ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός και Ανάλυση Συστήματος Απορρόφησης Κυματικής Ενέργειας

Νικόλαος Λεβεντάκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2012

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη αφορά τη σχεδίαση μηχανισμού, με την ονομασία «κυματικό βαρούλκο», ο οποίος βασίζεται στη δομή του ναυτικού βαρούλκου (βιντσιρέλο), αλλά είναι κατάλληλα τροποποιημένος ώστε να δεσμεύει την ενέργεια του κυματισμού σκαφών ή πλωτών σωμάτων γενικότερα. Το κυματικό βαρούλκο είναι σχεδιασμένο ώστε κατά τη λειτουργία του να περιορίζει την ταλάντωση του σκάφους, όσο αυτό είναι δεμένο ή αγκυροβολημένο, απορροφώντας ποσοστό της μηχανικής ενέργειας που μεταφέρουν τα κύματα στο σκάφος και μετατρέποντάς το σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι προσφέρει αφενός φθηνή και καθαρή ενέργεια, αφετέρου μεγαλύτερη άνεση στους επιβάτες κατά την παραμονή τους στο σκάφος.

Σε ένα σκάφος μπορούν να εγκαθίστανται ένας ή περισσότεροι μηχανισμοί. Με την εγκατάσταση τριών κυματικών βαρούλκων καθίσταται δυνατή η δέσμευση της ενέργειας της κίνησης του σκάφους σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας του. Λειτουργεί είτε κατά την πρόσδεση του σκάφους σε λιμένα είτε κατά την αγκυροβόληση του σκάφους αρόδου. Είναι επίσης δυνατό να συνδεθούν μεταξύ τους διαφορετικά σκάφη σχηματίζοντας πλέγμα. Σε κάθε περίπτωση, για λόγους ασφάλειας, το σύστημα των κυματικών βαρούλκων πρέπει να χρησιμοποιείται παράλληλα με συμβατικούς τρόπους πρόσδεσης.

Κυματικά βαρούλκα μπορούν να εγκαθίστανται είτε σε συμβατικά είτε σε υβριδικά/ηλεκτρικά σκάφη με σκοπό την παραγωγή ενέργειας ή την εξοικονόμηση καυσίμου αντίστοιχα. Το κόστος ενός κυματικού βαρούλκου αναμένεται στα 2000€ με 4000€ ανάλογα με το μέγεθος και την ονομαστική ισχύ. Το οικονομικό όφελος της επένδυσης εξαρτάται από το σενάριο χρήσης. Μεγαλύτερο όφελος προκύπτει αν το σύστημα εγκατασταθεί σε υβριδικό ή ηλεκτρικό σκάφος λόγω της εξοικονόμησης ή της υποκατάστασης του καυσίμου. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να μην αγνοείται το μη χρηματικό όφελος της απόσβεσης της ταλάντωσης του σκάφους και της επίτευξης μεγαλύτερης άνεσης για τους επιβάτες.

Το κυματικό βαρούλκο απορροφά κυματική ενέργεια χρησιμοποιώντας πλωτήρες των οποίων ο κύριος σκοπός χρήσης είναι διαφορετικός από την παραγωγή ενέργειας, όπως σκάφη και πλοία. Η συνδυασμένη αυτή χρήση μπορεί να καταστήσει δυνατή την εκμετάλλευση καθαρής ανανεώσιμης ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα με οικονομικά αποδοτικό τρόπο και να διαδώσει την κυματική ενέργεια στο ευρύ καταναλωτικό κοινό.

Abstract

Wave Winch is a wave energy absorber, based on the structure of the nautical winch, specially designed to damp the oscillations of a boat while it is moored and to transform the mechanical energy of the boat to electricity able to be stored in batteries. Thus the system provides both clean renewable energy and greater comfort to the passengers.

Wave winch consists of a drum linked to the base of the mechanism through a revolute joint, a spring rewinder and a ratchet. The drum is connected through gears to a separate gear box which rotates the electric DC generator. The electric circuit consists of an electric diode connected in series to a charge regulator for batteries or alternatively to an inverter. The structural similarities between the wave winches and the conventional nautical winches lead to easy and cheap production from the industries and high functionality and robustness.

It is possible to establish one or more wave winches on a single boat. Three of them are enough to absorb the energy from the movement of the boat in all its degrees of freedom. It can be used either when the ship is moored at port or offshore. It is also possible to connect boats between them in order to create a grid on the sea surface. For safety reasons the wave winch system should be used only when the boat is safely moored according to the conventional ways. Other way the system may not withstand the wave excitation forces.

Wave winches can be used either in conventional or in hybrid / electric boats in order to produce electricity or reduce fuel consumption correspondingly. The cost of a wave winch is expected to be similar to the cost of a conventional nautical electric winch, which varies between 2000€ and 4000€ depending on the size and the nominal power. The financial outcome of the investment depends on the scenario of use. Greater profit is achieved when the system is used on hybrid or electric crafts due to the reduction in fuel consumption. In both cases should be added the non monetary value of the comfort achieved due to the damping of boat oscillations.

Wave winches absorb wave energy using floaters whose main purpose is different than energy production, such as ships and boats. Combined use can make it possible to extract clean, renewable energy from ocean waves in an inexpensive way and promote wave energy harvesting to a wide range of people.

«Δόξα τῷ Θεῷ πάντων ἕνεκεν»

(αγ. Ιω. Χρυσόστομος)

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των προπτυχιακών μου σπουδών τις οποίες δε θα μπορούσα να ολοκληρώσω χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη των γονιών μου χάρη στην οποία μπόρεσα να προχωρήσω απερίσπαστα σε αυτές. Ευχαριστίες επιπλέον οφείλω στον αδερφό μου, στο ευρύτερο οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον καθώς και στον πνευματικό μου για την πολύπλευρη υποστήριξή τους, οι οποίες όπως είναι φυσικό είναι δύσκολο να διατυπωθούν και να συμπυκνωθούν στις λίγες αυτές γραμμές.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, χωρίς την καθοδήγηση του οποίου δε θα ήταν δυνατόν να εξελιχθεί η αρχική μου ιδέα στην παρούσα μελέτη. Η εμπειρία του υπήρξε ασφαλής οδηγός για την ανάπτυξη, στα πλαίσια προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, ενός καινοτόμου προϊόντος, εγχειρήματος εξ ορισμού επισφαλούς και πολύπλοκου λόγω της σχετικής ασάφειας δεδομένων και στόχων που οπωσδήποτε υπάρχουν στην αρχική φάση.

Καταλυτική για την προσπάθειά μου ήταν και η πρόθυμη βοήθεια όλων των μελών της ερευνητικής ομάδας του κ. Παπαδόπουλου. Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Μακροδημήτρη Μιχάλη και κ. Νάνο Κώστα καθώς και το μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Νταβλιάκο Ιωάννη για την πολύτιμη αρωγή τους σε κάθε στάδιο της διπλωματικής μου εργασίας.

Νικόλαος Ι. Λεβεντάκης Φθινόπωρο 2012

Περιεχόμενα

Περίληψη **2**

Abstract **3**

Ευχαριστίες **5**

Περιεχόμενα **6**

Κατάλογος Σχημάτων **8**

Κατάλογος Πινάκων **12**

Κατάλογος Συντμήσεων **13**

Κατάλογος Συμβόλων **14**

1 Εισαγωγή **20**

1.1 Σκοπός Εργασίας 20

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 21

1.3 Δομή Εργασίας 25

2 Κυματική Ενέργεια **26**

2.1 Ανεμογενή βαρυτικά κύματα 26

2.2 Κατανομή παγκόσμιου κυματικού δυναμικού 28

2.3 Οφέλη και προκλήσεις της κυματικής ενέργειας 29

2.4 Επίδραση στο περιβάλλον 30

2.5 Ελλάδα: προοπτικές και δυνατότητες 31

3 Μηχανισμοί δέσμευσης και μετατροπής κυματικής ενέργειας **33**

3.1 Ιστορική αναδρομή των διατάξεων δέσμευσης κυματικής ενέργειας 33

3.2 Κατηγοριοποίηση διατάξεων κυματικής ενέργειας 36

3.3 Μελέτη Περιπτώσεων 40

4 Σχεδιασμός Κυματικού Βαρούλκου **45**

4.1 Προδιαγραφές 45

4.2 Σχεδιασμός της αρχής λειτουργίας του συστήματος 46

4.3 Μηχανολογικός Σχεδιασμός 53

4.4 Μέθοδος Συναρμολόγησης 61

4.5 Μέθοδος Εγκατάστασης 65

4.6 Μέθοδος Χειρισμού 68

4.7 Περιγραφή της λειτουργίας του μηχανισμού 68

4.8 Ενδιαφέρουσες εφαρμογές 69

5 Ανάλυση του Συστήματος 74

5.1 Μοντελοποίηση συστήματος κυματικού βαρούλκου 74

5.2 Μαθηματική μοντελοποίηση αλληλεπίδρασης σώματος – κύματος..... 81

5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση συνολικού συστήματος 100

6 Οικονομοτεχνική ανάλυση 108

6.1 Σενάριο 1: Χρήση σε υβριδικό ή ηλεκτρικό σκάφος 108

6.2 Σενάριο 2: Πώληση ενέργειας στο δίκτυο σε προνομιακή τιμή 100€/MWh 109

6.3 Σενάριο 3: Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συμβατικό σκάφος 109

6.4 Αξιολόγηση της επένδυσης 109

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία 111

7.1 Συμπεράσματα 111

7.2 Μελλοντική εργασία 112

Βιβλιογραφία 114

A Παράρτημα: Ανάλυση σχέσεων 116

Χρήσιμες μαθηματικές σχέσεις 116

Ολοκλήρωση δύναμης και ροπής άνωσης 116

Δυναμική πλωτήρα για απειροστές μετατοπίσεις 116

Ολοκλήρωση δύναμης και ροπής ακτινοβολίας 119

B Παράρτημα: Κώδικες Matlab 121

Κώδικας επίλυσης συστήματος κυματικού βαρούλκου 121

Δομικό διάγραμμα του συστήματος κυματικού βαρούλκου στο Simulink 122

Γράφος του συστήματος του κυματικού βαρούλκου στο Simscape 122

Κώδικας επίλυσης κίνησης του πλωτήρα στο χώρο 122

Δομικό διάγραμμα των εξισώσεων κίνησης του πλωτήρα στο Simulink 124

Κώδικας συνολικού συστήματος 124

Συνδυασμός δομικού διαγράμματος Simulink και γράφων του Simscape 128

Γ Παράρτημα: Περιβαλλοντικά ζητήματα 129

Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπεράκτιων / παράκτιων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας και του περιβάλλοντος στις θέσεις εγκατάστασης τους 129

Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παράκτιων και των επακτίων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας και του περιβάλλοντος στις θέσεις εγκατάστασης τους 132

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας US 2008/0018114 A1. Εγκατάσταση σε σκάφος βραχιόνων οι οποίοι συνδέονται με πλωτήρες εκτός του σκάφους. 22

Σχήμα 1-2. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας DE 20312348. Εγκατάσταση σε σκάφος συστήματος κυματικής ενέργειας το οποίο αποτελείται από τύμπανο, αλυσίδα και αντίβαρο για την τάνυση της αλυσίδας. 23

Σχήμα 1-3. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας US 2008/0217921. Για την τάνυση του εύκαμπτου φορέα (σκοινί , αλυσίδα κλπ) γίνεται χρήση ελατηρίου. 23

Σχήμα 1-4. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας GB 2479348. Μηχανισμός απορρόφησης κυματικής ενέργειας ο οποίος εγκαθίσταται σε σκάφους και διαθέτει τύμπανο στο οποίο περιελίσσεται εύκαμπτος φορέας, επανατατικό ελατήριο και καστάνια. 24

Σχήμα 2-1. Η κίνηση ενός στοιχείο του ρευστού κατά τον κυματισμό.....28

Σχήμα 2-2. Μέσες τιμές κυματική ισχύος (kW/m) 28

Σχήμα 2-3. Κατανομή μέσου ύψους κύματος στον ελληνικό και ευρύτερο θαλάσσιο χώρο[16]. 31

Σχήμα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση του κυματικού μετατροπέα Salter's Duck. 34

Σχήμα 3-2. Κυματικό πάρκο στο Agucadoura. 35

Σχήμα 3-3. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του Wave Hub. 35

Σχήμα 3-4. Αρχή λειτουργίας διατάξεων ταλαντωμένης στήλη νερού (Oscillating Water Column). 36

Σχήμα 3-5. Η μηχανή WaveBob. 36

Σχήμα 3-6. Αρχή λειτουργίας διατάξεων ανύψωσης (overtopping devices). 37

Σχήμα 3-7. Η μηχανή Wave Dragon. 37

Σχήμα 3-8. Αρχή λειτουργίας διατάξεων πρόνευσης (surging devices).....38

Σχήμα 3-9. Η μηχανή Wave Roller. 38

Σχήμα 3-10. Αρχή λειτουργίας διατάξεων αρθρωμένων σωμάτων (attenuator).....39

Σχήμα 3-11. Η μηχανή Pelamis. 39

Σχήμα 3-12. Αρχή λειτουργίας διατάξεων παλινδρόμησης (heaving devices). 40

Σχήμα 3-13. Η μηχανή Archimedes Wave Swing.....40

Σχήμα 3-14. Ένας από τους κυματικούς μετατροπείς PowerBuoy του πάρκου. 41

Σχήμα 3-15. Ο κυματικός μετατροπέας Powerbuoy. 42

Σχήμα 3-16. Στιγμιότυπο από τη συναρμολόγηση των Pelamis. 43

Σχήμα 3-17. Ο κυματικός μετατροπέας Pelamis σε λειτουργία.....43

Σχήμα 3-18. Ο θάλαμος της μονάδας Pico OWC.....44

Σχήμα 3-19. Ακροφύσια της μονάδας Pico OWC.....44

Σχήμα 4-1. Ροή ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων του κυματικού βαρούλκου σε κάθε φάση λειτουργίας του. 47

Σχήμα 4-2. Μονογραμμικό διάγραμμα της 1^{ης} παραλλαγής.....50

Σχήμα 4-3. Μονογραμμικό διάγραμμα της 2^{ης} παραλλαγής.....51

Σχήμα 4-4. Ναυτικά βιντσιρέλα. 53

Σχήμα 4-5. Ισομετρική όψη του μηχανισμού εκτεταμένου (exploded view). 55

Σχήμα 4-6. Ισομετρική όψη του μηχανισμού εκτεταμένου (exploded view). 55

Σχήμα 4-7. Ισομετρική όψη του μηχανισμού από πάνω. 56

Σχήμα 4-8. Ισομετρική όψη του μηχανισμού από κάτω. 56

Σχήμα 4-9. Το τύμπανο του κυματικού βαρούλκο. Διακρίνεται η οπή στην οποία προσαρμόζεται σταθερά ο εύκαμπτος φορέας. 57

Σχήμα 4-10. Το τύμπανο με τοποθετημένο στο εσωτερικό του το επανατατικό ελατήριο. 57

Σχήμα 4-11. Το τύμπανο με βιδωμένο στο πάνω μέρος το πώμα. Διακρίνεται το βέλος που επισημαίνει τη φορά περιστροφής του χειρομοχλού από το χειριστή. 58

Σχήμα 4-12. Η βάση με τη ροδέλα και το έδρανο κύλισης. 58

Σχήμα 4-13. Το κάτω μέρος του μηχανισμού όπου διακρίνονται οι εγκοπές με τις οποίες προσαρμόζεται η καστάνια στη βάση, οι μικρές οπές για τους κοχλίες και η μεγαλύτερη οπή για τη διέλευση της ατράκτους του κιβωτίου ταχυτήτων.....59

Σχήμα 4-14. Ο μηχανισμός σε τομή.....59

Σχήμα 4-15. Η συνεργασία του κεντρικού πείρου με την καστάνια μέσω των στελεχών της.....60

Σχήμα 4-15. Η συνεργασία του κεντρικού πείρου με το χειρομοχλό.....60

Σχήμα 4-16. Η συνεργασία των σφηνών με τη βάση (παρουσιάζεται διαφανής) και τον κεντρικό πείρο.....61

Σχήμα 4-17. Η συνεργασία του τυμπάνου με τον οδοντωτό τροχό, το κιβώτιο ταχυτήτων και την ηλεκτρική γεννήτρια. Από το σχήμα έχει αφαιρεθεί η βάση για λόγους ευκρίνειας. Ο οδοντωτός τροχός δεν εφάπτεται με την καστάνια. 61

Σχήμα 4-18. Ισομετρικές όψεις της βάσης. Διακρίνονται αριστερά και δεξιά το μικρότερο και το μεγαλύτερο ορθογώνιο κατακόρυφο άνοιγμα αντίστοιχα. 62

Σχήμα 4-19. Επισημαίνεται με τη μαύρη λεπτή γραμμή η πορεία τοποθέτησης της καστάνιας στο εσωτερικό της βάσης. 62

Σχήμα 4-20. Προσαρμογή των στελεχών της καστάνιας στον κεντρικό πείρο. 63

Σχήμα 4-21. Διακρίνεται η βάση με τοποθετημένο τον οδοντωτό τροχό και το κιβώτιο ταχυτήτων. 64

Σχήμα 4-22. Το τύμπανο με τον εύκαμπτο φορέα περιτυλιγμένο και προσαρμοσμένο στην οπή του τυμπάνου.....64

Σχήμα 4-23. Χειρομοχλός αποσπασμένος από τον υπόλοιπο μηχανισμό. 65

Σχήμα 4-24. Το τύμπανο με το πώμα και το ελατήριο αποσπασμένα από τον υπόλοιπο μηχανισμό. 66

Σχήμα 4-25. Ισομετρική όψη του μηχανισμού μετά την απομάκρυνση και πριν την επανατοποθέτηση του τυμπάνου με το πώμα και το ελατήριο. 66

Σχήμα 4-26. Ισομετρική όψη του μηχανισμού, μετά την σύνδεση του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρικής γεννήτριας και πριν τη σύνδεση του οδοντωτού τροχού. 67

Σχήμα 4-27. Ισομετρική όψη του μηχανισμού, μετά τη σύνδεση του οδοντωτού τροχού και πριν την επανατοποθέτηση του τυμπάνου με το πώμα και το ελατήριο. .67

Σχήμα 4-28. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του συστήματος.....68

Σχήμα 4-29. Εγκατάσταση των κυματικών βαρούλκων πάνω σε σκάφη δύο διαφορετικών σχημάτων. Με κύκλο σημειώνονται οι θέσεις των κυματικών βαρούλκων.....70

Σχήμα 4-30. Σκάφος με εγκατεστημένα κυματικά βαρούλκα δεμένο σε λιμένα. Διακρίνονται τα σκοινιά με τα οποία δένει στους κάβους, η αλυσίδα της άγκυρας και οι εύκαμπτοι φορείς των κυματικών βαρούλκων.....70

Σχήμα 4-31. Σύνδεση του σκάφους αρόδου με απευθείας σύνδεση των εύκαμπτων φορέων στο στριφτάρι της αλυσίδας της άγκυρας. 71

Σχήμα 4-32. Σύνδεση του σκάφους αρόδου με σύνδεση των εύκαμπτων φορέων σε πλωτές άγκυρες και σύνδεση των πλωτών αγκυρών στο στριφτάρι της αλυσίδας της σταθερής άγκυρας. 71

Σχήμα 4-33. Παράδειγμα διασύνδεσης σκαφών που διαθέτουν τρία κυματικά βαρούλκα. Με έντονες κουκκίδες συμβολίζονται οι θέσεις των κυματικών βαρούλκων. 73

Σχήμα 5-1. Αφαιρετικό μοντέλο του συστήματος το οποίο απεικονίζει την αρχή λειτουργίας του παρουσιάζοντας μόνο τα μέλη του συστήματος που επηρεάζουν τη δυναμική του συμπεριφορά. 75

Σχήμα 5-2. Ο γραμμικός γράφος του συστήματος 76

Σχήμα 5-3. Η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. 81

Σχήμα 5-4. Κυλινδρικός πλωτήρας και συστήματα συντεταγμένων. 82

Σχήμα 5-5. Περιστροφή του σωματόδετου συστήματος αξόνων κατά τις γωνίες Euler. 82

Σχήμα 5-6. Η θέση και ο προσανατολισμός του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα αξόνων. 99

Σχήμα 5-7. Ξεχωριστά, η κατά z μετατόπιση και η ως προς y περιστροφή (εξωτερική γωνία Euler β) 99

Σχήμα 5-8. Οι συνιστώσες της μεταφορικής και περιστροφικής ταχύτητας του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων.....100

Σχήμα 5-9. Σύστημα τριών κυματικών βαρούλκων εγκατεστημένο σε κυλινδρικό πλωτήρα.....100

Σχήμα 5-10. Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει δυναμική αλληλεπίδραση του πλωτήρα και των κυματικών βαρούλκων. 101

Σχήμα 5-11. Δυνάμεις και ροπές 101

Σχήμα 5-12. Μεταφορά πληροφορίας μεταξύ πλωτήρα και κυματικών βαρούλκων κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος. 104

Σχήμα 5-13. Γραφική απεικόνιση του συστήματος. 105

Σχήμα 5-14. Η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης κάθε υποσυστήματος κυματικού βαρούλκου στο συνολικό σύστημα.....106

Σχήμα 5-15. Οι συνιστώσες της θέσης και του προσανατολισμού του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. 107

Σχήμα 5-16. Οι συνιστώσες της γραμμικής και περιστροφικής ταχύτητας του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. 107

Σχήμα 7-1. Βιντσιρέλο με διαμόρφωση στο πάνω μέρος για την πρόσδεση σκοινιού με τη χρήση θηλιάς. 113

Σχήμα Α-1. Απειροστή μετατόπιση της ισάλου επιφάνειας.....117

Σχήμα Β-1. Δομικό διάγραμμα του συστήματος κυματικού βαρούλκου στο Simulink. 122

Σχήμα Β-2. Γράφος του συστήματος του κυματικού βαρούλκου στο Simscape 122

Σχήμα Β-3. Δομικό διάγραμμα του πλωτήρα στο Simulink.....124

Σχήμα Β-4. Συνολικό σύστημα.....128

Σχήμα Β-5. Subsystem 1. 128

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Στοιχεία έργου Iberdola OPT. 41

Πίνακας 3-2. Στοιχείο έργου Okeanós.....42

Πίνακας 3-3. Στοιχεία έργου Pico OWC. 44

Πίνακας 4-1. Σύγκριση των δύο εναλλακτικών συστημάτων 51

Κατάλογος Συντμήσεων

cs coordinate system

σ.αξ. σύστημα αξόνων

σ.σ. σύστημα συντεταγμένων

Κατάλογος Συμβόλων

A_w ίσαλος επιφάνεια (water plane area). Η επιφάνεια που σχηματίζεται από την τομή του όγκου του πλωτήρα και του οριζόντιου επιπέδου του ήρεμου νερού.

$\vec{B}$ η δύναμη της άνωσης στο κέντρο άνωσης.

$\vec{B}'$ η δύναμη της άνωση όταν το σώμα ισορροπεί.

b_i σωματόδετο σύστημα αξόνων στο σώμα i.

bf_i σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων (body fixed) στο σώμα i, i=1,2…N.

CB κέντρο άνωσης (center of buoyancy).

CF κέντρο πλεύσης (center of flotation).

C_f ο συντελεστής απορρόφησης ενέργειας (coefficient factor).

C_i κέντρο μάζας σώματος i.

c_1 συντελεστής απόσβεσης των εδράνων κύλισης και της ροδέλας στην περιστροφική άρθρωση που σχηματίζει το τύμπανο με τη βάση.

c_2 συντελεστής απόσβεσης λόγω μηχανικών απωλειών στο κιβώτιο ταχυτήτων και στο δρομέα της γεννήτριας.

c* μη γραμμική απόσβεση του εύκαμπτου φορέα.

$\vec{D}$ το διάνυσμα των γενικευμένων δυνάμεων (δυνάμεις και ροπές).

$E_{\eta\lambda}$ η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα κυματικά βαρούλκα.

${}^{s}\hat{e}_i$ το μοναδιαίο διάνυσμα της κατεύθυνσης της δύναμης που ασκείται από το σύστημα του κυματικού βαρούλκου στον εύκαμπτο φορέα.

${}^{3}\vec{F}_A^2$ η δύναμη που ασκείται από το A στο σημείο 2, εκφραζόμενη στο σ.αξ 3.

${}^{s}\vec{F}_e^C$ η δύναμη διέγερσης η οποία ασκείται από το κύμα στο κέντρο μάζας του πλωτήρα.

${}^{s}\vec{F}_{rd}^C$ η δύναμη ακτινοβολίας η οποία ασκείται από το κύμα στο κέντρο μάζας του πλωτήρα.

${}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai}$ η δύναμη που ασκείται από το μηχανισμό στο σημείο Ai του σώματος.

$\vec{F}_{CB}^C$ η δύναμη της άνωσης στο κέντρο μάζας του πλωτήρα.

$\vec{F}_v^C$ η δύναμη που προέρχεται από την κατανομή των διατμητικών τάσεων ($\tilde{\tau}$) στην υγρή επιφάνεια του πλωτήρα.

$\vec{F}_w^C$ η δύναμη που ασκείται από το κύμα στο κέντρο μάζας του πλωτήρα λόγω της δυναμικής πίεσης.

f_n μέτρο δύναμης μηχανικού στοιχείου n του κυματικού βαρούλκου.

f_s το μέτρο της δύναμης που ασκείται από το σύστημα του κυματικού βαρούλκου στον εύκαμπτο φορέα.

G σταθερά γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

g επιτάχυνση της βαρύτητας.

H το ύψος του κύματος.

H_u η θερμογόνος ικανότητα καυσίμου.

${}^3\tilde{I}_i^2$ τανυστής ροπών αδράνειας ή μητρώο αδράνειας του σώματος i ως προς το σημείο 2, εκφρασμένος στο σ.αξ. 3.

i σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

i_n ρεύμα ηλεκτρικού στοιχείου n του κυματικού βαρούλκου.

J η ισχύς ενός κύματος ανά μέτρο μετώπου κύματος.

J_1 περιστροφική αδράνεια του τυμπάνου του κυματικού βαρούλκου.

J_2 περιστροφική αδράνεια του δρομέα της ηλεκτρικής γεννήτριας.

$\tilde{K}$ το μητρώο υδροστατικής δυσκαμψίας.

k* μη γραμμική ελαστικότητα του εύκαμπτου φορέα.

k ο κυματικός αριθμός (wave number).

L ποσότητα καυσίμου σε λίτρα.

L_s επαγωγή των τυλιγμάτων της γεννήτριας.

${}^3\vec{L}_i^2$ στροφορμή σώματος i ως προς σημείο 2 στο σ.αξ. 3.

${}^3\vec{M}_F^2$ η ροπή της δύναμης F ως προς το σημείο 2, εκφραζόμενη στο σ.αξ. 3.

$\vec{M}_B^C$ η ροπή της άνωσης ως προς το κέντρο μάζας.

$\vec{M}'_B$ η ροπή της άνωσης όταν το σώμα ισορροπεί.

$\vec{M}_\Sigma$ η ροπή που προέρχεται από την κατανομή της στατικής πίεσης στην επιφάνεια του πλωτήρα.

$\vec{M}_v$ η ροπή που προέρχεται από την κατανομή των διατμητικών τάσεων ($\tilde{\tau}$) στην επιφάνεια του πλωτήρα.

$\vec{M}_w^C$ η ροπή του κύματος η οποία οφείλεται στην κατανομή της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του πλωτήρα.

$\tilde{M}$ το μητρώο αδράνειας του σώματος.

$\tilde{M}_{ad}$ το μητρώο προστιθέμενης μάζας (added mass).

$\tilde{M}_{ad,tt}$ μητρώο αδράνειας προερχόμενο από την *αντίδραση* του νερού στην κίνηση του πλωτήρα λόγω της αδράνειας του εκτοπιζόμενου νερού. Ο δείκτης t αντιστοιχεί στους βαθμούς ελευθερίας κατά x, y, z ενώ ο δείκτης r κατά γ, β, α.

$\tilde{M}_{ad,tr}$ ομοίως.

$\tilde{M}_{ad,rt}$ ομοίως.

$\tilde{M}_{ad,rr}$ ομοίως.

m_i μάζα σώματος i.

m_h μάζα νερού.

${}^s\vec{n}_S^+$ το κάθετο στην επιφάνεια S διάνυσμα με φορά προς τα μέσα εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

${}^s\vec{n}_S^-$ το κάθετο στην επιφάνεια S διάνυσμα με φορά προς τα έξω εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

${}^s\vec{n}_{Sw}^-$ το κάθετο διάνυσμα στην υγρή επιφάνεια του σώματος με φορά προς τα έξω, δηλαδή από την επιφάνεια του σώματος προς το ρευστό.

${}^s\vec{n}_{Sw}^+$ το κάθετο διάνυσμα στην υγρή επιφάνεια του σώματος με φορά προς τα μέσα, δηλαδή από την επιφάνεια του σώματος προς το εσωτερικό του σώματος.

O το σημείο αναφοράς στο χώρο.

P_{buoy} η μηχανική ισχύς που απορροφάται από τον πλωτήρα.

P_{wave} η ισχύς που μεταφέρει το κύμα.

p πίεση.

p_a ατμοσφαιρική πίεση.

$^{3}\vec{p}_i^{\,2}$ η ορμή του σώματος i ως προς σημείο 2 εκφρασμένη στο σ.αξ. 3.

$\vec{q}$ το διάνυσμα των γενικευμένων ταχυτήτων (γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες).

R_s ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων της γεννήτριας.

R_d μη γραμμική αντίσταση της ηλεκτρικής διόδου.

R_l ωμική αντίσταση του ηλεκτρικού φορτίου.

$\tilde{R}^2_{1,x_1x_2x_3}$ μητρώο στροφής του σ.αξ. 1 ως προς το σ.αξ. 2 με στροφές ως προς τους άξονες x_1, x_2, x_3 με τη σειρά που αναγράφονται.

r ακτίνα τυμπάνου.

r_{fn} οικονομικός συντελεστής επικαιροποίησης.

$^{3}\vec{r}_1^{\,2}$ θέση του σημείου 1 ως προς το σημείο 2 εκφρασμένη στο σ.αξ. 3. Αντίστοιχα ισχύει και για κάθε συνιστώσα του διανύσματος.

$^{s}\vec{r}^{\,C}_{q,Sw}$ η θέση ενός σημείου της υγρής επιφάνειας του σώματος ως προς το κέντρο μάζας εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

$^{s}\vec{r}^{\,C}_{CB}$ η θέση του σημείου άνωσης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

Sw ως δείκτης συμβολίζει την υγρή επιφάνεια του σώματος.

sf το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (space fixed).

s αδρανειακό σύστημα αξόνων.

S^C_y ροπή της ισάλου επιφάνειας ως προς το κέντρο μάζας.

S^C_{yz} ομοίως.

S^C_{yy} ομοίως.

S^C_{yx} ομοίως.

S^C_x ομοίως.

S^C_{xz} ομοίως.

S^C_{xy} ομοίως.

S^C_{xx} ομοίως.

T η περίοδος ενός κύματος

$\tilde{t}$ ο τανυστής τάσεων που δημιουργούνται ανάμεσα στα στοιχεία του ρευστού σε κάθε θέση και χρονική στιγμή.

${}^{s}\vec{u}^{O}$ η ταχύτητα ενός υλικού σημείου του ρευστού ως προς το αδρανειακό σύστημα αξόνων. Συμβολίζεται απλούστερα και ως $\vec{u}$.

V_b δυναμικό παρεμπόδισης ηλεκτρικής διόδου.

V_n τάση ηλεκτρικού στοιχείου n του συστήματος.

${}^{3}\vec{v}_{1}^{2}$ γραμμική ταχύτητα ή απλά ταχύτητα του σημείου 1 ως προς σημείο 2 εκφρασμένη στο σ.αξ. 3.

${}^{s}\vec{v}_{q,Sw}^{O}$ η ταχύτητα ενός σημείου q της υγρής επιφάνειας του σώματος ως προς το σημείο αναφοράς O, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς s.

y_{k*} η διαφορά της απόστασης δύο σημείων του εύκαμπτου φορέα από την απόσταση που έχουν όταν ο εύκαμπτος φορέας είναι τεντωμένος.

$\tilde{Z}$ το μητρώο απόσβεσης εξ ακτινοβολίας.

$\tilde{Z}_{tt}$ μητρώο απόσβεσης προερχόμενα από την *αντίσταση* του νερού στην κίνηση του πλωτήρα μέσω εκπομπής κυμάτων. Ο δείκτης t αντιστοιχεί στους βαθμούς ελευθερίας κατά x, y, z ενώ ο δείκτης r κατά γ, β, α.

$\tilde{Z}_{tr}$ ομοίως.

$\tilde{Z}_{rt}$ ομοίως.

$\tilde{Z}_{rr}$ ομοίως.

${}^{3}\vec{a}_{1}^{2}$ γραμμική επιτάχυνση ή απλά επιτάχυνση του σημείου 1 ως προς το σημείο 2 εκφρασμένη σ.αξ. 3.

η_1 βαθμός απόδοσης ηλεκτρικού κινητήρα.

η_2 βαθμός απόδοσης μηχανής εσωτερικής καύσης.

λ μήκος κύματος.

μ ιξώδες ρευστού.

$\vec{\xi}$ το διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας του σώματος.

