έχουν βρεχόμενη επιφάνεια κάτω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους</p> <p>=.FALSE. για σώματα που έχουν βρεχόμενη επιφάνεια κάτω από την μεγαλύτερη ακτίνα τους, για παράδειγμα σώματα που εφάπτονται στον πυθμένα της θάλασσας με την μεγαλύτερη ακτίνα τους</p> <p>LBN3:</p> <p>=.TRUE. για σώματα που επιπλέουν στην 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, για παράδειγμα την επιφάνεια του σώματος πάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα του. Στην αρίθμηση δεν προσμετράται το μεσαίο στοιχείο της άνω επιφάνειας. 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	HOBMT: απόσταση της κατώτατης οριζόντιας επιφάνειας του κεντρικού δακτυλιοειδούς στοιχείου της άνω επιφάνειας, μετρούμενη από την πυθμένα HOB (I), I=1, NMAXOB: αποστάσεις των υπολοίπων δακτυλιοειδών στοιχείων της άνω επιφάνειας μετρούμενες από τον πυθμένα

Κάρτα 6η

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

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 LBT =.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, για παράδειγμα την επιφάνεια του σώματος κάνω από την μεγαλύτερη ακτίνα του. Στην αρίθμηση δεν προσμετράται το μεσαίο στοιχείο της κάτω επιφάνειας. Αυτό σημαίνει ότι για έναν κάθετο απλό κύλινδρο 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	HUNMT: απόσταση της ανώτατης οριζόντιας επιφάνειας του κεντρικού δακτυλιοειδούς στοιχείου της κάτω επιφάνειας, μετρούμενη από την πυθμένα HUN(I), I=1, NMAXUN: αποστάσεις των υπολοίπων δακτυλιοειδών στοιχείων της κάτω επιφάνειας μετρούμενες από τον πυθμένα

Κάρτα 10η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
16I5	<p>NEUNMT: Αριθμός συντελεστών Fourier του δυναμικού ταχύτητας στην κάθετη κατεύθυνση για το κεντρικό δακτυλιοειδές στοιχείο της κάτω επιφάνειας. Ο αριθμός αυτός συνήθως ισούται με 49 για $d/a \leq 10$ (κάρτα 2). Για $10 \leq d/a \leq 30$ επιλέγεται NEUNMT=99 ενώ για $d/a \geq 30$ επιλέγεται NEUNMT=199 που είναι και η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του.</p> <p>NEUN(I), I=1, NMAXUN: Αριθμός συντελεστών Fourier του δυναμικού ταχύτητας στην κάθετη κατεύθυνση για τα 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 ο αδιάστατος κυματικός αριθμός ka, όπου a είναι η μεγαλύτερη ακτίνα του σώματος</p> <p>=0 αν δίνονται οι τιμές της κυκλικής συχνότητας ω</p> <p>MAL : πλήθος διαφορετικών τιμών του ka ή ω</p>

Κάρτα 13η

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

Κάρτα 14η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
3F10.0	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.m ²]

Κάρτα 15η

<i>Format</i>	<i>Μεταβλητές</i>
5x,2I5	iplott: =1 δημιουργείται αρχείο πινακοποιημένων δεδομένων έτοιμο για χρήση σε πρόγραμμα εξαγωγής γραφημάτων =0 δεν παράγεται κανένα αρχείο itape 5: =1 αν απαιτείται η αποθήκευση των ποσοτήτων πρώτης τάξης σε αρχείο, που δημιουργείται αυτόματα, διαθέσιμο για περαιτέρω επεξεργασία =0 δεν δημιουργείται κανένα αρχείο

4.2 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 και οι ανυψώσεις εσωτερικά και εξωτερικά του σώματος τυπώνονται σε αδιάστατη μορφή όπως περιγράφεται ακολούθως.

Δυνάμεις διέγερσης (exciting forces)

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

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

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

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

Υδροδυναμικές Παράμετροι (hydrodynamic parameters)

$$\alpha_{jj} = \frac{A_{jj}}{\rho \cdot \nabla}$$
$$b_{jj} = \frac{B_{jj}}{\rho \cdot \omega \cdot \nabla}$$

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

$$a_{55} = \frac{A_{55}}{\rho \cdot \nabla \cdot a^2}$$
$$b_{55} = \frac{B_{55}}{\rho \cdot \omega \cdot \nabla \cdot a^2}$$

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

Στις παραπάνω εκφράσεις a είναι η μεγαλύτερη ακτίνα του σώματος και ∇ είναι ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού.

Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (wave run up)

$$Z = \frac{\zeta}{(H/2)}$$

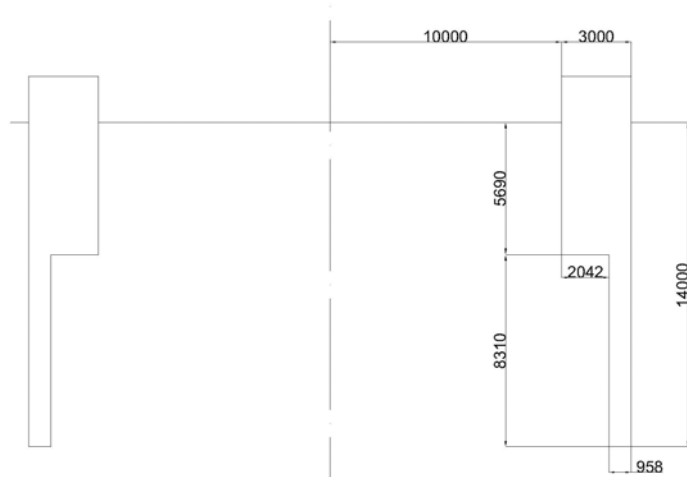
4.3 Γεωμετρικές μορφές θαλάμων συμπίεσης που εξετάσθηκαν και αρχεία εισαγωγής δεδομένων προγράμματος cylinder3.f

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γεωμετρικές μορφές των συσκευών ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης που εξετάσθηκαν με τους αντίστοιχους θαλάμους ταλάντωσης της υδάτινης στήλης.

Για την συγκριτική αποτίμηση της επίδρασης διαφόρων γεωμετριών του θαλάμου ταλάντωσης στην απόδοση της κυματικής μηχανής, επελέγησαν κατασκευές που είχαν το ίδιο εμβαδόν εσωτερικής ελεύθερης επιφάνειας, στις οποίες άλλαζε η γεωμετρία του υποθαλάσσιου τμήματος του θαλάμου. Παράλληλα κατελήφθη προσπάθεια ώστε πέραν της σταθερής εσωτερικής επιφάνειας και ο ανωστικός όγκος να διατηρηθεί σταθερός.

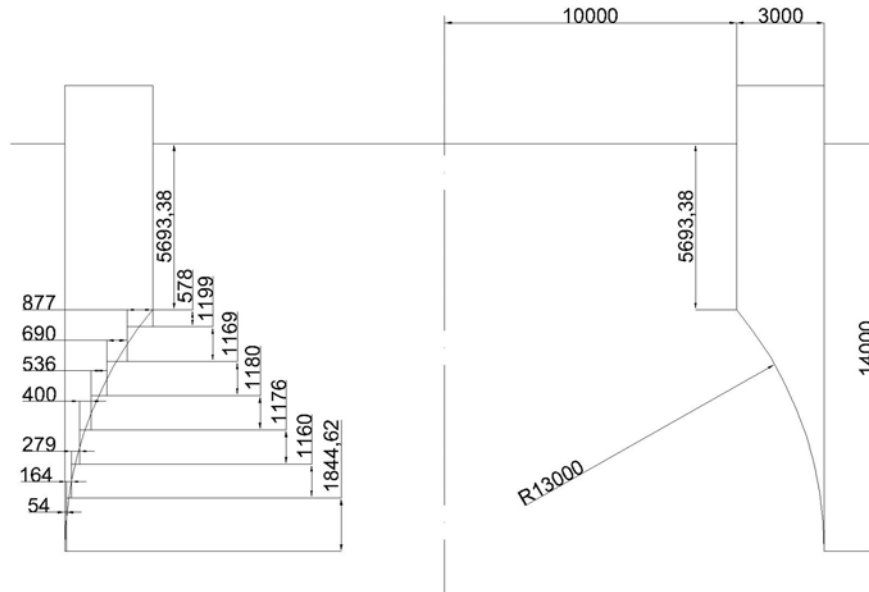
Οι ειδικότερες γεωμετρίες που εξετάσθηκαν, μαζί με τις διαστάσεις τους παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν στη συνέχεια:

- (i) Η πρώτη περίπτωση (Case 1) αφορά ημιβυθισμένο κοίλο θάλαμο ανοιχτό στον πυθμένα κάτω από την ίσαλο. Στο εσωτερικό του θαλάμου βρίσκεται εσωτερικό σκαλοπάτι. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται σκαρίφημα της εξεταζόμενης συσκευής καθώς και οι αναλυτικές διαστάσεις της σε mm.



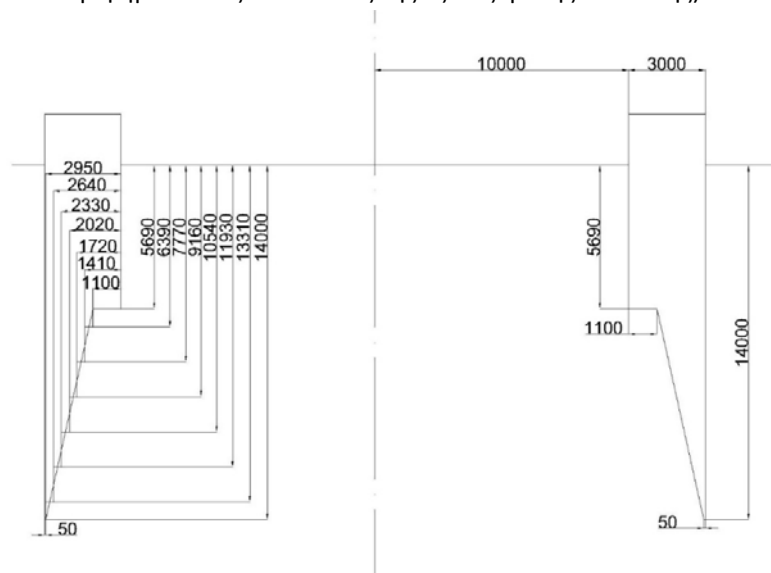
Σχήμα 4.1: Εξεταζόμενη κυματική συσκευή με εσωτερικό σκαλοπάτι στο εσωτερικό του θαλάμου ταλάντωσης

- (ii) Η δεύτερη περίπτωση (Case 2) αναφέρεται σε ημιβυθισμένο κοίλο θάλαμο ανοιχτό στον πυθμένα κάτω από την ίσαλο με σφαιρικό υποθαλάσσιο θάλαμο (βλέπε σχήμα 4.2 για το σκαρίφημα και τις διαστάσεις της εξεταζόμενης συσκευής)



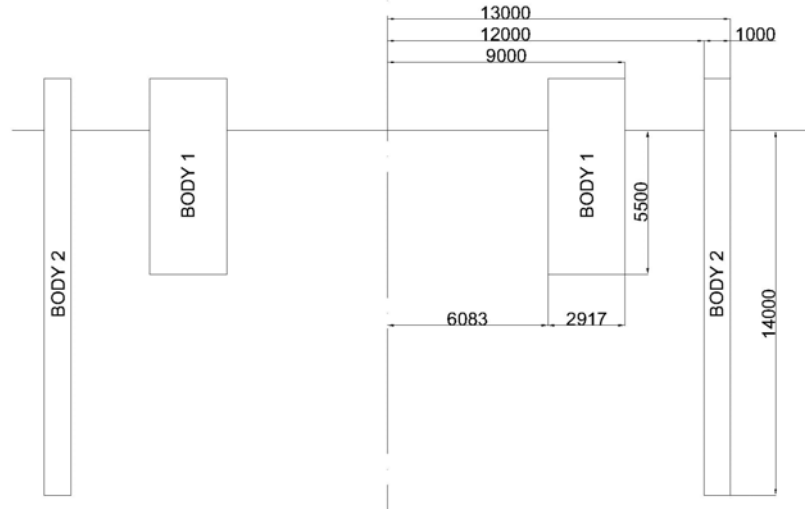
Σχήμα 4.2: Εξεταζόμενη κυματική συσκευή με σφαιρικό υποθαλάσσιο θάλαμο ταλάντωσης

- (iii) Η Τρίτη περίπτωση (Case 3) αφορά ημιβυθισμένο κοίλο θάλαμο ανοιχτό στον πυθμένα ο οποίος συντίθεται από κωνικό υποθαλάσσιο θάλαμο (βλέπε σχήμα 4.3 για το σκαρίφημα και τις διαστάσεις της εξεταζόμενης συσκευής)



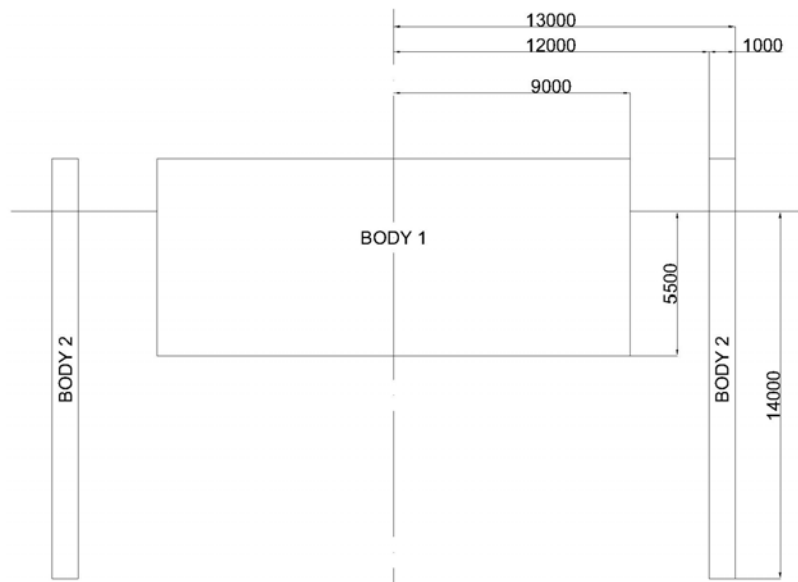
Σχήμα 4.3: Εξεταζόμενη κυματική συσκευή με κωνικό υποθαλάσσιο θάλαμο ταλάντωσης

- (iv) Η τέταρτη περίπτωση (Case 4) εξετάζει ημιβυθισμένο κοίλο θάλαμο ταλάντωσης, ο οποίος συντίθεται από ομόκεντρο κοίλο κύλινδρο. Στο σχήμα 4.4 απεικονίζεται το σκαρίφημα της εξεταζόμενης συσκευής καθώς και οι διαστάσεις της



Σχήμα 4.4: Εξεταζόμενη κυματική συσκευή με θάλαμο ταλάντωσης θάλαμο ταλάντωσης, ο οποίος συντίθεται από ομόκεντρο κοίλο κύλινδρο

- (v) Τέλος, εξετάσθηκε ημιβυθισμένος κοίλος θάλαμος ταλάντωσης, ο οποίος συντίθεται από ομόκεντρο συμπαγές κυλινδρικό σώμα (Case 5) Η διάταξη και οι διαστάσεις της απεικονίζονται στο σχήμα 4.5



Σχήμα 4.5: Εξεταζόμενη κυματική συσκευή με θάλαμο ταλάντωσης θάλαμο ταλάντωσης, ο οποίος συντίθεται από συμπαγές κυλινδρικό σώμα

Σε όλες τις παραπάνω εξεταζόμενες περιπτώσεις το βάθος του νερού υποτέθηκε ίσο με 70 μέτρα. Στην επόμενη παράγραφο δίνεται για κάθε μια από τις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν, ενδεικτικό αρχείο εισόδου.