ρ_h πυκνότητα νερού.

Σ_i σημείο αναφοράς στο σώμα i.

$\vec{\Sigma}^C$ η δύναμη που προέρχεται από την κατανομή της στατικής πίεσης στην επιφάνεια του σώματος.

$\Sigma\vec{F}^C$ η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο κέντρο μάζας του σώματος.

$\Sigma\vec{M}^C$ η συνισταμένη των ροπών που ασκούνται στο σώμα ως προς το κέντρο μάζας.

τ_s η σταθερή ροπή του μη γραμμικού ελατηρίου σταθερής ροπής.

τ_n μέτρο ροπής περιστροφικού στοιχείου n του κυματικού βαρούλκου.

$\tilde{\tau}$ ο τανυστής διατμητικών τάσεων λόγω συνεκτικότητας του ρευστού.

υ_n μέτρο ταχύτητας μηχανικού στοιχείου n του κυματικού βαρούλκου.

υ_s το μέτρο της ταχύτητας που θεωρούμε πως επιβάλλεται από τον πλωτήρα στο κυματικό βαρούλκο ως πηγή ταχύτητας μέσω του εύκαμπτου φορέα.

υ_p η ταχύτητα ενός μονοχρωματικού κύματος

φ το δυναμικό της ταχύτητας του νερού.

φ_i το δυναμικό της ταχύτητας του νερού που προκύπτει για κίνηση του στερεού με το βαθμό ελευθερίας *i*.

φ_0 το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος κύματος.

φ_d το δυναμικό της ταχύτητας του διαθλώμενου κύματος από ακίνητο σώμα.

ω_n μέτρο περιστροφικής ταχύτητας μηχανικού στοιχείου n του κυματικού βαρούλκου.

${}^3\vec{\omega}_1^2$ γωνιακή ταχύτητα του σ.αξ. 1 ως προς σ.αξ. 2 εκφρασμένη στο σ.αξ. 3.

${}^3\dot{\vec{\omega}}_1^2$ γωνιακή επιτάχυνση του σ.αξ. 1 ως προς το σ.αξ. 2 εκφρασμένη στο σ.αξ. 3.

ω_f η κυκλική συχνότητα κύματος.

$\tilde{1}$ μοναδιαίος πίνακας.

$\forall$ ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού από τον πλωτήρα.

$\left[{}^3x_1^2, {}^3y_1^2, {}^3z_1^2\right]$ οι τρεις συνιστώσες της θέσης του σημείου 1 ως προς το σημείο 2 εκφρασμένες στο σύστημα αξόνων 3.

$\left[{}^3\gamma_{bf}^{sf}, {}^3\beta_{bf}^{sf}, {}^3\alpha_{bf}^{sf}\right]$ οι τρεις γωνίες Euler που συνθέτουν την περιστροφή του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων bf ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων sf εκφρασμένες στο σύστημα αξόνων 3.

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Η αυξημένη ζήτηση για ενέργεια παγκοσμίως σε συνδυασμό με την όξυνση της κλιματικής αλλαγής από ανθρωπογενή αίτια καθιστούν αναγκαία την εξεύρεση και εκμετάλλευση ολοένα και περισσότερων νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μία μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας είναι η μηχανική ενέργεια που μεταφέρουν τα υδάτινα κύματα στις θάλασσες και τις λίμνες. Σύμφωνα με μελέτες το παγκόσμιο δυναμικό της ενέργειας των θαλασσίων κυμάτων εκτιμάται στα 2TW και σε 2.000 TWh ετησίως[2]. Αξίζει να σημειωθεί πως τα κύματα ως πηγή ενέργειας παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος (W/m ή W/m^2) από οποιαδήποτε άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Για την εκμετάλλευση αυτού του δυναμικού έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα μεγάλη ποικιλία λύσεων πολύ διαφορετικών μεταξύ τους. Οι τεχνολογίες μετατροπής κυματικής ενέργειας χαρακτηρίζονται γενικώς από ελάχιστη οπτική και ηχητική όχληση στο ανθρώπινο περιβάλλον και αμελητέα ανάγκη για γη. Εντούτοις η μεγάλη ποικιλομορφία στις προτεινόμενες διατάξεις οφείλεται στη δυσκολία εφεύρεσης μηχανισμών που να μπορούν να δεσμεύουν κυματική ενέργεια με οικονομικά βιώσιμο τρόπο και παράλληλα να αντέχουν και να μπορούν να λειτουργήσουν αξιόπιστα στις ιδιαίτερες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η δυσκολία εξεύρεσης οικονομοτεχνικά αποδεκτών λύσεων για την εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού καθιστά τέτοιου είδους επενδύσεις μη ελκυστικές και συνιστά το βασικό μειονέκτημα της παρούσας στάθμης της τεχνικής.

Μια προσέγγιση που θα μπορούσε να συμβιβάσει το κόστος εγκατάστασης και τα οικονομικά οφέλη της κυματικής ενέργειας θα μπορούσε να προκύψει από την εγκατάσταση διατάξεων σημειακών απολητπτών κυματικής ενέργειας, σε πλωτές κατασκευές οι οποίες έχουν κύριο σκοπό χρήσης διαφορετικό από την παραγωγή κυματικής ενέργειας, όπως πλοία και σκάφη. Έτσι η συνδυασμένη χρήση τους (αναψυχή, αλιεία, μεταφορά κλπ) με παραγωγή καθαρής ενέργειας θα μπορούσε να δημιουργήσει πρόσθετα κέρδη για τους ιδιοκτήτες καθώς και να φέρει την κυματική ενέργεια στο προσκήνιο και να τη διαδώσει στο ευρύ κοινό.

Πληθώρα σκαφών ανά πάσα στιγμή ταλαντώνονται υπό την επίδραση κυμάτων κατά τη στάθμευσή τους είτε σε λιμένες είτε αρόδου. Αυτή η ταλάντωση ενώ είναι γενικά ανωφελής και ανεπιθύμητη από τους επιβάτες, συνιστά καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Σχεδιάζοντας σύστημα που αποσβαίνει την ταλάντωση

των σκαφών μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρισμό θα μπορούσαμε να αποκομίσουμε τα εξής οφέλη:

- Μεγαλύτερη άνεση στους επιβάτες του σκάφους.
- Παραγωγή καθαρής ενέργειας από ανανεώσιμη πηγή
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης κυματικής μονάδας δεδομένου ότι αξιοποιούνται ως πλωτήρες υπάρχοντα σκάφη και συνεπώς το κόστος κτήσης, λειτουργίας και συντήρησης των σκαφών δεν συμπεριλαμβάνεται στα κόστη της επένδυσης.

Η ευρεία χρήση μικρής ισχύος διατάξεων τέτοιου τύπου από ένα μεγάλο αριθμό ιδιοκτητών σκαφών ή ιδιοκτητών μαρινών θα μπορούσε να προσθέσει αξιόλογη ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο και να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα θα μπορούσε να συμβάλει στη διάδοση των ηλεκτρικών ή υβριδικών σκαφών καθώς και να ωθήσει την ανάπτυξη της ναυπηγικής βιομηχανίας προσφέροντας νέα προϊόντα, νέες υπηρεσίες, καινοτόμες επενδύσεις και νέες θέσεις εργασίας στον κλάδο.

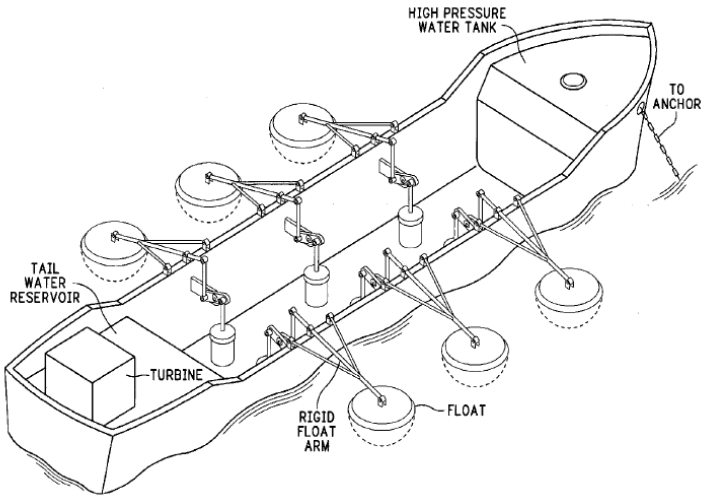
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Πολύτιμα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά της κυματικής ενέργειας ως ανανεώσιμης πηγή ενέργειας καθώς και για τη σύγχρονες τεχνολογίες δέσμευσής υπάρχουν διαθέσιμα στις ιστοσελίδες «Wave Power» του ιστοτόπου Wikipedia[15] και «Κύματα» του ιστοτόπου Aqua-Ret[17]. Παράλληλα το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε) έχει εκδώσει τον «Άτλαντα ανέμου και κύματος των ελληνικών θαλασσών»[16] όπου παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία σχετικά με την κατανομή του κυματικού δυναμικού στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο.

1.2.1 Έρευνα Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας

Έχουν γίνει στο παρελθόν αξιοσημείωτες προσπάθειες για τη δημιουργία διατάξεων κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιούν στοιχεία όμοια με αυτά του κυματικού βαρούλκου αλλά και ειδικότερα για τη δημιουργία συστημάτων απορρόφησης κυματικής ενέργειας τα οποία να εκμεταλλεύονται την κίνηση πλοίων και σκαφών. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται εφευρέσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας US 2008/0018114 A1 προτείνεται η σύνδεση του σκάφους μέσω βραχιόνων με πλωτήρες (Σχ. 1-1). Οι βραχίονες πιέζουν ρευστό το οποίο μέσω υδραυλικού συστήματος περιστρέφει υδραυλικό κινητήρα. Η διάταξη αυτή δεσμεύει αρκετό ωφέλιμο χώρο από το σκάφος ενώ είναι πολύπλοκη η διαδικασία της εκκίνησης και του τερματισμού της λειτουργίας της.

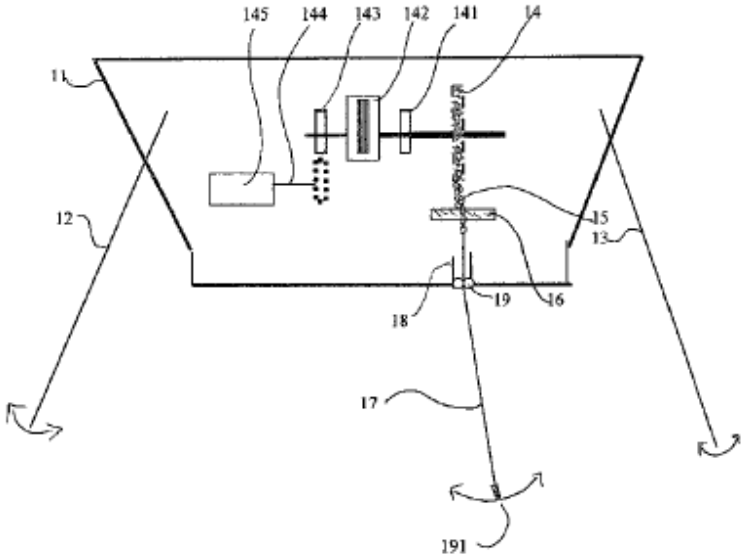


Σχήμα 1-1. Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας US 2008/0018114 A1. Εγκατάσταση σε σκάφος βραχιόνων οι οποίοι συνδέονται με πλωτήρες εκτός του σκάφους.

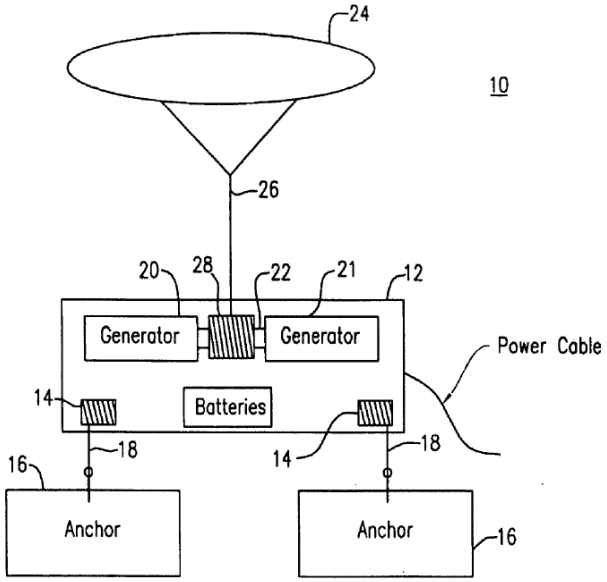
Στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας DE 20312348U1 το σύστημα απορρόφησης κυματικής ενέργειας αποτελείται από τύμπανο στο οποίο τυλίγεται αλυσίδα η οποία οδηγείται στην άγκυρα (Σχ. 1-2). Για την τάνυση της αλυσίδας χρησιμοποιείται αντίβαρο. Όπως είναι φυσικό το αντίβαρο απαιτεί είτε κάποιο χώρο για την κίνηση του εντός του πλωτού σώματος είτε επιπλέον μηχανισμό και κατάλληλη διαμόρφωση για την κίνηση του έξω από το σκάφος με επιπρόσθετο κίνδυνο τη συχνή πρόσκρουση του αντίβαρου στα ύφαλα του σκάφους.

Μία τρίτη εναλλακτική για την τάνυση του εύκαμπτου φορέα είναι η χρήση ελατηρίου όπως στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας US 2008/0217921 (Σχ. 1-3). Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται πλωτήρας ο οποίος επιπλέει στην επιφάνεια και συνδέεται υποβρυχίως με μηχανισμό αποτελούμενο από τύμπανο το οποίο συνδέεται με ηλεκτρικές γεννήτριες.

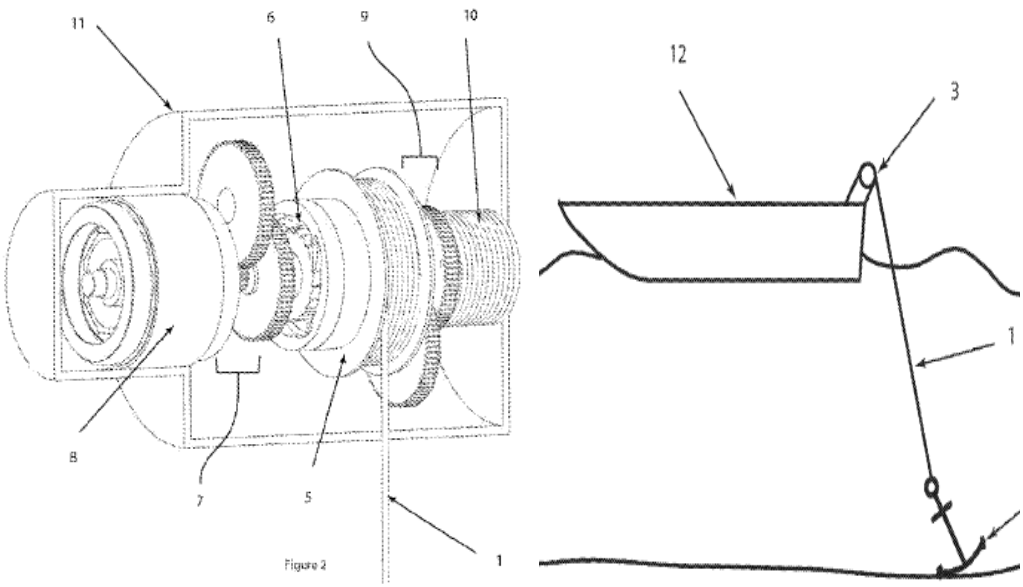
Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που κινείται πιο κοντά στο κυματικό βαρούλκο είναι το GB 2479348 (Σχ. 1-4). Εν προκειμένω, το σύστημα που εγκαθίσταται στο σκάφος αποτελείται από τύμπανο στο οποίο τυλίγεται κάποιος εύκαμπτος φορέας. Την επαναφορά του τυμπάνου και την τάνυση του εύκαμπτου φορέα αναλαμβάνει στροφικό ελατήριο. Παράλληλα χρησιμοποιείται καστάνια για την αποσύμπλεξη του τυμπάνου από το φορτίο κατά τη φάση της επαναφοράς από το ελατήριο. Τα βασικά μειονεκτήματα της καστάνιας είναι το γεγονός ότι παράγει θόρυβο ο οποίος εύκολα γίνεται ενοχλητικός καθώς και το γεγονός ότι οι μηχανικές απώλειες είναι σημαντικές.



Σχήμα 1-2. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας DE 20312348. Εγκατάσταση σε σκάφος συστήματος κυματικής ενέργειας το οποίο αποτελείται από τύμπανο, αλυσίδα και αντίβαρο για την τάνυση της αλυσίδας.



Σχήμα 1-3. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας US 2008/0217921. Για την τάνυση του εύκαμπτου φορέα (σκοινί , αλυσίδα κλπ) γίνεται χρήση ελατηρίου.



Σχήμα 1-4. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας GB 2479348. Μηχανισμός απορρόφησης κυματικής ενέργειας ο οποίος εγκαθίσταται σε σκάφους και διαθέτει τύμπανο στο οποίο περιελίσσεται εύκαμπτος φορέας, επανατατικό ελατήριο και καστάνια.

1.2.2 Θεωρητική μελέτη

Για τη θεωρητική μελέτη του αντικειμένου χρειάστηκε η μελέτη των παρακάτω επιστημονικών πεδίων:

- Μηχανική των κυμάτων
- Αλληλεπίδραση κύματος – σώματος
- Κινηματική και δυναμική του στερεού σώματος στο χώρο
- Δυναμική συστημάτων

Όσον αφορά τη μηχανική των κυμάτων και την αλληλεπίδραση κύματος σώματος οι πρώτες μελέτες έγιναν από το J. N. Newman (1977) ο οποίος αναπτύσσει τις σχετικές αναλύσεις του στο βιβλίο Marine Hydrodynamics[11]. Ενδιαφέροντα στοιχεία μπορεί επίσης να βρει κανείς στα συγγράμματα των J. Falnes (Ocean Waves and Oscillating Systems[5]), T. I. Fossen (Guidance and Control of Ocean Vehicles[6] και Marine Control Systems Guidance Navigation and Control of Ships Rigs and Underwater Vehicles[7]) και E. Lewandovski (The dynamics of Marine Craft Maneuring and Seakeeping [9]).

Σχετικά με την κινηματική και δυναμική του στερεού σώματος στο χώρο, πολύτιμα στοιχεία μπορεί να αντλήσει κανείς από τα συγγράμματα των J. Craig (Introduction to Robotics[3]), Tsai L. (Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators[14]) και Goldstein, Poole & Safko (Classical Mechanics[8]).

Για την ανάλυση της δυναμικής του συστήματος υιοθετήθηκε η μέθοδος των γραμμικών γράφων η οποία αναπτύσσεται στο σύγγραμμα των Derek Rowell & David N. Wormley (System Dynamics: An Introduction[13]).

1.3 Δομή Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το κύμα ως πηγή ενέργειας. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κυμάτων, η κατανομή του δυναμικού τους στον πλανήτη, οι τεχνολογικές προκλήσεις, τα οφέλη και το πιθανό αντίκτυπο στο περιβάλλον που προκύπτουν από την εκμετάλλευση του ενεργειακού τους περιεχομένου καθώς και οι προοπτικές και οι δυνατότητες που υπάρχουν ειδικότερα για την Ελλάδα ως νησιωτική χώρα με μεγάλο μήκος ακτογραμμών και ενδιαφέρον κυματικό δυναμικό.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας και τα είδη των μηχανισμών δέσμευσης και μετατροπής της κυματικής ενέργειας. Επίσης περιλαμβάνονται συνοπτικές μελέτες περιπτώσεων που αφορούν τις σημαντικότερες πιλοτικές εφαρμογές των τελευταίων χρόνων με αντιπροσωπευτικά παραδείγματα από τις κυρίαρχες τεχνολογίες.

Στο Κεφάλαιο 4 επιχειρείται ο σχεδιασμός συστήματος κυματικής ενέργειας το οποίο εγκαθίσταται σε σκάφη θαλάσσης. Ορίζονται προδιαγραφές, εξετάζονται εναλλακτικές αρχές λειτουργίας, προκύπτουν παραλλαγές οι οποίες αξιολογούνται με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους και προκύπτει μία μηχανολογική σύνθεση η οποία βασίζεται στη δομή των συμβατικών ναυτικών βαρούλκων (βιντσιρέλων) αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνει και όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για να μπορεί να επιτελεί την αποστολή της. Τέλος παρουσιάζονται πιθανές πρακτικές εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει το σύστημα.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος κυματικών μετατροπέων – σκάφους και αναλύεται και προσομοιώνεται η δυναμική του συμπεριφορά με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (Matlab, Simulink).

Στο Κεφάλαιο 6 επιχειρείται σύντομη οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης που θα έκανε κάποιος ιδιώτης εγκαθιστώντας το σύστημα στο σκάφος του, με βάση τρία διαφορετικά σενάρια χρήσης: χρήση σε υβριδικό σκάφος για την υποκατάσταση ποσοστού του καυσίμου και τη συμβολή σε μεγαλύτερη ενεργειακή αυτάρκεια, χρήση σε συμβατικό σκάφος για την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες του σκάφους και χρήση σε συμβατικό σκάφος αποκλειστικά για την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο σε προνομιακή τιμή.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

2 Κυματική Ενέργεια

Στην Κεφάλαιο αυτό μελετάται η πηγή από την οποία το σχεδιαζόμενο σύστημα θα αντλεί ενέργεια. Εξετάζονται τα αίτια που δημιουργούν τα κύματα, χαρακτηριστικά μεγέθη των κυμάτων, στοιχεία της μηχανικής τους, η κατανομή του κυματικού δυναμικού παγκοσμίως, τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, οι τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου κάτι τέτοιο να γίνει εφικτό, οι πιθανές επιδράσεις στο περιβάλλον που μπορεί να προκύψουν από τις διεργασίες δέσμευσης της κυματικής ενέργειας και τέλος οι προοπτικές και οι δυνατότητες που παρουσιάζονται ειδικά για την Ελλάδα από τον αναπτυσσόμενο αυτό τεχνολογικό τομέα.

2.1 Ανεμογενή βαρυτικά κύματα

Τα θαλάσσια κύματα προκαλούνται από μία πληθώρα δυνάμεων είτε μετεωρολογικής προέλευσης (από ανέμους) είτε αστρονομικής (παλιρροιακά φαινόμενα) είτε γεωλογικής (υποθαλάσσιοι σεισμοί, tsunami). Ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους κυμάτων, τα κύματα που δημιουργούνται από ανέμους είναι τα καταλληλότερα για ενεργειακή εκμετάλλευση.

Καθώς οι άνεμοι πνέουν πάνω από τη θάλασσα ασκούνται πιέσεις πάνω στην επιφάνειά της και έτσι αλλού δημιουργούνται κοιλάδες και αλλού κορυφές. Κατά τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια φυσική αποθήκευση της αιολικής ενέργειας στο νερό κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια.

Η εκδήλωση της κυματικής δραστηριότητας έχει χρονική διαφορά φάσης σε σχέση με την αιολική δραστηριότητα που την προκαλεί. Συνεπώς τα μέγιστα και τα ελάχιστα της κυματικής και της αιολικής δραστηριότητας δε συμπίπτουν αλλά μπορεί να απέχουν κάποιες ώρες ή και μέρες.

Τα αιολικής προέλευσης κύματα μπορούν να ταξιδέψουν χιλιόμετρα χωρίς να χάσουν σημαντικό ποσοστό της αρχικής τους ενέργειας, εκτός και αν συναντήσουν αντίθετους ανέμους. Κοντά στις ακτές, η ενεργειακή τους πυκνότητα μειώνεται λόγω της αλληλεπίδρασης με την ξηρά. Ωστόσο αυτή η απώλεια ενέργειας μπορεί να ανακτηθεί χάρι στην εμφάνιση φαινομένων διάθλασης και ανάκλασης τα οποία δημιουργούν εστίες συγκέντρωσης ενέργειας (hot spots).

Τα κύματα περικλείουν μηχανική ενέργεια που αποτελείται από κινητική και δυναμική ενέργεια. Η δυναμική ενέργεια ενός κύματος προέρχεται από τη βαρύτητα και από την επιφανειακή τάση. Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 0.1m η επιφανειακή τάση θεωρείται αμελητέα και τα κύματα αυτά ονομάζονται βαρυτικά κύματα.

Στην περίπτωση των βαρυτικών κυμάτων, σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μέσο διάδοσης αλλά εξαρτάται και από τη συχνότητα του κύματος.

Η συσχέτιση συχνότητας και μήκους κύματος όπως προκύπτει από τη θεωρία [5] έχει ως εξής:

$$\omega^2 = g \cdot k \tag{2-1}$$

$$k = 2\pi/\lambda \tag{2-2}$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, k ο κυματικός αριθμός (wave number) και λ το μήκος κύματος.

Συνεπώς η ταχύτητα ενός μονοχρωματικού κύματος, δηλαδή κύματος που αποτελείται από μία μόνο συχνότητα, είναι:

$$\upsilon_p = \omega/k = g/\omega = \sqrt{g/k} \tag{2-3}$$

Ένα πραγματικό κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως η επαλληλία άπειρων ιδανικών κυμάτων διαφορετικού μήκους κύματος. Ιδανικά κύματα είναι τα κύματα τα οποία διαδίδονται σε ασυμπίεστο ρευστό και αστρόβιλο πεδίο ταχυτήτων και δεν χάνουν την ενέργειά τους κατά τη διάδοσή τους.

Η ισχύς ενός κύματος καθορίζεται από το ύψος του κύματος, την ταχύτητά του, το μήκος του και την πυκνότητα του νερού. Με καλή προσέγγιση, για αρμονικά κύματα που διαδίδονται σε σχετικά βαθιά νερά θεωρείται για τη μεταφερόμενη ισχύ:

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} TH^2 \tag{2-4}$$

όπου ρ: η πυκνότητα του νερού, T η περίοδος του κύματος, H το ύψος του κύματος.

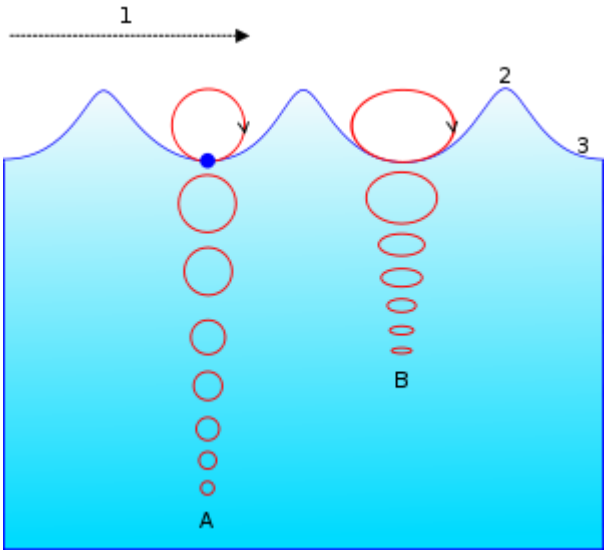
Θεωρώντας πυκνότητα θαλασσινού νερού ρ=1020 kg/m^3, και επιτάχυνση της βαρύτητας g=9.81m/s^2 προκύπτει:

$$J = \left(976 \frac{W}{m^3 s}\right) \cdot TH^2 \tag{2-5}$$

Σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις η δυναμική ενέργεια ενός κύματος είναι ανάλογη της περιόδου του κύματος και του τετραγώνου του ύψους του κύματος. Η ισχύς των κυμάτων εκφράζεται σε kW ανά μέτρο μετώπου κύματος (kW/m). Εκτιμάται ότι με την παρούσα τεχνολογία από την μεταφερόμενη ενέργεια ενός κύματος ένα 20% είναι εφικτό να δεσμευτεί με τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα.

Οι διαστάσεις του κύματος εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου, την ακτίνα μέσα στην οποία διεγείρει ο άνεμος τα κύματα, το χρόνο κατά τον οποίο ο άνεμος πνέει καθώς και το βάθος και την μορφολογία του πυθμένα (ο οποίος μπορεί να συγκεντρώνει ή να διαχέει την ενέργεια των κυμάτων).

Κάθε στοιχείο του ρευστού εκτελεί κυκλική ή ελλειπτική κίνηση το πλάτος της οποίας εξαρτάται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται το στοιχείο του ρευστού. Η κυματική δραστηριότητα είναι μέγιστη στην επιφάνεια και μειώνεται εκθετικά με το βάθος.

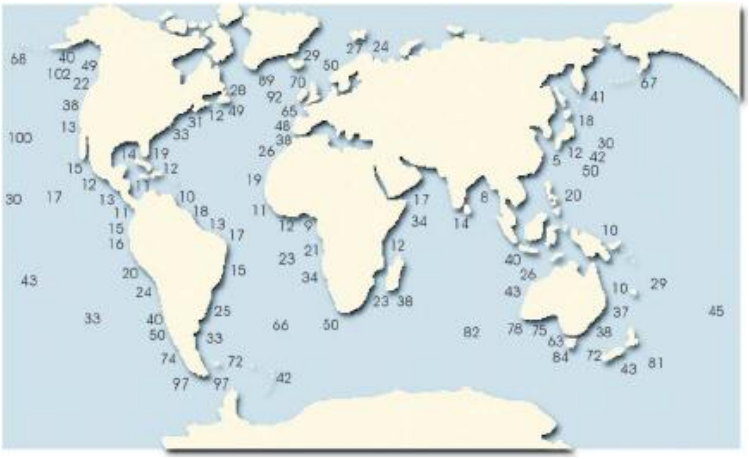


Σχήμα 2-1. Η κίνηση ενός στοιχείο του ρευστού κατά τον κυματισμό.

2.2 Κατανομή παγκόσμιου κυματικού δυναμικού

Η κυματική ενέργεια είναι κατανεμημένη σε όλο τον πλανήτη. Ωστόσο ανάμεσα στα γεωγραφικά ύψη των 30° και 60° παρατηρείται αυξημένη κυματική δραστηριότητα. Αξιοσημείωτα ποσά κυματικής ενέργειας παρατηρούνται στις δυτικές ευρωπαϊκές ακτές, στον Καναδά, στις ΗΠΑ, στη Νότια Αμερική και στις νότιες ακτές της Αυστραλίας.

Η δυνητική συνεισφορά της παγκόσμιας κυματικής ενέργειας στην αγορά ηλεκτρισμού υπολογίζεται ότι είναι της τάξης των 2 TW με δυνατότητα παραγωγής 2.000 TWh/έτος το οποίο αντιστοιχεί στο 10% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού[2].



Σχήμα 2-2. Μέσες τιμές κυματική ισχύος (kW/m)

Μελέτες έδειξαν πως η διαθέσιμη κυματική ενέργεια στο βορειοανατολικό Ατλαντικό είναι της τάξης των 290 GW ενώ αντίθετα για την Μεσόγειο, που είναι κλειστή θάλασσα, είναι της τάξης των 30 GW.

«Εκτός από τη σημασία της όσον αφορά τη συμβατότητα των γενικών επιπέδων κυματικής ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών, η ετήσια μέση ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα εάν δεν ερμηνευθεί σε συνδυασμό με την εποχιακή της διαφοροποίηση. Οι ετήσιες μέσες τιμές μπορεί να αντιστοιχούν σε υψηλά επίπεδα ενέργειας, αλλά ενδέχεται να υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα με σχεδόν καθόλου εκμεταλλεύσιμο πόρο και να εμφανίζονται καταστροφικές εντάσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Είναι σημαντικό η περιοδικότητα αυτή να μην είναι δυσανάλογη με την τοπική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, εάν πρόκειται να συμβάλλει σημαντικά η κυματική ενέργεια στον εφοδιασμό της περιοχής με ηλεκτρική ενέργεια». [17]

2.3 Οφέλη και προκλήσεις της κυματικής ενέργειας

Η κυματική ενέργεια ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και σημαντικές οικονομοτεχνικές προκλήσεις.

Τα κυριότερα από τα πλεονεκτήματα της κυματικής ενέργειας έναντι άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Η μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ.
- Μηδενικός θόρυβος στο ηπειρωτικό περιβάλλον.
- Ελάχιστη οπτική όχληση. Σε αντίθεση με τα υπεράκτια αιολικά, οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας γενικά δεν έχουν κάποια οπτική επίπτωση στην ακτογραμμή, πράγμα που καθιστά δυνατή την εγκατάσταση κυματικών πάρκων πλησιέστερα στην ακτή. Αυτό θα σήμαινε σημαντική μείωση του κόστους καλωδιώσεων και εγκατάστασης, ενώ παράλληλα η εποπτεία και η συντήρηση μπορεί να γίνει με αποτελεσματικότερο τρόπο[17].
- Αμελητέα ανάγκη για γη. Οι ανάγκες για γη αφορούν ένα μικρό κομμάτι της ακτογραμμής. Ένας αποφασιστικός παράγοντας, όσον αφορά την καταλληλότητα της ακτογραμμής, είναι τα βαθυμετρικά της χαρακτηριστικά (π.χ. η κλίση και η μορφή του πυθμένα της). Το καταλληλότερο εύρος βάθους για τις συσκευές κυματικής ενέργειας είναι τα 50 μέτρα, λαμβάνοντας υπόψη την εξισορρόπηση της διαθέσιμης ενέργειας και των δαπανών προσλιμενισμού καθώς και την απόσταση από τη στεριά[17].

Παράλληλα, οι σημαντικότερες τεχνολογικές προκλήσεις είναι:

- Η ανομοιομορφία στην κατεύθυνση, τη φάση και τη συχνότητα των κυμάτων η οποία καθιστά πολύπλοκη την απορρόφηση ενέργειας καθώς και την εξομάλυνση της ηλεκτρικής τάσης.

- Η σύνδεση της ακανόνιστης μικρής συχνότητας των κυμάτων (~0.1 Hz) με τη σταθερή συχνότητα ηλεκτρικού δικτύου.
- Τα ισχυρά καιρικά φαινόμενα και οι συνεπακόλουθες ισχυρές καταπονήσεις. Τα ακραία κυματικά φαινόμενα σε ορίζοντα εικοσαετίας και πεντηκονταετίας, με βάση τα οποία σχεδιάζονται οι θαλάσσιες κατασκευές, είναι πολλαπλάσιας ισχύος από τη μέση κυματική δραστηριότητα κάθε θαλάσσιας περιοχής. Συνεπώς οι διατάξεις κυματικής ενέργειας οφείλουν αφενός να εκμεταλλεύονται με το βέλτιστο οικονομοτεχνικά τρόπο την προσφερόμενη κυματική ενέργεια αφετέρου να αντέχουν στις ακραίες θαλάσσιες συνθήκες. Οι δύο αυτοί ανταγωνιστικοί μεταξύ τους στόχοι οδηγούν συνήθως είτε σε υπερδιαστασιολογημένες ακριβές κατασκευές είτε σε διατάξεις με επιπλέον συστήματα τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία ή αποσύρουν της μηχανές σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών.

2.4 Επίδραση στο περιβάλλον

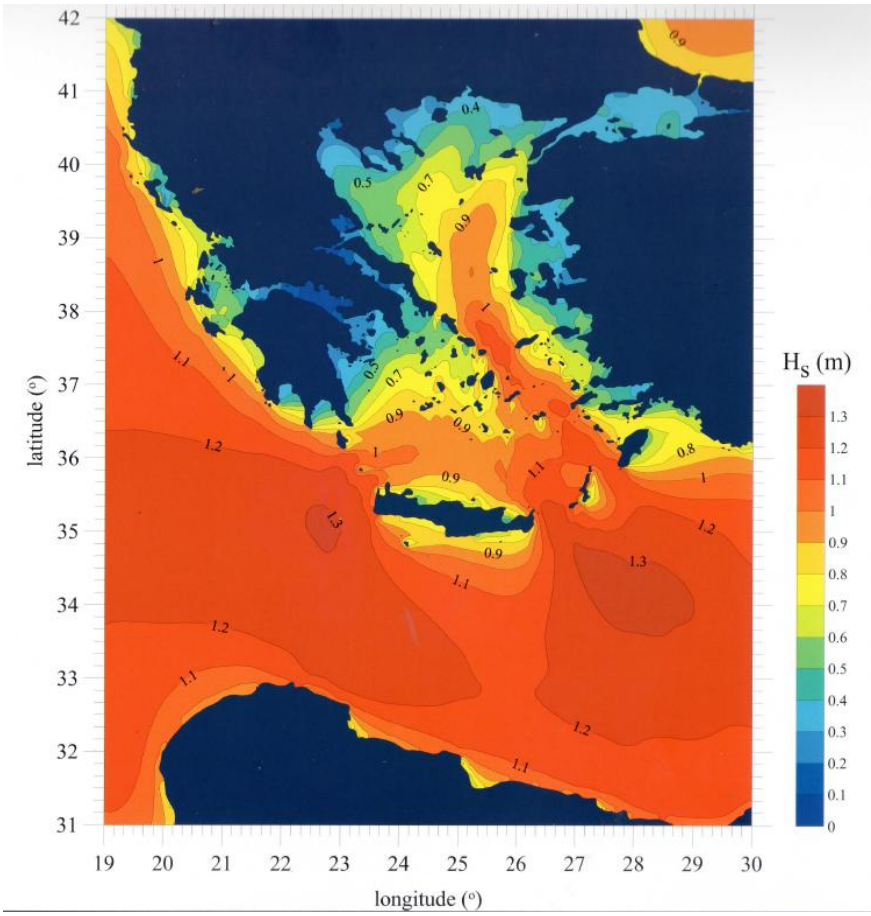
Εφόσον η κυματική ενέργεια αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η ορθή εκμετάλλευσή της συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO_2 και στην αειφόρο ανάπτυξη. Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον στο οποίο εντάσσονται επιφέροντας αλλαγές από τις οποίες προκύπτουν άλλοτε οφέλη και άλλοτε προβλήματα, ανάλογα με το αν έχει γίνει σωστός σχεδιασμός. Μπορούν να προκύψουν θέματα ηχορύπανσης στο θαλάσσιο περιβάλλον, να επηρεαστεί δυσμενώς η χλωρίδα και η πανίδα, να υπάρξουν επιπτώσεις στην αλιεία ή να επηρεαστεί η μορφολογία των ακτών. Από την άλλη, οι κυματικές διατάξεις μπορούν να αποτελέσουν καταφύγιο για θαλάσσια είδη αυξάνοντας τη βιοποικιλότητα της περιοχής, να ενισχύσουν την τοπική επιχειρηματικότητα, να προσφέρουν θέσεις εργασίας, να συμβάλουν στην ηλεκτροδότηση απομονωμένων περιοχών, να προστατεύσουν τις ακτές από τη διάβρωση και φυσικά να συμβάλουν στην προσπάθεια ενάντια στην κλιματική αλλαγή. Συνεπώς αναδεικνύεται η βαρύτητα του ρόλου που έχει ο σωστός σχεδιασμός της κυματικής εγκατάστασης σε μια περιοχή. Στο Γ Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιθανές αλληλεπιδράσεις κυματικών εγκαταστάσεων – περιβάλλοντος κατά τις διάφορες φάσης του κύκλου ζωής μιας κυματικής εγκατάστασης.

Οι πίνακες προέρχονται από τον ιστότοπο AQUARET [17] ο οποίος αποτελεί ένα εργαλείο τηλεκπαίδευσης στις ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες του υδάτινου στοιχείου που χρηματοδοτείται από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Leonardo Da Vinci.

2.5 Ελλάδα: προοπτικές και δυνατότητες

Το ελληνικό κυματικό δυναμικό χαρακτηρίζεται από χαμηλής έντασης κύμα της τάξης των 3kW/m. Εντονότερη κυματική δραστηριότητα παρατηρείται στο Λιβυκό πέλαγος νότια της Κρήτης, στο θαλάσσιο χώρο ανάμεσα Κρήτης και Δωδεκανήσων, μεταξύ Κυκλάδων και νησιών ανατολικού Αιγαίου καθώς και στα δυτικά και νοτιοδυτικά θαλάσσια σύνορα της χώρας. Σε αυτές τις περιοχές το μέσο ετήσιο ύψος κύματος κυμαίνεται στα 1 έως 1.3 m [16].

Σημαντικό χαρακτηριστικό του ελληνικού θαλάσσιου χώρου είναι το πολύ μεγάλο μήκος ακτογραμμών καθώς και οι πολύπλοκη δαντελωτή μορφολογία τους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ήπια κυματική δραστηριότητα επιτρέπουν τη δημιουργία πολλών κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση κυματικών μονάδων μέτριας και μικρής κυματικής ισχύος.



Σχήμα 2-3. Κατανομή μέσου ύψους κύματος στον ελληνικό και ευρύτερο θαλάσσιο χώρο[16].

2.5.1 Υποδομές

Οι κυριότερες υποδομές που έχουν αναπτυχθεί στην Ελλάδα είναι οι υπηρεσίες που παρέχει το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών και κυρίως το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

«Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ αναπτύχθηκε την περίοδο 1997-2000 στα πλαίσια του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ-Ι. Ο πρωταρχικός στόχος ήταν ο σχεδιασμός ενός αξιόπιστου και υπολογιστικά αποτελεσματικού συστήματος για τη δημιουργία υψηλής ακρίβειας δεδομένων, ιδιαίτερα χρήσιμων για την πρόγνωση των τοπικών ατμοσφαιρικών συνθηκών καθώς και για την τροφοδοσία των προγνωστικών κυματικών και υδροδυναμικών μοντέλων καθώς και του προγνωστικού μοντέλου οικοσυστήματος του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ με αναλυτικά πεδία επιφανειακών ροών ορμής, υγρασίας, θερμότητας, ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους κύματος) και βροχόπτωσης. Το σύστημα πρόγνωσης καιρού με τη δυνατότητα της λειτουργίας των επάλληλων πλεγμάτων είναι επιχειρησιακό από τον Οκτώβριο 1999 παρέχοντας τριήμερες (72 ώρες) προγνώσεις καιρού για δύο διαφορετικές περιοχές με διαφορετική ευκρίνεια (1/10°x1/10° - (10χλμ) και 1/4°x1/4° - (25 χλμ)). Το αραιό πλέγμα καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, της Μεσογείου και της Βόρειας Αφρικής, ενώ το πυκνό πλέγμα καλύπτει την Ανατολική Μεσόγειο.

Το σύστημα παρέχει στους ενδιαφερόμενους ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο των θαλασσίων καιρικών συνθηκών σε όλη την επικράτεια καθώς και προγνωστικά. Χάρι στη στατιστική επεξεργασία καιρικών δεδομένων από το ΕΛΚΕΘΕ, έχουν δημιουργηθεί βάσεις δεδομένων που παρέχουν στατιστικές πληροφορίες για τη κυματική δραστηριότητα σε όλες τις ελληνικές θάλασσες, δεδομένα απαραίτητα για το σχεδιασμό θαλάσσιων κατασκευών.

Το σύστημα πρόγνωσης καιρού ΠΟΣΕΙΔΩΝ-ΙΙ λειτουργεί επιχειρησιακά από το Δεκέμβριο 2007 και εφαρμόζεται με οριζόντια ανάλυση 1/20°x1/20° (~5 km) σε μια εκτεταμένη περιοχή που καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Μεσόγειου, της Μαύρης Θάλασσας και μεγάλο μέρος της Βόρειας Αφρικής και της Ασίας. Η διάρκεια προσομοίωσης έχει επεκταθεί σε 120 ώρες (5 ημέρες)» [18].

2.5.2 Προοπτικές

Το ελληνικό κυματικό δυναμικό λόγω του ήπιου μεγέθους του καθίσταται ευκολότερα εκμεταλλεύσιμο από διατάξεις μεσαίου μεγέθους και κόστους. Η προσέλκυση επενδύσεων στον τομέα της κυματικής ενέργειας θα μπορούσε να προσφέρει νέες αγορές και νέα ώθηση στον ελληνικό ναυπηγοεπισκευαστικό κλάδο, να δημιουργήσει θέσεις εργασίας καθώς και να συμβάλει στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος της χώρας. Παράλληλα διατάξεις κυματικής ενέργειας θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην ηλεκτροδότηση απομονωμένων νησιών. Εξαιρετικό ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διάδοση της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σε ιδιώτες με διατάξεις μικρής ισχύος όπως γίνεται με αντίστοιχες διατάξεις ηλιακής και αιολικής ενέργειας.

3 Μηχανισμοί δέσμευσης και μετατροπής κυματικής ενέργειας

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η στάθμη της τεχνικής στον τομέα της κυματικής ενέργειας.

Παρουσιάζεται η διαδρομή από τις πρώτες πατέντες του 18^{ου} αιώνα ως τις σύγχρονες τεχνολογίες. Ο τομέας της κυματικής ενέργειας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποικιλομορφία διατάξεων σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη ανανεώσιμη πηγή γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στον απρόβλεπτο χαρακτήρα και τα ακραία φαινόμενα που παρουσιάζει το ωκεάνιο περιβάλλον. Τα συστήματα κυματικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε πέντε ευρύτερες κατηγορίες με βάση την αρχή λειτουργίας τους.

Την τελευταία δεκαετία ξεκίνησαν οι πρώτες πιλοτικές εφαρμογές συγκεκριμένων τεχνολογιών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρατίθενται τεχνοοικονομικά στοιχεία αυτών των εγκαταστάσεων απ' όπου μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

3.1 Ιστορική αναδρομή των διατάξεων δέσμευσης κυματικής ενέργειας

Παρόλο που η κυματική ενέργεια ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας δεν είναι ακόμη διαδεδομένη και μόλις τα τελευταία χρόνια έχει ανακύψει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γι' αυτή, οι πρώτες προσπάθειες για την εκμετάλλευσή της ξεκινούν το 18^{ο} αιώνα.

Η πρώτη γνωστή ευρεσιτεχνία για την αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων εμφανίζεται το 1799 στο Παρίσι από τον Girard και το γιό του. Το 1910 κατασκευάζεται μία από τις πρώτες διατάξεις κυματικής ενέργειας από το Bochaux-Praceique με την οποία τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό το σπίτι του στο Royan κοντά στη Bordeaux στην Γαλλία. Ήταν η πρώτη διάταξη τύπου «Ταλαντώμενης στήλης ύδατος» . Από το 1855 μέχρι το 1973, μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο, είχαν εμφανιστεί 340 κατοχυρωμένες ευρεσιτεχνίες.

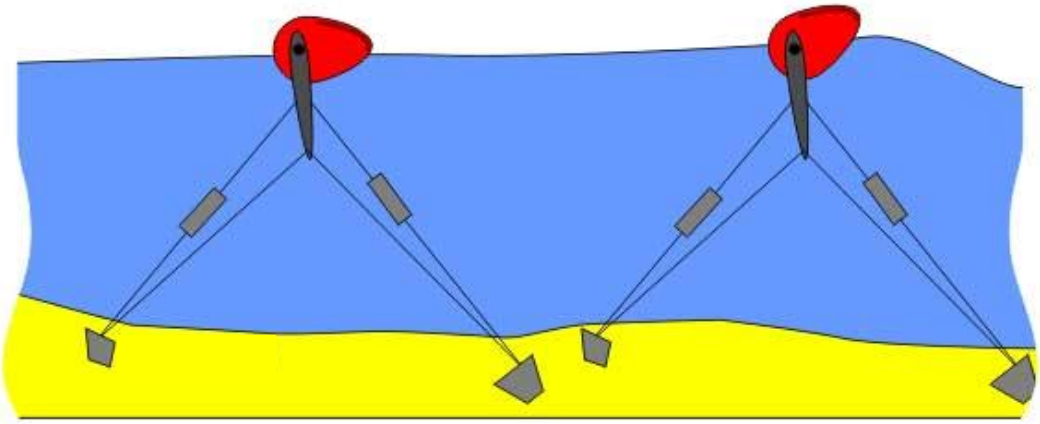
Η σύγχρονη επιστημονική έρευνα για την δέσμευση της κυματικής ενέργειας ξεκινάει τη δεκαετία του 1940 με τα πειράματα του Yosiho Masuda. Ο Masuda δοκίμασε πληθώρα διαφορετικών διατάξεων στη θάλασσα ανάμεσα στις οποίες ήταν και η τεχνική της απορρόφησης ενέργειας από την κίνηση αρθρωμένων σωμάτων.

Το ενδιαφέρον για την κυματική ενέργεια ανανεώθηκε το 1973 εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης. Ένας σημαντικός αριθμός ακαδημαϊκών ερευνητών άρχισε να εξετάζει συστηματικά τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα. Ανάμεσα σε αυτούς ήταν και οι: Stephen Salter από το πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, Kiell Budal και Johannes Falnes από το Νορβηγικό Τεχνολογικό Ίδρυμα (Norwegian Institute of Technology), Michael E. McCormick από τη Ναυτική Ακαδημία των ΗΠΑ,

David Evans από το πανεπιστήμιο του Bristol, Michael French από το πανεπιστήμιο του Lancaster και οι John Newman και Chiang C. Mei από το MIT.

Το 1974 ο Stephen Salter προχώρησε σε μία εφεύρεση γνωστή ως Salter's Duck (Σχ. 3-1) η οποία είχε το σχήμα έκκεντρου. Σύμφωνα με ελεγχόμενα πειράματα μικρής κλίμακας η μηχανή αυτή αποδείχτηκε πως μπορούσε να απορροφήσει το 90% της ενέργειας του κύματος και το 90% αυτής να το μετατρέψει σε ηλεκτρισμό, οδηγώντας σε βαθμό απόδοσης της τάξης του 80%.

Καθώς ο μηχανισμός κινείται από τα κύματα, το εκκρεμές που υπάρχει στο εσωτερικό ταλαντώνεται και η ταλάντωση αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό.



Σχήμα 3-1. Σχηματική αναπαράσταση του κυματικού μετατροπέα Salter's Duck.

Τη δεκαετία του 1980 καθώς η τιμή του πετρελαίου έπεσε, η χρηματοδότηση για την κυματική ενέργεια μειώθηκε δραστικά. Παρόλα αυτά λίγα πρωτότυπα πρώτης γενιάς δοκιμάστηκαν στη θάλασσα. Πρόσφατα πλέον λόγω της κλιματικής αλλαγής και της γενικότερης κινητοποίησης στα θέματα προστασίας του περιβάλλοντος εμφανίζεται διεθνώς ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της κυματικής.

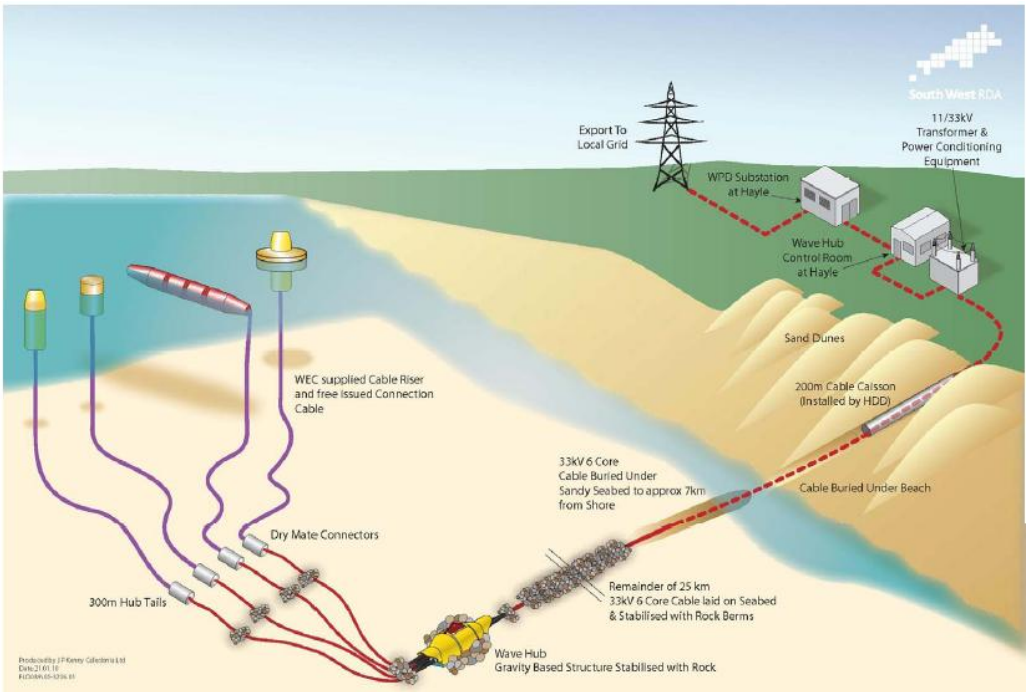
Το πρώτο κυματικό πάρκο παγκοσμίως ήταν το Agucadoura Wave Farm, το οποίο βρισκόταν 5km από την ακτή κοντά στη Provoa de Varzim βόρεια του Oporto στην Πορτογαλία (Σχ. 3-2). Το πάρκο διέθετε τρεις κυματικούς μετατροπείς Pelamis συνολικής ισχύος 2.25MW. Τέθηκε σε λειτουργία πρώτη φορά τον Ιούλιο του 2008 και επίσημα άνοιξε το Σεπτέμβριο του 2008. Μετά από δύο μήνες, το Νοέμβριο του 2008 το πάρκο έκλεισε λόγω της χρεωκοπίας της εταιρίας που το διαχειριζόταν. Οι μηχανές ήταν ήδη εκτός λειτουργίας λόγω τεχνικών ζητημάτων και παρότι επιδιορθώθηκαν, εντούτοις δεν

τέθηκαν ξανά σε λειτουργία και αποσύρθηκαν οριστικά το 2011. Σχεδιάζεται μια δεύτερη φάση λειτουργίας του έργου με 25 μηχανές Pelamis συνολικής ισχύος 21 MW.

Σχήμα 3-2. Κυματικό πάρκο στο Agucadoura.

Στις 20 Φεβρουαρίου του 2007 ανακοινώθηκε η χρηματοδότηση κυματικού πάρκου 3MW στη Σκωτία με 4 εκατομμύρια λίρες στα πλαίσια ενός χρηματοδοτικού σχήματος 13 εκατομμυρίων λιρών για την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας στη Σκωτία. Η πρώτη από τις 66 μηχανές τέθηκε σε λειτουργία το Μάιο του 2010.

Χρηματοδότηση επιπλέον ανακοινώθηκε για την ανάπτυξη του Wave Hub στη βόρεια ακτή του Cornwall στην Αγγλία (Σχ. 3-3) . Η διάταξη αυτή θα λειτουργεί σαν μία τεράστια «μπαλαντέζα» μέσα στη θάλασσα η οποία θα συνδέει ευκολότερα και οικονομικότερα σειρές διάφορων πιλοτικών διατάξεων κυματικής ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Αρχικά θα μπορεί να μεταφέρει συνολική ισχύ 20 MW με δυνατότητα επέκτασης στα 40MW. Ήδη έχει εκδηλωθεί ενδιαφέρον από 4 κατασκευαστές κυματικών μετατροπέων για τη χρήση του εν λόγω συστήματος.[15]



Σχήμα 3-3. Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του Wave Hub.

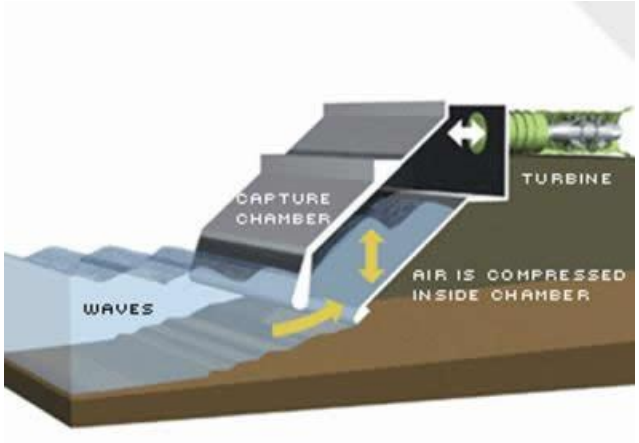
3.2 Κατηγοριοποίηση διατάξεων κυματικής ενέργειας

Οι μηχανισμοί κυματικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται με βάση τον τρόπο λειτουργίας τους στις εξής κατηγορίες:

- Διατάξεις ταλαντωμένης στήλης νερού (Oscillating Water Columns)
- Διατάξεις ανύψωσης (Overtopping devices)
- Διατάξεις πρόνευσης (Surging devices)
- Διατάξεις αρθρωμένων σωλήνων (attenuators)
- Διατάξεις παλινδρόμησης (Heaving devices)

3.2.1 Διατάξεις ταλαντωμένης στήλης νερού (Oscillating Water Columns)

Οι κατασκευές αυτές είναι κενές στο εσωτερικό τους και ημιβυθισμένες. Ο κυματισμός της θάλασσας πιέζει τον αέρα που βρίσκεται μέσα και στην συνέχεια αυτός κινεί ένα αεριοστρόβιλο τοποθετημένο στην οροφή της κατασκευής (Σχ. 3-4). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μηχανή Wave Bob (Σχ. 3-5).



Σχήμα 3-4. Αρχή λειτουργίας διατάξεων ταλαντωμένης στήλη νερού (Oscillating Water Column).

Σχήμα 3-5. Η μηχανή WaveBob.

3.2.2 Διατάξεις ανύψωσης (Overtopping devices)

Μπορούν να είναι εγκατεστημένες στην ακτή ή να επιπλέουν. Με κατάλληλη διάταξη οδηγούν τα κύματα σε μία υπερυψωμένη δεξαμενή απ' όπου στη συνέχεια το νερό μπορεί

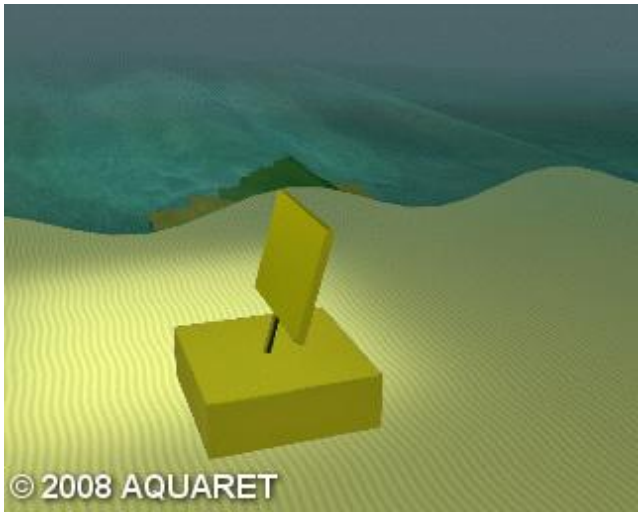
να περιστρέψει υδροστροβίλους (Σχ. 3-6). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μηχανή Wave Dragon (Σχ. 3-7).

Σχήμα 3-6. Αρχή λειτουργίας διατάξεων ανύψωσης (overtopping devices).

Σχήμα 3-7. Η μηχανή Wave Dragon.

3.2.3 Διατάξεις πρόνευσης (Surging devices)

Διαθέτουν μία επίπεδη επιφάνεια αρθρωμένη μέσω απλής στροφικής άρθρωσης σε βάση στον πυθμένα. Εκμεταλλεύονται την οριζόντια κίνηση των κυμάτων για παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδραυλικών συστημάτων (Σχ. 3-8). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μηχανή Wave Roller (Σχ. 3-9).

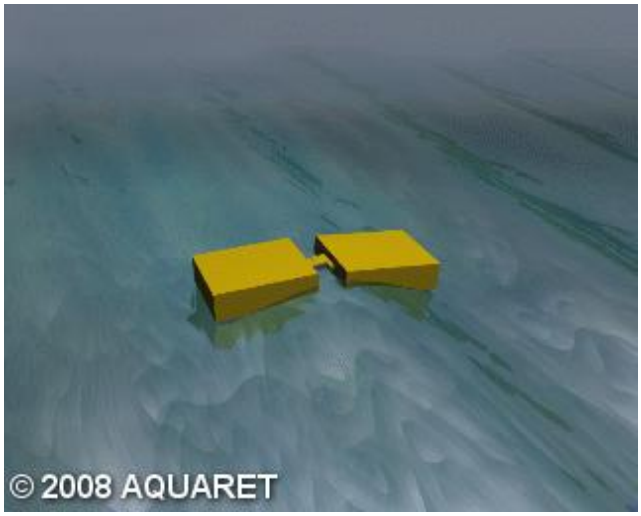


Σχήμα 3-8. Αρχή λειτουργίας διατάξεων πρόνευσης (surging devices)

Σχήμα 3-9. Η μηχανή Wave Roller.

3.2.4 Διατάξεις αρθρωμένων τμημάτων (Attenuators)

Αποτελούνται από τμήματα τα οποία επιπλέουν στο νερό και είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με αρθρώσεις κατά μήκος του κύριου άξονά τους (Σχ. 3-10). Η σχετική κίνηση των τμημάτων θέτει σε κίνηση υδραυλικά έμβολα τα οποία μέσω πεπιεσμένου ελαίου κινούν με τη σειρά τους ηλεκτρογεννήτριες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μηχανή Pelamis (Σχ. 3-11).



Σχήμα 3-10. Αρχή λειτουργίας διατάξεων αρθρωμένων σωμάτων (attenuator).

Σχήμα 3-11. Η μηχανή Pelamis.

3.2.5 Διατάξεις παλινδρόμησης (Heaving devices)

Μπορούν να επιπλέουν ή να είναι ημιβυθισμένες. Αποτελούνται από ένα πλωτήρα ο οποίος ταλαντώνεται από τον κυματισμό. Η δημιουργούμενη παλινδρομική κίνηση μπορεί να μετατραπεί, με μηχανικό ή υδραυλικό τρόπο, σε ηλεκτρισμό (Σχ. 3-12). Χαρακτηριστικό παράδειγμα η μηχανή Archimedes Wave Swing (Σχ. 3-13).

Σχήμα 3-12. Αρχή λειτουργίας διατάξεων παλινδρόμησης (heaving devices).

Σχήμα 3-13. Η μηχανή Archimedes Wave Swing.

3.3 Μελέτη Περιπτώσεων

Παρακάτω εξετάζονται χαρακτηριστικά στοιχεία των κυριότερων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας.

3.3.1 Κυματικό πάρκο Iberdola OPT

Το κυματικό πάρκο Ibertola OPT είναι εγκατεστημένο 9 km από την ακτή του Punta del Pescador το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Santoña στη βόρεια Ισπανία. Ο βυθός χαρακτηρίζεται αμμώδης με βραχώδεις σχηματισμούς και βάθος περίπου 50m. Αποτελείται από 9 συσκευές PowerBuoy των 150kW συν μία των 40kW. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας, θεωρώντας συντελεστές φόρτισης 20% το καλοκαίρι και 40% το χειμώνα, κυμαίνεται στις 3.5 – 4 GWh/yr. Συγκεντρωτικά στοιχεία βρίσκονται στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1. Στοιχεία έργου Iberdola OPT.

Τοποθεσία	**Santoña, Cantabria, Ισπανία**
Εγκατεστημένη ισχύς	1.39 MW
Τεχνολογία	Διατάξεις παλινδρόμησης. Αξονοσυμμετρικοί σημειακοί απολήπτες τύπου Power Buoy με υδραυλικό σύστημα απορρόφησης ενέργειας.
Χρονολογίες	2008 – 2009

Το σύστημα διαθέτει αισθητήρες οι οποίοι καταγράφουν διαρκώς την κυματική δραστηριότητα και στέλνουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε κέντρο ελέγχου. Σε περίπτωση που οι μηχανισμοί εκτεθούν σε πολύ μεγάλα κύματα, κλειδώνουν και σταματούν τη λειτουργία τους ώσπου τα κύματα να επιστρέψουν στα φυσιολογικά επίπεδα. Σύμφωνα με τους σχεδιαστές του συστήματος ένα κυματικό πάρκο από PowerBuoy ισχύος 10MW απαιτεί θαλάσσια έκταση 0.125km^2. Οι κυματικοί πλωτήρες PowerBuoy (Σχ. 3-14 και 3-15) αποτελούν απλές κατασκευές και μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα από την υπάρχουσα συμβατική ναυτική τεχνολογία.

Σχήμα 3-14. Ένας από τους κυματικούς μετατροπείς PowerBuoy του πάρκου.

Στοιχεία σχετικά με το κόστος της εγκατάστασης δεν έχουν δημοσιευθεί. Το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται στα 50-70€/MWh για πλωτήρες ισχύος 150kW και 20-30€/MWh για πλωτήρες ισχύος 500kW.

Σχήμα 3-15. Ο κυματικός μετατροπέας Powerbuoy.

3.3.2 Κυματικό πάρκο Okeanós

Το κυματικό πάρκο Okeanós αποτελείται από τρεις μηχανές Pelamis των 750kW. Παρότι το κόστος αγοράς του εξοπλισμού ανέρχεται στα 8 εκατομμύρια ευρώ, αναμένεται να γίνει απόσβεση, λόγω της πολύ ευνοϊκής τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας η οποία ανέρχεται στα 230€/MWh. Συγκεντρωτικά στοιχεία βρίσκονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2. Στοιχείο έργου Okeanós.

Τοποθεσία	**Aguçadoura/ Póvoa de Varzim, Βόρεια Πορτογαλλία**
Εγκατεστημένη ισχύς	2.25MW αποτελούμενη από τρεις μηχανές των 750kW η κάθε μία.
Τεχνολογία	Διατάξεις αρθρωμένων σωλήνων τύπου Pelamis.
Χρονολογίες	Καλοκαίρι 2008.

Ο κυματικός μετατροπέας Pelamis (Σχ. 3-17) είναι μία ημιβυθισμένη κατασκευή αποτελούμενη από 4 χαλύβδινα τεμάχια συνδεδεμένα μεταξύ τους με τρεις αρθρώσεις. Τα αρθρωμένα τμήματα κινούνται το ένα ως προς το άλλο και οι αρθρώσεις απορροφούν την κινητική ενέργειας με τη χρήση ελεγχόμενου υδραυλικού υποσυστήματος. Το υδραυλικό υποσύστημα με τη χρήση εμβόλων οδηγεί ρευστό υψηλής πίεσης σε υδραυλικούς κινητήρες οι οποίοι οδηγούν ηλεκτρικές επαγωγικές γεννήτριες.

Οι μηχανές κατασκευάστηκαν στη Σκωτία και μεταφέρθηκαν σε τμήματα στην Πορτογαλία όπου και συναρμολογήθηκαν όπως φαίνεται στο Σχ. 3-16.