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 1^η περίπτωση
(βλέπε, σχήμα 4.1)

```
CAS1
70.00 13.00 19
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 2 1

70.00 64.31 56.00
 19 49 49
10.00 12.042 13.00
 0 30
0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400
0.450 0.500 0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800
0.850 0.900 0.950 1.000 1.050 1.100 1.150 1.200
1.250 1.300 1.350 1.400 1.450 1.500
70.00 0.000 274495.182
 0 0 1 0
```

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 2^η περίπτωση
(βλέπε, σχήμα 4.2)

```
CAS2
70.00 13.05 19
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 8 1

70.00 63.532 62.533 61.364 60.184 59.00 57.848 56.794
56.00
 19 49 49 49 49 49 49 49 49
10.00 10.877 11.567 12.103 12.503 12.782 12.946 13.00
13.05
 0 30
0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400
0.450 0.500 0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800
0.850 0.900 0.950 1.000 1.050 1.100 1.150 1.200
1.250 1.300 1.350 1.400 1.450 1.500
70.00 0.000 274495.182
 0 0 1 0
```

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα "Cylinder3D" για την 3^η περίπτωση
(βλέπε Σχήμα 4.3)

```
CAS3
70.00 13.00 19
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 8 1

70.00 64.310 63.614 62.229 60.844 59.459 58.074 56.689
56.00
 19 49 49 49 49 49 49 49 49
10.00 11.10 11.408 11.716 12.024 12.332 12.640 12.95
13.00
 0 30
0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400
0.450 0.500 0.550 0.600 0.650 0.660 0.670 0.680
0.690 0.700 0.710 0.720 0.730 0.740 0.750 0.760
0.770 0.7725 0.775 0.7775 0.780 0.7825
70.00 0.000 274495.182
 0 0 1 0
```

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα "Cylinder3D" για την 4^η περίπτωση
(βλέπε σχήμα 4.4)

```
CAS4
70.00 13.00 19
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 3 1
 0 1 0
70.00 64.50 70.00 56.00
 19 49 19 49
6.083 9.000 12.00 13.00
 0 30
0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400
0.450 0.500 0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800
0.850 0.900 0.950 1.000 1.050 1.100 1.150 1.200
1.250 1.300 1.350 1.400 1.450 1.500
70.00 0.000 274495.182
 0 0 1 0
```

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Cylinder3D” για την 5^η περίπτωση

(βλέπε σχήμα 4.5)

CAS5

70.00 13.00 39

.FALSE. .TRUE. .TRUE..FALSE..TRUE. .TRUE.

2 0

1 0

64.50 70.00 56.00

79 39 79

9.000 12.00 13.00

0 28

0.050 0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.650

0.700 0.710 0.720 0.730 0.740 0.750 0.760 0.770

0.780 0.790 0.800 0.810 0.820 0.830 0.840 0.850

0.900 0.950 1.000 1.050

70.00 0.000 176000.

0 0 1 0

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Concentric” για την 4^η περίπτωση

(βλέπε σχήμα 4.4)

CAS4

70.00 13.00 13.00 2 39

.FALSE. .TRUE. .TRUE..FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE.

3 1

0 1 0

70.00 64.50 70.00 56.00

39 79 39 79

6.083 9.000 12.00 13.00

0 1 0 2

1 1 2 2

0 30

0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400

0.450 0.500 0.550 0.600 0.650 0.700 0.750 0.800

0.850 0.900 0.910 0.920 0.930 0.940 0.950 0.960

0.970 0.980 0.990 1.000 1.010 1.020

70.00 45000. 176000.

0.0000 0.0000

0 0 0

0 0 1 0

Ενδεικτικό αρχείο εισόδου για το υπολογιστικό πρόγραμμα “Concentric” για την 5^η περίπτωση
(βλέπε σχήμα 4.5)

```
CAS5.  
70.00 13.00 13.00 2 39  
.FALSE. .TRUE. .TRUE. .FALSE. .TRUE. .TRUE. .FALSE.  
2 0  
1 0  
64.50 70.00 56.00  
79 39 79  
9.000 12.00 13.00  
1 0 2  
1 2 2  
0 30  
0.050 0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700  
0.800 0.850 0.900 0.950 1.000 1.050 1.100 1.150  
1.200 1.250 1.300 1.350 1.400 1.450 1.500 1.550  
1.600 1.650 1.700 1.750 1.800 2.000  
70.00 7262.5 176000.  
0.0000 0.0000  
0 0 0  
1 0 1 0  
9  
2 2 2  
2  
151  
1.0
```

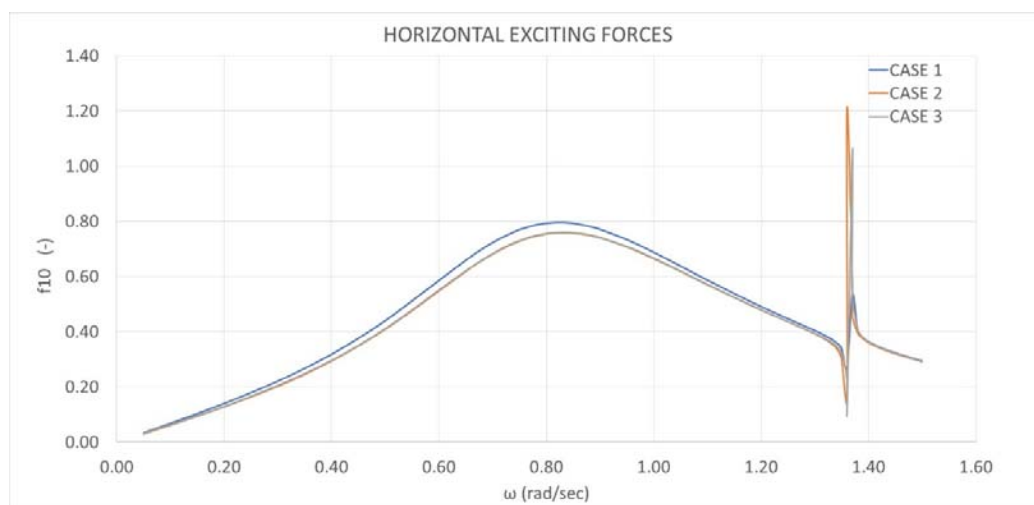

5 Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής ανάλυσης των γεωμετριών των θαλάμων ταλάντωσης του ρευστού, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται στα κεφάλαια 5.1, 5.2 και 5.3, οι δυνάμεις διέγερσης, οι υδροδυναμικοί συντελεστές, καθώς και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, αντίστοιχα. Οι αδιαστατοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των φυσικών μεγεθών, εμφανίζονται στο κεφάλαιο 4.2.

5.1 Δυνάμεις Διέγερσης

Οι δυνάμεις διέγερσης στην οριζόντια κατεύθυνση που ασκούνται στις περιπτώσεις θαλάμων με τις ονομασίες CASE1, CASE2 και CASE3, παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1 συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος κυματισμού. Παρατηρούμε ότι στην περιοχή συχνοτήτων κοντά στο 1.36rad/sec οι οριζόντιες δυνάμεις εμφανίζουν τοπικά ελάχιστα και μέγιστα, γεγονός που συνιστά μια ιδιόμορφη συμπεριφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές που λαμβάνουν οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάσαμε.

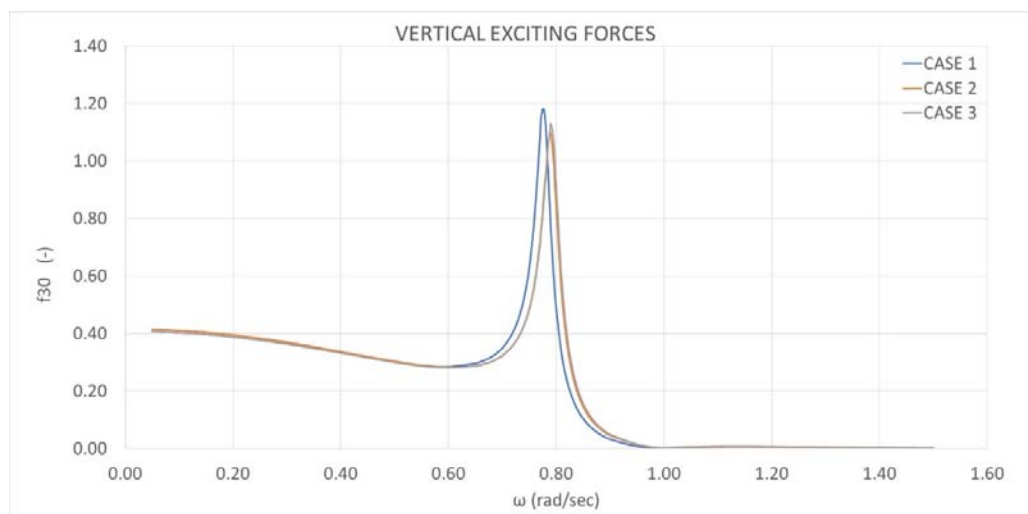
Ειδικότερα παρατηρούμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις γεωμετριών (CASE1,2,3), για $\omega = 1.36\text{rad/sec}$ εμφανίζεται ελάχιστο της δύναμης, ενώ αμέσως μετά για $\omega = 1.37\text{ rad/sec}$ περίπου εμφανίζεται αντίστοιχο μέγιστο. Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας που βρίσκεται εγκλωβισμένη στον θάλαμο συμπίεσης. Οι αντίστοιχοι αδιάστατοι κυματαριθμοί που αντιστοιχούν στις δυο αυτές συχνότητες είναι: $ka = 1.88$ και $ka = 1.91$, όπου a είναι η ακτίνα της εσωτερικής υδάτινης επιφάνειας. Για τις περιπτώσεις που εξετάσαμε, έχει ληφθεί ίση με 10m. Παρατηρούμε μια μικρή μετατόπιση της συχνότητας στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της δύναμης σαν συνάρτηση της εκάστοτε γεωμετρίας



Σχήμα 5.1: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες στις εξεταζόμενες περιπτώσεις CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα

Από θεωρητική άποψη οι συντονισμοί αυτοί εμφανίζονται στις ρίζες της παραγώγου πρώτης τάξης της συνάρτησης Bessel πρώτου είδους $J_1'(ka)=0$, δηλαδή για $ka = 1.84, 5.33, \dots$ [62], για τις οποίες εμφανίζεται συντονισμός της υδάτινης μάζας του ρευστού σε ταλαντευόμενο κλειστό αξονοσυμμετρικό δοχείο, που υποβάλλεται σε οριζόντια εξαναγκασμένη κίνηση (pitching mode). Η πρώτη θεωρητική τιμή του 1.84 είναι πολύ κοντά σε αυτή που προσδιορίστηκε και αριθμητικά με τα αποτελέσματα του προγράμματος.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στις τρεις γεωμετρικές θαλάμων που εξετάσαμε. Και εδώ παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα τοπικό μέγιστο της δύναμης σε τιμές της κυκλικής συχνότητας διέγερσης του κυματισμού γύρω στο $\omega = 0.78 - 0.79$ rad/sec, που οφείλεται σε καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό του θαλάμου συμπίεσης (rumping mode). Οι ταλαντώσεις αυτές είναι διαφορετικής υφής από εκείνες που αναφέρθηκαν προηγούμενα στην περίπτωση των οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης (pitching modes). Εδώ είναι υδροστατικής φύσης [65] και για τον υπολογισμό της συχνότητας στην οποία εμφανίζονται 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 εμφανίζει το rumping mode της κίνησης του ρευστού.



Σχήμα 5.2: Κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες στις εξεταζόμενες περιπτώσεις CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης τόσο σε συγκρότημα δυο ομοαξονικών τοροειδών σωμάτων (CASE 4) της παραγράφου 4.3, όσο και στο κάθε ένα σώμα της διάταξης. Εδώ υπάρχει μια εσωτερική ελεύθερη επιφάνεια κυκλικής μορφής που περιβάλλεται από το εσωτερικό τοροειδές σώμα και μια δακτυλιοειδής επιφάνεια νερού που περιβάλλεται μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τοροειδούς σώματος.

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται κατ' αρχάς η οριζόντια δύναμη που ασκείται σε κάθε ένα από τα σώματα της διάταξης, ως εάν ήταν μόνο του, χωρίς την παρουσία του άλλου. Οι συντονισμοί που εμφανίζονται για κάθε ένα από τα σώματα αυτά (γύρω στο $\omega = 1.74$ rad/sec για το εσωτερικό σώμα και γύρω στο $\omega = 1.23$ rad/sec για το εξωτερικό σώμα, που αντιστοιχούν σε αδιάστατους κυματαριθμούς ίσους με $k.a = 1.878$ και $k.a = 1.855$, αντίστοιχα,

με a την ακτίνα της δημιουργούμενης ελεύθερης επιφάνειας στο εσωτερικό των εκάστοτε εξεταζόμενων σωμάτων, είναι πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή του 1.84 στην οποία αναφερθήκαμε προηγούμενα) αντιστοιχούν σε αντισυμμετρικούς συντονισμούς (pitching modes), βλέπε και σχολιασμό του σχήματος 5.1.