Σχήμα 3-16. Στιγμιότυπο από τη συναρμολόγηση των Pelamis.

Σχήμα 3-17. Ο κυματικός μετατροπέας Pelamis σε λειτουργία.

3.3.3 Ευρωπαϊκή πιλοτική μονάδα κυματικής ενέργειας – Pico OWC

Το έργο Pico OWC ολοκληρώθηκε το 1999, όμως στη συνέχεια πλημμύρισε και οι στρόβιλοι τύπου Wells παρουσίασαν σημαντικές δυσλειτουργίες. Η διάταξη επιδιορθώθηκε το φθινόπωρο του 2005. Το έργο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και κόστισε 2-3 εκατομμύρια ευρώ. Η απόσβεση του κόστος πρόκειται να έρθει

από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στην προνομιακή τιμή των 230€/MWh. Συγκεντρωτικά στοιχεία βρίσκονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3. Στοιχεία έργου Pico OWC.

Τοποθεσία	**Pico island, Azores Πορτογαλία**
Εγκατεστημένη ισχύς	400kW
Τεχνολογία	Διατάξεις ταλαντούμενης στήλης νερού
Χρονολογίες	Πρώτη εγκατάσταση και λειτουργία 1999, επαναλειτουργία μετά από μερική καταστροφή τον Οκτώβριο του 2005.

Με βάση την αρχή λειτουργίας των διατάξεων ταλαντούμενης στήλης ύδατος (OWC) το προσπίπτον κύμα προκαλεί την ταλάντωση της ελεύθερης επιφάνειας μάζας νερού η οποία βρίσκεται σε θάλαμο (Σχ. 3-18) ο οποίος είναι κενός στο ανώτερο τμήμα του. Η κίνηση αυτή προκαλεί ροή αέρα χαμηλής πίεσης η οποία οδηγείται σε ακροφύσια (Σχ. 3-19) όπου βρίσκονται στρόβιλοι τύπου Wells.

Σχήμα 3-18. Ο θάλαμος της μονάδας Pico OWC.

Σχήμα 3-19. Ακροφύσια της μονάδας Pico OWC.

4 Σχεδιασμός Κυματικού Βαρούλκου

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πορεία σχεδιασμού του συστήματος απορρόφησης κυματικής ενέργειας με την ονομασία «κυματικό βαρούλκο». Αρχικά ορίζονται, με την κατάλληλη τεκμηρίωση, οι προδιαγραφές τις οποίες το σύστημα θα πρέπει να πληρεί. Στη συνέχεια εξετάζεται η αρχή λειτουργίας του συστήματος, σε γενικό επίπεδο, θεωρώντας το σύστημα ως ένα σύνολο σημειακών δυναμικών στοιχείων (αδράνειες, αποσβεστήρες, πηνία, μετασχηματιστές κλπ) τα οποία αλληλεπιδρούν μαζί τους[13]. Ορίζονται τα επιμέρους υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται το συνολικό σύστημα και παρουσιάζονται οι εναλλακτικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκρότηση κάθε υποσυστήματος. Καταλήγουμε σε δύο παραλλαγές οι οποίες συγκρίνονται με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους και προκρίνεται η μία.

Κατόπιν το σύστημα αποκτά μορφή και γεωμετρία στο χώρο. Σχεδιάζεται μία μηχανολογική κατασκευή η οποία υιοθετεί την αρχή λειτουργίας που προέκυψε από την προηγούμενη Παράγραφο του κεφαλαίου αυτού. Στο μηχανισμό έχει πλέον προστεθεί ένα πλήθος νέων εξαρτημάτων προκειμένου το κυματικό βαρούλκο να μπορεί να είναι λειτουργικό υπό πραγματικές συνθήκες. Στη συνέχεια αναλύονται η μέθοδος συναρμολόγησης, εγκατάστασης και χειρισμού του κυματικού βαρούλκου και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του. Τέλος αναλύονται ενδιαφέρουσες εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει το κυματικό βαρούλκο.

4.1 Προδιαγραφές

Ζητείται μηχανισμός ο οποίος να δεσμεύει και να αποθηκεύει την κυματικής προέλευσης μηχανική ισχύ σκάφους ή πλωτήρα σύμφωνα με τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Η ενέργεια μπορεί να παράγεται πάνω στο πλωτό σώμα.
- Η ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται πάνω στο πλωτό σώμα.
- Η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται από το πλωτό σώμα σε άλλο κινούμενο ή ακίνητο σώμα.
- Ο μηχανισμός θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ευκολία στη χρήση και από επεκτασιμότητα.

Οι δύο πρώτες προδιαγραφές προκύπτουν από την προοπτική το σύστημα να αξιοποιείται από σκάφη θαλάσσης. Αν η ενέργεια παράγεται και αποθηκεύεται πάνω στο σκάφος τότε το σκάφος θα μπορεί να μεταφέρει το σύστημα καθώς και την ενέργεια όπου πηγαίνει. Φυσικά το σύστημα μπορεί να εγκαθίσταται και στον λιμένα όπως θα δούμε στη συνέχεια. Η τρίτη προδιαγραφή είναι απαραίτητη για την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας. Η τέταρτη προδιαγραφή προκύπτει από το γεγονός ότι το προϊόν απευθύνεται

κατά κύριο λόγο σε ιδιοκτήτες σκαφών και ο σχεδιασμός του θα πρέπει λαμβάνει υπόψη του το χειρισμό του από μη ειδικούς.

Ως καταλληλότερος τρόπος αποθήκευσης επιλέγεται η χημική ενέργεια ηλεκτρικής στήλης (μπαταρίας). Για τη φόρτιση μπαταρίας απαιτείται η μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική. Για τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος του πλωτού σώματος σε ηλεκτρική μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε γραμμικοί είτε περιστροφικοί ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς (ηλεκτρογεννήτριες). Επιλέγεται η χρήση περιστροφικών ηλεκτρικών γεννητριών καθώς απαιτούν μικρότερο χώρο για μεγάλες μετατοπίσεις ενώ οι γραμμικοί μετατροπείς περιορίζονται από το μήκος διαδρομής τους. Η κίνηση μεταδίδεται στους δρομείς των ηλεκτρικών γεννητριών με τη χρήση εύκαμπτων φορέων, όπου εύκαμπτοι φορείς εννοούνται σκοινιά, καλώδια, αλυσίδες και γενικά φορείς οι οποίοι μεταφέρουν αποκλειστικά και μόνο αξονικές εφελκυστικές δυνάμεις.

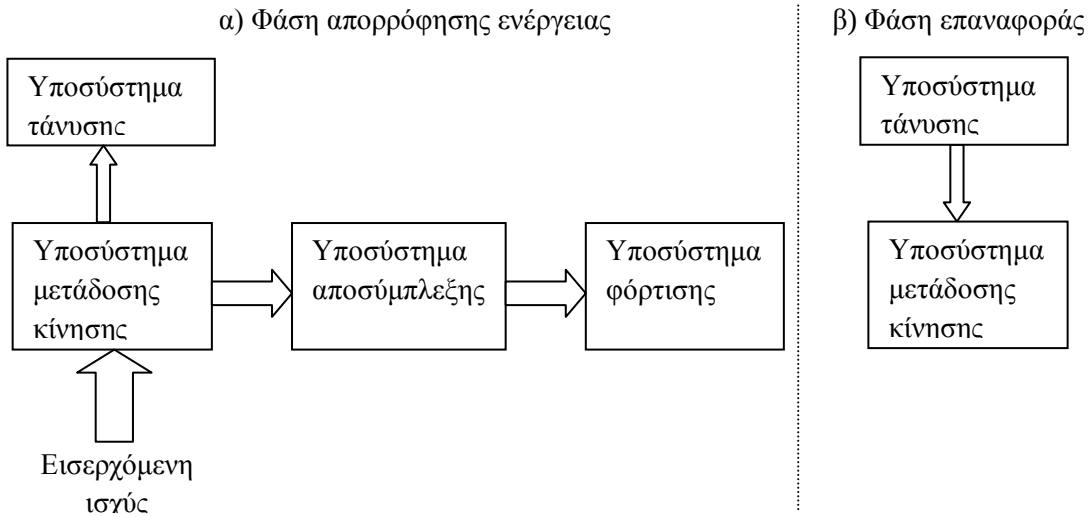
Θεωρείται πλωτό σώμα με 6 βαθμούς ελευθερίας. Μέσω του μηχανισμού η μηχανική ισχύς που του προσφέρουν τα κύματα μετασχηματίζεται σε περιστροφική ισχύ στις ατράκτους των ηλεκτρομηχανικών μετατροπέων και από εκεί μέσω ηλεκτρικού - ηλεκτρονικού κυκλώματος αποθηκεύεται σε ηλεκτρική στήλη (μπαταρία).

4.2 Σχεδιασμός της αρχής λειτουργίας του συστήματος

Για την επίτευξη των ανωτέρω το σύστημα θα αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια:

- Υποσύστημα μετάδοσης κίνησης από το σώμα σε περιστρεφόμενες ατράκτους
- Υποσύστημα τάνυσης του εύκαμπτου φορέα
- Υποσύστημα αποσύμπλεξης φορτίου - υποσυστήματος τάνυσης του εύκαμπτου φορέα
- Υποσύστημα φόρτισης μπαταρίας

Στο Σχ. 4-1 απεικονίζεται η ροή ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων σε κάθε φάση λειτουργίας του μηχανισμού.



Σχήμα 4-1. Ροή ισχύος μεταξύ των υποσυστημάτων του κυματικού βαρούλκου σε κάθε φάση λειτουργίας του.

4.2.1 Υποσύστημα μετάδοσης κίνησης από το σώμα σε περιστρεφόμενες ατράκτους

Όπως αναφέρθηκε, έχουμε επιλέξει η μηχανική ισχύς του πλωτού σώματος να μεταδίδεται σε ατράκτους περιστροφικών γεννητριών. Παρακάτω εξετάζονται εναλλακτικές επιλογές για το υποσύστημα.

Προτεινόμενες εναλλακτικές:

- Τύμπανο – εύκαμπτος φορέας – άτρακτος γεννήτριας.
- Τύμπανο – εύκαμπτος φορέας – υδραυλικό υποσύστημα - άτρακτος γεννήτριας.
- Εύκαμπτος φορέας – υδραυλικό υποσύστημα με υδραυλικό έμβολο - άτρακτος γεννήτριας.

Η χρήση υδραυλικού υποσυστήματος, θα υπερτερούσε σε περίπτωση συγκριτικά μεγάλων δυνάμεων και ροπών καθώς και σε ανάγκη μετασχηματισμού της ισχύος και μεταφοράς της ισχύος χωρίς μηχανικές ταλαντώσεις. Από την άλλη το επιπλέον υδραυλικό υποσύστημα θα αυξήσει το κόστος της εγκατάστασης και τις ενεργειακές απώλειες.

Όσον αφορά τη διαφορά ανάμεσα στη $2^η$ και $3^η$ εναλλακτική, ισχύουν όσα γράφηκαν για τις διαφορές μεταξύ γραμμικών και περιστροφικών γεννητριών.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέγεται να υιοθετηθεί η πρώτη εναλλακτική όπου γίνεται χρήση απλώς τυμπάνων και εύκαμπτων φορέων για τη μετάδοση της κίνησης από το σώμα στις ατράκτους των γεννητριών.

4.2.2 Υποσύστημα τάνυσης του εύκαμπτου φορέα

Όπως γίνεται αντιληπτό, για να μεταφέρει ο εύκαμπτος φορέας δυνάμεις θα πρέπει να παραμένει τεντωμένος. Για να εξασφαλιστεί αυτή η συνθήκη θα πρέπει να υπάρχει ένα

σύστημα τάνυσης του εύκαμπτου φορέα και επαναφοράς του τυμπάνου στην αρχική του θέση, το οποίο να δρα κατά τη φάση της ταλάντωσης που η μετατόπιση του πλωτήρα θα οδηγούσε στη χαλάρωση (slack) του εύκαμπτου φορέα.

Προτεινόμενες εναλλακτικές:

- στροφικό ελατήριο που ακολουθεί το νόμο του Hooke ($\tau = k\,\varphi$)
- στροφικό ελατήριο σταθερής ροπής
- χρήση DC κινητήρα.

Η απαιτούμενη ροπή επαναφοράς στην άτρακτο για τη λειτουργία του συστήματος πρέπει να εξασφαλίζει τις ακόλουθες συνθήκες:

Ο χρόνος επαναφοράς να μην είναι μεγαλύτερος του μισού της περιόδου της διεγείρουσας δύναμης ώστε να προλαβαίνει το τύμπανο να επανέρχεται. Πρακτικά ο χρόνος επαναφοράς θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μη χαλαρώνει ο εύκαμπτος φορέας. Αν η δύναμη επαναφοράς προέρχεται από στροφικό ελατήριο το οποίο ακολουθεί το νόμο του Hooke θα πρέπει η ιδιοσυχνότητα του συστήματος ελατηρίου - τυμπάνου να είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα διέγερσης.

Ο εύκαμπτος φορέας σε συνθήκες ήρεμου νερού πρέπει να υφίσταται προένταση η οποία να εξουδετερώνει το ίδιο βάρος και τις ροπές του. (π.χ. μια αρχική συστροφή του ελατηρίου).

Επίσης θα πρέπει να εξασφαλίζεται η άσκηση ροπής επαναφοράς στο τύμπανο και στη μέγιστη απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας. Αν πρόκειται για ελατήριο θα πρέπει να εξασφαλίζεται πως δε θα επανέλθει στο φυσικό του μήκος πριν τη μέγιστη απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας διότι κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε χαλάρωση του εύκαμπτου φορέα.

Η χρήση DC κινητήρα για τον έλεγχο θέσης του τυμπάνου της ατράκτου παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον αλλά δεν εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Θα μπορούσε να αποτελέσει το αντικείμενο μελλοντικής εργασίας για τη δημιουργία ενός νέου συστήματος απορρόφησης κυματικής ισχύος.

Επιλέγεται η χρήση στροφικού ελατηρίου σταθερής ροπής λόγω της απλότητας της λειτουργίας και της γεωμετρίας του μηχανισμού και της ευρείας χρήσης του.

4.2.3 Υποσύστημα αποσύμπλεξης φορτίου - υποσυστήματος τάνυσης του εύκαμπτου φορέα

Ο χρόνος επαναφοράς εξαρτάται από την αδράνεια της ατράκτου, από τη σκληρότητα του ελατηρίου και από την ανθιστάμενη ροπή που εκδηλώνει το φορτίο καταναλώνοντας την ισχύ. Η ροπή του φορτίου είναι ροπή απόσβεσης που εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε σταθερό χρόνο επαναφοράς πρέπει να αποσυμπλέκουμε το φορτίο από το υποσύστημα τάνυσης του εύκαμπτου φορέα κατά τη

φάση της επαναφοράς του τυμπάνου. Σε αντίθετη περίπτωση το ελατήριο υπό ορισμένες συνθήκες δε θα προλαβαίνει να επαναφέρει το τύμπανο, ο εύκαμπτος φορέας θα χαλαρώνει και θα παύει να μεταφέρει ροπές στο τύμπανο και συνεπώς ένα κομμάτι της ενέργειας δε θα δεσμεύεται. Πέραν τούτου, με τη χρήση αυτού του υποσυστήματος εξασφαλίζεται καλύτερη ροή ισχύος διότι το υποσύστημα τάνυσης του εύκαμπτου φορέα κατά τη φάση της επαναφοράς δεν παρέχει ισχύ και στο φορτίο αλλά μόνο στην περιστρεφόμενη αδράνεια.

Προτεινόμενες εναλλακτικές:

- Μηχανικό υποσύστημα:
  - Ελεγχόμενος συμπλέκτης
  - Καστάνια
- Ηλεκτρικό υποσύστημα:
  - Ελεγχόμενος διακόπτης
  - Δίοδος

Προτιμούνται οι απλούστερες διατάξεις της καστάνιας και της διόδου έναντι των διατάξεων που απαιτούν έλεγχο. Η απλότητα στον τρόπο λειτουργίας και κατασκευής θεωρείται πως μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους και στην αύξηση της αξιοπιστίας της συσκευής.

4.2.4 Υποσύστημα φόρτισης μπαταρίας

Η μπαταρία εμφανίζει στους ακροδέκτες της μία σχεδόν σταθερή τάση (τάση εξόδου). Για να δοθεί ενέργεια προς την μπαταρία απαιτείται συσκευή φόρτισης με τάση εξόδου μεγαλύτερη από την τάση εξόδου της μπαταρίας και μικρότερη από ένα όριο πάνω από το οποίο η μπαταρία καταστρέφεται. Για να γίνει αυτό απαιτούνται ηλεκτρονικά ισχύος όπως τα παρακάτω:

- Ρυθμιστές φόρτισης (charge regulators)
- PWM (pulse width modulator)
- MPPT (maximum power point tracking) [1]
- Boost/Buck converter (step up/down)
- Inverters και ανορθωτές

Λόγω της ευρύτατης και επιτυχημένης χρήσης των ρυθμιστών φόρτισης σε εφαρμογές ηλιακής και αιολικής ενέργειας θεωρούνται ως αποδεκτή λύση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

4.2.5 Δυνατοί συνδυασμοί

Τα παραπάνω υποσυστήματα μπορούν να σχηματίσουν μεταξύ τους αρκετούς διαφορετικούς συνδυασμούς. Καταλληλότερες θεωρούνται οι παρακάτω παραλλαγές:

4.2.5.1 Παραλλαγή 1

Το σύστημα περιλαμβάνει εύκαμπτο φορέα και περιστρεφόμενο τύμπανο στο οποίο τυλίγεται ο εύκαμπτος φορέας. Στροφικό ελατήριο σταθερής ροπής συνδέει την άτρακτο του τυμπάνου με το πλωτό σώμα.

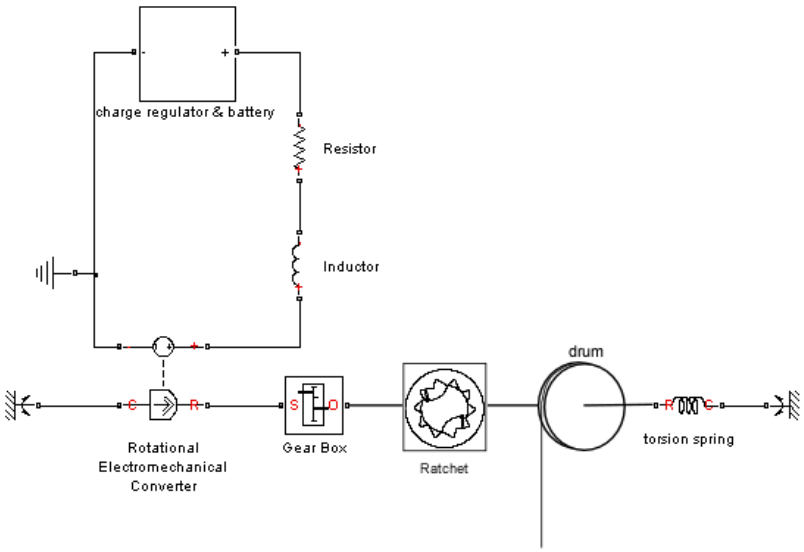
Παράλληλα η άτρακτος του τυμπάνου συνδέεται μέσω καστάνιας με την άτρακτο της ηλεκτρικής μηχανής. Η ηλεκτρική μηχανή συνδέεται μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος με το ρυθμιστή φόρτισης μπαταρίας. Απαιτείται αρχική συστροφή του στροφικού ελατηρίου για την επίτευξη προέντασης.

Στο Σχ. 4-2 παρουσιάζεται απλουστευτικό μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρομηχανικού συστήματος της πρώτης παραλλαγής.

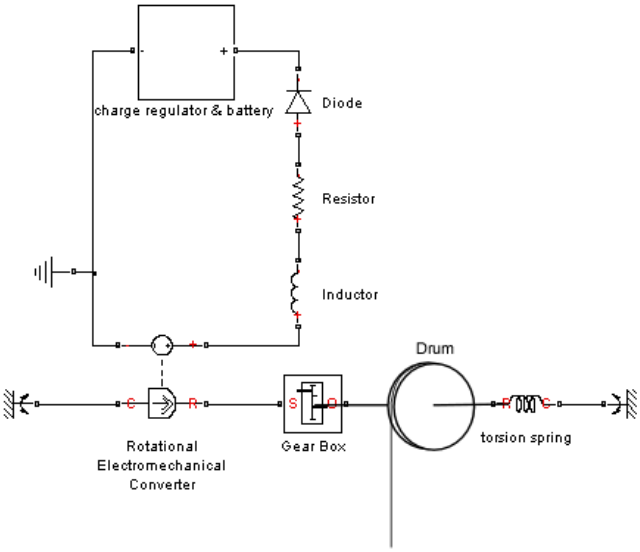
4.2.5.2 Παραλλαγή 2

Χρησιμοποιείται όμοια διάταξη με την εξής διαφορά: Πλέον για την αποσύμπλεξη φορτίου και ελατηρίου χρησιμοποιείται ηλεκτρική δίοδος η οποία τοποθετείται στο ηλεκτρικό κύκλωμα ανάμεσα στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και το ρυθμιστή φόρτισης με φορά τέτοια που να μην επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος όταν η πολικότητα της γεννήτριας αλλάζει εξαιτίας της περιστροφής του τυμπάνου από το στροφικό ελατήριο κατά την αντίθετη φορά. Συνεπώς κατ' αυτή τη φάση της λειτουργίας του συστήματος, εφόσον το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα, δεν ασκείται ανθιστάμενη ροπή (Laplace) από την ηλεκτρική γεννήτρια και ο χρόνος επαναφοράς του τυμπάνου από το ελατήριο παραμένει σταθερός και μικρότερος από ένα όριο ώστε να μην χάνεται η τάνυση του εύκαμπτου φορέα. Συνεπώς δεν υπάρχει η ανάγκη της καστάνιας.

Στο Σχ. 4-3 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρομηχανικού συστήματος της δεύτερη παραλλαγής.



Σχήμα 4-2. Μονογραμμικό διάγραμμα της 1ης παραλλαγής.



Σχήμα 4-3. Μονογραμμικό διάγραμμα της 2ης παραλλαγής.

4.2.6 Σύγκριση και αξιολόγηση των παραλλαγών

Είναι πλέον απαραίτητο να συγκριθούν οι δύο παραλλαγές και να δούμε ποια και σε ποιες περιπτώσεις πλεονεκτεί έναντι της άλλης. Τα κριτήρια και τα σχόλια συνοψίζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1. Σύγκριση των δύο εναλλακτικών συστημάτων

	Κριτήρια	Παραλλαγή 1	Παραλλαγή 2	Σχόλια
Οικονομοτεχνικά Κριτήρια	Ενεργειακή Απόδοση	-	+	Η καστάνια συνεπάγεται σχετικά υψηλές μηχανικές απώλειες. Η δίοδος έχει σχετικά μικρές ηλεκτρικές απώλειες. Παρόλα αυτά στις διόδους υπάρχει το δυναμικό παρεμπόδισης το οποίο μπορεί να μειώσει την απορρόφηση ενέργειας αν δεν γίνει προσεκτικός σχεδιασμός και η τάση της γεννήτριας είναι συγκρίσιμη με το δυναμικό παρεμπόδισης της διόδου. Επιπλέον στις απώλειες της 2ης παραλλαγής θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τις απώλειες τριβής του κιβωτίου ταχυτήτων κατά την αντίστροφη λειτουργία του οι οποίες σχεδόν απουσιάζουν στην 1η παραλλαγή κατά την οποία το κιβώτιο ταχυτήτων δε στρέφεται αντίστροφα.

	Κόστος Κατασκευής	0	0	Το κόστος κατασκευής των δύο παραλλαγών θεωρείται όμοιο και συγκρίσιμο με ναυτικά εξαρτήματα της αγοράς όπως ηλεκτρικούς εργάτες και ηλεκτρικά βιντσιρέλα.
	Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	-	+	Η καστάνια απαιτεί ακριβότερη και συχνότερη συντήρηση από τη δίοδο.
	Ασφάλεια Αξιοπιστία	0	0	Όμοια επίπεδα ασφάλειας και αξιοπιστίας.
Περιβαλλοντικά Κριτήρια	Θόρυβος	-	+	Η καστάνια καθώς εμπλέκει και αποσυμπλέκει το τύμπανο με τη γεννήτρια παρουσιάζει θόρυβο χαμηλής έντασης αλλά πιθανόν ενοχλητικής συχνότητας για τους ανθρώπους οι οποίοι βρίσκονται κοντά. Από την άλλη η δίοδος δε συμβάλει στο θόρυβο. Κατά τ' άλλα η διάταξη δεν αναμένεται να δημιουργεί ηχητική όχληση είτε στο ανθρώπινο είτε στο θαλάσσιο και υποθαλάσσιο περιβάλλον.
	Εκπομπές-Ρύπανση	0	0	Μηδενικές εκπομπές, μηδενικοί ρύποι. Ως ΑΠΕ συμβάλει στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την αειφόρο ανάπτυξη.
	Οπτική Όχληση	0	0	Γενικώς οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας δε δημιουργούν ζητήματα οπτικής όχλησης. Εν προκειμένω, η εγκατάσταση του συστήματος είτε σε σκάφη είτε σε πλωτήρες δε δημιουργεί τέτοιου είδους προβλήματα. Αν μάλιστα προσεχθεί η αισθητική της όψης του μηχανισμού κατά το σχεδιασμό τότε το αποτέλεσμα μπορεί να είναι αρκετά καλαίσθητο

Από τα παραπάνω κριτήρια καταλήγουμε πως καταλληλότερος σχεδιασμός είναι αυτός της 2^{ης} παραλλαγής όπου για την αποσύμπλεξη του φορτίου από το σύστημα επαναφοράς χρησιμοποιείται ηλεκτρική δίοδος αντί για καστάνια.

4.3 Μηχανολογικός Σχεδιασμός

Έχοντας πλέον συγκλίνει στην αρχή λειτουργίας του συστήματος μπορούμε να προχωρήσουμε στον μηχανολογικό σχεδιασμό, από τον οποίο θα προκύψει η τρισδιάστατη μορφή του προϊόντος, η δομή του, ο τρόπος συναρμολόγησης, εγκατάστασης, χειρισμού, και λειτουργίας του καθώς και οι εφαρμογές που μπορεί να έχει στην πράξη.

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το κυματικό βαρούλκο μοιάζει στη μορφή και στη λειτουργία με τα ναυτικά βαρούλκα (βιντσιρέλο) τα οποία χρησιμοποιούνται ήδη σε σκάφη. Αυτό εξασφαλίζει στο προϊόν τη δυνατότητα να εγκαθίσταται με ευκολία σε σκάφη, να είναι εύκολος και γνώριμος ο χειρισμός του από τους χρήστες και να εντάσσεται στον περιβάλλον του σκάφους αρμονικά χωρίς να προκαλεί αίσθημα ηχητικής ή οπτικής όχλησης. Επιπλέον χρησιμοποιώντας σε σημαντικό αριθμό τυποποιημένα εξαρτήματα που παράγονται από τη βιομηχανία σε μεγάλες ποσότητες καθίσταται σχετικά εύκολη και φθηνή η παραγωγή τέτοιων συστημάτων ιδιαίτερα μάλιστα από βιομηχανικές μονάδες που ήδη διαθέτουν γραμμές παραγωγής ναυτικών βιντσιρέλων. Στην ουσία θέλουμε μία παραλλαγή του ναυτικού βιντσιρέλου η οποία βασίζεται στη μορφή, τη δομή και τη λειτουργία του αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνει και όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος όπως παρουσιάστηκαν.

Σχήμα 4-4. Ναυτικά βιντσιρέλα.

Η μέθοδος με την οποία συγκλίνουμε σε ένα τελικό σχεδιασμό βασίζεται στη δημιουργία όσο το δυνατόν περισσότερων εναλλακτικών σχεδιασμών από τη σύγκριση και την αντιπαραβολή των οποίων προκύπτουν νέοι μηχανολογικοί σχεδιασμοί ώσπου να επέλθει σύγκλιση σε ένα μηχανολογικό σχεδιασμό ο οποίος εκτιμάται ότι μπορεί να ικανοποιήσει κατά τον καλύτερο τρόπο ένα σημαντικό πλήθος προδιαγραφών και παραμέτρων.

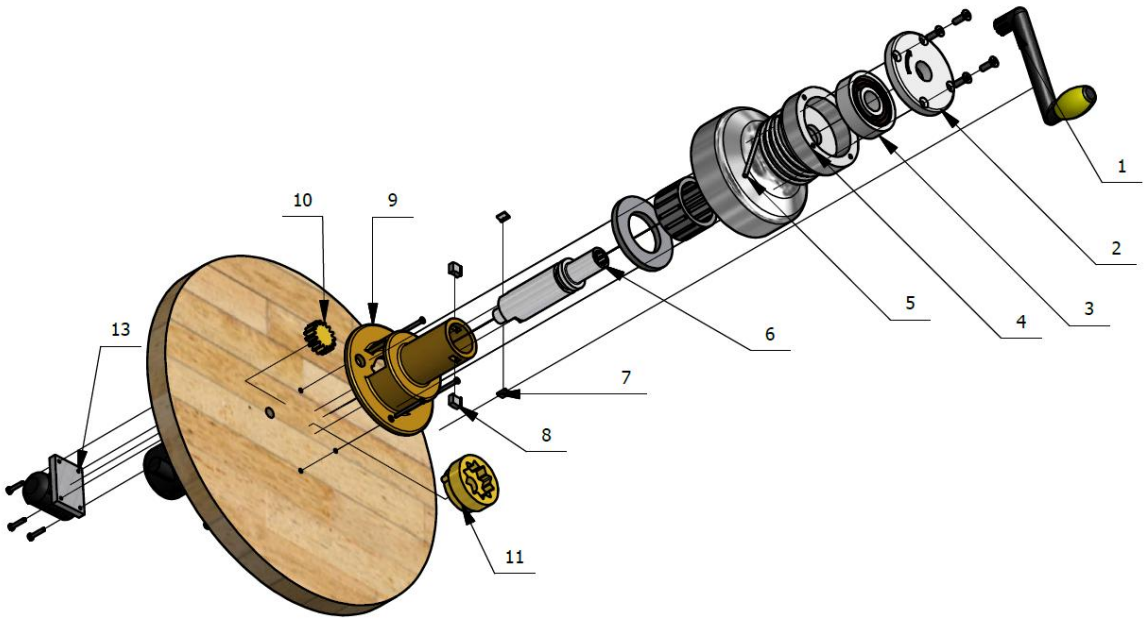
Στην συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του τελικού μηχανολογικού σχεδιασμού και κάθε συνιστώσας του κύκλου λειτουργίας του.

4.3.1 Μορφή και δομή του κυματικού βαρούλκου

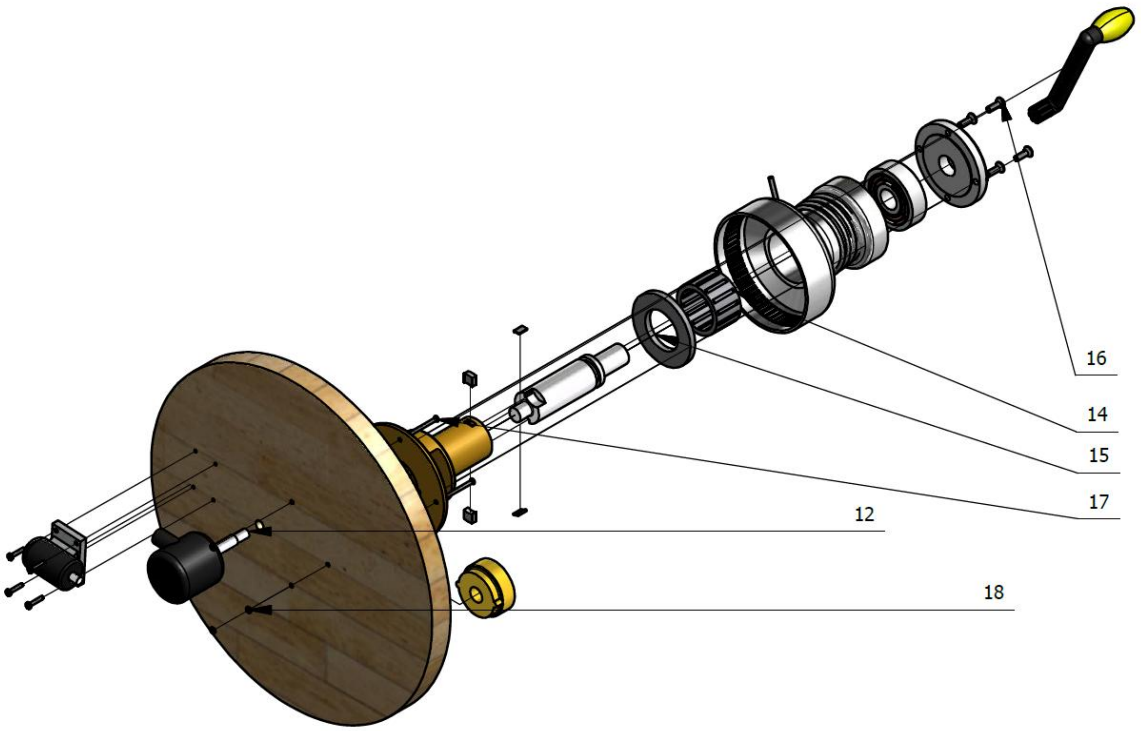
Στην Παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η δομή του κυματικού βαρούλκου. Ο μηχανισμός αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία (κωδικοποιημένα):

- Χειρομοχλός (1)
- Πώμα (2)
- Επανατατικό ελατήριο (3)
- Τύμπανο (4)
- Εύκαμπτος φορέας (5)
- Κεντρικός πείρος (6)
- Στελέχη καστάνιας (7)
- Σφήνες (8)
- Βάση (9)
- Οδοντωτός τροχός (10)
- Καστάνια (11)
- Κιβώτιο ταχυτήτων (12)
- Ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (13)
- Έδρανα κύλισης (14)
- Ροδέλα (15)
- Κοχλίες πώματος (16)
- Κοχλίες βάσης (17)
- Περικόχλια (18)

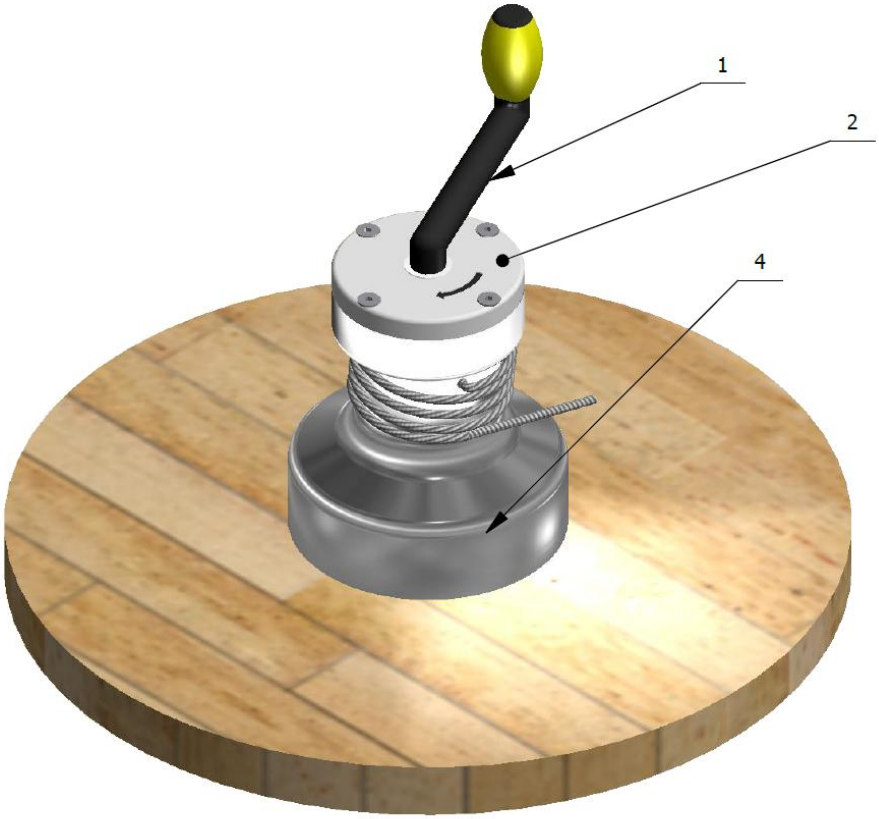
Τα στοιχεία αυτά σημειώνονται με τους κωδικούς τους σε όλα τα επόμενα σχήματα. Στα Σχ. 4-5 και 4-6 απεικονίζεται ο μηχανισμός εκτεταμένος (exploded) ενώ στα Σχ. 4-7 και 4-8 παρουσιάζονται ισομετρικές όψεις του.



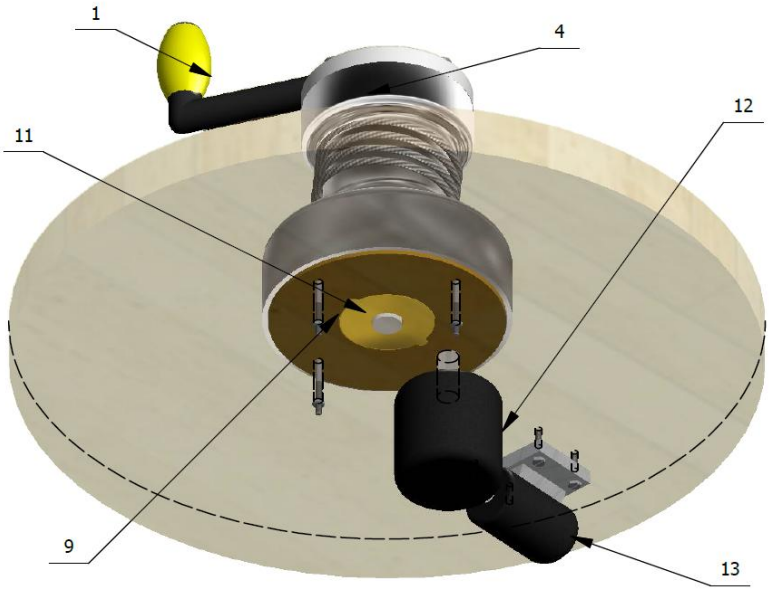
Σχήμα 4-5. Ισομετρική όψη του μηχανισμού εκτεταμένου (exploded view).



Σχήμα 4-6. Ισομετρική όψη του μηχανισμού εκτεταμένου (exploded view).



Σχήμα 4-7. Ισομετρική όψη του μηχανισμού από πάνω.



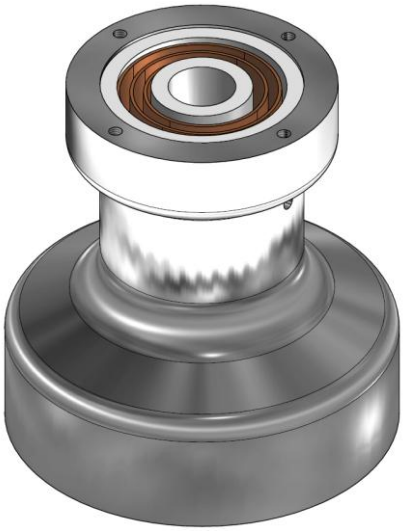
Σχήμα 4-8. Ισομετρική όψη του μηχανισμού από κάτω.

Το βαρούλκο απορρόφησης κυματικής ενέργειας ή απλά κυματικό βαρούλκο, όπως αναφέρθηκε, διαθέτει τύμπανο περιέλιξης στο οποίο τυλίγεται ο εύκαμπτος φορέας. Όπως φαίνεται στο Σχ. 4-9, το τύμπανο εξωτερικά έχει τη χαρακτηριστική μορφή των

τυμπάνων ναυτικών βαρούλκων (βιντσιρέλο) για τη σωστή συνεργασία με τον εύκαμπτο φορέα. Διαθέτει οπή στην περιφέρειά του για τη σταθερή προσαρμογή της μίας άκρης του εύκαμπτου φορέα στο τύμπανο.

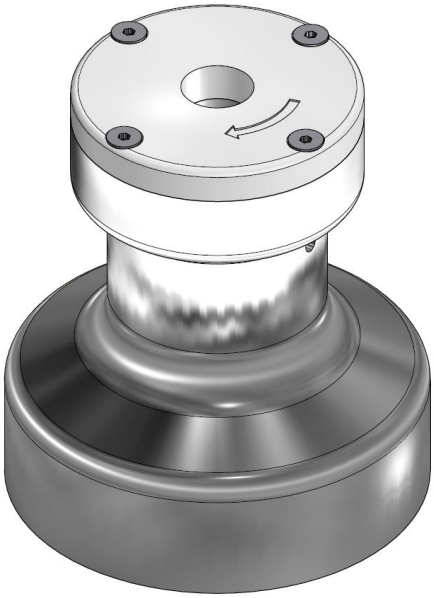
Σχήμα 4-9. Το τύμπανο του κυματικού βαρούλκο. Διακρίνεται η οπή στην οποία προσαρμόζεται σταθερά ο εύκαμπτος φορέας.

Το τύμπανο διαθέτει επιπλέον κατάλληλη διαμόρφωση στο πάνω μέρος του για την προσαρμογή επανατατικού ελατηρίου σταθερής ροπής ομοαξονικά στο εσωτερικό του σύμφωνα με το Σχ. 4-10.



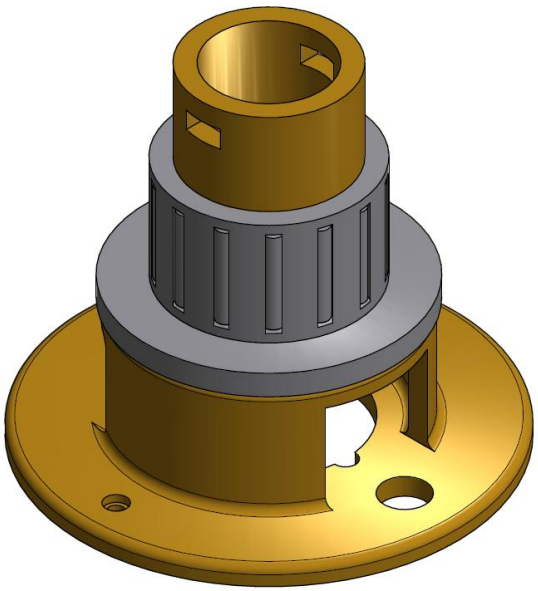
Σχήμα 4-10. Το τύμπανο με τοποθετημένο στο εσωτερικό του το επανατατικό ελατήριο.

Στο πάνω μέρος του επανατατικού ελατήριου εφάπτεται πώμα το οποίο στερεώνεται στο τύμπανο με κοχλίες (Σχ. 4-11). Το πώμα έχει στο κέντρο του οπή.



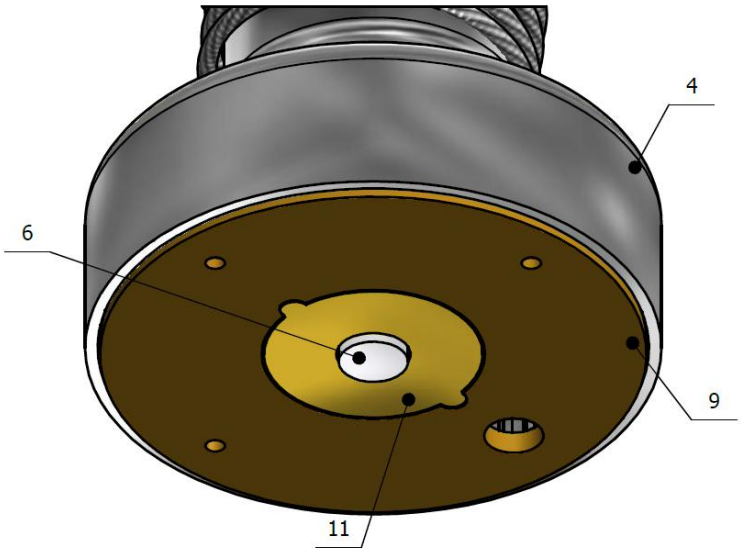
Σχήμα 4-11. Το τύμπανο με βιδωμένο στο πάνω μέρος το πώμα. Διακρίνεται το βέλος που επισημαίνει τη φορά περιστροφής του χειρομοχλού από το χειριστή.

Το τύμπανο εδράζεται με περιστροφική άρθρωση σε κυλινδρική δακτυλιοειδή βάση με τη χρήση εδράνων κύλισης και ροδέλας όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4-12.



Σχήμα 4-12. Η βάση με τη ροδέλα και το έδρανο κύλισης.

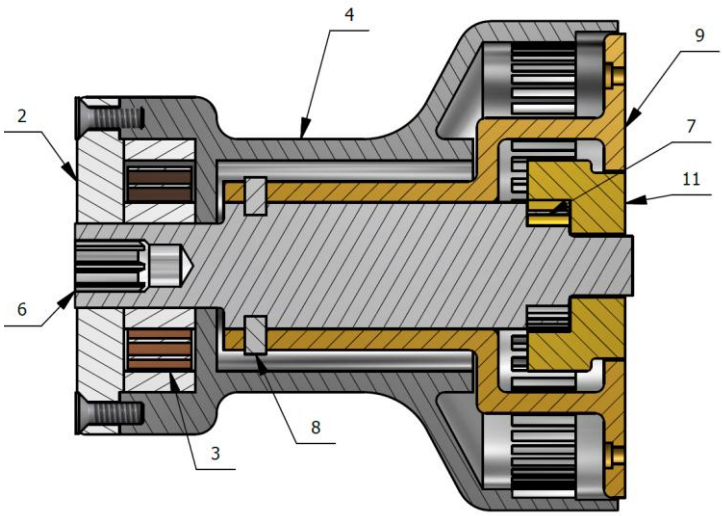
Στο εσωτερικό της βάσης (9) υπάρχει καστάνια (11) πρισματικά προσαρμοσμένη στη βάση (9) μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης όπως φαίνεται στο Σχ. 4-13.



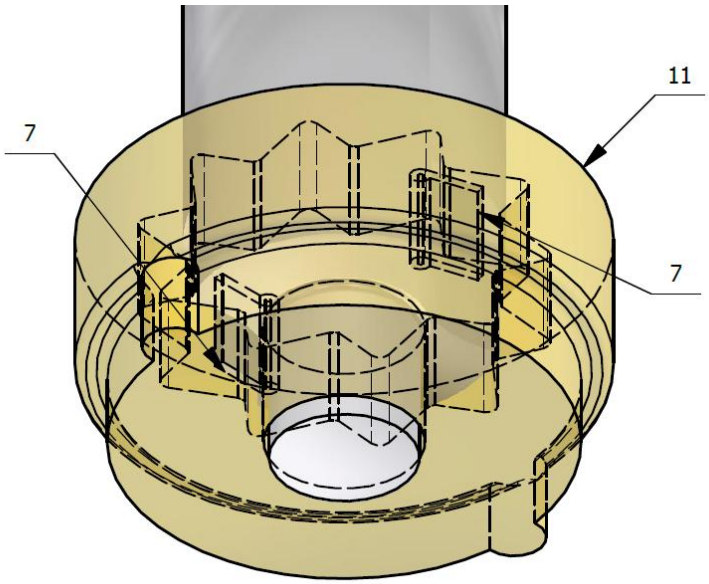
Σχήμα 4-13. Το κάτω μέρος του μηχανισμού όπου διακρίνονται οι εγκοπές με τις οποίες προσαρμόζεται η καστάνια στη βάση, οι μικρές οπές για τους κοχλίες και η μεγαλύτερη οπή για τη διέλευση της ατράκτους του κιβωτίου ταχυτήτων.

Η καστάνια (11) συνδέεται με το τύμπανο (4) μέσω κεντρικού πείρου (6) ο οποίος διέρχεται από τον κοινό άξονα του τυμπάνου (4), του επανατατικού ελατηρίου (3), του πώματος (2) και της βάσης (9) σύμφωνα με το Σχ. 4-14.

Σύμφωνα με το ίδιο σχήμα ο κεντρικός πείρος (6) συνδέεται αφενός στο πάνω μέρος πρισματικά με το επανατατικό ελατήριο (3) μέσω αύλακας ώστε να μην είναι δυνατή η σχετική περιστροφή τους αφετέρου στο κάτω μέρος συνδέεται με την καστάνια (11) μέσω των στελεχών της καστάνιας (7) που επιτρέπουν τη σχετική περιστροφή κεντρικού πείρου (6) – καστάνιας (11) προς μία μόνο φορά. Η συνεργασία της καστάνιας (11) με τον κεντρικό πείρο (6) απεικονίζεται στο Σχ. 4-15. Ο κεντρικός πείρος (6) συνεργάζεται ακόμη με την οπή του πώματος (2) με ελεύθερη συναρμογή.



Σχήμα 4-14. Ο μηχανισμός σε τομή.

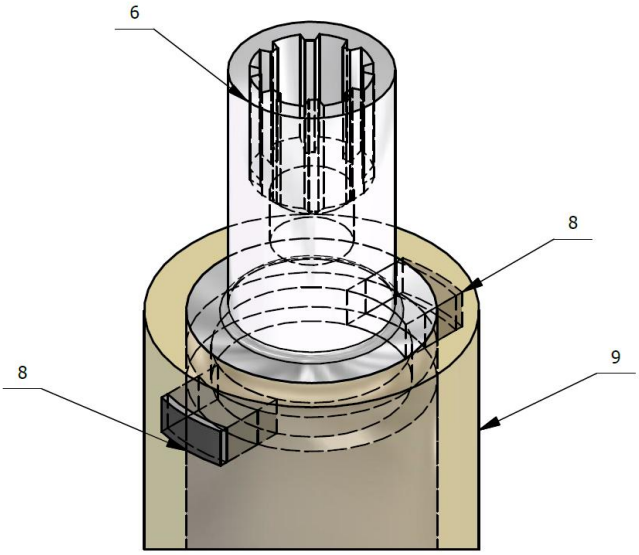


Σχήμα 4-15. Η συνεργασία του κεντρικού πείρου με την καστάνια μέσω των στελεχών της.

Ο κεντρικός πείρος στο πάνω μέρος του διαθέτει οπή με αυλακώσεις ώστε να συνδέεται πρισματικά με χειρομοχλό όπως φαίνεται στο Σχ. 4-16.

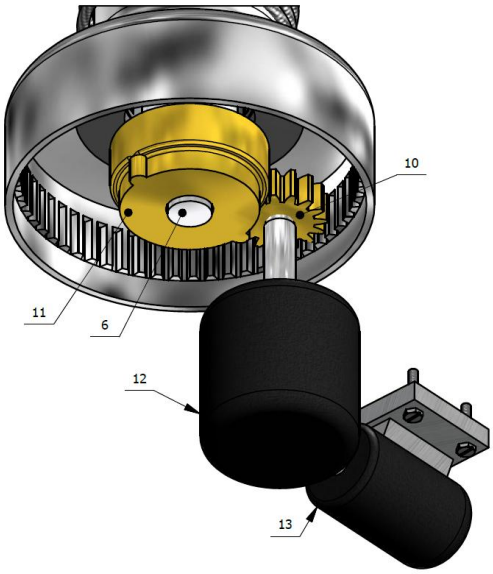
Σχήμα 4-16. Η συνεργασία του κεντρικού πείρου με το χειρομοχλό.

Ο κεντρικός πείρος συγκρατείται στο κατάλληλο ύψος μέσα στη βάση (9) χάρη στη συνεργασία των σφηνών (8) και της αύλακας που υπάρχει περιμετρικά στον κεντρικό πείρο (6) στην κατάλληλη διατομή (Σχ. 4-17).



Σχήμα 4-17. Η συνεργασία των σφηνών με τη βάση (παρουσιάζεται διαφανής) και τον κεντρικό πείρο.

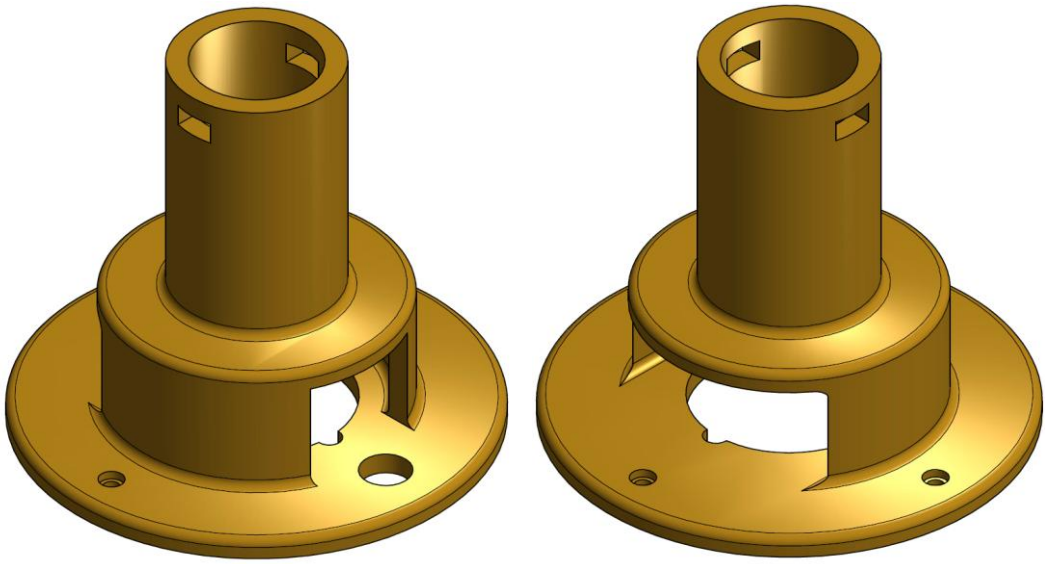
Στο κάτω μέρος του τυμπάνου υπάρχει εσωτερική οδόντωση η οποία συνεργάζεται με οδοντωτό τροχό (10) για τη μετάδοση της κίνησης σε κιβώτιο ταχυτήτων (12) και από εκεί στην ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (13) (Σχ. 4-18).



Σχήμα 4-18. Η συνεργασία του τυμπάνου με τον οδοντωτό τροχό, το κιβώτιο ταχυτήτων και την ηλεκτρική γεννήτρια. Από το σχήμα έχει αφαιρεθεί η βάση για λόγους ευκρίνειας. Ο οδοντωτός τροχός δεν εφάπτεται με την καστάνια.

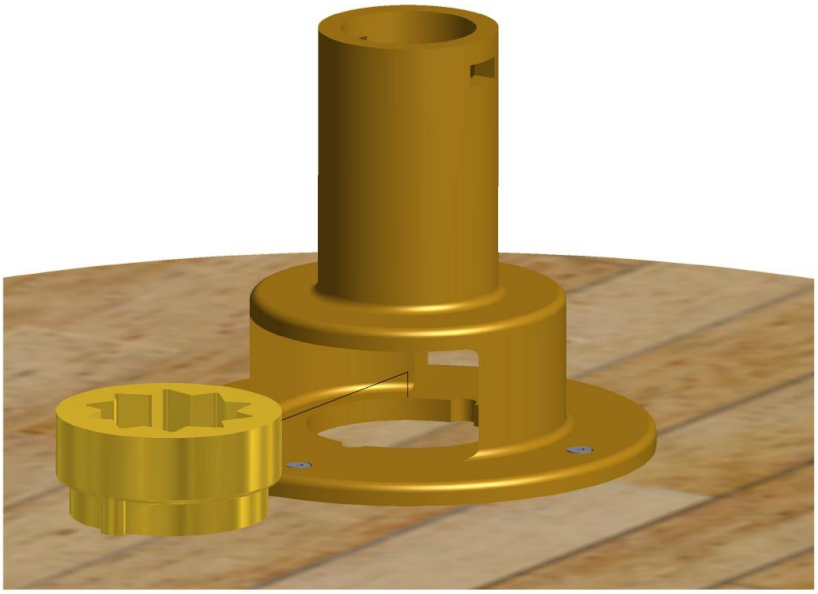
4.4 Μέθοδος Συναρμολόγησης

Η βάση στερεώνεται μέσω κοχλιών σε επίπεδη επιφάνεια. Η βάση διαθέτει δύο ορθογώνια κατακόρυφα ανοίγματα τα οποία χρησιμεύουν κατά τη συναρμολόγηση για την εύκολη εισαγωγή και εξαγωγή της καστάνιας (Σχ. 4-19).



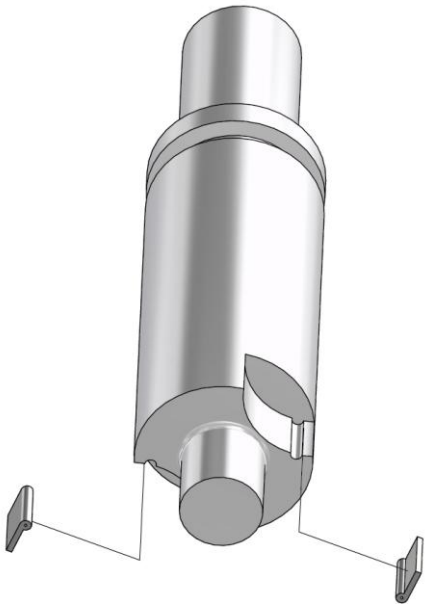
Σχήμα 4-19. Ισομετρικές όψεις της βάσης. Διακρίνονται αριστερά και δεξιά το μικρότερο και το μεγαλύτερο ορθογώνιο κατακόρυφο άνοιγμα αντίστοιχα.

Στη συνέχεια μέσω του μεγαλύτερου κατακόρυφου ορθογώνιου ανοίγματος στη μία πλευρά της βάσης, διέρχεται η καστάνια, η οποία εφαρμόζει και στερεώνεται με το βάρος της στη μεγάλη οπή που υπάρχει στο κέντρο του κάτω μέρους της βάσης. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 4-20.



Σχήμα 4-20. Επισημαίνεται με τη μαύρη λεπτή γραμμή η πορεία τοποθέτησης της καστάνιας στο εσωτερικό της βάσης.

Ακολούθως, προσαρμόζονται στον κεντρικό πείρο τα στελέχη της καστάνιας σύμφωνα με το Σχ. 4-21. Τα στελέχη προσαρμόζονται με μικρά στροφικά ελατήρια στην άτρακτο ώστε να μπορούν να επιτελέσουν τη λειτουργία τους.



Σχήμα 4-21. Προσαρμογή των στελεχών της καστάνιας στον κεντρικό πείρο.

Ο κεντρικός πείρος εισέρχεται κατακόρυφα διαμέσου του κορμού της βάσης με τα στελέχη της καστάνιας προς τα κάτω ώστε να μπορούν να συνεργάζονται με την εσωτερική οδόντωση της καστάνιας και να εμποδίζεται η αποφόρτιση του επανατατικού ελατηρίου.

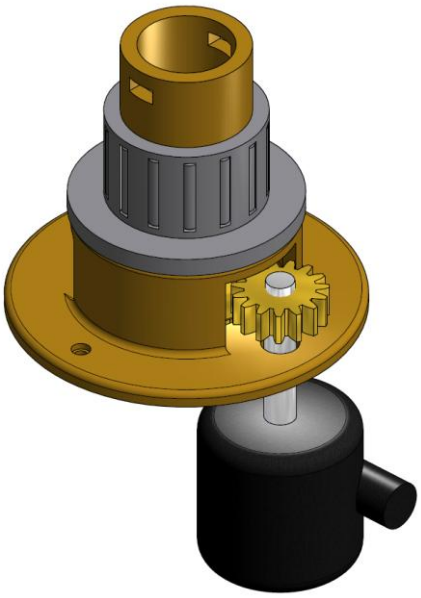
Ο κεντρικός πείρος συγκρατείται στο κατάλληλο ύψος μέσα στον κορμό της βάσης από τις δύο σφήνες οι οποίες περνούν μέσα από τα δύο ανοίγματα στο πάνω μέρος του κορμού της βάσης και συνεργάζονται με την αύλακα που υπάρχει περιμετρικά του κεντρικού πείρου στο πάνω μέρος του τμήματος του κεντρικού πείρου με τη μεγάλη διατομή (Σχ. 4-17).

Έπειτα διαμέσου του κορμού της βάσης από τη εξωτερική μεριά περνά η ροδέλα και τα έδρανα κύλισης (Σχ. 4-12) τα οποία επιτρέπουν τη σχετική περιστροφή του τυμπάνου ως προς το κορμό της βάσης.

Στην οπή της βάσης απέναντι από το μικρότερο κατακόρυφο ορθογώνιο άνοιγμα προσαρμόζεται η άτρακτος του κιβωτίου ταχυτήτων και ο οδοντωτός τροχός (Σχ. 4-22).

Στη συνέχεια το τύμπανο διέρχεται εξωτερικά του κορμού της βάσης με την εσωτερική οδόντωση προς τα κάτω.

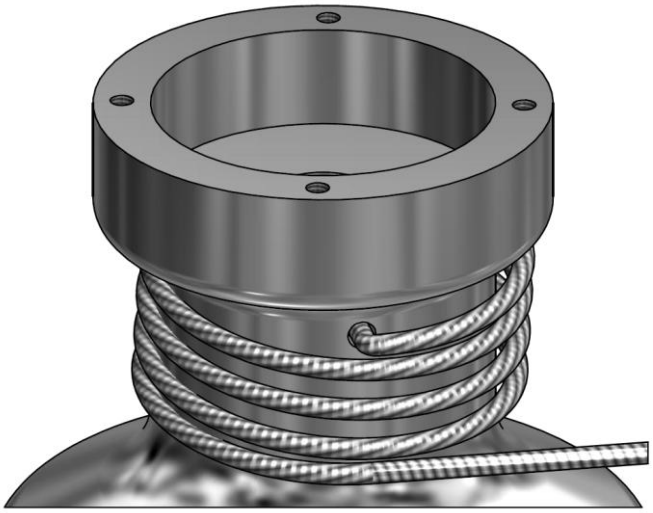
Έπειτα διάμεσου του ανώτερου τμήματος του κεντρικού πείρου διέρχεται το επανατατικό ελατήριο σταθερής ροπής (Σχ. 4-10). Η εξωτερική διατομή του ελατηρίου συνδέεται με το τύμπανο και η εσωτερική με τον κεντρικό πείρο με τη χρήση αύλακας. Το επανατατικό ελατήριο θα πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε περιστρέφοντας τον κεντρικό πείρο - ο κεντρικός πείρος λόγω της καστάνιας έχει μία μόνο φορά περιστροφής - και κρατώντας ακίνητο το τύμπανο, το ελατήριο να συσπειρώνεται.



Σχήμα 4-22. Διακρίνεται η βάση με τοποθετημένο τον οδοντωτό τροχό και το κιβώτιο ταχυτήτων.

Πάνω από το επανατατικό ελατήριο τοποθετείται το πώμα το οποίο συνδέεται με το τύμπανο με τη χρήση κοχλιών.

Κατόπιν η μία άκρη του εύκαμπτου φορέα συνδέεται σταθερά με την οπή που υπάρχει στον κορμό του τυμπάνου και ο εύκαμπτος φορέας τυλίγεται γύρω από το τύμπανο όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4-23. Η φορά περιελίξεως του εύκαμπτου φορέα θα πρέπει να είναι τέτοια ούτως ώστε τραβώντας τον εύκαμπτο φορέα από την ελεύθερη άκρη, το ελατήριο να συσπειρώνεται. Η πρόσδεση του εύκαμπτου φορέα πάνω στο τύμπανο γίνεται πριν ακόμη την τοποθέτηση του τυμπάνου στο υπόλοιπο συναρμολόγημα.



Σχήμα 4-23. Το τύμπανο με τον εύκαμπτο φορέα περιτυλιγμένο και προσαρμοσμένο στην οπή του τυμπάνου.

Τέλος τοποθετείται ο χειρομοχλός στην οπή που υπάρχει στο πάνω μέρος του κεντρικού πείρου σύμφωνα με το Σχ. 4-24.

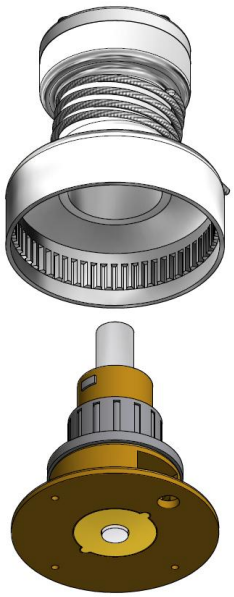
Η διαδικασία της αποσυναρμολόγησης είναι η ακριβώς αντίθετη. Όπως και στα ναυτικά βιντσιρέλο η συναρμολόγηση και η αποσυναρμολόγηση πρέπει να είναι εύκολες διαδικασίες για το χρήστη ο οποίος ανά τακτά χρονικά διαστήματα πρέπει να προβαίνει σε κάποιες βασικές εργασίες συντήρησης του μηχανισμού για την προστασία του από φθορές που προκαλεί το θαλάσσιο περιβάλλον.

Σχήμα 4-24. Χειρομοχλός αποσπασμένος από τον υπόλοιπο μηχανισμό.

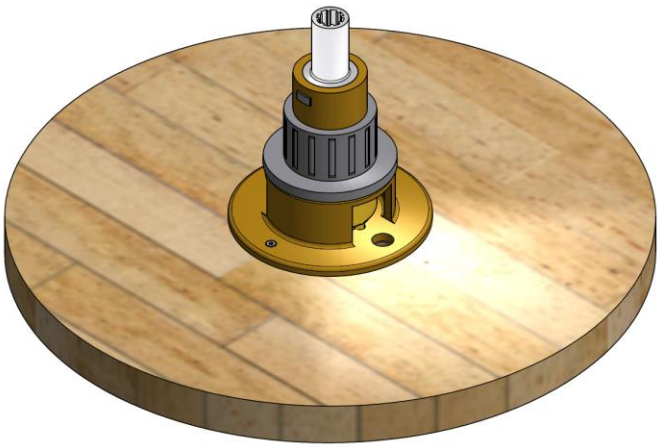
4.5 Μέθοδος Εγκατάστασης

Θεωρείται ότι ήδη διαθέτουμε το κυματικό βιντσιρέλο συναρμολογημένο και πλήρες χωρίς ακόμη να έχει τοποθετηθεί στο κατάστρωμα του σκάφους. Για την εγκατάσταση του ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Αφαιρείται ο χειρομοχλός (Σχ. 4-24).
2. Αφαιρείται από το μηχανισμό το τύμπανο περιέλιξης μαζί με το ελατήριο και το πώμα χωρίς τη μεταξύ τους αποσυναρμολόγηση, απλώς τραβώντας προς τα πάνω το τύμπανο περιέλιξης (Σχ. 4-25).
3. Η βάση (9) προσδένεται με κοχλίες (17) σε επίπεδη επιφάνεια του καταστρώματος (Σχ. 4-26).