Στη συνέχεια στο ίδιο σχήμα, δίνεται και η δύναμη διέγερσης στην οριζόντια κατεύθυνση που ασκείται σε κάθε ένα σώμα της διάταξης παρουσία του άλλου, καθώς και η συνολική δύναμη που ασκείται στο συγκρότημα. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα όπου εμφανίζεται η ιδιόμορφη συμπεριφορά στην οριζόντια δύναμη σε κάθε σώμα της διάταξης, μετατίθεται σε μικρότερη συχνότητα, κοινή και για τα δύο τοροειδή σώματα, σε σχέση με εκείνη που εμφανιζόταν όταν κάθε σώμα ήταν μόνο του. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί περίπου στο $\omega = 1.13$ rad/sec. Στην ίδια συχνότητα εμφανίζεται και η ιδιόμορφη συμπεριφορά στην συνολική οριζόντια δύναμη που ασκείται στο συγκρότημα των δύο σωμάτων. Σημειώνουμε στο σημείο αυτό, ότι η ταυτόχρονη παρουσία του εσωτερικού και του εξωτερικού τοροειδούς σώματος δημιουργεί καινούργια ελεύθερη επιφάνεια ρευστού μεταξύ των δυο σωμάτων, δακτυλιοειδούς μορφής, ο συντονισμός της οποίας σε αντισυμμετρικές ταλαντώσεις αναμένεται να παρουσιάζεται σε διαφορετικές συχνότητες από εκείνες που ισχύουν για κάθε σώμα μόνο του. Στη περίπτωση κλειστών δοχείων στο εσωτερικό των οποίων δημιουργείται δακτυλιοειδής περιοχή μεταξύ ενός εσωτερικού κυλίνδρου και του εξωτερικού τοιχώματος του δοχείου, οι συχνότητες που εμφανίζεται συντονισμός της υδατινής στήλης σε αντισυμμετρικές ταλαντώσεις (pitching modes), δίνονται από την σχέση [66]:

$$\omega^2 = \frac{g}{a_2} \cdot \xi \cdot \tanh\left(\xi \frac{h}{a_2}\right) \quad (5.1)$$

Όπου g : η επιτάχυνση της βαρύτητας, a_2 η ακτίνα όπως ορίζεται στο σχήμα 3.2, h : το βάθος του νερού στο ταλαντευόμενο δοχείο και ξ : ρίζες της εξίσωσης

$$J_1'(\xi) \cdot Y_1'\left(\frac{a_1}{a_2} \xi\right) - J_1'\left(\frac{a_1}{a_2} \xi\right) \cdot Y_1'(\xi) = 0 \quad (5.2)$$

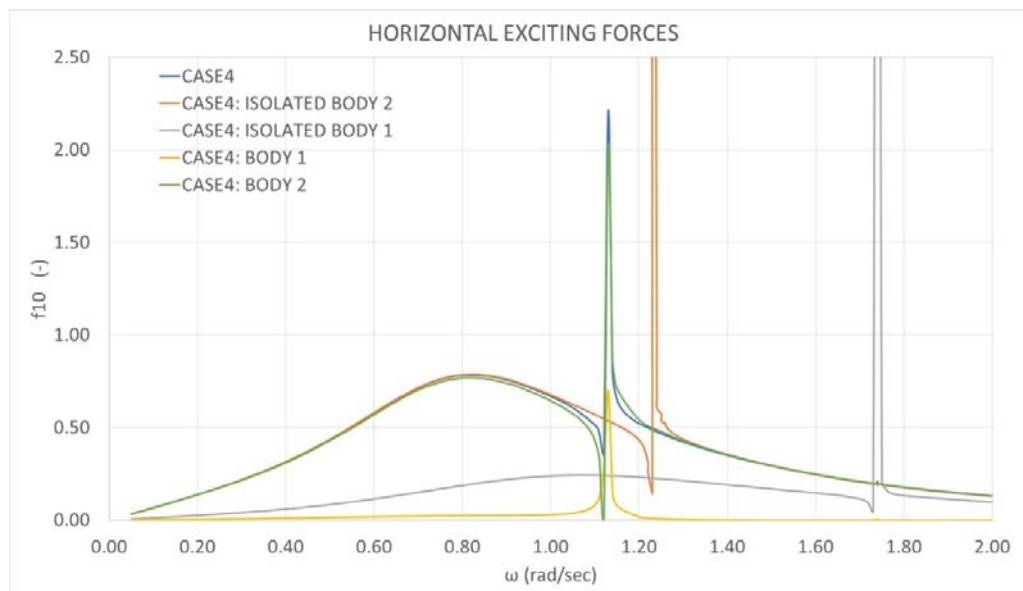
με J_1' και Y_1' τις παραγώγους των συναρτήσεων Bessel πρώτου και δεύτερου είδους και πρώτης τάξης και a_1 και a_2 τις ακτίνες των κυλίνδρων, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 5.3. Αντικαθιστώντας τις τιμές των ακτίνων, που για την συγκεκριμένη γεωμετρία που εξετάζουμε είναι 9m και 12m, αντίστοιχα και υποθέτοντας ένα βάθος $h = 14$ m, όσο το βύθισμα του εξωτερικού τοροειδούς σώματος, προκύπτει με βάση τον πίνακα που ακολουθεί που ελήφθη από το [66] με γραμμική παρεμβολή για $a_1/a_2 = 0.75$ ότι $\xi = 1.1478$ και $\omega = 0.904$ rad / sec.

Πίνακας 5.1: Ρίζες της εξίσωσης (5.2) για διάφορες τιμές του $k = a_1/a_2$

$n \setminus k$	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	1.84080	1.80347	1.70512	1.58207	1.46179	1.35468	1.26209	1.18238	1.11338	1.05312
1	5.32913	5.13714	4.96086	5.13742	5.65919	6.56494	8.04111	10.59188	15.77812	31.44697
2	8.53050	8.19917	8.43307	9.30835	10.68335	12.70657	15.80132	21.00412	31.45132	62.84810
3	11.69512	11.35879	12.16501	13.68367	15.84811	18.94268	23.62394	31.45577	47.15038	94.26451
4	14.84607	14.63436	15.99324	18.11588	21.04879	25.20249	31.46329	41.91895	62.85103	125.67496
5	17.98982	17.98642	19.86163	22.57071	26.26408	31.47214	39.30762	52.38450	78.55486	157.08804
6	21.12895	21.38369	23.75018	27.03693	31.48593	37.74587	47.15522	62.85225	94.26013	188.50221
7	24.26472	24.80814	27.64977	31.50921	36.71185	44.02232	55.00467	73.32123	109.96622	219.91695
8	27.39787	28.24974	31.55634	35.98546	41.94030	50.30046	62.85525	83.79098	125.67278	251.33201
9	30.52885	31.70269	35.46753	40.46433	47.17043	56.57973	70.70660	94.26122	141.37967	282.74731

Παρατηρούμε δηλαδή ότι ήδη με χρήση των σχέσεων αυτών διαπιστώνεται ότι ο συντονισμός σε αντισυμμετρικές ταλαντώσεις αναμένεται σε συχνότητες μικρότερες εκείνων που εμφανίζοντο στα μεμονωμένα τοροειδή σώματα. Βέβαια υπάρχει απόκλιση από την τιμή του $\omega = 1.13 \text{ rad/sec}$ που προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα, πρέπει όμως να σημειώσουμε ότι οι θεωρητικές τιμές προκύπτουν για κλειστά δοχεία με πυθμένα, γεγονός που δεν ισχύει στην περίπτωση μας λόγω του ανοικτού προς την θάλασσα θαλάμου της ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, με συνέπεια το «βάθος» του νερού της ταλάντωσης να μην είναι σαφώς ορισμένο.

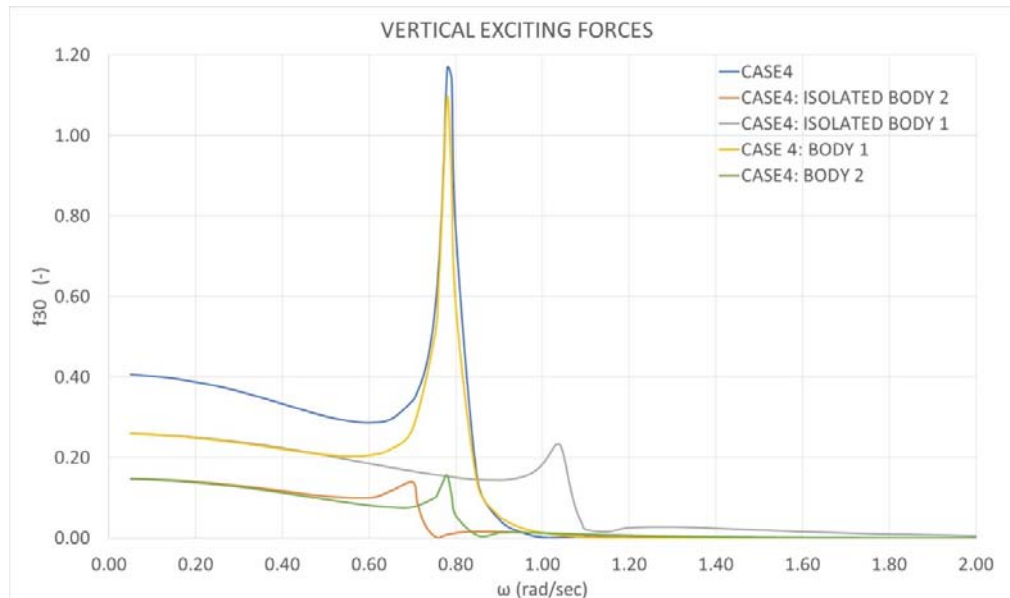
Σημειώνουμε ακόμα, ότι ένας δευτερογενής μικρής έκτασης συντονισμός της συνολικής οριζόντιας δύναμης διέγερσης που ασκείται στο συγκρότημα των σωμάτων, εμφανίζεται και στην συχνότητα στην οποία το ρευστό στον εσωτερικό κύλινδρο εμφανίζει αντισυμμετρικό συντονισμό, κοντά δηλαδή στην συχνότητα $\omega = 1.74 \text{ rad/sec}$. Αργότερα θα παρουσιάσουμε και τις ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας στο εσωτερικό πεδίο ροής με και χωρίς την παρουσία του εξωτερικού κυλίνδρου. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο εξωτερικός κύλινδρος δρα σαν κυματοθραύστης με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η δύναμη που ασκείται στο εσωτερικό σώμα της διάταξης, σε σχέση με εκείνη που ασκείτο σε αυτό όταν το τελευταίο θεωρείτο μόνο του στο πεδίο ροής.



Σχήμα 5.3: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες: α) στην εξεταζόμενη περίπτωση (CASE4), β) στο εξωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE4: ISOLATED BODY 2), γ) στο εσωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE4: ISOLATED BODY 1), δ) στο εσωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE4: BODY 1) και ε) στο εξωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE4: BODY 2), ως προς την κυματική συχνότητα

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε κάθε ένα από τα δακτυλιοειδή σώματα της περίπτωσης 4 (CASE 4), καθώς και η συνολική δύναμη στα δύο σώματα μαζί. Εδώ οι συντονισμοί στο rumping mode (συμμετρική κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού), εμφανίζονται για τιμές συχνοτήτων κυματισμού $\omega = 1.04 \text{ rad/sec}$ ($k \cdot a = 0.992$, με $a = 9\text{m}$) για το εσωτερικό σώμα και για $\omega = 0.70 \text{ rad/sec}$ ($k \cdot a = 0.651$, με $a = 13\text{m}$) για το εξωτερικό σώμα, αντίστοιχα, όταν αυτά είναι μόνα τους. Στην περίπτωση του συγκροτήματος των σωμάτων, τότε το τοπικό μέγιστο στην καθ' ύψος δύναμη

διέγερσης, μετατίθεται στο $\omega = 0.78 \text{ rad/sec}$ ($k \cdot a = 0.807$, με $a = 13\text{m}$), που συμπίπτει και με τη θέση που εμφανίζεται το τοπικό μέγιστο της συνολικής κατακόρυφης δύναμης που ασκείται στο συγκρότημα των σωμάτων. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των κατακόρυφων δυνάμεων διέγερσης, το τοπικό μέγιστο της δύναμης τόσο σε κάθε ένα από τα σώματα, παρουσία του άλλου, όσο και στο συγκρότημα των σωμάτων, εμφανίζεται για κυκλική συχνότητα που είναι ανάμεσα σε αυτές των μεμονωμένων σωμάτων και είναι πολύ πιο έντονο. Αξίζει να σημειωθεί η σημαντική αύξηση της κατακόρυφης δύναμης διέγερσης στο εσωτερικό σώματα της διάταξης (σώμα 1), σε σχέση με την τιμή που είχε όταν αυτό ήταν μόνο του στο πεδίο ροής, βλέπε Σχήμα 5.4.

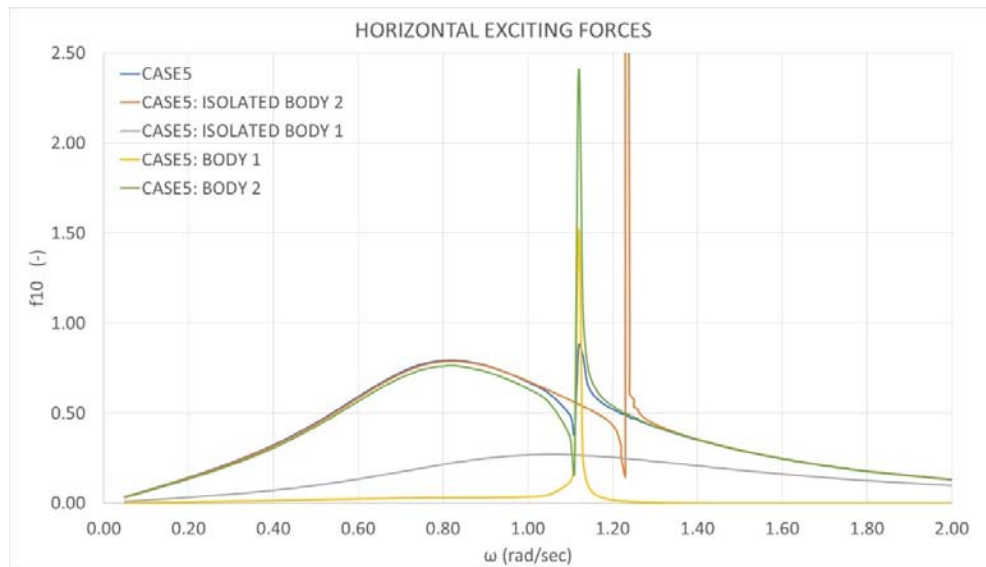


Σχήμα 5.4: Κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες: α) στην εξεταζόμενη περίπτωση (CASE4), β) στο εξωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE4: ISOLATED BODY 2), γ) στο εσωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE4: ISOLATED BODY 1), δ) στο εσωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE4: BODY 1) και ε) στο εξωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE4: BODY 2), ως προς την κυματική συχνότητα

Η επόμενη περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή δύο ομοαξονικών σωμάτων, τα οποία κινούνται είτε ανεξάρτητα είτε ως συγκρότημα (CASE5 του κεφαλαίου 4.3). Το συγκρότημα αποτελείται από έναν εσωτερικό συμπαγή κύλινδρο με ακτίνα ίση με την εξωτερική ακτίνα του εσωτερικού δακτυλιοειδούς σώματος που εξετάστηκε προηγούμενα στην περίπτωση 4 και ένα εξωτερικό τοροειδές σώμα με διαστάσεις αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση (CASE4). Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να διαπιστωθεί κατά πόσον η αντικατάσταση του εσωτερικού κοίλου τοροειδούς σώματος της περίπτωσης 4 με ένα συμπαγή εσωτερικό κύλινδρο επηρεάζει την θέση του συντονισμού των αντισυμμετρικών και συμμετρικών ταλαντώσεων της υδάτινης μάζας, που περικλείεται μεταξύ του εσωτερικού κυλίνδρου και του εξωτερικού τοροειδούς σώματος, και αντίστοιχα τη θέση των τοπικών μεγίστων της οριζόντιας και της κατακόρυφης δύναμης διέγερσης.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις σε κάθε ένα από τα σώματα που απαρτίζουν το συγκρότημα, όταν αυτά θεωρηθούν μόνα τους στο πεδίο ροής και όταν αυτά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Παρατηρούμε ότι η παρουσία του εξωτερικού κυλινδρικού σώματος δημιουργεί ιδιόμορφη συμπεριφορά γύρω στο $\omega = 1.12 \text{ rad/sec}$ ($ka =$

1.66), $a = 13\text{m}$, στην οριζόντια δύναμη διέγερσης που ασκείται σε κάθε ένα από τα σώματα της διάταξης και στο συγκρότημα ολόκληρο και οφείλεται στο συντονισμό (αντισυμμετρικό) της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό πεδίο ροής που περικλείεται από το σώμα. Παρατηρούμε επίσης ότι η συχνότητα αυτή $\omega = 1.12 \text{ rad/sec}$ είναι επί της ουσίας ίδια με την αντίστοιχη συχνότητα που εμφανίζει τοπικό μέγιστο το συγκρότημα των δύο σωμάτων, όταν το εσωτερικό σώμα ήταν κοίλος κύλινδρος (CASE4). Κατά συνέπεια διαπιστώνεται ότι η και εδώ, όπως προηγούμενα στο Σχήμα 5.3, παρατηρούμε ότι η οριζόντια δύναμη διέγερσης που ασκείται στο εσωτερικό σώμα, όταν αυτό περιβάλλεται από τον εξωτερικό κύλινδρο, είναι πολύ μικρότερη εκείνης που ασκείται πάνω του όταν είναι απευθείας εκτεθειμένο στην δράση των κυμάτων.



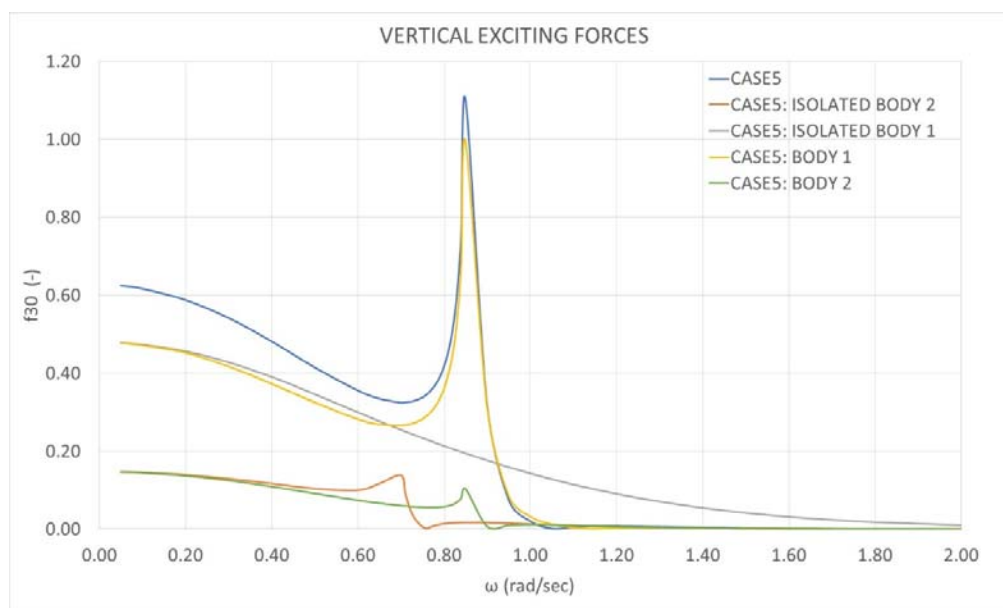
Σχήμα 5.5: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες: α) στην εξεταζόμενη περίπτωση (CASE5), β) στο εξωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE5: ISOLATED BODY 2), γ) στο εσωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE5: ISOLATED BODY 1), δ) στο εσωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE5: BODY 1) και ε) στο εξωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE5: BODY 2), ως προς την κυματική συχνότητα

Άρα ο εξωτερικός κύλινδρος δρα ως κυματοθραύστης στη περίπτωση των οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης που ασκούνται στον εσωτερικό κύλινδρο.

Το αντίθετο συμβαίνει με τις κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στον εσωτερικό κύλινδρο της διάταξης παρουσία του εξωτερικού, βλέπε σχήμα 5.6. Παρατηρούμε εδώ ότι η δύναμη ενισχύεται σημαντικά στην περιοχή του συντονισμού στο rumping mode της κίνησης του ρευστού στο εσωτερικό του σώματος για $\omega = 0.85 \text{ rad/sec}$ ($ka = 0.958$, με $a = 13\text{m}$), με αποτέλεσμα να μπορούμε να βγάλουμε κατ' αρχάς το συμπέρασμα ότι η εξωτερική δακτυλιοειδής κατασκευή δρα ευεργετικά στην εσωτερική αν η τελευταία χρησιμοποιηθεί σαν heaving device διότι μεγιστοποιεί την δύναμη διέγερσης που ασκείται στο σώμα με συνακόλουθη αναμενόμενη μεγιστοποίηση και των αντίστοιχων κινήσεων του εσωτερικού κυλίνδρου στην καθ' ύψος κίνηση.

Στην ίδια συχνότητα, δηλαδή για $\omega = 0.85 \text{ rad/sec}$ εμφανίζεται και το τοπικό μέγιστο της κατακόρυφης δύναμης διέγερσης που ασκείται στον εξωτερικό κύλινδρο (σώμα: 2),

καθώς και στο συγκρότημα των δύο σωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντονισμός αυτός επαληθεύεται αριθμητικά από την [66] η οποία παρουσιάζει τους συντονισμούς της κίνησης του ρευστού σε θάλαμο ομόκεντρης κυλινδρικής Σ.Α.Κ.Ε με συμπαγές εσωτερικό κυλινδρικό σώμα. Σε σχέση με την τιμή της ιδιοσυχνότητας της καθ' ύψος κίνησης συντονισμού του ρευστού στο εσωτερικό του κυλίνδρου υπ' αριθμό: 2, όταν αυτός είναι μόνος του, που εμφανίζεται για $\omega = 0.7 \text{ rad/sec}$, παρατηρούμε ότι η τιμή της ιδιοσυχνότητας αυτής μετατίθεται για υψηλότερες τιμές της κυκλικής συχνότητας ($\omega = 0.85 \text{ rad/sec}$) στη περίπτωση των αλληλοεπιδρώντων σωμάτων.



Σχήμα 5.6: Κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης ασκούμενες: α) στην εξεταζόμενη περίπτωση (CASE5), β) στο εξωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE5: ISOLATED BODY 2), γ) στο εσωτερικό σώμα όταν αυτό θεωρείται μεμονωμένο (CASE5: ISOLATED BODY 1), δ) στο εσωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE5: BODY 1) και ε) στο εξωτερικό σώμα της εξεταζόμενης περίπτωσης (CASE5: BODY 2), ως προς την κυματική συχνότητα

5.2 Υδροδυναμικοί Συντελεστές

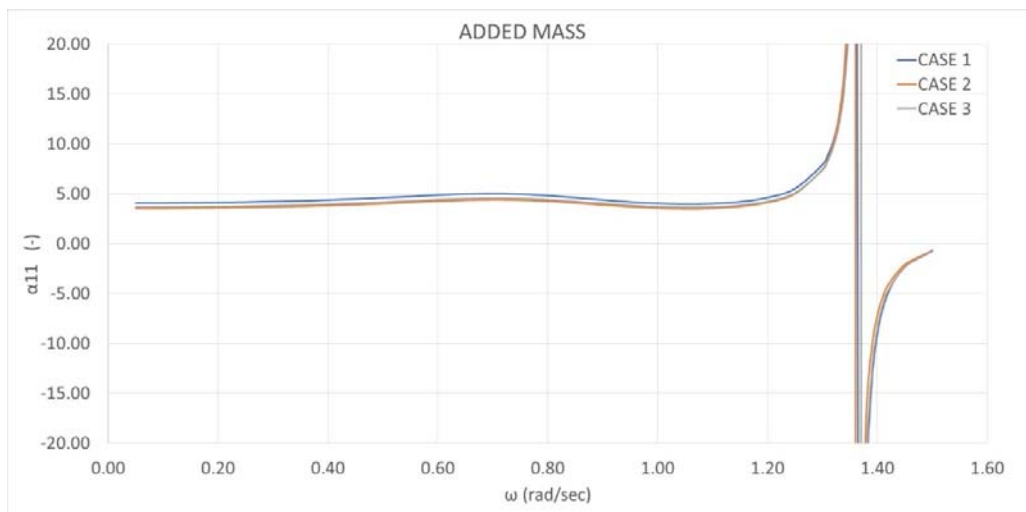
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος ακτινοβολίας για τις περιπτώσεις γεωμετριών που εξετάστηκαν και θα παρουσιαστούν οι αντίστοιχοι υδροδυναμικοί συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης. Τα σχήματα 5.7 – 5.12 αναφέρονται στις τρεις πρώτες περιπτώσεις θαλάμων που εξετάστηκαν, δηλαδή αυτούς με την σύνθετη κυλινδρική γεωμετρία (CASE1), με την σφαιρική γεωμετρία (CASE2) και την κωνική γεωμετρία (CASE3).

Ειδικότερα, στα σχήματα 5.7, 5.9 και 5.11 δίδονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές πρόσθετης μάζας στην οριζόντια μεταφορική κίνηση (surge), στην καθ' ύψος κίνηση (heave) και στην περιστροφή (pitch), αντίστοιχα και στα σχήματα 5.8, 5.10 και 5.12 οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης στις αντίστοιχες κινήσεις. Παρατηρούμε ότι η ιδιόμορφη συμπεριφορά των συναρτήσεων μεταφοράς των δυνάμεων διέγερσης στις συχνότητες που εμφανίζονται συμμετρικοί (rumping) και αντισυμμετρικοί (pitching) συντονισμοί της υδάτινης στήλης εντός του θαλάμου συμπίεσης, παρουσιάζεται και στους υδροδυναμικούς συντελεστές. Έτσι, στις αντίστοιχες συχνότητες που εμφανίζονται τα μέγιστα των οριζόντιων

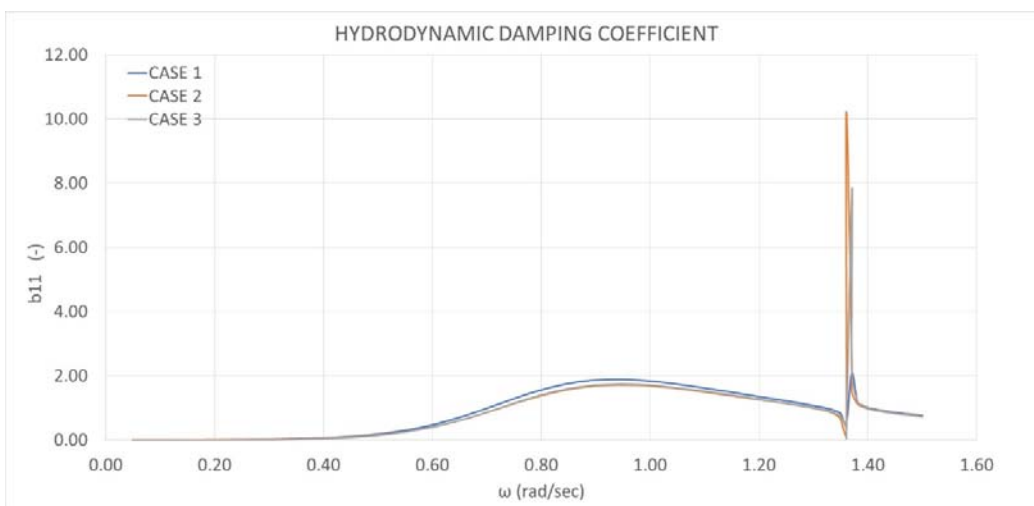
δυνάμεων διέγερσης, παρουσιάζονται και οι κορυφές στις τιμές της υδροδυναμικής μάζας στην οριζόντια κίνηση (surge) και στην περιστροφή (pitch), βλέπε σχήματα 5.1 και 5.11.

Αντίστοιχη παρατήρηση ισχύει για τις συχνότητες που εμφανίζεται η μέγιστη καθ' ύψος δύναμη διέγερσης που ασκείται στην κατασκευή (Σχήμα 5.2), με την συχνότητα που παρουσιάζεται το μέγιστο της υδροδυναμικής μάζας στην καθ' ύψος κίνηση (Σχήμα 5.9).

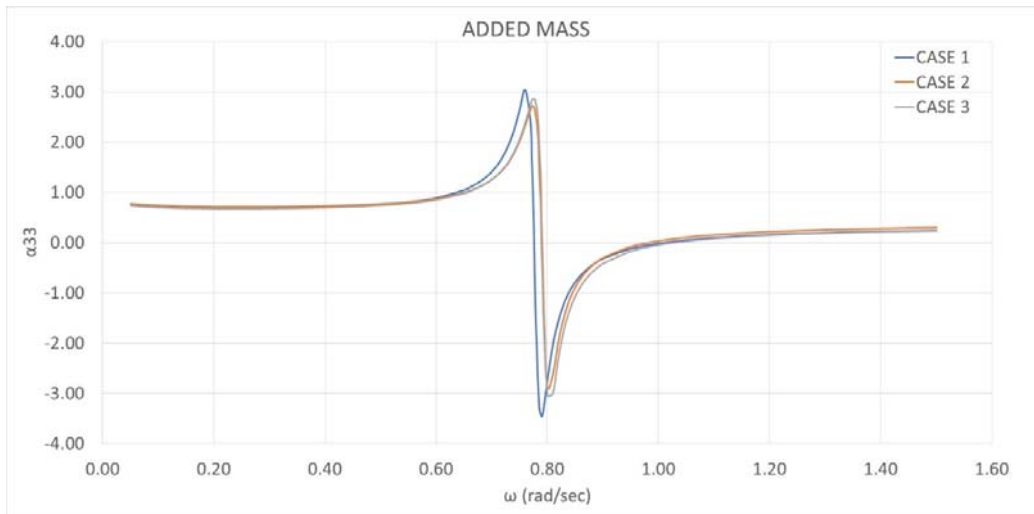
Σε ότι αφορά στις υδροδυναμικές αποσβέσεις, παρατηρούμε επίσης μέγιστες τιμές στις περιοχές που εμφανίζονται οι συμμετρικοί (rumping) και αντισυμμετρικοί (pitching) συντονισμοί του νερού στον θάλαμο συμπίεσης, βλέπε σχήμα 5.1 σε συνδυασμό με τα σχήματα 5.8 και 5.12, καθώς και 5.2 σε συνδυασμό με το σχήμα 5.10. Παρατηρούμε ακόμα, ότι οι υδροδυναμικοί συντελεστές απόσβεσης μηδενίζονται σε συχνότητες στις οποίες μηδενίζονται και οι αντίστοιχες δυνάμεις διέγερσης, βλέπε σχήματα 5.1 και 5.8.