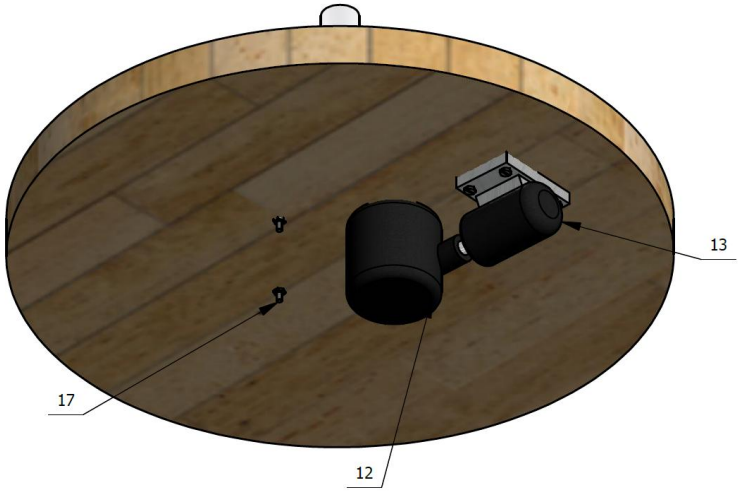


Σχήμα 4-25. Το τύμπανο με το πώμα και το ελατήριο αποσπασμένα από τον υπόλοιπο μηχανισμό.



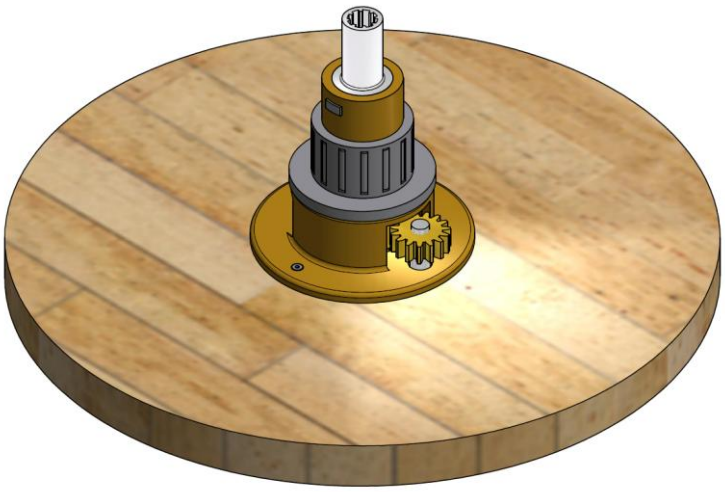
Σχήμα 4-26. Ισομετρική όψη του μηχανισμού μετά την απομάκρυνση και πριν την επανατοποθέτηση του τυμπάνου με το πώμα και το ελατήριο.

4. Το κιβώτιο ταχυτήτων (12) τοποθετείται από την κάτω πλευρά του καταστρώματος και η άτρακτός του διαπερνά την επιφάνεια του καταστρώματος διαμέσου οπής που έχει ανοιχθεί εκ των προτέρων (Σχ. 4-27).
5. Το κιβώτιο ταχυτήτων (12) συνδέεται με την ηλεκτρική γεννήτρια (13) και η ηλεκτρική γεννήτρια (13) συνδέεται με κοχλίες με την κάτω επιφάνεια του καταστρώματος (Σχ. 4-27).



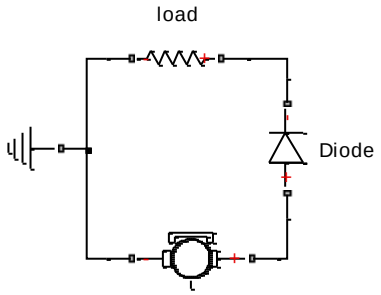
Σχήμα 4-27. Ισομετρική όψη του μηχανισμού, μετά την σύνδεση του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρικής γεννήτριας και πριν τη σύνδεση του οδοντωτού τροχού.

6. Ο οδοντωτός τροχός προσαρμόζεται στην άτρακτο του κιβωτίου ταχυτήτων (Σχ. 4-28).



Σχήμα 4-28. Ισομετρική όψη του μηχανισμού, μετά τη σύνδεση του οδοντωτού τροχού και πριν την επανατοποθέτηση του τυμπάνου με το πώμα και το ελατήριο.

7. Επανατοποθετείται στη θέση του το συναρμολόγημα του τυμπάνου, ελατηρίου και πώματος.
8. Συγκροτείται το ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο συνδέει την ηλεκτρική γεννήτρια με την ηλεκτρική δίοδο, το ηλεκτρικό φορτίο και τη γείωση όπως φαίνεται στο Σχ. 4-29.



Σχήμα 4-29. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του συστήματος

4.6 Μέθοδος Χειρισμού

Παράδειγμα χρήσης του μηχανισμού σε σκάφος με χρήση σκοινιού ως εύκαμπτου φορέα:

1. Το σκάφος δένεται σύμφωνα με τους κανονισμούς κατά τους συμβατικούς τρόπους με τη χρήση αλυσίδων ή σκοινιών παράλληλα με τους εύκαμπτους φορείς του συστήματος των κυματικών βαρούλκων.
2. Επιλέγεται σημείο πρόσδεσης, κινούμενο ή ακίνητο, εκτός σκάφους, στο οποίο συνδέεται από τη μία άκρη ένα πρώτο σκοινί.
3. Η άλλη άκρη του πρώτου σκοινιού συνδέεται με την ελεύθερη άκρη του σκοινιού που είναι τυλιγμένο στο τύμπανο του βαρούλκου. Τα δύο σκοινιά συνδέονται μεταξύ τους με σιαγόνες, αναβατήρα αναρρίχησης ή κατάλληλους κόμβους.
4. Πριν την έναρξη της λειτουργίας κάθε κυματικού βαρούλκου ο χειριστής τοποθετεί το χειρομοχλό στο βαρούλκο και περιστρέφει κατά τη φορά που επισημαίνεται με βέλος στο πώμα (Σχ. 4-7) ώσπου να βεβαιωθεί ότι το σκοινί έχει τεντώσει. Ο χειρομοχλός έχει μία φορά περιστροφής λόγω της καστάνιας. Το βέλος προστίθεται για διευκόλυνση του χρήστη και για την προστασία από λάθος χειρισμούς.
5. Ο χειριστής περιστρέφει λίγες φορές ακόμη ώστε να μην καθίσταται δυνατό το επανατατικό ελατήριο να επανέρχεται στο φυσικό του μήκος κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης του σκάφους και συνεπώς να μη χάνεται η προένταση του σκοινιού σε κάποια χρονικά διαστήματα. Αφαιρώντας το χειρομοχλό λόγω της ύπαρξης της καστάνιας, το επανατατικό ελατήριο δεν αποσυσπειρώνεται. Συνεπώς το επανατατικό ελατήριο μεταφέρει ολόκληρη τη ροπή στο τύμπανο και συσπειρώνεται – αποσυσπειρώνεται μόνο από το τύμπανο κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Ο μηχανισμός επομένως είναι πλέον έτοιμος να λειτουργήσει.

4.7 Περιγραφή της λειτουργίας του μηχανισμού

Σε πρώτη φάση κατά την ανύψωση του μηχανισμού λόγω της ταλάντωσης του σκάφους ο εύκαμπτος φορέας μεταφέρει ροπή στο τύμπανο και στο επανατατικό ελατήριο. Το

τύμπανο μεταδίδει κίνηση και ισχύ στον οδοντωτό τροχό με τον οποίο συνεργάζεται. Η ισχύς από τον οδοντωτό τροχό μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων οδηγείται στην ηλεκτρική γεννήτρια και από εκεί με τη χρήση κατάλληλου ηλεκτρικού κυκλώματος (Σχ. 4-29) τροφοδοτεί με ενέργεια την μπαταρία.

Όταν σε δεύτερη φάση ο μηχανισμός κινείται καθοδικά, το σκοινί πρόκειται να χαλαρώσει όμως το επανατατικό ελατήριο στρέφει αντίστροφα το τύμπανο και δεν επιτρέπει στο σκοινί να χαλαρώσει διατηρώντας πάντα κάποια προένταση. Παράλληλα στρέφεται αντίστροφα ο οδοντωτός τροχός χωρίς όμως τώρα να προσδίδει ενέργεια στην μπαταρία λόγω της παρουσίας της διόδου στο ηλεκτρικό κύκλωμα η οποία δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος κατά την αντίθετη φορά.

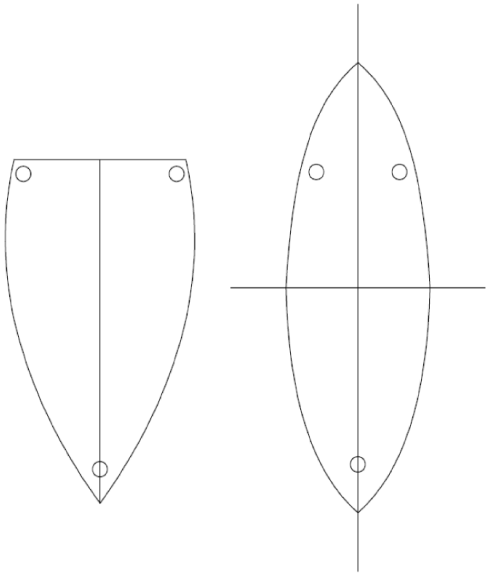
4.8 Ενδιαφέρουσες εφαρμογές

4.8.1 Εγκατάσταση σε σκάφη θαλάσσης

Όπως αναφέρθηκε οι παραπάνω μηχανισμοί μπορούν να εγκαθίσταται σε σκάφη με στόχο τη μετατροπή ποσοστού της μηχανικής ισχύος, που προσδίδουν τα κύματα στο σκάφος, σε ηλεκτρισμό και την απόσβεση των ταλαντώσεων, κατά τη διάρκεια που το σκάφος είναι αγκυροβολημένο με απώτερο σκοπό τη μεγαλύτερη άνεση των επιβατών και την παραγωγή φθηνής και καθαρής ενέργειας.

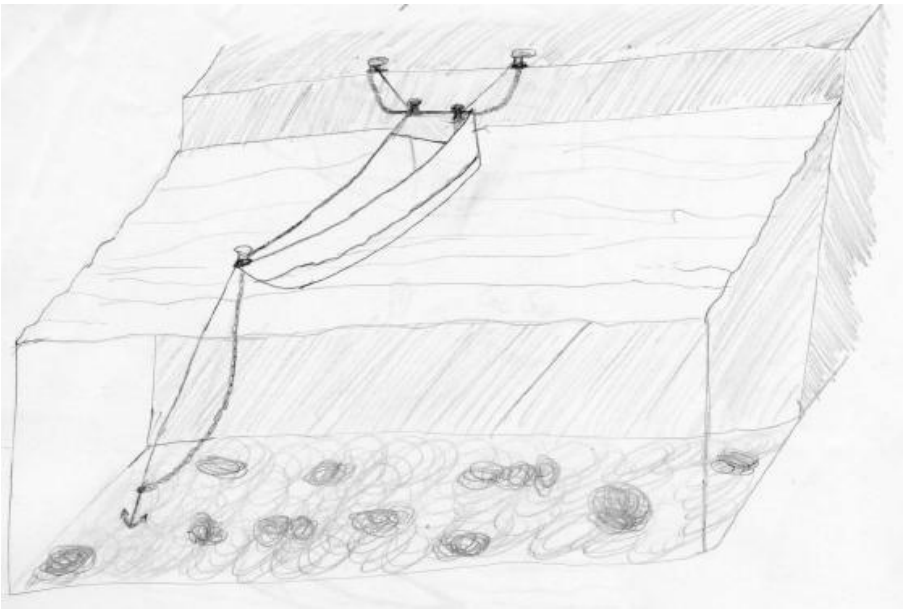
Το σύστημα εγκαθίσταται σε τρία σημείου ενός σκάφους. Ένας μηχανισμός στην πλώρη και δύο στην πρύμνη, κατά τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματίζεται ισοσκελές τρίγωνο με άξονα συμμετρίας τον άξονα συμμετρίας του σκάφους (Σχ. 4-30). Έτσι απορροφάται ενέργεια από την κίνηση του σώματος και με τους 6 βαθμούς ελευθερίας που διαθέτει.

Τα ελατήρια σταθερής ροπής που διαθέτουν τα κυματικά βαρούλκα δέχονται ένα συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών και απαιτείται η παράλληλη χρήση του συστήματος κυματικής ενέργειας με συμβατική πρόσδεση του σκάφους προκειμένου αφενός η θέση και ο προσανατολισμός του σκάφους να διατηρούνται εντός κάποιων ορίων αφετέρου να την καταστραφεί το ελατήριο από την υπερφόρτωση. Συνεπώς σε κάθε περίπτωση το σκάφος δένεται με τους συμβατικούς τρόπους και τα κυματικά βαρούλκα λειτουργούν παράλληλα με τα σκοινιά, τις αλυσίδες και τις άγκυρες του σκάφους. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει οι χρήστες να στηρίζονται στην παρουσία των κυματικών βαρούλκων για την ασφαλή πρόσδεση του σκάφους καθώς κάτι τέτοιο θα προξενούσε βλάβες στο σύστημα των κυματικών βαρούλκων (π.χ. τραυματισμός του ελατηρίου) και θα εγκυμονούσε σοβαρότατους κινδύνους για την ασφάλεια του σκάφους και των επιβατών.



Σχήμα 4-30. Εγκατάσταση των κυματικών βαρούλκων πάνω σε σκάφη δύο διαφορετικών σχημάτων. Με κύκλο σημειώνονται οι θέσεις των κυματικών βαρούλκων.

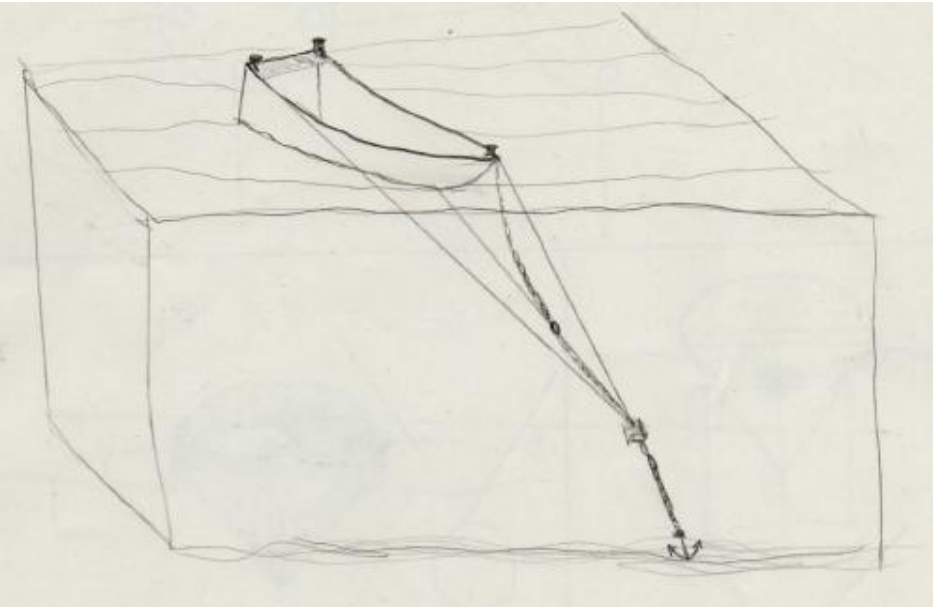
Σε περίπτωση που το σκάφος βρίσκεται σε λιμένα τα δύο κυματικά βαρούλκα της πρύμνης συνδέονται στα δύο σημεία του λιμένα από τα οποία έχει δεθεί το σκάφος και το τρίτο βαρούλκο το οποίο βρίσκεται στην πλώρη συνδέεται απ' ευθείας στην άγκυρα (Σχ. 4-31).



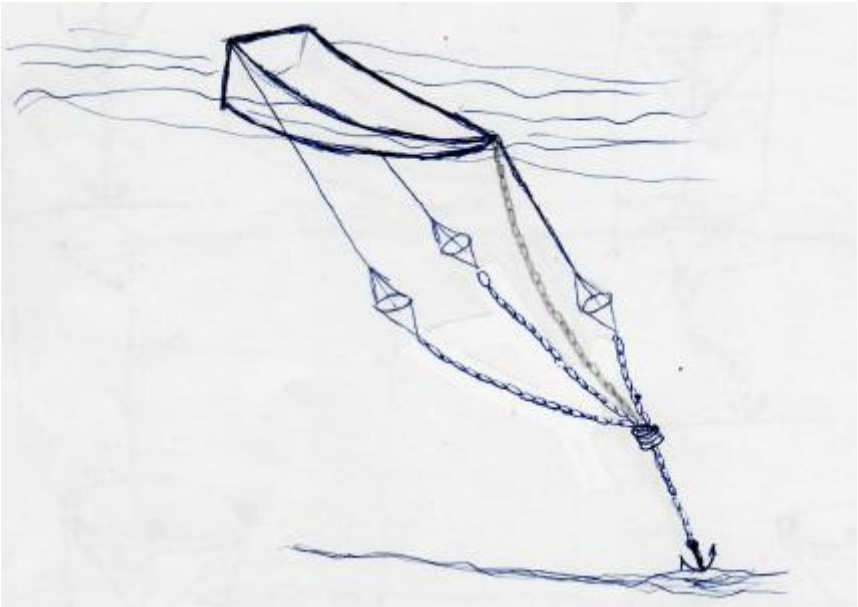
Σχήμα 4-31. Σκάφος με εγκατεστημένα κυματικά βαρούλκα δεμένο σε λιμένα. Διακρίνονται τα σκοινιά με τα οποία δένει στους κάβους, η αλυσίδα της άγκυρας και οι εύκαμπτοι φορείς των κυματικών βαρούλκων.

Σε περίπτωση που το σκάφος βρίσκεται αγκυροβολημένο αρόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο εναλλακτικές:

- οι εύκαμπτοι φορείς των κυματικών βαρούλκων συνδέονται σε στριφτάρι το οποίου υπάρχει σε κάποιο σημείο της αλυσίδας της άγκυρας (Σχ. 4-32).
- ο εύκαμπτος φορέας κάθε κυματικού βαρούλκου συνδέεται με πλωτή άγκυρα η οποία στη συνέχεια συνδέεται σε στριφτάρι το οποίο υπάρχει σε κάποιο σημείο της αλυσίδας της άγκυρας (Σχ. 4-33).



Σχήμα 4-32. Σύνδεση του σκάφους αρόδου με απευθείας σύνδεση των εύκαμπτων φορέων στο στριφτάρι της αλυσίδας της άγκυρας.



Σχήμα 4-33. Σύνδεση του σκάφους αρόδου με σύνδεση των εύκαμπτων φορέων σε πλωτές άγκυρες και σύνδεση των πλωτών αγκυρών στο στριφτάρι της αλυσίδας της σταθερής άγκυρας.

Το στριφτάρι υπάρχει και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις για την αποτροπή του ενδεχόμενου μπλεξίματος των εύκαμπτων φορέων κατά τις τυχαίες περιστροφές του σκάφους από τον κυματισμό.

Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στην μπαταρία του σκάφους και είτε χρησιμοποιείται εξ ολοκλήρου για τις ανάγκες του σκάφους είτε, αν υπάρχει κατάλληλη υποδομή με αναστροφείς (inverters) σε κατάλληλα σχεδιασμένο λιμένα, κατά ένα μέρος διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και πωλείται στο διαχειριστή του δικτύου ή σε εταιρεία παροχής ηλεκτρισμού. Η δυνατότητα πώλησης κυματικής προέλευσης ηλεκτρισμού θα μπορούσε να ενισχύεται κατά τους χειμερινούς μήνες οπότε αφενός τα σκάφη αναψυχής χρησιμοποιούνται ελάχιστα και έχουν ελάχιστες ενεργειακές ανάγκες αφετέρου το κυματικό φαινόμενο είναι εντονότερο. Προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι η ύπαρξη κινήτρων για τους ιδιώτες ώστε να αφήνουν τα σκάφη τους εντός ειδικά σχεδιασμένων και διαμορφωμένων λιμένων κατά τη χειμερινή περίοδο για την παραγωγή ενέργειας. Ενδεχομένως αυτό σημαίνει μεγαλύτερο κόστος συντήρησης του σκάφους, εκτιμάται όμως πως μπορεί να υπολογιστεί οικονομοτεχνικά βέλτιστη λύση, υπό την οποία ο ιδιοκτήτης του σκάφους να επωφελείται οικονομικά.

4.8.2 Εγκατάσταση σε λιμένες και μόλους

Με την ίδια λογική, ο μηχανισμός παραγωγής της ενέργειας αντί να εγκαθίσταται στο σκάφος μπορεί να εγκαθίσταται στο λιμένα και να συνδέεται με τα σκάφη που έρχονται για να δέσουν. Έτσι στην ουσία η επένδυση γίνεται από τον ιδιοκτήτη ή το διαχειριστή του λιμένα ενώ ο ιδιώτης παραχωρεί το σκάφος του για την παραγωγή ενέργειας με αντάλλαγμα κάποια οφέλη.

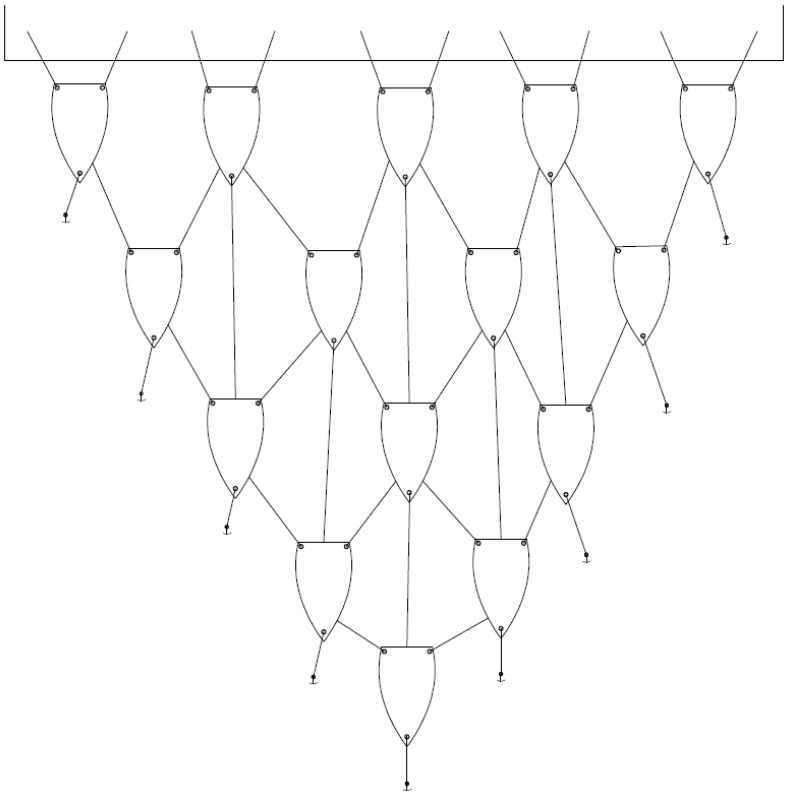
Με την εγκατάσταση τέτοιων μηχανισμών σε λιμάνια, δίνεται η δυνατότητα μεγαλύτερων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας οι οποίες από τη μια απαιτούν μεγαλύτερα κεφάλαια από την άλλη όμως μπορούν να επιτύχουν οικονομίες κλίμακας και να έχουν καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα σε σχέση με την επένδυση που κάνει κάποιος ιδιώτης εξοπλίζοντας το σκάφος του με το εν λόγω σύστημα.

Μια τέτοια δυνατότητα θα μπορούσε να δημιουργήσει νέου τύπου λιμένες οι οποίοι πιθανόν θα ενσωματώνουν και άλλες τεχνολογίες ώστε το κύμα να διατηρείται σε συγκεκριμένα επίπεδα για τη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον λιμένες και μαρίνες περισσότερο εκτεθειμένα στο κύμα ενδεχομένως αποκτήσουν ένα συγκριτικό πλεονέκτημα με το οποίο θα μπορέσουν να γίνουν πιο ανταγωνιστικά.

Δίνεται λοιπόν η δυνατότητα να δημιουργηθούν νέες αγορές προϊόντων και υπηρεσιών στον κλάδο της ναυτιλίας καθώς και αρκετές νέες θέσεις εργασίας.

4.8.3 Διασύνδεση σκαφών μεταξύ τους

Τα σκάφη τα οποία διαθέτουν σύστημα κυματικών βαρούλκων μπορούν να συνδέονται με άλλα σκάφη ή άλλα πλωτά σώματα είτε αυτά διαθέτουν είτε δε διαθέτουν σύστημα κυματικών βαρούλκων. Σε αυτή την περίπτωση ένα ή περισσότερα από κυματικά βαρούλκα του σκάφους συνδέονται με ένα ή περισσότερα σημεία (π.χ. δέστρες) ενός άλλου σκάφους μέσω των εύκαμπτων φορέων τους όπως για παράδειγμα φαίνεται στο Σχ. 4-34.



Σχήμα 4-34. Παράδειγμα διασύνδεσης σκαφών που διαθέτουν τρία κυματικά βαρούλκα. Με έντονες κουκκίδες συμβολίζονται οι θέσεις των κυματικών βαρούλκων.

Σημειώνεται πως η σύνδεση κυματικού βαρούλκου με κυματικό βαρούλκου απευθείας δεν προσφέρει κάποιο πλεονέκτημα λόγω δράσης αντίδρασης και σχετικής κίνησης και γι' αυτό δεν ενδείκνυται. Αντί αυτού προτιμάται η σύνδεση κάθε κυματικού βαρούλκου με ένα σταθερό σημείο του άλλου σκάφους ή του άλλου πλωτού σώματος γενικότερα.

Και σε αυτή την περίπτωση τα σκάφη θα πρέπει παράλληλα να δένονται μεταξύ τους και με τον πυθμένα με σκοινιά και άγκυρες κατά τις συμβατικές μεθόδους και να μην αφήνονται δεμένα μόνο με τα κυματικά βαρούλκα.

5 Ανάλυση του Συστήματος

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η μοντελοποίηση και η προσομοίωση του συστήματος σκάφος – κυματικά βαρούλκα που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.8.1. Γενικεύοντας, αντί για σκάφος, θεωρείται πλωτήρας οποιασδήποτε μορφής, πάνω στον οποίο εγκαθίστανται τρία κυματικά βαρούλκα τα οποία προσδένονται σε τρία ακίνητα σημεία. Στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων για λόγους απλότητας θεωρείται κυλινδρικός πλωτήρας.

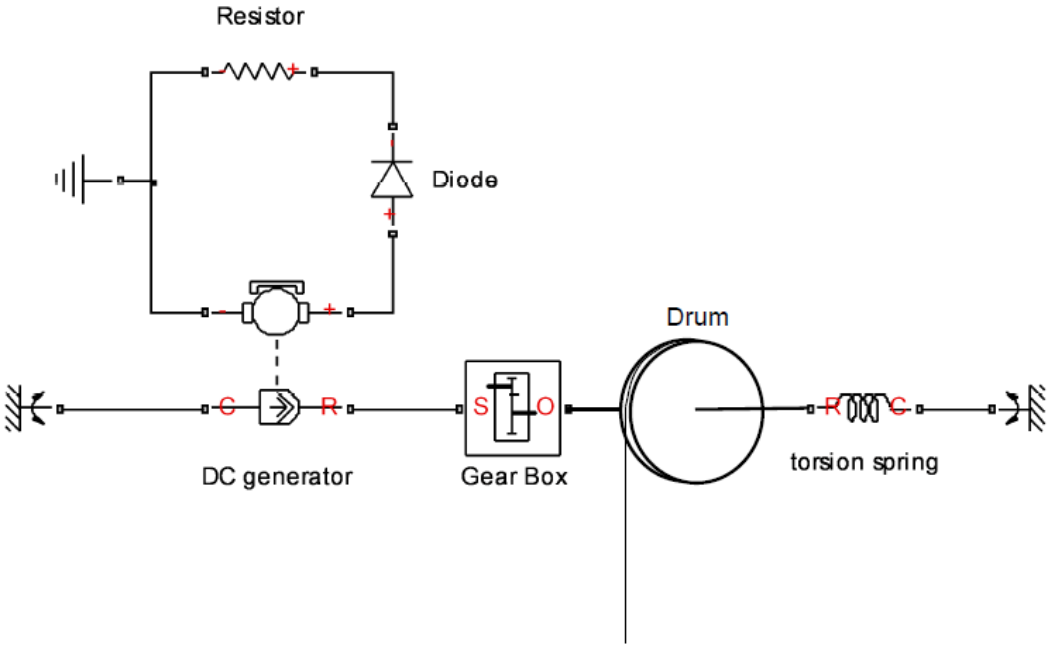
Αρχικά μοντελοποιείται το κυματικό βαρούλκο ανεξάρτητα από τον πλωτήρα στον οποίο εγκαθίσταται, με τη χρήση της μεθόδου των γραμμικών γράφων[13]. Στη συνέχεια αναλύεται η μηχανική ενός οποιουδήποτε πλωτήρα στον τρισδιάστατο χώρο λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις κύματος – στερεού σώματος. Τέλος συνδυάζονται τα δύο επιμέρους μοντέλα σε ένα ενιαίο μοντέλο το οποίο περιγράφει το συνολικό σύστημα πλωτήρα – κυματικών βαρούλκων και επιτυγχάνεται η αριθμητική επίλυση του συζευγμένου συστήματος.

5.1 Μοντελοποίηση συστήματος κυματικού βαρούλκου

Όπως αναφέρθηκε ο μηχανισμός διαθέτει τύμπανο στο οποίο περιελίσσεται ο εύκαμπτος φορέας. Η άτρακτος του τυμπάνου συνδέεται με το στροφικό επανατατικό ελατήριο το οποίο συνδέεται με τη βάση του μηχανισμού. Η άτρακτος του τυμπάνου συνδέεται επιπλέον με κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο πολλαπλασιάζει τη γωνιακή ταχύτητα του τυμπάνου. Η έξοδος του κιβωτίου ταχυτήτων συνδέεται με ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (DC). Η ηλεκτρική γεννήτρια συνδέεται σε σειρά με ηλεκτρική δίοδο. Σε σειρά με τη δίοδο συνδέεται το υποσύστημα φόρτισης μπαταρίας σύμφωνα με την Παράγραφο 4.2.4. Το υποσύστημα αυτό θεωρείται πως δεν έχει επαγωγική ή χωρητική συμπεριφορά και πως λειτουργεί ως καταβόθρα ενέργειας. Λόγω του ότι βασίζεται σε ψηφιακά κυκλώματα, η δυναμική του συμπεριφορά δεν είναι εύκολο να εκφραστεί μέσω κάποια συνάρτησης. Για το λόγο αυτό προσεγγιστικά θεωρείται πως δρα ως ένα τυπικό ωμικό φορτίο (Σχ. 5-1), δεδομένου ότι η απορρόφηση ισχύος από το υποσύστημα φόρτισης δεν είναι σταθερή αλλά είναι ανάλογη με την ισχύ που προσφέρεται σε αυτό από τη γεννήτρια.

Για τη μοντελοποίηση συστημάτων εξυπηρετεί η θεώρησή τους ως ένα σύνολο διακριτών στοιχείων τα οποία περιγράφονται από μία χαρακτηριστική συνάρτηση των συντελεστών ισχύος τους και συνδέονται μεταξύ τους συναλλάσσοντας ενέργεια. Τα στοιχεία θεωρούνται ως σημεία στο χώρο με μεταβλητές και παραμέτρους αντιπροσωπευτικές του συνολικού τους μεγέθους[13]. Με βάση αυτή τη θεώρηση μπορούμε να σχεδιάσουμε μονογραμμικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τα διακριτά αυτά στοιχεία και τις μεταξύ τους σχέσεις. Γνώστες τέτοιες απεικονίσεις είναι οι γράφοι

δεσμών και οι γραμμικοί γράφοι. Στην παρούσα μελέτη υιοθετείται η μέθοδος των γραμμικών γράφων[13].



Σχήμα 5-1. Αφαιρετικό μοντέλο του συστήματος το οποίο απεικονίζει την αρχή λειτουργίας του παρουσιάζοντας μόνο τα μέλη του συστήματος που επηρεάζουν τη δυναμική του συμπεριφορά.