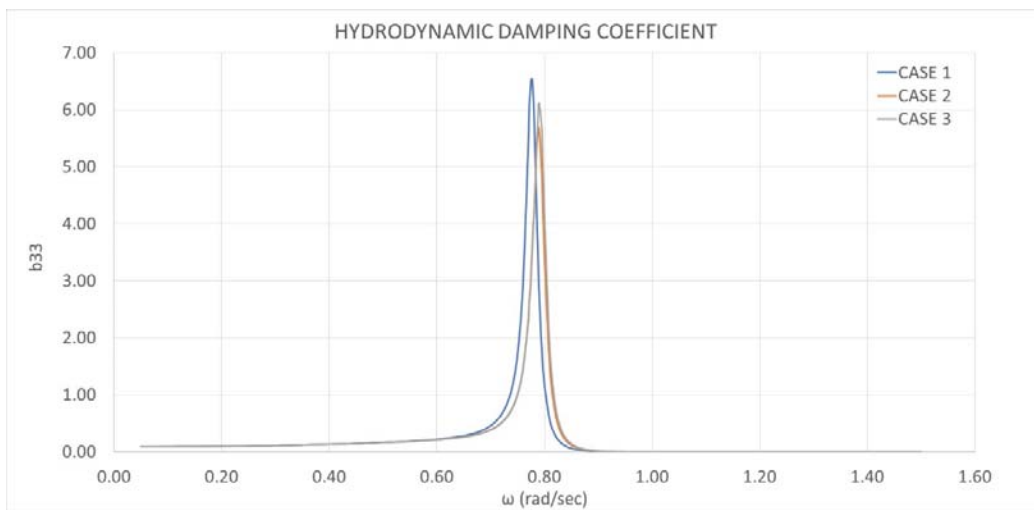
Σχήμα 5.7: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα α_{11} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα



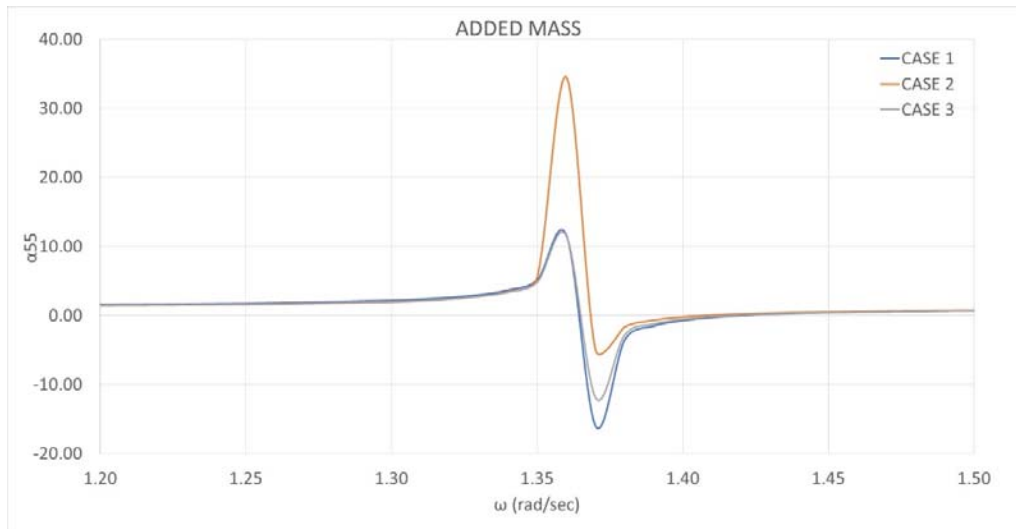
Σχήμα 5.8: Υδροδυναμική απόσβεση b_{11} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα



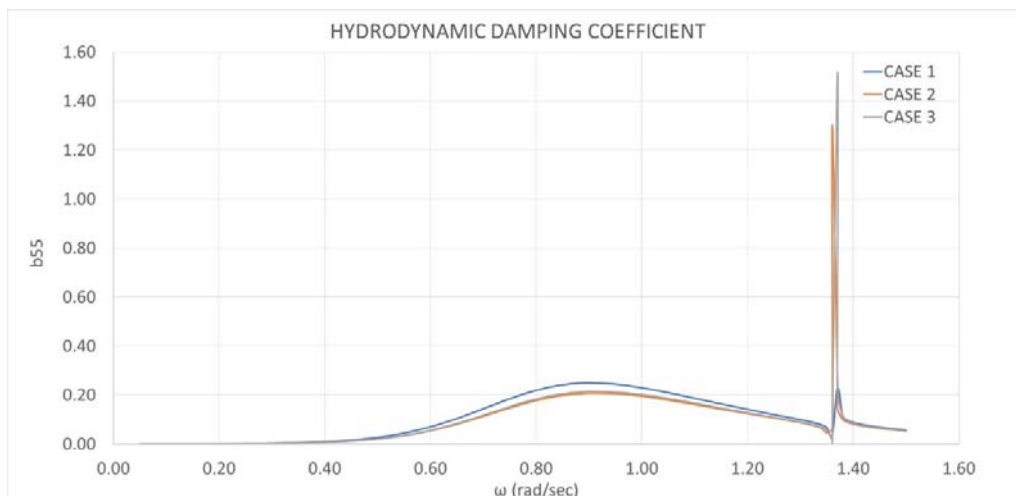
Σχήμα 5.9: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα a_{33} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 5.10: Υδροδυναμική απόσβεση b_{33} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα



Σχήμα 5.11: Υδροδυναμική πρόσθετη μάζα α_{55} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα



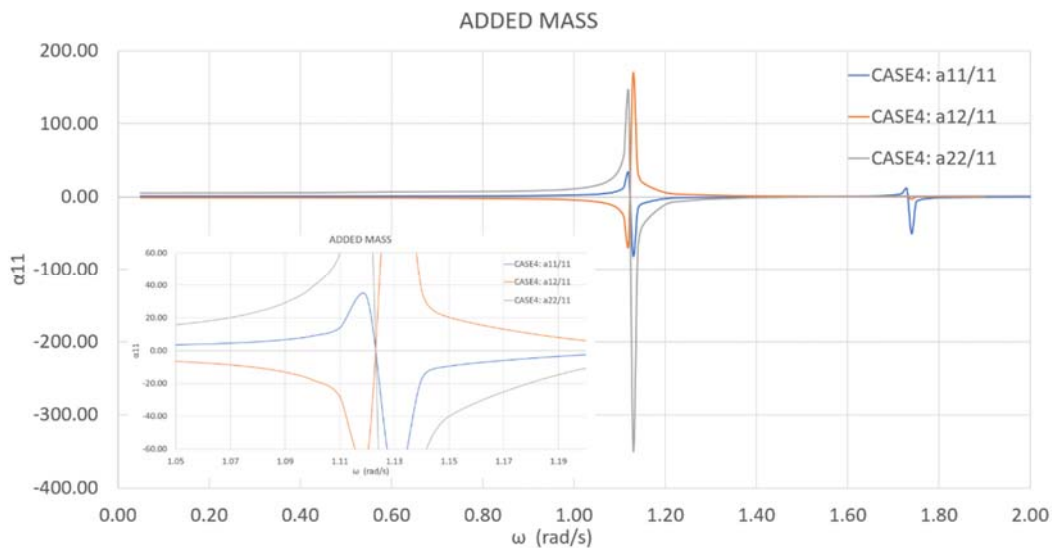
Σχήμα 5.12: Υδροδυναμική απόσβεση b_{55} των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE1, CASE2, CASE3, ως προς την κυματική συχνότητα

Στη συνέχεια στα σχήματα 5.13 – 5.18 απεικονίζονται τα γραφήματα της υδροδυναμικής μάζας και απόσβεσης των σωμάτων της περίπτωσης CASE4. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.13 απεικονίζεται η υδροδυναμική μάζα α_{11} του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x , συγκρινόμενη με την υδροδυναμική μάζα α_{11} του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x και την υδροδυναμική μάζα α_{11} του σώματος 2 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x . Παρατηρούμε ότι στα σημεία που οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης στο σώμα 1, όταν αυτό θεωρούνταν μεμονωμένο ή τμήμα ενιαίας διάταξης με το σώμα 2, παρουσίαζαν ιδιόμορφη συμπεριφορά (δηλαδή στο $\omega = 1.74$ και 1.13 rad/s, αντίστοιχα), παρουσιάζουν συντονισμούς και οι αντίστοιχες υδροδυναμικές μάζες του 1^{ου} σώματος. Χαρακτηριστικός είναι και ο συντονισμός της υδροδυναμικής μάζας του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x στο $\omega=1.75$ rad/s, όπου στην ίδια κυματική συχνότητα μεγιστοποιείται και η οριζόντια δύναμη διέγερσης του

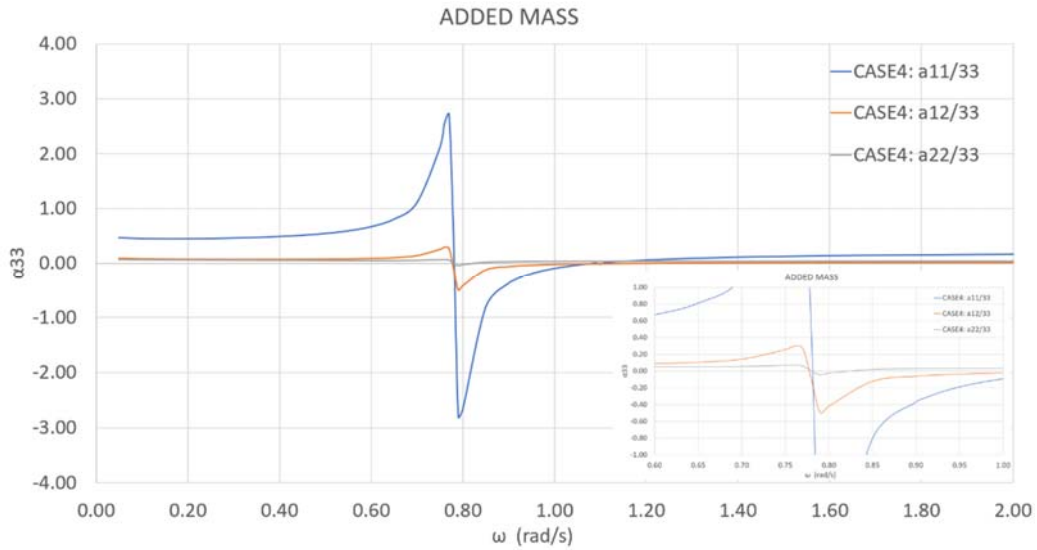
σώματος 1, θεωρούμενου ως μεμονωμένου. Αντίστοιχο συμπέρασμα εξάγεται και από το σχήμα 5.15 όπου απεικονίζεται η υδροδυναμική μάζα α_{55} του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 1 περί τον y , συγκρινόμενη με την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον y και την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον y .

Στο σχήμα 5.14 εμφανίζεται η πρόσθετη μάζα α_{33} του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z , συγκρινόμενη με την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z . Παρατηρείται ότι τα σημεία που μεγιστοποιούν τις αντίστοιχες κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης, δημιουργούν ολικά μέγιστα και ελάχιστα και στις παραπάνω υδροδυναμικές μάζες των εκάστοτε σωμάτων.

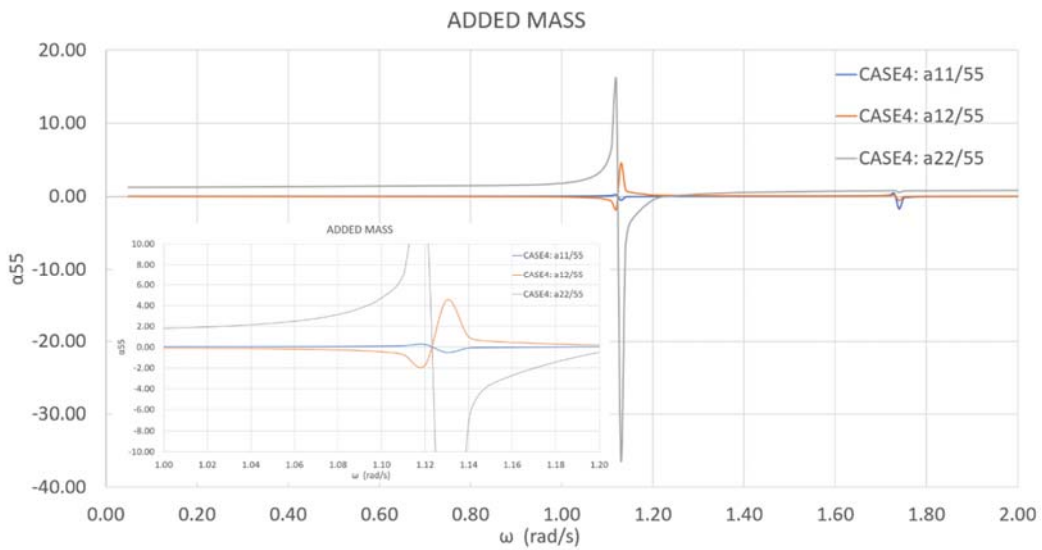
Οι υδροδυναμικές αποσβέσεις της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 στις διευθύνσεις x , z και περί τον y , παρουσιάζονται στα σχήματα 5.16 – 5.18. Παρατηρείται, ότι οι μέγιστες τιμές των αποσβέσεων εμφανίζονται στις περιοχές που πραγματοποιούνται οι συμμετρικοί (rumping) και αντισυμμετρικοί (pitching) συντονισμοί του νερού στον θάλαμο συμπίεσης, βλπέε σχήμα 5.1 σε συνδυασμό με τα σχήματα 5.8 και 5.12, καθώς και 5.2 σε συνδυασμό με το σχήμα 5.10.



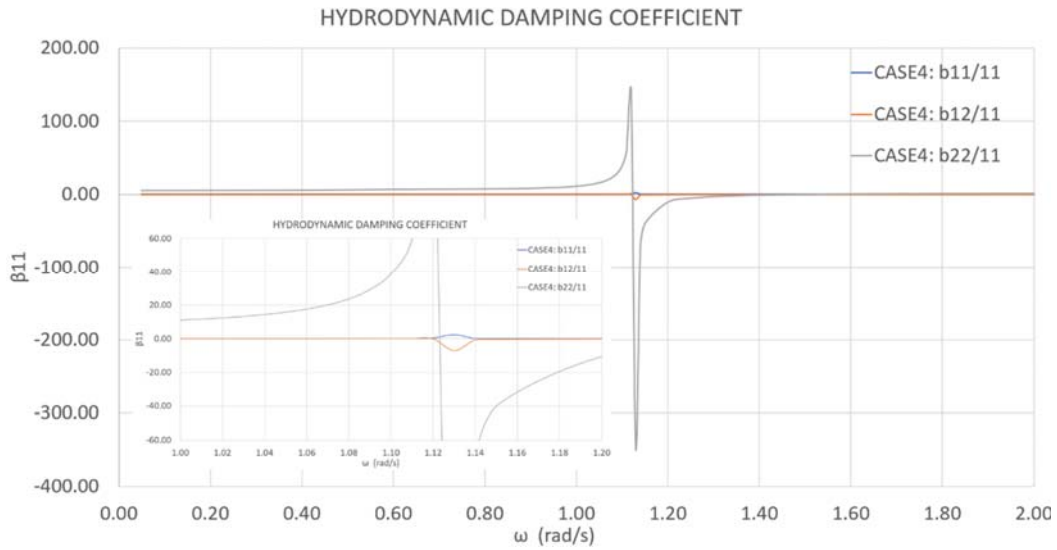
Σχήμα 5.13: Πρόσθετη μάζα α_{11} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: $a_{11}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x , β) CASE4: $a_{12}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x και γ) CASE4: $a_{22}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x .



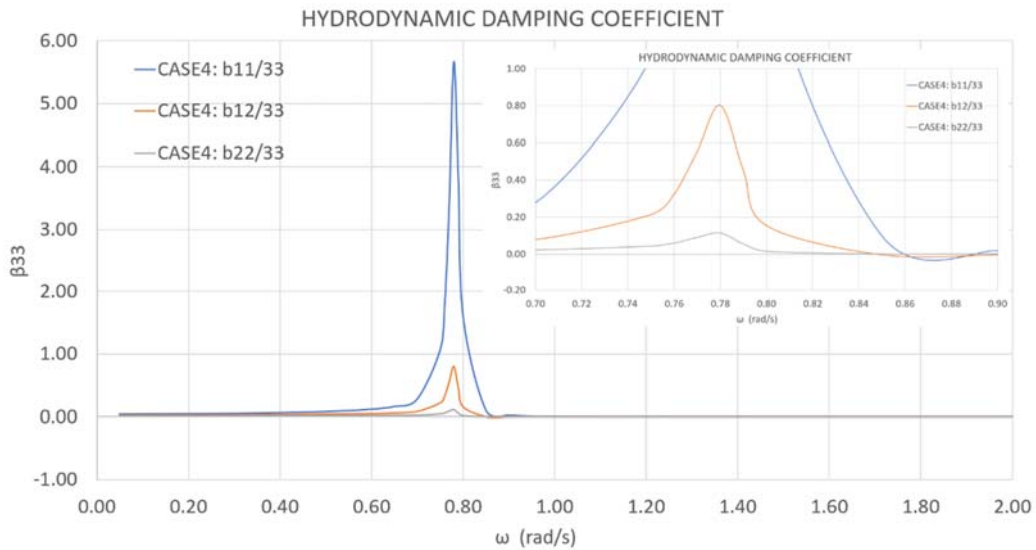
Σχήμα 5.14: Πρόσθετη μάζα α_{33} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: a11/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z, β) CASE4: a12/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και γ) CASE4: a22/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z.



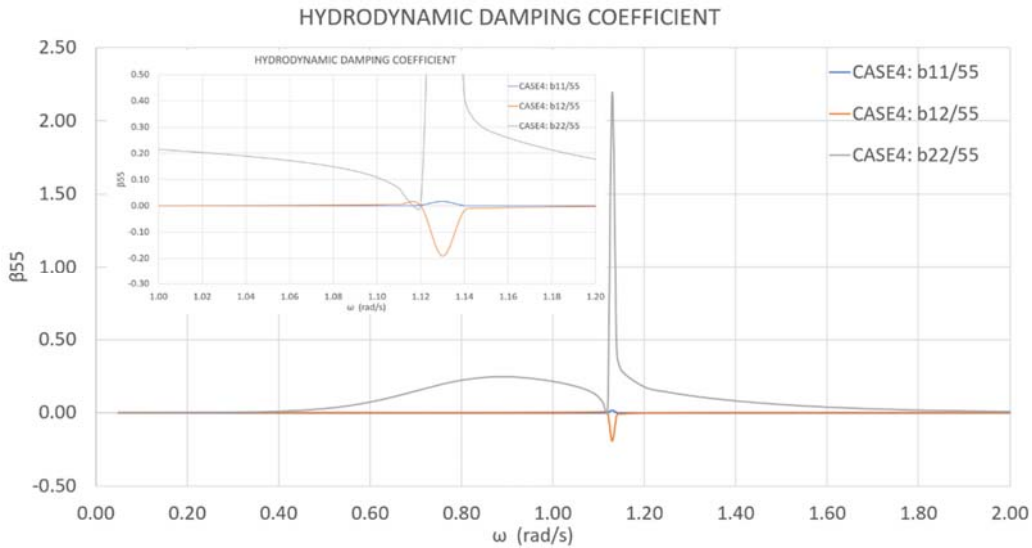
Σχήμα 5.15: Πρόσθετη μάζα α_{55} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: a11/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 1 περί τον γ , β) CASE4: a12/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον γ και γ) CASE4: a22/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον γ .



Σχήμα 5.16: Απόσβεση β_{11} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: $b_{11}/11$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x , β) CASE4: $b_{12}/11$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x και γ) CASE4: $b_{22}/11$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 2 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x .

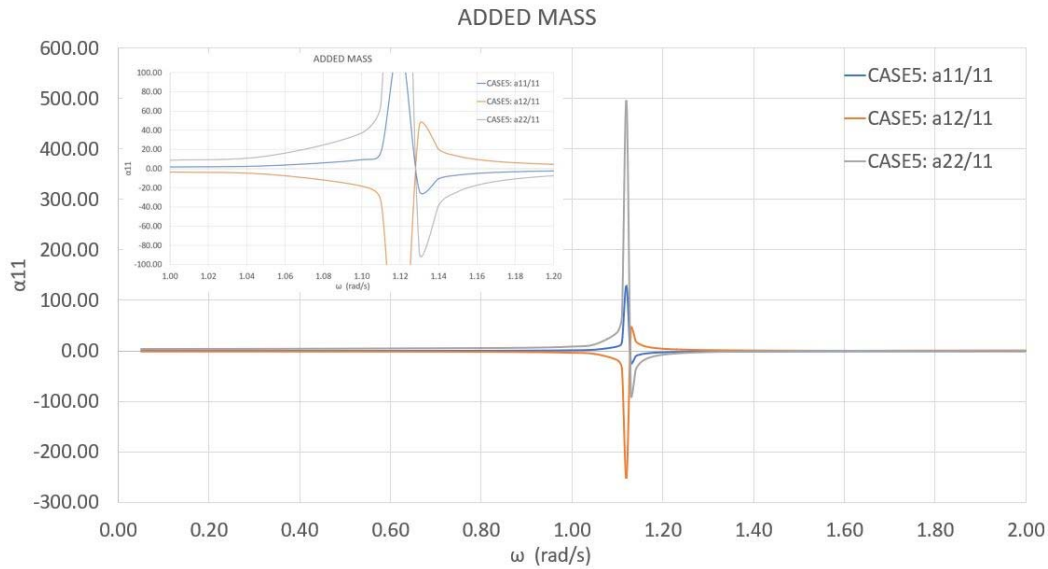


Σχήμα 5.17: Απόσβεση β_{33} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: $b_{11}/33$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z , β) CASE4: $b_{12}/33$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και γ) CASE4: $b_{22}/33$ δηλώνει την απόσβεση του σώματος 2 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z .

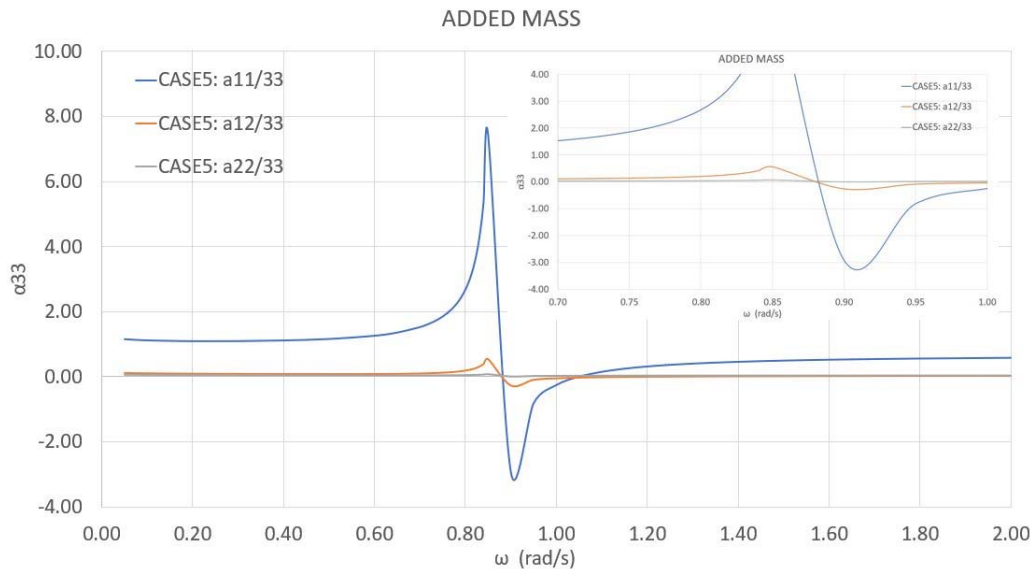


Σχήμα 5.18: Πρόσθετη μάζα β_{55} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE4 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE4: $b_{11}/55$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 1 περί τον y , β) CASE4: $b_{12}/55$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον y και γ) CASE4: $b_{22}/55$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην περιστροφή περί τον y , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον y .

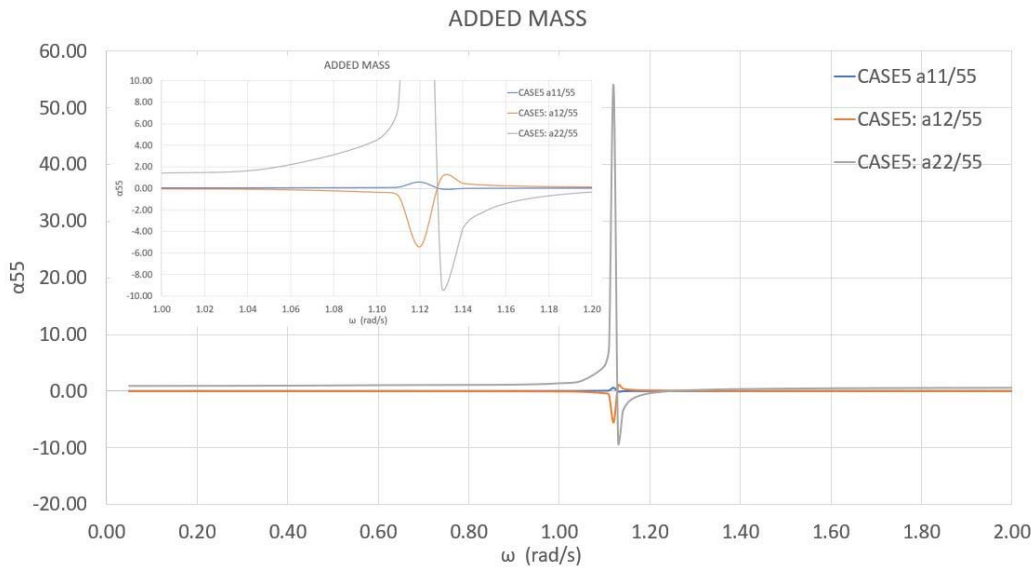
Τέλος στα σχήματα 5.19 – 5.24 απεικονίζονται τα γραφήματα της υδροδυναμικής μάζας και απόσβεσης των σωμάτων της περίπτωσης CASE5. Πιο συγκεκριμένα, στα σχήματα 5.19 – 5.21 απεικονίζεται η υδροδυναμική μάζα α_{11} (αντίστοιχα α_{33} και α_{55}) του σώματος 1 στην διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y), λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y), συγκρινόμενη με την υδροδυναμική μάζα α_{11} (αντίστοιχα α_{33} και α_{55}) του σώματος 1 στην διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y), λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y) και την υδροδυναμική μάζα α_{11} (αντίστοιχα α_{33} και α_{55}) του σώματος 2 στην διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y), λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x (αντίστοιχα z και περί τον y). Τα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά στις συχνότητες συντονισμού με τα αντίστοιχα γραφήματα των δυνάμεων διέγερσης της εξεταζόμενης περίπτωσης.



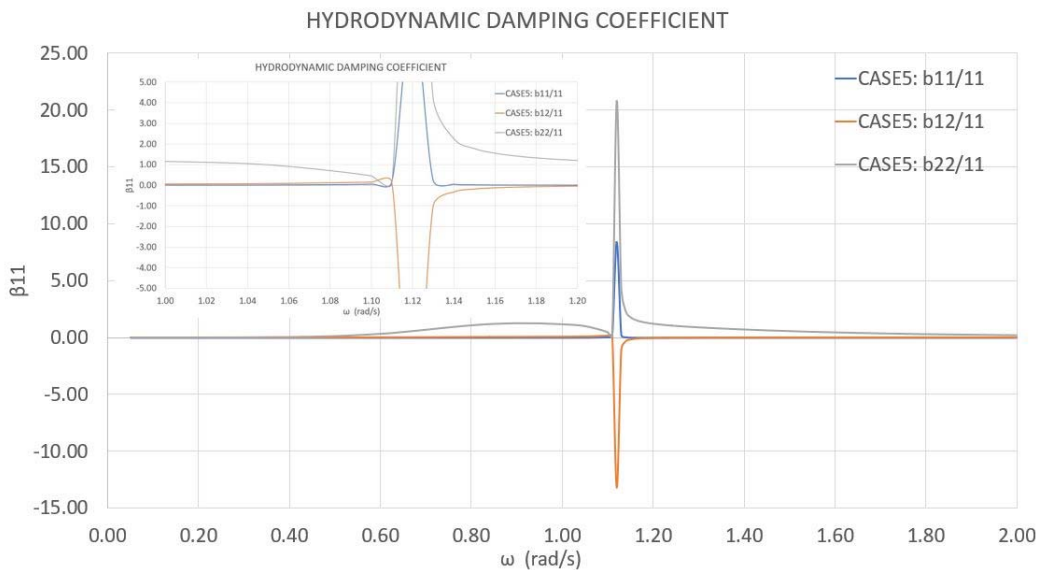
Σχήμα 5.19: Πρόσθετη μάζα α_{11} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: $a_{11}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x , β) CASE5: $a_{12}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x και γ) CASE5: $a_{22}/11$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση x , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x .



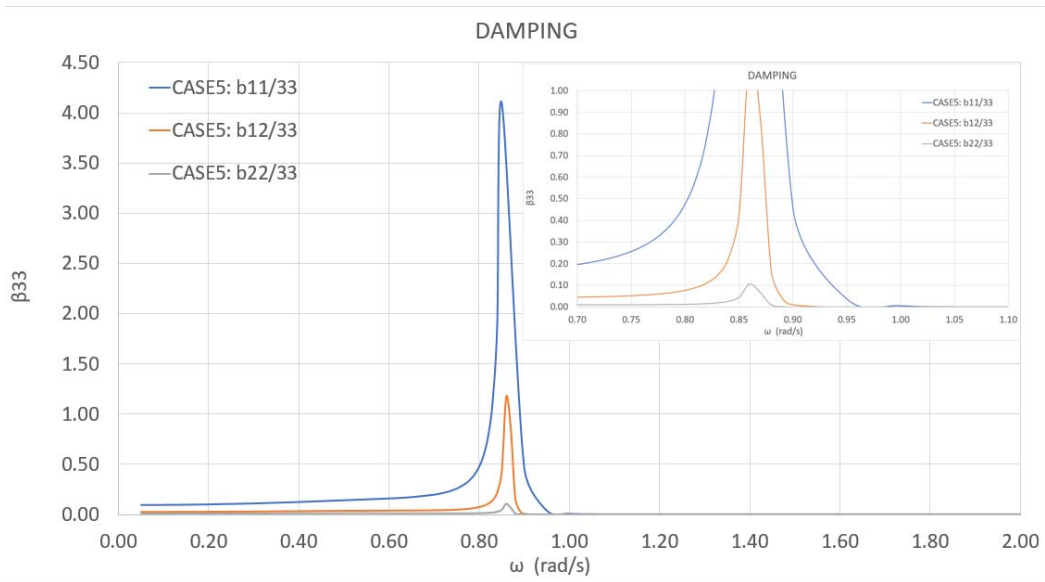
Σχήμα 5.20: Πρόσθετη μάζα α_{33} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: $a_{11}/33$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z , β) CASE5: $a_{12}/33$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και γ) CASE4: $a_{22}/33$ δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση z , λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z .