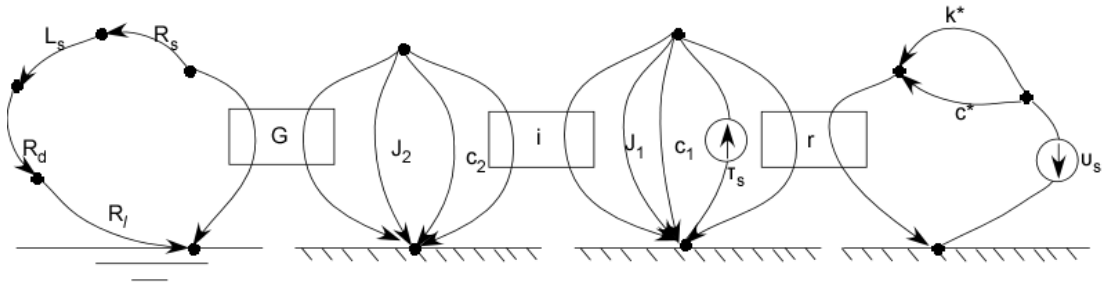
5.1.1 Εύρεση εξισώσεων κατάστασης

Το σύστημα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. Στροφική αδράνεια του τυμπάνου J_1.
2. Μη γραμμικό ελατήριο σταθερής ροπής. Λόγω του ότι παρέχει σταθερή ροπή μοντελοποιείται ως πηγή ροπής τ_s.
3. Αποσβεστήρας c_1 λόγω των εδράνων κύλισης και της ροδέλας στην στροφική άρθρωση που σχηματίζει το τύμπανο με τη βάση.
4. Τύμπανο ακτίνας r που λειτουργεί ως μετασχηματιστής της ευθύγραμμης κίνησης σε περιστροφική.
5. Εύκαμπτος φορέας: Μοντελοποιείται ως μηχανισμός hard stop ο οποίος μεταφέρει δυνάμεις όταν είναι πλήρως επιμηκυμένος ενώ σε αντίθετη περίπτωση αυτό δεν ισχύει. Με αυτή τη λογική ο εύκαμπτος φορέας αντιστοιχεί σε μία μη γραμμική ελαστικότητα k* και μία μη γραμμική απόσβεση c* συνδεδεμένες παράλληλα, οι οποίες είναι μηδενικές όταν ο εύκαμπτος φορέας είναι λυγισμένος και σχεδόν άπειρες όταν ο εύκαμπτος φορέας είναι τεντωμένος.
6. Κιβώτιο ταχυτήτων σχέσης μετάδοσης i.
7. Στροφική αδράνεια J_2 του δρομέα της ηλεκτρικής γεννήτριας.

8. Αποσβεστήρας c_2 λόγω μηχανικών απωλειών στο κιβώτιο ταχυτήτων και στο δρομέα της γεννήτριας. Λόγω της χρήσης του κιβωτίου ταχυτήτων για αύξηση στροφών, απαιτείται προσοχή στην επιλογή της σχέσης μετάδοσης i ώστε να παραμένει η απαιτούμενη ροπή εισόδου σε ασφαλή για την κατασκευή επίπεδα.
9. Γεννήτριας συνεχούς ρεύματος ηλεκτρικής σταθεράς G η οποία μετασχηματίζει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
10. Επαγωγή L_s των τυλιγμάτων της γεννήτριας.
11. Ωμική αντίσταση R_s των τυλιγμάτων της γεννήτριας.
12. Μη γραμμική αντίσταση R_d της ηλεκτρικής διόδου η οποία είναι μηδενική όταν το ρεύμα έχει θετική φορά και άπειρη (πρακτικά πολύ μεγάλη) όταν το ρεύμα έχει αρνητική φορά.
13. Ωμική αντίσταση R_l του ηλεκτρικού φορτίου. Θεωρούμε πως το ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο αποτελείται από ρυθμιστή φόρτισης και μπαταρία συμπεριφέρεται ως ωμική αντίσταση.
14. Πηγή ενέργειας για το σύστημά μας είναι η κίνηση του πλωτού σώματος. Το κύμα, ο πλωτήρας και τα κυματικά βαρούλκα αλληλεπιδρούν δυναμικά μεταξύ τους. Θα θεωρήσουμε πως ο πλωτήρας δρα ως πηγή ταχύτητας υ_s για το κυματικό βαρούλκο. Όπως θα δούμε αργότερα θεωρούμε ταυτόχρονα πως το κυματικό βαρούλκο δρα ως πηγή δύναμης για το σώμα προκειμένου να συμπεριλάβουμε στη μελέτη μας τη δυναμική αυτή αλληλεπίδραση και να έχουμε ακριβέστερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος.

Με βάση τα στοιχεία αυτά και λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένα συγκροτείται ο γραμμικός γράφος του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχ. 5-2.



Σχήμα 5-2. Ο γραμμικός γράφος του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε ισχύει:

$$R_d = \begin{cases} a, i_d \geq 0 \\ +\infty, i_d < 0 \end{cases} \tag{5-1}$$

$$k^*, c^* = \begin{cases} +\infty, \; y_{k^*} > 0 \\ 0, \; y_{k^*} \le 0 \end{cases} \tag{5-2}$$

όπου y_{k*} η διαφορά της απόστασης δύο σημείων του εύκαμπτου φορέα από την απόσταση που έχουν όταν ο εύκαμπτος φορέας είναι τεντωμένος. Θεωρούμε πάντα σημεία τα οποία δεν ανήκουν στο περιτυλιγμένο τμήμα του εύκαμπτου φορέα. Ουσιαστικά το μέγεθος y_{k*} μας δείχνει πόσο έχει χαλαρώσει ο εύκαμπτος φορέας.

Θεωρούμε πως τη χρονική στιγμή μηδέν ο εύκαμπτος φορέας είναι τεντωμένος και συνεπώς $y_{k*}(0)=0$.

Επιλύοντας το γραμμικό γράφο, προκύπτουν οι ακόλουθες καταστατικές εξισώσεις για το σύστημα:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -rk^* & 0 \\ \dfrac{r}{J_{eq}} & -\dfrac{\left(c_1 + i^2 c_2\right) + r^2 c^*}{J_{eq}} & -\dfrac{iG}{J_{eq}} \\ 0 & \dfrac{iG}{L_s} & -\dfrac{R_s + R_d + R_l}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{J_{eq}} & -\dfrac{rc^*}{J_{eq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_s \\ \upsilon_s \end{bmatrix}, \tag{5-3}$$

όπου

$$J_{eq} = J_1 + i^2 \cdot J_2 \tag{5-4}$$

Ακόμη ισχύει:

$$\frac{dy_{k^*}}{dt} = \upsilon_s - \omega_{J_1} r \tag{5-5}$$

Ως δείκτης σε κάθε συντελεστή ισχύος τοποθετείται το σύμβολο του στοιχείου στο οποίο αντιστοιχεί.

Συγκεντρώνοντας τις εξισώσεις προκύπτει:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \\ y_{k^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -rk^* & 0 & 0 \\ \dfrac{r}{J_{eq}} & -\dfrac{\left(c_1 + i^2 c_2\right) + r^2 c^*}{J_{eq}} & -\dfrac{iG}{J_{eq}} & 0 \\ 0 & \dfrac{iG}{L_s} & -\dfrac{R_s + R_d + R_l}{L_s} & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \\ y_{k^*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{J_{eq}} & -\dfrac{rc^*}{J_{eq}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_s \\ \upsilon_s \end{bmatrix} \tag{5-6}$$

Συνοπτικά:

$$\dot{\vec{x}} = \tilde{A}\vec{x} + \tilde{B}\vec{w} \tag{5-7}$$

όπου

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \\ y_{k^*} \end{bmatrix} \tag{5-8}$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & -rk^* & 0 & 0 \\ \dfrac{r}{J_{eq}} & -\dfrac{\left(c_1 + i^2 c_2\right) + r^2 c^*}{J_{eq}} & -\dfrac{iG}{J_{eq}} & 0 \\ 0 & \dfrac{iG}{L_s} & -\dfrac{R_s + R_d + R_l}{L_s} & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-9}$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dfrac{1}{J_{eq}} & -\dfrac{rc^*}{J_{eq}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5-10}$$

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} \tau_s \\ \upsilon_s \end{bmatrix} \tag{5-11}$$

Επιπλέον ισχύει:

$$f_s = f_{k*} - \omega_{J_1} rc^* + \upsilon_s c^* = \begin{bmatrix} 1 & -rc^* & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{k^*} \\ \omega_{J_1} \\ i_{Ls} \\ y_{k^*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & c^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_s \\ \upsilon_s \end{bmatrix} \tag{5-12}$$

Συνοπτικά:

$$f_s = \vec{C}^T \cdot \vec{x} + \vec{D}^T \cdot \vec{w} \tag{5-13}$$

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} 1 & -rc^* & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{5-14}$$

$$\vec{D} = \begin{bmatrix} 0 & c^* \end{bmatrix}^T \tag{5-15}$$

5.1.2 Εύρεση ροπής επαναφοράς ελατηρίου σταθερής ροπής.

Όπως αναφέρθηκε, το ελατήριο οφείλει να επαναφέρει το τύμπανο στη θέση του μέσα σε χρονικό διάστημα μικρότερο ή ίσο με το μισό της περιόδου της ταλάντωσης από το άνω άκρο έως το κάτω, ούτως ώστε ο εύκαμπτος φορέας να μη χαλαρώνει.

Για την εύρεση της απαιτούμενης ροπής κάνουμε χρήση του 2^{ου} νόμου του Νεύτωνα:

$$\tau_s = J_{tot}\frac{d\omega}{dt} + c_{tot}\omega \tag{5-16}$$

Θεωρώντας σταθερή τη ροπή του ελατηρίου προκύπτει:

$$\tau_s \cdot \frac{t^2}{2} = J_{tot}\left[\left(\theta-\theta_0\right)-\omega_0 t\right] + c_{tot}\int\left(\theta-\theta_0\right)dt \tag{5-17}$$

Θεωρείται ω_0=0 εφόσον η φάση της επαναφοράς αρχίζει από την ακραία θέση ταλάντωσης όπου η ταχύτητα μηδενίζεται. Επιπλέον θεωρείται θ_0=0.

Αν θεωρήσουμε απλή αρμονική ταλάντωση με πλάτος ταχύτητας υ_s και συχνότητα ω_f, τότε το πλάτος της ταλάντωσης θα είναι $A=\upsilon_s/\omega_f$.

Συνεπώς σε χρόνο T/2 θα είναι:

$$\theta-\theta_0 = \frac{2\mathrm{A}}{r} = 2\frac{\upsilon_s}{\omega_f \cdot r} = \frac{\upsilon_s T}{\pi} \tag{5-18}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω για t≤T/2:

$$\tau_s \geq \frac{4\upsilon_s}{\pi r_d}\left(\frac{2J_{tot}}{T} + c_{tot}\right) \tag{5-19}$$

Για την ονομαστική ροπή του ελατηρίου θεωρείται συντελεστής ασφάλειας με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η ροπή που προκύπτει από τη Εξ. (5-19).

Παράλληλα η ροπή τ_s δε θα πρέπει να υπερβαίνει ένα όριο πάνω από το οποίο καθίσταται πολύ δύσκολη η περιστροφή του χειρομοχλού. Θεωρώντας πως ένας μέσος άνθρωπος μπορεί χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία να ασκήσει με τεντωμένο το χέρι δύναμη 30N (ή ισοδύναμα να σηκώσει ένα βάρος 3kg) προς όλες τις κατευθύνσεις και πως ένα τυπικό μήκος χειρομοχλού είναι 35cm, καταλήγουμε σε ένα άνω όριο ροπής ελατηρίου στα 10Nm. Συνεπώς:

$$10Nm \geq \tau_s \geq \frac{4\upsilon_s}{\pi r_d}\left(\frac{2J_{tot}}{T} + c_{tot}\right) \tag{5-20}$$

5.1.3 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κατάστασης του κυματικού βαρούλκου

Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων γίνεται χρήση των πακέτων λογισμικού Matlab, Simulink και Simscape. Ο κώδικας σε Matlab παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β.

Για τους μη σταθερούς συντελεστές k* και c* χρησιμοποιήθηκε η εξής σιγμοειδής έκφραση:

$$\begin{aligned} a &= 10^4 \\ k^* &= 10^6\left(\tan\left(a\left(x_{k*}-0.001\right)\right)+1\right)/2 \\ c^* &= 150\left(\tan\left(a\left(x_{k*}-0.001\right)\right)+1\right)/2 \end{aligned} \tag{5-21}$$

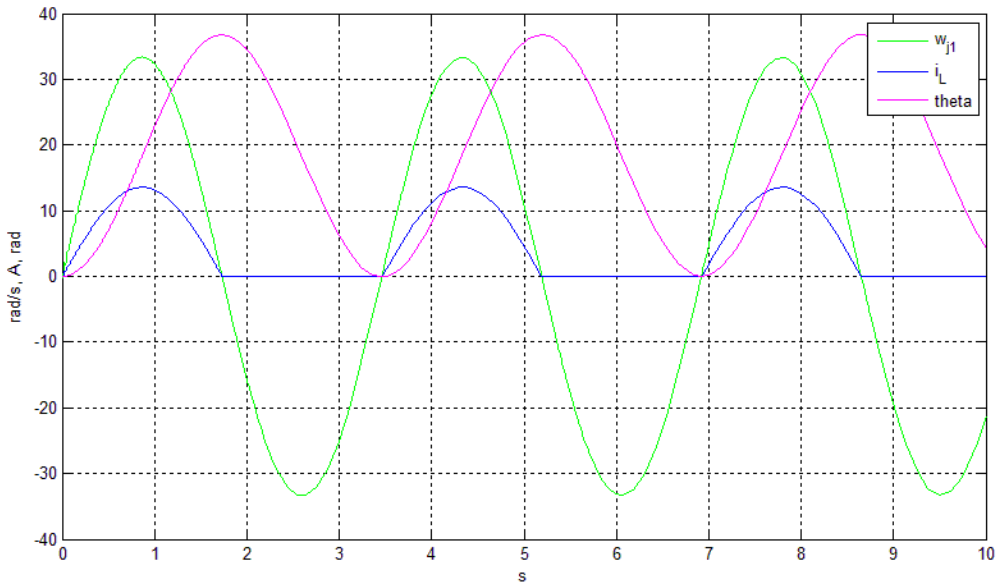
με σκοπό την μείωση της αριθμητικής αστάθειας που εύκολα εμφανίζεται αν οι συντελεστές διατυπωθούν σε δίκλαδη μορφή (βλ Εξ. (5-2).

Για τις υπόλοιπες παραμέτρους θεωρήθηκαν:

- r = 0.06 m
- i=3,
- G=1.4 V/(rad/s),
- c_1=0.001 Nm/(rad/s),
- c_2=0.001 Nm/(rad/s),
- R_s=5 Ohm
- R_l=5 Ohm
- L_s=0.0375 Henry
- J_1=0.001099 kgm^2
- J_2=0.011 kgm^2
- V_b=0.3 V,
- υ_s=2 m/s,
- ω_f=1.816 rad/s
- Συντελεστής ασφάλειας: 2.5
- τ_s=-7.2 Nm

Στο Σχ. 5-3 φαίνεται η απόκριση των μεταβλητών κατάστασης. Το τύμπανο εκτελεί ημιτονοειδή εναλλασσόμενη κίνηση. Το ρεύμα στο κύκλωμα ακολουθεί την ημιτονοειδή απόκριση της γωνιακής ταχύτητας του τυμπάνου όταν αυτή είναι θετική ενώ όταν το τύμπανο στρέφεται κατά την αντίθετη φορά από το ελατήριο τότε η δίοδος δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος κατά την αρνητική φορά οπότε πλέον το ρεύμα μηδενίζεται σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Τα αποτελέσματα επαληθεύουν τις αρχικές υποθέσεις. Η αριθμητική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων καθώς και το μοντέλο στο περιβάλλον του Simscape συγκλίνουν στην ίδιες λύσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως στο Simscape το σύστημα επιλύεται χωρίς τη κατάστρωση εξισώσεων αλλά με ισολογισμούς ενέργειας σε κάθε στοιχείο και έλεγχο της συμβατότητας και συνέχειας του διαγράμματος μέσα από επαναληπτικούς υπολογισμούς σε διακριτά μικρά χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 5-3. Η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

5.2 Μαθηματική μοντελοποίηση αλληλεπίδρασης σώματος – κύματος

5.2.1 Κινηματική ανάλυση του πλωτήρα

Θεωρούμε δύο συστήματα συντεταγμένων: το σύστημα sf:{O,(xyz)} ως αδρανειακό και το σύστημα συντεταγμένων bf:{C,(x΄y΄z΄)} ως σωματόδετο, σύμφωνα με το Σχ. 5-4. Αρχικά θεωρούμε πως το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο που ορίζει η στάθμη του ήρεμου νερού στην ίδια κατακόρυφο με το κέντρο μάζας του πλωτήρα. Οπότε:

$$ {}^{s}x_C^O\left(t=0\right)=0 \tag{5-22}$$

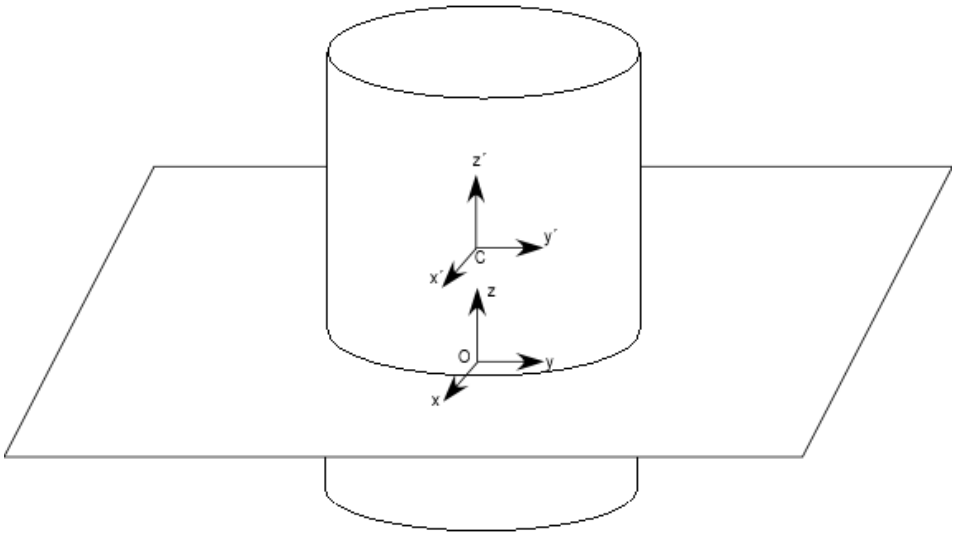
$$ {}^{s}y_C^O\left(t=0\right)=0 \tag{5-23}$$

$$ {}^{s}z_C^O\left(t=0\right)=h_0 \tag{5-24}$$

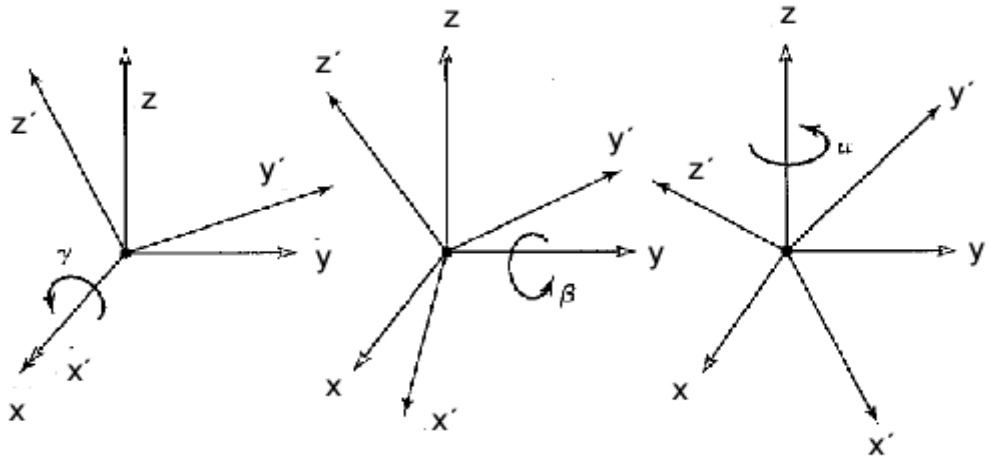
Επιπλέον θεωρούμε τους άξονες των δύο συστημάτων συντεταγμένων αρχικά παράλληλους: $(x,y,z)_{t=0} = (x',y',z')_{t=0}$.

Η κίνηση του πλωτήρα στο χώρο χαρακτηρίζεται από 6 βαθμούς ελευθερίας: 3 μεταφορικούς και 3 στροφικούς:

- ${}^{s}\vec{r}_C^O=\left[{}^{s}x_C^O,\,{}^{s}y_C^O,\,{}^{s}z_C^O\right]^{\mathrm{T}}$ είναι οι τρεις μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας του κέντρου μάζας ως προς το σημείο αναφοράς του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων εκφρασμένες στο αδρανειακό σύστημα αξόνων και
- $\vec{\theta}=\left[\hat{\gamma},\hat{\beta},\hat{\alpha}\right]^{\mathrm{T}}$ είναι οι τρεις γωνίες Euler ως προς το αδρανειακό σύστημα αξόνων σύμφωνα με το Σχ. 5-5.



Σχήμα 5-4. Κυλινδρικός πλωτήρας και συστήματα συντεταγμένων.



Σχήμα 5-5. Περιστροφή του σωματόδετου συστήματος αξόνων κατά τις γωνίες Euler.

Με βάση αυτές τις γωνίες Euler για το μητρώο περιστροφής ισχύει:

$$\tilde{R}^{s}_{b,xyz}(\gamma,\beta,\alpha)=\begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}, \qquad (5\text{-}25)$$

όπου ca: cos(α) και sα: sin(α).

Εφ' όσον έχουμε μόνο δύο συστήματα αξόνων μπορούμε να παραλείπουμε τους δείκτες s, b στα δεξιά του R, για λόγους συντομίας.

Για την περιγραφή της θέσης οποιουδήποτε σημείου ισχύει:

$${}^{s}\vec{r}^{\,0}_{C} + {}^{s}\vec{r}^{\,C}_{q} = {}^{s}\vec{r}^{\,0}_{q} \qquad (5\text{-}26)$$

$${}^{s}\vec{r}^{\,O}_{C} = \tilde{R}^{s}_{b} \cdot {}^{b}\vec{r}^{\,O}_{C} \qquad (5\text{-}27)$$

Ορίζουμε ως βαθμούς ελευθερίας του σώματος:

$$\vec{\xi} = \left[{}^{s}\vec{r}_C^{\,O}, \vec{\theta} \right]^{\mathrm{T}} = \left[{}^{s}x_C^O, {}^{s}y_C^O, {}^{s}z_C^O, \hat{\gamma}, \hat{\beta}, \hat{\alpha} \right]^{\mathrm{T}} \tag{5-28}$$

Για την ταχύτητα του κέντρου βάρους ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{v}_C^{\,O} = {}^{s}\dot{\vec{r}}_C^{\,O} = \left[{}^{s}\dot{x}_C^O, {}^{s}\dot{y}_C^O, {}^{s}\dot{z}_C^O \right]^T \tag{5-29}$$

Για τη γωνιακή ταχύτητα του σώματος ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{\omega} = \tilde{E}\left(\vec{\theta}\right) \cdot \dot{\vec{\theta}} = \left[{}^{s}\omega_x, {}^{s}\omega_y, {}^{s}\omega_z \right]^{\mathrm{T}} \tag{5-30}$$

όπου

$$\tilde{E}\left(\vec{\theta}\right) = \begin{bmatrix} cac\beta & -sa & 0 \\ sac\beta & ca & 0 \\ -s\beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5-31}$$

και

$$\dot{\vec{\theta}} = \left[\dot{\gamma}, \dot{\beta}, \dot{\alpha} \right]^{\mathrm{T}} \tag{5-32}$$

Επιπλέον ορίζουμε το διάνυσμα των γενικευμένων ταχυτήτων:

$$\vec{q} = \left[{}^{s}\vec{v}_C^{\,O}, {}^{s}\vec{\omega} \right]^{\mathrm{T}} \tag{5-33}$$

5.2.2 Δυναμική ανάλυση του πλωτήρα

Σύμφωνα με τους νόμους Newton και Euler εκφρασμένους στο αδρανειακό σύστημα αξόνων ισχύει:

$$ {}^{s}\Sigma\vec{F}^C = m \cdot {}^{s}\vec{a}_C^{\,O} = m \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_C^{\,O} \tag{5-34}$$

$$ {}^{s}\Sigma\vec{M}^C = {}^{s}\tilde{I}^C \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}} + {}^{s}\vec{\omega} \times \left({}^{s}\tilde{I}^C \cdot {}^{s}\vec{\omega} \right) \tag{5-35}$$

Αναλύουμε τη συνισταμένη δύναμη και ροπή στις συνιστώσες τους:

$$\Sigma\vec{F}^C = \vec{F}_h^C + \vec{W} + \vec{F}_{stm}^C \tag{5-36}$$

$$\Sigma\vec{M}^C = \vec{M}_h^C + \vec{M}_{stm}^C \tag{5-37}$$

όπου $\vec{F}_h^C$, $\vec{M}_h^C$ είναι η υδροδυναμική δύναμη και ροπή στο κέντρο μάζας C του πλωτήρα εξαιτίας της επαφής του σώματος με το νερό, $\vec{W}^C = -m\vec{g}$ είναι το βάρος του πλωτήρα το οποίο θεωρείται πάντα πως ασκείται στο κέντρο μάζας C και γι' αυτό δεν παράγει ροπή ως προς το κέντρο μάζας και $\vec{F}_{stm}^C$, $\vec{M}_{stm}^C$ είναι η δύναμη και η ροπή που ασκεί στον πλωτήρα το σύστημα απορρόφησης ενέργειας και οποιοδήποτε άλλο σύστημα επηρεάζει την κίνηση του πλωτήρα.

Από το νόμο δράσης αντίδρασης προκύπτει πως η δύναμη που ασκείται από το υγρό στο σώμα ισούται με τη δύναμη που ασκείται από το σώμα στο υγρό αλλά με αντίθετη φορά:

$$\vec{F}_h^C = -\vec{F}_C^h \tag{5-38}$$

Με βάση αυτό μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις της δυναμικής για το ρευστό όγκου V και επιφάνειας S το οποίο αλληλεπιδρά με το σώμα:

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho_h \cdot {}^s\vec{u}^O dV = {}^s\vec{F}_C^h + {}^s\vec{W}^h + {}^s\vec{F}_S^h = -{}^s\vec{F}_h^C + {}^s\vec{W}^h + {}^s\vec{F}_S^h \tag{5-39}$$

όπου $\int_V \rho_h \cdot {}^s\vec{u}^O dV$ είναι η ορμή της μάζας του νερού και ${}^s\vec{u}^O$ είναι η ταχύτητα ενός υλικού σημείου του ρευστού ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Στο εξής θα συμβολίζεται ως $\vec{u}$.

Ακόμα έχουμε τη δύναμη της βαρύτητας στο νερό:

$${}^s\vec{W}^h = \int_V \rho_h \vec{g} dV \tag{5-40}$$

και την επιφανειακή δύναμη που ασκείται στο νερό από την επιφάνεια του όγκου ελέγχου ο οποίος το περικλείει:

$${}^s\vec{F}_S^h = \int_S \tilde{t}_S \cdot {}^s\vec{n}_S^- dS \tag{5-41}$$

όπου ${}^s\vec{n}_S^-$ είναι το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα με φορά προς το εσωτερικό του ρευστού.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως και η δύναμη που ασκείται από το σώμα στο νερό είναι και αυτή επιφανειακή δύναμη και περιγράφεται με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή:

$${}^s\vec{F}_C^h = \int_S \tilde{t}_b \cdot {}^s\vec{n}_S^- dS \tag{5-42}$$

5.2.3 Εξισώσεις μηχανικής ρευστών

5.2.3.1 Αρχή διατήρησης της μάζας

Η αρχή διατήρησης της μάζας διατυπώνεται ως εξής :

$$\frac{d}{dt}\int_V m_h dV = 0 \tag{5-43}$$

Μέσω της χρήση του θεωρήματος μεταφοράς (transport theorem) και του θεωρήματος Gauss προκύπτει:

$$\frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla\left(\rho_h \vec{u}\right) = 0 \tag{5-44}$$

Παραδοχή: Το νερό συμπεριφέρεται ως ασυμπίεστο ρευστό. Συνεπώς η αρχή διατήρησης της μάζας γράφεται:

$$\nabla \vec{u} = 0 \tag{5-45}$$

5.2.3.2 Νόμος μεταβολής της ορμής

Με βάση το θεώρημα της μεταφοράς ισχύει:

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho_h \vec{u} dV = \int_V \frac{\partial\left(\rho_h \vec{u}\right)}{\partial t} dV + \int_S \rho_h \vec{u}\left(\vec{u} \cdot {}^s\vec{n}_S^-\right) dS \tag{5-46}$$

και συνεπώς ο νόμος μεταβολής της ορμής με βάση την Εξ. ((5-39) γράφεται:

$$\int_V \frac{\partial\left(\rho_h \vec{u}\right)}{\partial t} dV + \int_S \rho_h \vec{u}\left(\vec{u} \cdot {}^s\vec{n}_S^-\right) dS = \int_V \rho_h \vec{g} dV + \int_S \tilde{t}_S \cdot {}^s\vec{n}_S^- dS - \vec{F}_h^C \tag{5-47}$$

Με βάση το θεώρημα Gauss και την Εξ. ((5-45) που ισχύει για ασυμπίεστο ρευστό προκύπτει:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u}\nabla\right)\vec{u} = \vec{g} - \frac{1}{\rho_h}\nabla \tilde{t} \tag{5-48}$$

Ο πίνακας $\tilde{t}$ αντιστοιχεί στον τανυστή των τάσεων οι οποίες δημιουργούνται ανάμεσα στα στοιχεία του ρευστού σε κάθε θέση και χρονική στιγμή.

Παραδοχή: Θεωρούμε πως το νερό αποτελεί νευτώνειο ρευστό. Για τα νευτώνεια ρευστά ισχύει:

$$\tilde{t} = p\tilde{I} - \tilde{\tau} \tag{5-49}$$

όπου p είναι οι ορθές τάσεις λόγω της στατικής πίεσης και $\tilde{\tau}$ είναι οι διατμητικές τάσεις λόγω συνεκτικότητας (μ) του ρευστού.

Με βάση αυτή τη σχέση καταλήγουμε στις εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u}\nabla\right)\vec{u} = \vec{g} - \frac{1}{\rho_h}\nabla p + \frac{\mu}{\rho_h}\nabla^2 \vec{u} \tag{5-50}$$

5.2.4 Εξισώσεις υδάτινων αρμονικών κυμάτων

Για τον περαιτέρω υπολογισμό των εξισώσεων των κυμάτων θα κάνουμε ορισμένες ακόμα παραδοχές:

Μη συνεκτικό ρευστό. Η συνεκτικότητα του ρευστού θεωρείται σημαντική σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του στερεού με το οποίο έρχεται σε επαφή. Το στρώμα αυτό ονομάζεται οριακό στρώμα. Έξω από το οριακό στρώμα η επίδραση της συνεκτικότητα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και το ρευστό με καλή προσέγγιση μη συνεκτικό. Συνεπώς θεωρούμε $\tilde{\tau} = \tilde{0}$.

Αστρόβιλο πεδίο ροής. Εφόσον το ρευστό θεωρείται μη συνεκτικό δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις και δεν είναι εφικτό να μεταβληθεί η στροβιλότητά του κατά την εξέλιξη του φαινομένου. Έτσι αν υποθέσουμε αρχικά αστρόβιλο πεδίο ροής με βάση την παραπάνω παραδοχή το πεδίο θα εξακολουθεί να παραμένει αστρόβιλο. Για ένα αστρόβιλο πεδίο ροής ισχύει:

$$\vec{u} = \nabla \phi \tag{5-51}$$

όπου φ(x,y,z,t) είναι το δυναμικό της ταχύτητας. Επειδή το ρευστό θεωρείται και ασυμπίεστο θα είναι:

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{5-52}$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω παραδοχές στις εξισώσεις Navier Stokes προκύπτει η εξίσωση Bernoulli για μη μόνιμη ροή ως εξής:

$$\rho_h \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho_h \frac{u^2}{2} + p + \rho_h g z = C(t) \tag{5-53}$$

όπου C(t) σταθερά ως προς το χώρο, η τιμή της οποίας δεν επηρεάζει το διάνυσμα της ταχύτητας και μπορεί να τεθεί ίση με την ατμοσφαιρική πίεση p_a.

5.2.4.1 Οριακές συνθήκες

i. Διεπιφάνεια υγρού – στερεού

Κριτήριο μη εισχώρησης: Σε κάθε σημείο της επιφάνειας επαφής του σώματος με το νερό, η ταχύτητα του ρευστού κατά την κάθετη στην επιφάνεια του σώματος διεύθυνση πρέπει να ισούται με την ταχύτητα του αντίστοιχου σημείου του σώματος κατά την ίδια διεύθυνση:

$$\vec{u}\Big|_{Sw} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} = {}^{s}\vec{v}_{q,Sw}^{O} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} \tag{5-54}$$

Ο δείκτης Sw συμβολίζει την υγρή επιφάνεια του σώματος και το μέγεθος ${}^{s}\vec{v}_{q,Sw}^{O}$ αντιστοιχεί στην ταχύτητα ενός σημείου q της υγρής επιφάνειας του σώματος ως προς το σημείο αναφοράς O, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς s.