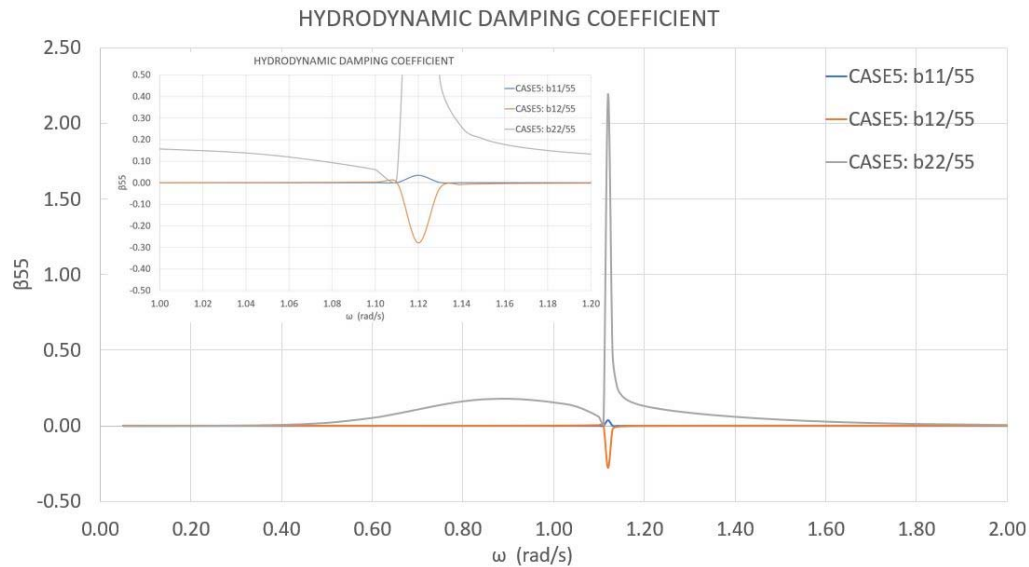
Σχήμα 5.21: Πρόσθετη μάζα α_{33} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: a11/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z, β) CASE5: a12/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και γ) CASE4: a22/33 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z.



Σχήμα 5.22: Απόσβεση β_{11} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: b11/11 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση x, λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση x, β) CASE5: b12/11 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση x, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x και γ) CASE5: b22/11 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 2 στην διεύθυνση x, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση x.



Σχήμα 5.23: Απόσβεση β_{33} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: b11/33 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 1 στη διεύθυνση z, β) CASE5: b12/33 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 1 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z και γ) CASE5: b22/33 δηλώνει την απόσβεση του σώματος 2 στην διεύθυνση z, λόγω κίνησης του σώματος 2 στη διεύθυνση z.



Σχήμα 5.24: Πρόσθετη μάζα β_{55} της εξεταζόμενης περίπτωσης CASE5 ως προς την κυματική συχνότητα, όπου: α) CASE5: b11/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 1 περί τον γ , β) CASE5: b12/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 1 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον γ και γ) CASE5: b22/55 δηλώνει την πρόσθετη μάζα του σώματος 2 στην περιστροφή περί τον γ , λόγω περιστροφής του σώματος 2 περί τον γ .

5.3 Ανύψωση Ελεύθερης Επιφάνειας

Οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας εξωτερικά και εσωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων με τις ονομασίες CASE1, CASE2 και CASE3, παρουσιάζονται στα σχήματα 5.25 και 5.26 συναρτήσει της απόστασης από τα τοιχώματα της συσκευής. Οι ανυψώσεις έχουν σχεδιαστεί για την κυματική συχνότητα γύρω στο $\omega = 0.78 - 0.79$ rad/sec, που οφείλεται σε καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό του θαλάμου συμπίεσης (rumping mode) (βλέπε Σχήμα 5.2) και για $\omega = 1.36 - 1.37$ rad/sec, όπου εμφανίζεται ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας που βρίσκεται εγκλωβισμένη στον θάλαμο συμπίεσης (βλέπε Σχήμα 5.1). Η αδιατάραχτη ελεύθερη επιφάνεια του νερού βρίσκεται πάνω στον άξονα xx' .

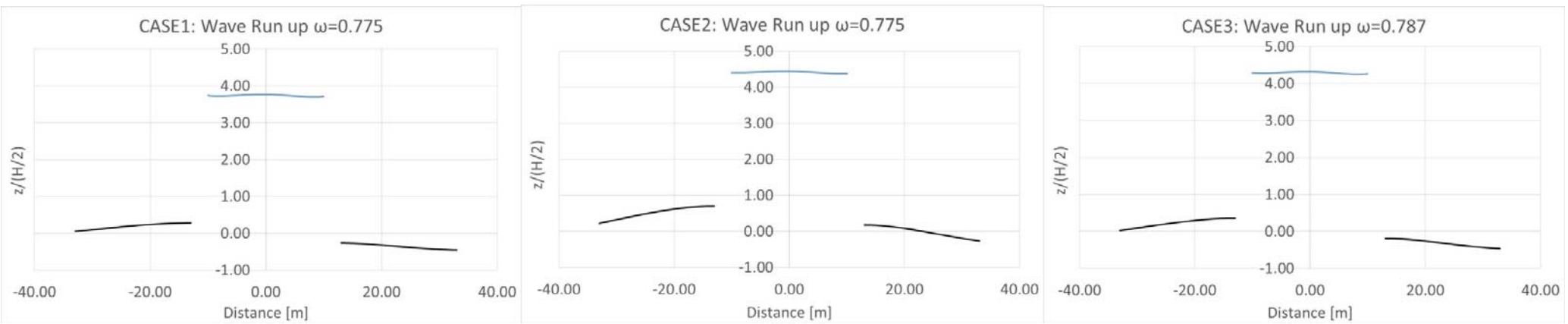
Παρατηρούμε ότι γύρω στο $\omega = 0.78 - 0.79$ rad/sec παρουσιάζεται η συμμετρική ταλάντωση της υδάτινης στήλης εντός των συσκευών (βλέπε σχήμα 5.25), ενώ για $\omega = 1.36 - 1.37$ rad/sec εμφανίζεται ο αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας εντός των συσκευών (βλέπε σχήμα 5.26). Επίσης διαφαίνεται ότι οι εξεταζόμενες περιπτώσεις συσκευής με σφαιρικό και κωνικό θάλαμο ταλάντωσης (CASE2, CASE3) παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ανύψωσης, στις συχνότητες αυτές, ως προς την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εντός του θαλάμου με εσωτερικό σκαλοπάτι, καθιστώντας τις ενεργειακά αποδοτικότερες σε σχέση με την απόδοση της συσκευής με ονομασία CASE1.

Στα Σχήματα 5.27 – 5.28 εμφανίζονται οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά της εξεταζόμενης κυματικής συσκευής με την ονομασία CASE4, συναρτήσει της απόστασης από τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα της συσκευής. Οι εξεταζόμενες κυματικές συχνότητες για τις οποίες σχεδιάζονται οι ανυψώσεις είναι: α) γύρω στο $\omega = 0.7 - 0.8$ rad/sec, που εμφανίζεται η καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό των θαλάμων συμπίεσης των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE4 και ISOLATED BODY 2, β) στο $\omega = 1.04$ rad/sec, που εμφανίζεται η αντίστοιχη καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης για την περίπτωση ISOLATED BODY 1, γ) στο $\omega = 1.74$ rad/sec όπου εμφανίζεται ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας που βρίσκεται εγκλωβισμένη στον θάλαμο συμπίεσης της περίπτωσης ISOLATED BODY 1, δ) στο $\omega = 1.232$ rad/sec όπου εμφανίζεται αντίστοιχα ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας της περίπτωσης ISOLATED BODY 2, και ε) στο $\omega = 1.13$ rad/sec όπου εμφανίζεται αντίστοιχα ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας για την εξεταζόμενη CASE4 περίπτωση.

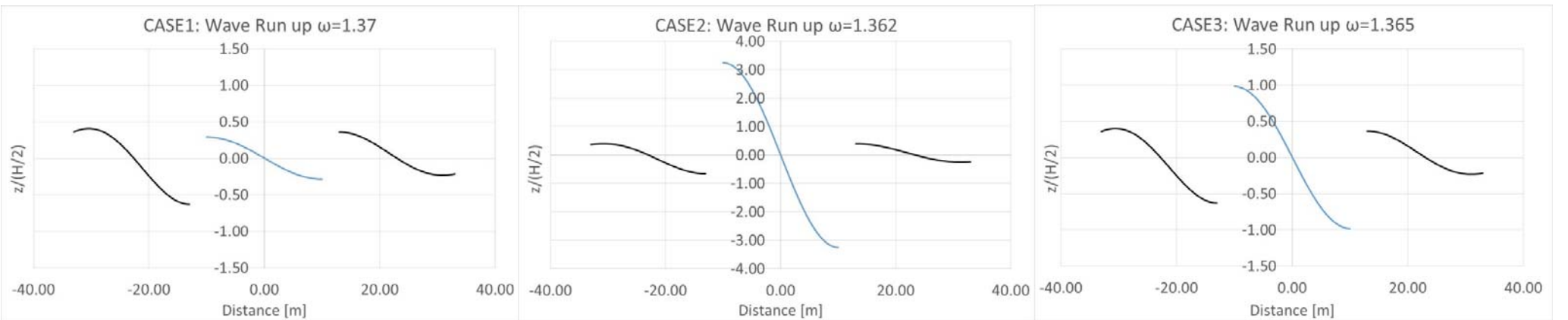
Παρατηρούμε στο Σχήμα 5.27 το συμμετρικό συντονισμό που εμφανίζουν οι εξεταζόμενες περιπτώσεις CASE4, CASE4 ISOLATED BODY 1, CASE4 ISOLATED BODY 2. Επίσης διαπιστώνουμε ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην εξεταζόμενη περίπτωση CASE4 εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή απ' ότι οι τιμές των ανυψώσεων στις μεμονωμένες περιπτώσεις σωμάτων ISOLATED BODY 1 και 2 για τη συχνότητα συμμετρικού συντονισμού. Όμοια για τη συχνότητα αντισυμμετρικού συντονισμού κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.28, οι αντισυμμετρικές μορφές των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά των σωμάτων. Παρατηρείται πως η συνολική μεταβολή του όγκου του ρευστού μέσα στους θαλάμους ταλάντωσης σε σχέση με τον αντίστοιχο όγκο σε αδιατάραχτες συνθήκες είναι μηδενική, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Στα Σχήματα 5.29 – 5.30 απεικονίζονται οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά της εξεταζόμενης κυματικής συσκευής με την ονομασία CASE5, συναρτήσει της απόστασης από τα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα της συσκευής. Οι εξεταζόμενες κυματικές συχνότητες για τις οποίες σχεδιάζονται οι ανυψώσεις είναι: α) γύρω στο $\omega = 0.7 - 0.9$ rad/sec, που εμφανίζεται η καθ' ύψος συμμετρική ταλάντωση συντονισμού της υδάτινης στήλης στο εσωτερικό των θαλάμων συμπίεσης των εξεταζόμενων περιπτώσεων CASE5 και ISOLATED BODY 2, β) στο $\omega = 1.232$ rad/sec όπου εμφανίζεται αντίστοιχα ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας της περίπτωσης ISOLATED BODY 2, και ε) στο $\omega = 1.15$ rad/sec όπου εμφανίζεται αντίστοιχα ο πρώτος αντισυμμετρικός συντονισμός της υδάτινης μάζας για την εξεταζόμενη CASE5 περίπτωση.

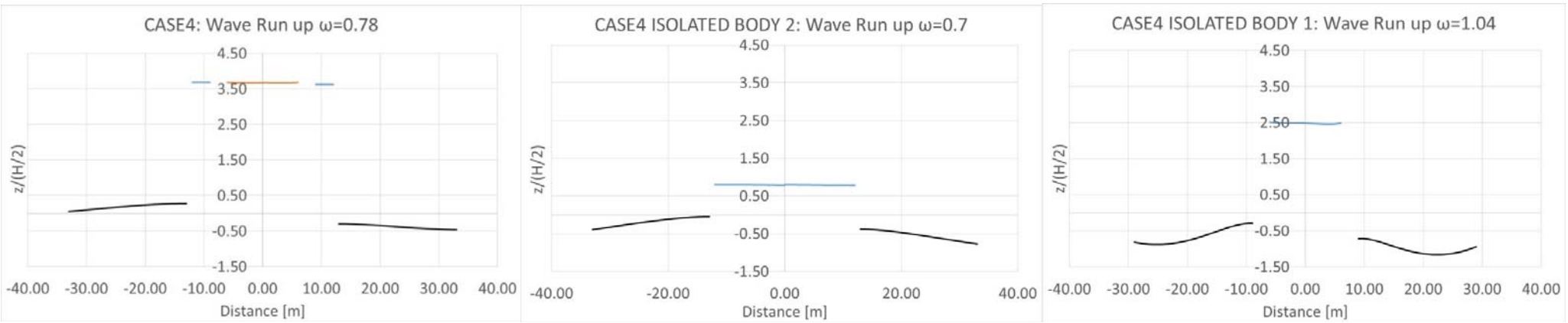
Παρατηρείται τέλος, στο Σχήμα 5.29, πως η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίπτωση CASE5 είναι μεγαλύτερη από αυτή στην περίπτωση CASE5 ISOLATED BODY 2, στη συχνότητα του συμμετρικού συντονισμού της εσωτερικής υδάτινης μάζας.



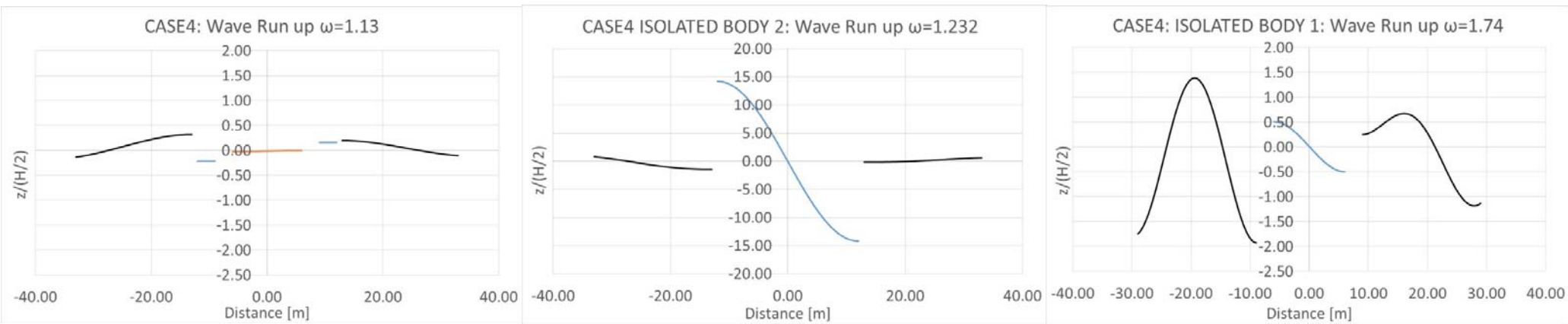
Σχήμα 5.25: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE1, CASE2, CASE3, για κυματική συχνότητα $\omega = 0.77 - 0.79$ rad/sec



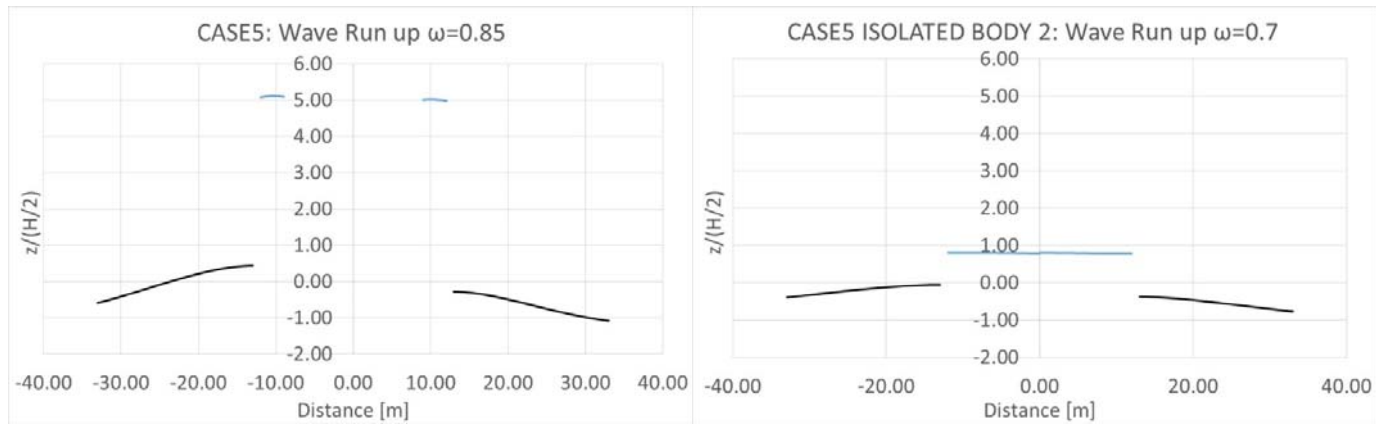
Σχήμα 5.26: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE1, CASE2, CASE3, για κυματική συχνότητα $\omega = 1.36 - 1.37$ rad/sec



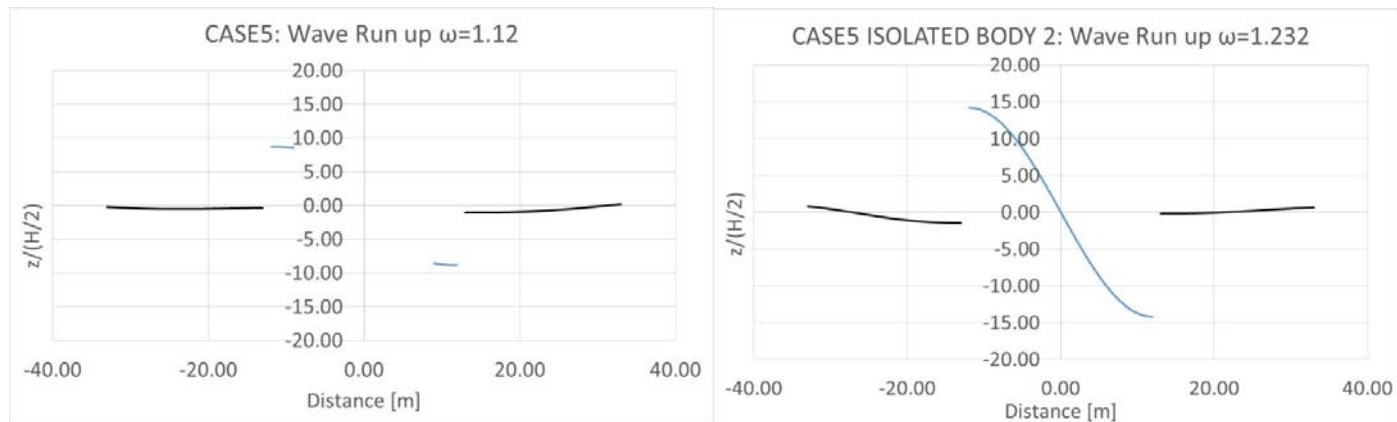
Σχήμα 5.27: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE4, CASE4 ISOLATED BODY 1, CASE4 ISOLATED BODY 2, για κυματικές συχνότητες $\omega = 0.7, 0.78, 1.04$ rad/sec



Σχήμα 5.28: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE4, CASE4 ISOLATED BODY 1, CASE4 ISOLATED BODY 2, για κυματικές συχνότητες $\omega = 1.13, 1.232, 1.74$ rad/sec



Σχήμα 5.29: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE5, CASE5 ISOLATED BODY 2 για κυματικές συχνότητες $\omega = 0.7, 0.85$ rad/sec



Σχήμα 5.30: Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εσωτερικά και εξωτερικά των εξεταζόμενων σωμάτων για τις περιπτώσεις CASE5, CASE5 ISOLATED BODY 2, για κυματικές συχνότητες $\omega = 1.15, 1.232$ rad/sec

6 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας του θαλάμου ταλάντωσης της υδάτινης στήλης στην απόδοση πλωτών κυματικών συσκευών (oscillating water columns) στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας δυναμικής ροής. Αναλύθηκε το υδροδυναμικό πρόβλημα περίθλασης και ακτινοβολίας και προσδιορίστηκαν οι ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης και οι υδροδυναμικοί συντελεστές διαφόρων τύπων θαλάμων κυματικών συσκευών, με στόχο το προσδιορισμό της επίδρασης της γεωμετρίας του θαλάμου σε σχέση με την απολήψιμη κυματική ενέργεια.

Εξετάστηκαν θάλαμοι ταλάντωσης, απλής, σύνθετης κυλινδρικής, σφαιρικής και κωνικής γεωμετρίας, καθώς και θάλαμοι με απλές ή και επάλληλες ομοαξονικές δακτυλιοειδείς επιφάνειες ταλάντωσης της υδάτινης στήλης. Από την σύγκριση των ασκούμενων φορτίων και των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας στα εξεταζόμενα σώματα προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

A) Η συνύπαρξη δύο ομοαξονικών σωμάτων μεταθέτει σε μικρότερη συχνότητα, κοινή και για τα δύο σώματα τον κύριο συντονισμό της οριζόντιας δύναμης που ασκείται σε αυτά, καθώς και στο συγκρότημα των σωμάτων, σε σχέση με εκείνη που εμφανιζόταν όταν κάθε σώμα ήταν μόνο του. Παράλληλα, διαπιστώνεται η διατήρηση και δευτερεύοντος συντονισμού στη συχνότητα συντονισμού του εσωτερικού τοροειδούς σώματος, όταν αυτό ήταν μόνο του.

B) Στην περίπτωση των κατακόρυφων δυνάμεων διέγερσης, το τοπικό μέγιστο της δύναμης τόσο σε κάθε ένα από τα σώματα, παρουσία του άλλου, όσο και στο συγκρότημα των σωμάτων, εμφανίζεται για κυκλική συχνότητα που είναι ανάμεσα σε αυτές των μεμονωμένων σωμάτων και είναι πολύ πιο έντονο. Διαπιστώνεται επίσης ότι στην διαμόρφωση της συνολικής κατακόρυφης δύναμης η συνεισφορά του εσωτερικού κυλίνδρου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του εξωτερικού.

Γ) Στην περίπτωση των σωμάτων ομοαξονικής διάταξης που εξετάστηκαν, διαπιστώθηκε ότι ο εξωτερικός κύλινδρος δρα σαν κυματοθραύστης για τον εσωτερικό σε ότι αφορά στις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε αυτόν σε όλο σχεδόν το φάσμα των συχνοτήτων διέγερσης (εμφανίζεται σημαντική μείωση των αντίστοιχων δυνάμεων διέγερσης στην οριζόντια κατεύθυνση), ενώ προκαλεί μεγάλη αύξηση στις κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στο εσωτερικό σώμα γεγονός που θα έχει ευεργετική επίδραση στην περίπτωση που το σώμα αυτό χρησιμοποιείτο σαν heaving device για την ανάκτηση της κυματικής ενέργειας.

Η τελευταία παρατήρηση μπορεί να οδηγήσει και σε πρόταση για μελλοντική διερεύνηση της απόδοσης κυματικής μηχανής αποτελούμενης από ομοαξονικούς κυλίνδρους, με μηχανισμούς απόληψης κυματικής ενέργειας που να βασίζονται σε παράλληλη λειτουργία ως heaving device του εσωτερικού κυλίνδρου και ως συσκευή ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (oscillating water column) για την τοροειδή υδάτινη επιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ τους.

Δ) Σε ότι αφορά τους υδροδυναμικούς συντελεστές, παρατηρούμε ότι στις συχνότητες που μεγιστοποιείται η υδροδυναμική μάζα, αντίστοιχα εμφανίζονται τα μέγιστα των οριζόντιων και κατακόρυφων δυνάμεων διέγερσης. Όμοια, οι υδροδυναμικές αποσβέσεις μεγιστοποιούνται στις περιοχές που εμφανίζονται οι συμμετρικοί (rumping) και αντισυμμετρικοί (pitching) συντονισμοί του νερού στον θάλαμο συμπίεσης. Παρατηρούμε ακόμα, ότι οι υδροδυναμικοί συντελεστές απόσβεσης μηδενίζονται σε συχνότητες στις οποίες μηδενίζονται και οι αντίστοιχες δυνάμεις διέγερσης.

Ε) Οι συσκευές οι οποίες συντίθενται από σφαιρικό ή κωνικό θάλαμο ταλάντωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανύψωση στις συχνότητες συμμετρικού συντονισμού της υδάτινης μάζας, ως προς τη συσκευή με εσωτερικό σκαλοπάτι εντός του θαλάμου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο όγκος του θαλάμου πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια και των τριών συσκευών είναι ο ίδιος, η αποδοτικότερη συσκευή είναι εκείνη η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Δηλαδή η κυματική συσκευή με σφαιρικό ή κωνικό θάλαμο ταλάντωσης.

ΣΤ) Αντίστοιχα, η κυματική συσκευή η οποία συντίθεται από ομόκεντρα κοίλα κυλινδρικά σώματα φαίνεται να λειτουργεί αποδοτικότερα σε σχέση με τη συσκευή με συμπαγές ομόκεντρο κυλινδρικό σώμα, λόγω του μεγαλύτερου όγκου του νερού που ανυψώνεται πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια σε αδιατάραχτες συνθήκες, στο θάλαμο της πρώτης συσκευής ως προς αυτόν της συσκευής με συμπαγές κυλινδρικό σώμα.

Ζ) Μεταξύ των εξεταζόμενων γεωμετριών συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας η περίπτωση του σφαιρικού και κωνικού θαλάμου ταλάντωσης είναι αποδοτικότερη σε σχέση τις ομόκεντρες κυματικές συσκευές. Αυτό προκύπτει διότι ο όγκος του νερού που ανυψώνεται πάνω από την αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια στη συχνότητα συμμετρικής ταλάντωσης, στο σφαιρικό και κωνικό θάλαμο, είναι μεγαλύτερος από αυτόν των ομόκεντρων κυλινδρικών θαλάμων ταλάντωσης.

Η) Τέλος, διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση ομοαξονικής διάταξης σωμάτων ο όγκος του νερού που ανυψώνεται πάνω από την αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια στη συχνότητα συμμετρικής ταλάντωσης, είναι μεγαλύτερος από το άθροισμα των επί μέρους όγκων νερού στην περίπτωση ανεξάρτητης λειτουργίας των γεωμετριών που τα απαρτίζουν.

Η παρούσα εργασία δύναται να επεκταθεί:

(α) Με την εισαγωγή της συνεκτικότητας στην επίλυση του προβλήματος (επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes) και την μελέτη της επίδρασής της στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού στο εσωτερικό του σώματος, καθώς της επίδρασης των στροβίλων που μπορεί να δημιουργούνται στα σημεία εισόδου του ρευστού στον θάλαμο ταλάντωσης στην εν γένει απόδοση και συμπεριφορά της κατασκευής.

(β) Με την μελέτη γεωμετριών με περισσότερα ομόκεντρα σώματα, ακίνητα και κινούμενα μεταξύ τους (και ως heaving devices)

(γ) Με την μελέτη της συμπεριφοράς του εκτοπιζόμενου από το νερό αέρα στο πλαίσιο των θερμοδυναμικών νόμων, θεωρώντας το ρευστό (αέρας) συμπιεστό.

(δ) Τέλος μπορεί να μελετηθεί και η διαμόρφωση του άνω τμήματος των θαλάμων ταλάντωσης από αεροδυναμική σκοπιά, ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή απομάστευση ενέργειας από τον εκτοπιζόμενο όγκο αέρα.

7 Βιβλιογραφία

- [1] "Wikipedia.org," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon_oil_spill. [Accessed 30 June 2019].
- [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/.
- [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 4 May 2019].
- [9] IRENA, "Renewable capacity highlights", 2018.
- [10] World Energy Council, "Marine Energy 2016 report", 2016.
- [11] Wind Power Engineering, [Online]. Available: www.windpowerengineering.com [Accessed 2 June 2019].
- [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> [Accessed 2 June 2019].
- [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 2019].
- [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 July 2019].
- [25] BP, “BP Energy Outlook 2019 edition”, BP, 2019. [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 13 July 2019].
- [26] EMEC, “The European Marine Energy Centre LTD”, [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>. [Accessed 21 May 2019].
- [27] HCMR, Hellenic Centre for Marine Research, [Online]. Available: <http://www.poseidon.hcmr.gr>. [Accessed 25 May 2019].
- [28] 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
- [29] Soukissian, T., “Blue Energy in the Medirerranean Sea”, Athens: Interreg PELAGOS, 2017.
- [30] Soukissian, T., “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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Mofor, L., Goldsmith, J., Jones, F., “Ocean Energy. Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook”, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2014.
- [34] 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. Avialable: www.si-ocean.eu
- [35] Sheng, S., “Report on Wind Turbine Subsystem Reliability – A Survey of Various Databases”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.
- [36] Corsatea, T.D., Magagna, D., “Overview of European innovate on activities in marine energy technology”, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2013.

- [37] Falcao, A.F., "Wave Energy Utilization: A review of the technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, p. 899-918, 2010.
- [38] Nielsen, K., Smed, P.F., "Point absorber—optimization and survival testing", In: *3rd European Wave Energy Conference*, 1998.
- [39] Center for Renewable Energy Sources, "Ocean Energy Conversion in Europe", Center for Renewable Energy Sources, Athens, 2006.
- [40] 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.
- [41] Falnes, J., "Wave-energy conversion through relative motion between two - single mode oscillating bodies", *J Offshore Mech Arctic Eng* 1999, 1999.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Yu, Y.H., Li, Y., "A RANS Simulation of the Heave Response of a Two-Body Floating-Point Wave Absorber", *ISOPE*, Hawaii, 2011.
- [47] 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.
- [48] McIver, P., "Some hydrodynamic aspects of arrays of wave-energy devices", *Applied Ocean Research*, Vol. 16, p. 61-69, 1994.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Aw-energy, "WaveRoller", [Online]. Available: <https://aw-energy.com/waveroller/>. [Accessed 4 June 2019].

- [54] Verdict Media Limited, "Pelamis, World's First Commercial Wave Energy Project, Agucadoura", Power Technology, 2019. [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/>. [Accessed 17 July 2019].
- [55] Prado, M., Gardner, F., "Deployment of AWS", In: *Coordinated Action in Ocean Energy*, Amsterdam, 2006.
- [56] 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 18 July 2019].
- [57] Ocean Energy, "OE Technology - Platform", Ocean Energy, 2017. [Online]. Available: <http://www.oceanenergy.ie/oe-technology1/platform>. [Accessed 18 July 2019].
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Mavrakos, S.A., "Hydrodynamic characteristics of floating toroidal bodies", *Ocean Engineering*, Vol. 24, No. 4, p. 381-399, 1997.
- [65] Faltinsen, O.M., "Sea loads on ships and offshore structures", Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 1992.
- [66] Silverman, S., Abrmanson, N.H., "Lateral sloshing in moving containers", *The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers*, Washington, D.C.: NASA, 1966.
- [67] "Wikipedia.org," [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. [Accessed 30 June 2019].