Η προηγούμενη συνθήκη επιτρέπει στα στοιχεία του ρευστού να έχουν εφαπτομενική ταχύτητα ως προς το σώμα, πράγμα το οποίο δε θα ίσχυε αν θεωρούσαμε συνεκτικό ρευστό. Καθώς το πεδίο ροής είναι αστρόβιλο προκύπτει:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}\Big|_{Sw} = {}^{s}\vec{v}_{q,Sw}^{O} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} \tag{5-55}$$

Έτσι για ακίνητα σώματα θα είναι

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}\Big|_{Sw} = 0 \tag{5-56}$$

ενώ για πλωτά σώματα θα ισχύει:

$$\left.\frac{\partial\phi}{\partial n}\right|_{Sw} = \left({}^{s}\vec{v}_C^{O} + {}^{s}\vec{\omega}\times {}^{s}\vec{r}_q^{C}\right)\cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} = {}^{s}\vec{v}_C^{O}\cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} + {}^{s}\vec{\omega}\cdot\left({}^{s}\vec{r}_q^{C}\times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-}\right) \tag{5-57}$$

Με βάση τη Εξ. (5-57) μπορεί να θεωρηθεί πως:

$$\phi = \vec{\varphi}_t\cdot {}^{s}\vec{v}_C^{O} + \vec{\varphi}_r\cdot {}^{s}\vec{\omega} \tag{5-58}$$

όπου $\vec{\varphi}_t = \left[\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\right]^{\mathrm{T}}$, $\vec{\varphi}_r = \left[\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6\right]^{\mathrm{T}}$.

Είναι εμφανές πως τα $\vec{\varphi}_t$ και $\vec{\varphi}_r$ δεν αποτελούν αδιάστατες παραμέτρους αλλά έχουν διαστάσεις διαφορετικές μεταξύ τους (m και m^2/rad αντίστοιχα). Στην ουσία τα φ_i αποτελούν το δυναμικό της ταχύτητας του ρευστού που προκύπτει για κίνηση του στερεού με το βαθμό ελευθερίας *i*, και κάθε ένα ξεχωριστά πρέπει να ικανοποιεί τις εξισώσεις του κύματος όπως διατυπώνονται στη συνέχεια.

ii. Διεπιφάνεια υγρού – αέρα

Κινηματική συνθήκη: Έστω z=η(x,y,t) η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας. Η κατακόρυφη ταχύτητα κάθε στοιχείου ρευστού της ελεύθερης επιφάνειας πρέπει να ισούται με την ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας στο αντίστοιχο σημείο για κάθε χρονική στιγμή.

$$\left.\vec{u}_z\right|_{z=\eta} = \left.\frac{\partial\phi}{\partial z}\right|_{z=\eta} = \frac{\partial\eta}{\partial t} \tag{5-59}$$

Δυναμική συνθήκη: Η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική: $\left.p\right|_{z=\eta} = p_a$. Λόγω εξίσωσης Bernoulli για z=η και αμελώντας διαφορικά 2^{ης} τάξης προκύπτει:

$$\eta = -\frac{1}{g}\left.\frac{\partial\phi}{\partial t}\right|_{z=\eta} \tag{5-60}$$

Για να συνδυάσουμε τις δύο παραπάνω οριακές συνθήκες παραγωγίζουμε την Εξ. ((5-60) ως προς t και αντικαθιστούμε την κινηματική συνθήκη, οπότε προκύπτει:

$$\left.\frac{\partial\phi}{\partial z}\right|_{z=\eta} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right|_{z=\eta} = 0 \tag{5-61}$$

Αναπτύσσοντας κατά Taylor τους όρους $\left.\frac{\partial\phi}{\partial t}\right|_{z=\eta}$ και $\left.\frac{\partial\phi}{\partial t}\right|_{z=\eta}$ γύρω από το z=0 και αμελώντας διαφορικά ανώτερης τάξης προκύπτει η γραμμικοποιημένη οριακή συνθήκη, για κύματα μικρού σχετικά ύψους:

$$\left.\frac{\partial\phi}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right|_{z=0} = 0 \tag{5-62}$$

Θεωρώντας λοιπόν ασυμπίεστο, μη συνεκτικό ρευστό, αστρόβιλη μη μόνιμη ροή και αρμονικά επιφανειακά κύματα μικρού σχετικά πλάτους, οι γενικές εξισώσεις της ρευστομηχανικής απλοποιούνται στο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων (5-63:

$$\left.\begin{aligned} \nabla^2\phi &= 0 \\ \left.\frac{\partial\phi}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right|_{z=0} &= 0 \\ \left.\frac{\partial\phi}{\partial n}\right|_{Sw} &= {}^s\vec{v}^{\,O}_{q,Sw}\cdot{}^s\vec{n}^{-}_{Sw} \end{aligned}\right\} \tag{5-63}$$

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (5-63 για την περίπτωση ήρεμης επιφάνειας στην οποία αρχίζει να κινείται σώμα με το βαθμό ελευθερίας *i* οι παραπάνω σχέσεις μετατρέπονται στις εξής:

$$\left.\begin{aligned} \nabla^2\varphi_i &= 0 \\ \left.\frac{\partial\varphi_i}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\varphi_i}{\partial t^2}\right|_{z=0} &= 0 \\ \left.\frac{\partial\varphi_i}{\partial n}\right|_{Sw} &= {}^s\vec{n}^{-}_{Sw} \end{aligned}\right\} \tag{5-64}$$

Στην περίπτωση που η κυματίζουσα επιφάνεια αλληλεπιδρά με ακίνητο σώμα οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται στις:

$$\left.\begin{aligned} \nabla^2\phi_0 &= 0 \\ \nabla^2\phi_d &= 0 \\ \left.\frac{\partial\phi_0}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\phi_0}{\partial t^2}\right|_{z=0} &= 0 \\ \left.\frac{\partial\phi_d}{\partial z}\right|_{z=0} + \frac{1}{g}\left.\frac{\partial^2\phi_d}{\partial t^2}\right|_{z=0} &= 0 \\ \left.\frac{\partial\phi_0}{\partial n}\right|_{Sw} &= -\left.\frac{\partial\phi_d}{\partial n}\right|_{Sw} \end{aligned}\right\} \tag{5-65}$$

όπου φ_0 είναι το δυναμικό του προσπίπτοντος κύματος και φ_d είναι το δυναμικό του διαθλώμενου κύματος από το ακίνητο σώμα.

Στην περίπτωση που έχουμε συνδυασμό των ανωτέρω, δηλαδή κύμα που διεγείρει σε κίνηση στερεό σώμα, θεωρούμε επαλληλία των δύο φαινομένων συνεπώς:

$$\phi_{tot} = \vec{\varphi}_t\cdot{}^s\vec{v}^{\,O}_C + \vec{\varphi}_r\cdot{}^s\vec{\omega} + \phi_0 + \phi_d \tag{5-66}$$

5.2.5 Υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές

Όπως ήδη διατυπώθηκε η πίεση και οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στο σώμα από το ρευστό αντιστοιχούν σε μία συνισταμένη δύναμη και μία συνισταμένη ροπή.

Συγκεκριμένα:

$$ {}^{s}\vec{F}_{h}^{C} = -{}^{s}\vec{F}_{C}^{h} = -\int_{Sw} \tilde{t}_{b} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-} dS = \int_{Sw} \tilde{t}_{b} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS \tag{5-67} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{h}^{C} = \int_{Sw} {}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} \times \left(\tilde{t}_{b} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS \tag{5-68} $$

όπου ${}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-}$ είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια επαφής αλλά με φορά προς τα έξω, δηλαδή από την επιφάνεια του σώματος προς το ρευστό, ${}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+}$ είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια επαφής αλλά με φορά προς τα μέσα, δηλαδή από την επιφάνεια του σώματος προς το εσωτερικό του σώματος και ${}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C}$ είναι η θέση ενός σημείου της υγρής επιφάνειας του σώματος ως προς το κέντρο μάζας εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

Θεωρώντας γνωστή τη γεωμετρία του πλωτήρα είναι γνωστά τα διανύσματα: ${}^{b}\vec{r}_{q,Sw}^{C}$ και ${}^{b}\vec{n}_{Sw}^{+}$. Παράλληλα ισχύουν οι σχέσεις : ${}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} = \tilde{R}_{b}^{s} \cdot {}^{b}\vec{r}_{q,Sw}^{C}$ και ${}^{s}\vec{n}_{Sw} = \tilde{R}_{b}^{s} \cdot {}^{b}\vec{n}_{Sw}$, όπου $\tilde{R}_{s}^{b}$ το μητρώο στροφής όπως ορίστηκε ήδη.

Δεδομένου ότι το νερό θεωρείται νευτώνειο ρευστό προκύπτει από την Εξ. ((5-49):

$$ {}^{s}\vec{F}_{h}^{C} = \int_{Sw} p \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS - \int_{Sw} \tilde{\tau} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS = {}^{s}\vec{\Sigma}^{C} + {}^{s}\vec{F}_{v}^{C} \tag{5-69} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{h}^{C} = \int_{Sw} {}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} \times \left(p \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS - \int_{Sw} {}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} \times \left(\tilde{\tau} \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS = {}^{s}\vec{M}_{\Sigma} + {}^{s}\vec{M}_{v} \tag{5-70} $$

όπου ${}^{s}\vec{\Sigma}^{C}$, ${}^{s}\vec{M}_{\Sigma}$ είναι η δύναμη και η ροπή που προέρχονται από την κατανομή της στατικής πίεσης στην επιφάνεια του σώματος και ${}^{s}\vec{F}_{v}^{C}$, ${}^{s}\vec{M}_{v}$ είναι η δύναμη και η ροπή που προέρχονται από την κατανομή των διατμητικών τάσεων ($\tilde{\tau}$) στην επιφάνεια του σώματος.

5.2.5.1 Δυνάμεις και ροπές μη συνεκτικού ρευστού

Όπως είδαμε ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{\Sigma}^{C} = \int_{Sw} p \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS \tag{5-71} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{\Sigma}^{C} = \int_{Sw} p \left({}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS \tag{5-72} $$

Αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές προέρχονται από την ολική πίεση του ρευστού και είναι ανεξάρτητες από τη συνεκτικότητά του. Συνεπώς υφίστανται και για μη συνεκτικό ρευστό. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Bernoulli για μη συνεκτικό, ασυμπίεστο ρευστό και αστρόβιλο, μη μόνιμο πεδίο ταχυτήτων και αντικαθιστώντας στην Εξ. ((5-71), προκύπτει:

$$ {}^{s}\vec{\Sigma}^{C} = \int_{Sw} p_a \cdot {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS - \int_{Sw} \rho_h \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} \right) {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS - \int_{Sw} \rho_h g z \cdot {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS = {}^{s}\vec{F}^{C}_{w} + {}^{s}\vec{F}^{C}_{CB} \quad (5\text{-}73) $$

Στον πρώτο όρο, $\int_{Sw} p_a \, {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS$, πρόκειται να προστεθεί και η ατμοσφαιρική πίεση που ασκείται στη μη βρεχόμενη επιφάνεια του πλωτήρα οπότε κατά την άθροισή τους οι δύο όροι θα απαλειφούν:

$$ \int_{Sair} p_a \, {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sair} dS + \int_{Sw} p_a \, {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS = p_a \int_{Stot} {}^{s}\vec{n}^{+}_{S} dS = \vec{0} \quad (5\text{-}74) $$

Ο δεύτερος όρος, ${}^{s}\vec{F}^{C}_{w} = -\int_{Sw} \rho_h \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} \right) {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS$, αποτελεί τη δύναμη που ασκείται στο σώμα από το ίδιο το κύμα ${}^{s}\vec{F}^{C}_{w}$, δηλαδή μέσω της δυναμικής πίεσης. Απαλείφοντας διαφορικά 2^{ης} τάξης προκύπτει:

$$ {}^{s}\vec{F}^{C}_{w} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial \phi}{\partial t} \, {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS \quad (5\text{-}75) $$

Ο τρίτος όρος, $-\int_{Sw} \rho_h g z \cdot {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} dS$, αποτελεί τη δύναμη της άνωσης (${}^{s}\vec{F}^{C}_{CB}$) στο κέντρο μάζας και οφείλεται στη δυνητική πίεση, δηλαδή στην στατική πίεση που οφείλεται στο βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων νερού.

Ακολουθώντας όμοια διαδικασία για τη ροπή:

$$ {}^{s}\vec{M}^{C}_{\Sigma} = {}^{s}\vec{M}^{C}_{w} + {}^{s}\vec{M}^{C}_{B} \quad (5\text{-}76) $$

$$ {}^{s}\vec{M}^{C}_{w} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial \phi}{\partial t} \left({}^{s}\vec{r}^{C}_{q,Sw} \times {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} \right) dS \quad (5\text{-}77) $$

$$ {}^{s}\vec{M}^{C}_{B} = -\int_{Sw} \rho_h g z \left({}^{s}\vec{r}^{C}_{q,Sw} \times {}^{s}\vec{n}^{+}_{Sw} \right) dS \quad (5\text{-}78) $$

όπου ${}^{s}\vec{M}^{C}_{w}$ είναι η ροπή του κύματος η οποία οφείλεται στην κατανομή της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του σώματος και ${}^{s}\vec{M}^{C}_{B}$ η ροπή της άνωσης.

5.2.5.2 Δύναμη και ροπή άνωσης

Ορίζουμε κέντρο άνωσης (center of buoyancy, CB) τη θέση του κέντρου μάζας του εκτοπισμένου όγκου νερού. Η θέση του σημείου άνωσης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος, εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα αξόνων, υπολογίζεται ως:

$$ {}^{s}\vec{r}_{CB}^{C} = \frac{\int_{Vw} {}^{s}\vec{r}_{q,Vw}^{C} dV}{\forall} \tag{5-79} $$

$$ \forall \equiv \int_{Vw} dV \tag{5-80} $$

όπου $\forall$ ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού.

Για τη δύναμη της άνωσης στο σώμα ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{B}^{CB} = -\int_{Sw} \rho_h g z \cdot {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS \tag{5-81} $$

Προφανώς: ${}^{s}\vec{F}_{CB}^{C} = {}^{s}\vec{B}^{CB}$, δηλαδή η δύναμη της άνωσης που ασκείται στο κέντρο άνωσης μεταφέρεται αυτούσια από το κέντρο άνωσης στο κέντρο μάζας παράγοντας και μία ροπή ως προς το κέντρο μάζας ${}^{s}\vec{M}_{B}^{C}$ σύμφωνα με τη Εξ. ((5-78).

Στη συνέχεια εφαρμόζεται το θεώρημα Gauss (βλ Παράρτημα Α):

$$ \int_{S} \vec{Q} \cdot \vec{n}^{-} ds = \int_{V} \vec{\nabla} \cdot \vec{Q} dV \tag{5-82} $$

Προσοχή απαιτείται στο ότι το θεώρημα Gauss στην παραπάνω έκφραση χρησιμοποιεί το κάθετο διάνυσμα με φορά προς το εξωτερικό της επιφάνειας.

Για τη δύναμη της άνωση προκύπτει:

$$ {}^{s}\vec{B}^{CB} = \rho_h g \vec{\nabla} z \int_{Vw} dV = \rho_h g \left(\vec{\nabla} z \right) \forall = \vec{k} \rho_h g \forall \tag{5-83} $$

Με βάση το αντίστοιχο θεώρημα Gauss για εξωτερικό γινόμενο:

$$ \int_{S} \vec{n}^{-} \times \vec{Q} ds = \int_{V} \vec{\nabla} \times \vec{Q} dV \tag{5-84} $$

προκύπτει για τη ροπή της άνωσης:

$$ {}^{s}\vec{M}_{B}^{C} = \rho_h g \forall \left({}^{s}y_{CB}^{C} \vec{i} - {}^{s}x_{CB}^{C} \vec{j} \right) \tag{5-85} $$

Η δύναμη και η ροπή της άνωσης εξαρτώνται από τον εκτοπισμένο όγκο ρευστού λόγω της κίνησης του σώματος και συνεπώς εξαρτώνται από τη θέση του σώματος ως προς την επιφάνεια της θάλασσας και από το ύψος και τη μορφή του κύματος.

5.2.5.2.1 Υδροστατική ανάλυση

Κατά την υδροστατική ανάλυση αναλύονται οι δυνάμεις που ασκούνται στον πλωτήρα θεωρώντας τον ακίνητο και θεωρώντας ότι εκτελεί απειροστές μετατοπίσεις:

Ορισμοί:

Ίσαλος επιφάνεια A_w (water plane area): Η επιφάνεια που σχηματίζεται από την τομή του σχήματος του πλωτήρα και του οριζόντιου επιπέδου του ήρεμου νερού.

Ορίζονται ως ροπές της ισάλου επιφάνειας ως προς το κέντρο μάζας οι παρακάτω ποσότητες:

$$S_y^C = \int_{Aw} {}^s y_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-86}$$

$$S_{yz}^C = \int_{Aw} {}^s y_{q,Aw}^C \cdot {}^s z_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-87}$$

$$S_{yy}^C = \int_{Aw} \left({}^s y_{q,Aw}^C \right)^2 dxdy \tag{5-88}$$

$$S_{yx}^C = \int_{Aw} {}^s y_{q,Aw}^C \cdot {}^s x_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-89}$$

$$S_x^C = \int_{Aw} {}^s x_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-90}$$

$$S_{xz}^C = \int_{Aw} {}^s x_{q,Aw}^C \cdot {}^s z_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-91}$$

$$S_{xy}^C = \int_{Aw} {}^s x_{q,Aw}^C \cdot {}^s y_{q,Aw}^C dxdy \tag{5-92}$$

$$S_{xx}^C = \int_{Aw} \left({}^s x_{q,Aw}^C \right)^2 dxdy \tag{5-93}$$

Κέντρο πλεύσης CF (center of flotation): Το σημείο του πλωτήρα το οποίο δεν μετατοπίζεται κατακόρυφα όταν δρουν οριζόντιες ροπές.

$${}^s\vec{r}_{CF}^{\,O} \equiv \frac{\int_{Aw} {}^s\vec{r}_{q,Aw}^{\,O} dxdy}{A_w} \tag{5-94}$$

Ισχύει:

$${}^s x_{CF}^O = \frac{S_x}{A_w} \tag{5-95}$$

$${}^s y_{CF}^O = \frac{S_y}{A_w} \tag{5-96}$$

Επειδή το σημείο αυτό αποτελεί το βαρύκεντρο της ισάλου επιφάνειας, θα είναι ${}^{s}z_{CF}^{O} = 0$. Προφανώς θα ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{r}_{CF}^{O} = {}^{s}\vec{r}_{C}^{O} + {}^{s}\vec{r}_{CF}^{C} \text{, όπου} \tag{5-97} $$

$$ {}^{s}\vec{r}_{CF}^{C} \equiv \frac{\int_{Aw} {}^{s}\vec{r}_{q,Aw}^{C} dxdy}{A_w} \tag{5-98} $$

5.2.5.2.2 Στατική ισορροπία

Όταν το σώμα ισορροπεί τότε:

$$ \left.\begin{array}{l} {}^{s}\vec{W} = {}^{s}\vec{B}'^{CB} \\ {}^{s}\vec{M}_{B}'^{C} = \vec{0} \end{array}\right\} \Leftrightarrow \left.\begin{array}{c} m/\rho_h = \forall' \\ {}^{s}y_{CB}^{C} = 0 \,\&\, {}^{s}x_{CB}^{C} = 0 \end{array}\right\} \tag{5-99} $$

όπου ${}^{s}\vec{B}'^{CB}$, ${}^{s}\vec{M}_{B}'^{C}$ είναι η άνωση και η ροπή της άνωσης όταν το σώμα ισορροπεί.

Δηλαδή στην περίπτωση στατικής ισορροπίας ο όγκος του εκτοπιζόμενου νερού ισούται με τη μάζα του σώματος διά την πυκνότητα του νερού και το κέντρο άνωσης βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο με το κέντρο μάζας.

5.2.5.2.3 Εμπειρικό μοντέλο για μη απειροστές μετατοπίσεις του πλωτήρα

Έχει παρατηρηθεί πως σε περιπτώσεις μεγαλύτερων μετατοπίσεων και περιστροφών γύρω από τη θέση ισορροπίας, η συμβολή της άνωσης μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τις γραμμικές σχέσεις που θα ίσχυαν θεωρητικά στην περίπτωση απειροστών μετατοπίσεων και περιστροφών [9].

Έτσι με βάση εμπειρικά δεδομένα και τη δυναμική του πλωτήρα για απειροστές μεταβολές προκύπτουν (βλ Παράρτημα Α) οι παρακάτω σχέσεις για την περιγραφή των ανωστικών δυνάμεων και των ροπών που παράγονται από την υδροστατική πίεση στη διεπιφάνεια ρευστού στερεού:

$$ \begin{bmatrix} {}^{s}\Delta\vec{B} \\ {}^{s}\Delta\vec{M}^{C} \end{bmatrix} = -\tilde{K} \cdot \vec{\xi} \tag{5-100} $$

$$ \tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_w & \rho_h g S_y^C & -\rho_h g S_x^C & 0 \\ 0 & 0 & S_y^C & S_{yy}^C & -S_{yx}^C & 0 \\ 0 & 0 & -S_x^C & -S_{xy}^C & S_{xx}^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{5-101} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{B}^{C} = {}^{s}\vec{M}_{B}'^{C} + {}^{s}\Delta\vec{M} = {}^{s}\Delta\vec{M} \tag{5-102} $$

$$ {}^{s}\vec{B}^{CB} = {}^{s}\vec{B}'^{CB} + {}^{s}\Delta\vec{B} \tag{5-103} $$

όπου $\tilde{K}$ είναι το μητρώο υδροστατικής δυσκαμψίας, το οποίο λειτουργεί ως σταθερά επαναφοράς όμοια με τη σταθερά ελατηρίου σε ένα σύστημα μάζας – ελατηρίου.

5.2.5.3 Δυνάμεις και ροπές κύματος (wave force & moment)

Αντικαθιστώντας τη Εξ. ((5-66) η οποία εκφράζει το δυναμικό της ταχύτητας στην περίπτωση σύνθετης κίνησης σώματος σε κυματίζουσα επιφάνεια νερού, στην Εξ. ((5-75) η οποία μας δίνει τη δύναμη που ασκεί το κύμα στο σώμα προκύπτει:

$$ {}^{s}\vec{F}_{w}^{C} = {}^{s}\vec{F}_{e} + {}^{s}\vec{F}_{rd} \tag{5-104} $$

$$ {}^{s}\vec{F}_{e}^{C} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial\left(\phi_0 + \phi_d\right)}{\partial t} {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS \tag{5-105} $$

$$ {}^{s}\vec{F}_{rd}^{C} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial\left(\vec{\varphi}_t \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} + \vec{\varphi}_r \cdot {}^{s}\vec{\omega}\right)}{\partial t} {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} dS \tag{5-106} $$

όπου ${}^{s}\vec{F}_{e}^{C}$ είναι η δύναμη διέγερσης η οποία ασκείται στον πλωτήρα από το κύμα και ${}^{s}\vec{F}_{rd}^{C}$ είναι η δύναμη που προκύπτει από την αντίδραση και την αντίσταση του ρευστού στην ταλάντωση του κύματος. Ο πλωτήρας κατά την ταλάντωσή του (γενικά σε οποιαδήποτε κίνησή του) παράγει επιφανειακά κύματα προς όλες τις διευθύνσεις τα οποία αντιστοιχούν σε «ακτινοβολία» μηχανικής ισχύος. Γι' αυτό και η δύναμη ${}^{s}\vec{F}_{rd}^{C}$ ονομάζεται δύναμη ακτινοβολίας.

Όμοια για τις ροπές:

$$ {}^{s}\vec{M}_{w}^{C} = {}^{s}\vec{M}_{e}^{C} + {}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} \tag{5-107} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{e}^{C} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial\left(\phi_0 + \phi_d\right)}{\partial t} \left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS \tag{5-108} $$

$$ {}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial\left(\vec{\varphi}_t \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} + \vec{\varphi}_r \cdot {}^{s}\vec{\omega}\right)}{\partial t} \left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) dS \tag{5-109} $$

όπου ${}^{s}\vec{M}_{e}^{C}$ η ροπή διέγερσης του κύματος στον πλωτήρα και ${}^{s}\vec{M}_{rd}^{C}$ η ροπή ακτινοβολίας της δύναμης ακτινοβολίας.

5.2.5.4 Δυνάμεις και ροπές ακτινοβολίας (radiation force & moment)

Αν υποθέσουμε ήρεμη απέραντη επιφάνεια νερού, άπειρο βάθος πυθμένα και σώμα που αρχίζει να κινείται τότε θα δούμε να δημιουργούνται κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού οι οποίοι θα διαδίδονται μακριά από το σώμα. Το δυναμικό των κυματισμών αυτών

προέρχεται από την κίνηση της υγρής επιφάνειας (Sw) του πλωτήρα και συνεπώς εξαρτάται από αυτή. Με βάση την Εξ. ((5-66) και δεδομένου ότι $\phi_0 = 0$ και $\phi_d = 0$ προκύπτει η δύναμη ακτινοβολίας (βλ Παρ. Α):

$$ {}^{s}\vec{F}_{rd}^{C} = -\tilde{Z}_{tt} \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} - \tilde{M}_{ad,tt} \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_{C}^{O} - \tilde{Z}_{tr} \cdot {}^{s}\vec{\omega} - \tilde{M}_{ad,tr} \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}} \tag{5-110} $$

$$ \tilde{Z}_{tt} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_t}{\partial t}^{T} \right) dS \tag{5-111} $$

$$ \tilde{Z}_{tr} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_r}{\partial t}^{T} \right) dS \tag{5-112} $$

$$ \tilde{M}_{ad,tt} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \vec{\varphi}_t^{T} \right) dS \tag{5-113} $$

$$ \tilde{M}_{ad,tr} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \vec{\varphi}_r^{T} \right) dS \tag{5-114} $$

όπου $\tilde{Z}_{tt}$, $\tilde{Z}_{tr}$ τα μητρώα απόσβεσης προερχόμενα από την *αντίσταση* του νερού στην κίνηση του πλωτήρα μέσω εκπομπής κυμάτων, $Z_{ij} \cdot q_j$ είναι η i συνιστώσα της δύναμης της αντίστασης του νερού κατά την κίνηση με το βαθμό ελευθερίας j, $\tilde{M}_{ad,tt}$, $\tilde{M}_{ad,tr}$ είναι μητρώα αδράνειας προερχόμενα από την *αντίδραση* του νερού στην κίνηση του πλωτήρα λόγω της αδράνειας του εκτοπιζόμενου νερού και $M_{ad,ij} \cdot \dot{q}_j$ είναι η i συνιστώσα της δύναμης της αντίδρασης του νερού κατά την κίνηση με τον βαθμό ελευθερίας j.

Ο δείκτης t αντιστοιχεί στους βαθμούς ελευθερίας κατά x, y, z ενώ ο δείκτης r κατά γ, β, α.

Η ροπή ακτινοβολίας υπολογίζεται όμοια ως εξής:

$$ {}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} = -\tilde{Z}_{rt} \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} - \tilde{M}_{ad,rt} \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_{C}^{O} - \tilde{Z}_{rr}\, {}^{s}\vec{\omega} - \tilde{M}_{ad,rr} \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}} \tag{5-115} $$

$$ \tilde{Z}_{rt} = \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_t}{\partial t}^{T} \right) dS \tag{5-116} $$

$$ \tilde{Z}_{rr} = \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_r}{\partial t}^{T} \right) dS \tag{5-117} $$

$$ \tilde{M}_{ad,rt} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \vec{\varphi}_t^{T} \right) dS \tag{5-118} $$

$$ \tilde{M}_{ad,rr} = \int_{Sw} \rho_h \left({}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \cdot \vec{\varphi}_r^{T} \right) dS \tag{5-119} $$

με τη διαφορά ότι $Z_{ij} \cdot q_j$ είναι η i συνιστώσα της ροπής της *αντίστασης* του νερού κατά την κίνηση με τον βαθμό ελευθερίας j και $M_{ad,ij} \cdot \dot{q}_j$ είναι η i συνιστώσα της ροπής της *αντίδρασης* του νερού κατά την κίνηση με τον βαθμό ελευθερίας j.

5.2.6 Το κύμα ως πηγή ισχύος

Το πρόβλημα της επίλυσης της αλληλεπίδρασης σώματος και κύματος είναι συζευγμένο καθώς το κύμα επηρεάζει την κίνηση του σώματος και η κίνηση του σώματος επηρεάζει το κύμα. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης θα θεωρήσουμε πως οι δυνάμεις που ασκεί το κύμα στο σώμα είναι ανεξάρτητες της κίνησης του σώματος, δηλαδή πως το κύμα δρα ως πηγή δύναμης. Η παραδοχή αυτή, θεωρείται καλή προσέγγιση, όταν έχουμε ένα σώμα συγκρίσιμων διαστάσεων με το κύμα σε υδάτινο όγκο πολύ μεγάλης έκτασης και βάθους.

5.2.7 Εξισώσεις κίνησης του πλωτήρα

Συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο κέντρο μάζας του σώματος:

$$\Sigma\vec{F}^C = {}^s\vec{F}_e^C - \tilde{Z}_{tt} \cdot {}^s\vec{v}_C^O - \tilde{M}_{ad,tt} \cdot {}^s\dot{\vec{v}}_C^O - \tilde{Z}_{tr}\, {}^s\vec{\omega} - \tilde{M}_{ad,tr} \cdot {}^s\dot{\vec{\omega}} + {}^s\Delta\vec{B} + {}^s\vec{F}_v^C + \vec{F}_{stm}^C \quad (5\text{-}120)$$

Συνισταμένη των ροπών που ασκούνται στο σώμα ως προς το κέντρο μάζας:

$$\begin{aligned}\Sigma\vec{M}^C = {}^s\vec{M}_e^C - \tilde{Z}_{rt} \cdot {}^s\vec{v}_C^O - \tilde{M}_{ad,rt} \cdot {}^s\dot{\vec{v}}_C^O - \tilde{Z}_{rr}\, {}^s\vec{\omega} - \\ -\tilde{M}_{ad,rr} \cdot {}^s\dot{\vec{\omega}} - {}^s\Delta\vec{M}^C + {}^s\vec{M}_v^C + \vec{M}_{stm}^C\end{aligned} \quad (5\text{-}121)$$

Αντικαθιστώντας στις (5-34, (5-35 προκύπτει:

$$m \cdot {}^s\dot{\vec{v}}_C^O + \tilde{M}_{ad,tt} \cdot {}^s\dot{\vec{v}}_C^O + \tilde{M}_{ad,tr} \cdot {}^s\dot{\vec{\omega}} + \tilde{Z}_{tt} \cdot {}^s\vec{v}_C^O + \tilde{Z}_{tr}\, {}^s\vec{\omega} = {}^s\vec{F}_e^C + {}^s\Delta\vec{B} + {}^s\vec{F}_v^C + \vec{F}_{stm}^C \quad (5\text{-}122)$$

$$\begin{aligned}{}^s\tilde{I}^C \cdot {}^s\dot{\vec{\omega}} + \tilde{M}_{ad,rt} \cdot {}^s\dot{\vec{v}}_C^O + \tilde{M}_{ad,rr} \cdot {}^s\dot{\vec{\omega}} + {}^s\vec{\omega} \times \left({}^s\tilde{I}^C \cdot {}^s\vec{\omega}\right) + \tilde{Z}_{rr}\, {}^s\vec{\omega} + \tilde{Z}_{rt} \cdot {}^s\vec{v}_C^O = \\ = {}^s\vec{M}_e^C + {}^s\Delta\vec{M}^C + {}^s\vec{M}_v^C + \vec{M}_{stm}^C\end{aligned} \quad (5\text{-}123)$$

Τελικώς θεωρώντας γενικευμένες μετατοπίσεις $\vec{\xi} = \begin{bmatrix} {}^s\vec{r}_C^O \\ \vec{\theta} \end{bmatrix}$, γενικευμένες ταχύτητες $\vec{q} = \begin{bmatrix} {}^s\vec{v}_C^O \\ {}^s\vec{\omega} \end{bmatrix}$ και γενικευμένες δυνάμεις $\vec{D} = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M} \end{bmatrix}$ προκύπτει:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\tilde{M} + \tilde{M}_{ad}\right)\dot{\vec{q}} + \tilde{Z}\vec{q} + C(\vec{q}) + \tilde{K}\vec{\xi} = {}^s\vec{D}_e^C + {}^s\vec{D}_v^C + {}^s\vec{D}_{stm}^C \\ \vec{q} = \tilde{J} \cdot \dot{\vec{\xi}} \end{aligned} \right\} \quad (5\text{-}124)$$

$$\tilde{J} = \begin{bmatrix} \tilde{1} & \tilde{0} \\ \tilde{0} & \tilde{E}(\theta) \end{bmatrix} \quad (5\text{-}125)$$

$$C(\vec{q}) = \begin{bmatrix} \vec{0} \\ {}^{s}\vec{\omega} \times \left({}^{s}\tilde{I}^{C} \cdot {}^{s}\vec{\omega} \right) \end{bmatrix} \tag{5-126}$$

$${}^{s}\tilde{I}^{C} = \tilde{R} \cdot {}^{b}\tilde{I}^{C} \cdot \tilde{R}^{T} \tag{5-127}$$

$$\tilde{M}_{ad} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_{ad,tt} & \tilde{M}_{ad,tr} \\ \tilde{M}_{ad,rt} & \tilde{M}_{ad,rr} \end{bmatrix} \tag{5-128}$$

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} m\tilde{1} & 0 \\ 0 & {}^{s}\tilde{I}^{C} \end{bmatrix} \tag{5-129}$$

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{tt} & \tilde{Z}_{tr} \\ \tilde{Z}_{rt} & \tilde{Z}_{rr} \end{bmatrix} \tag{5-130}$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_w & \rho_h g S_y^C & -\rho_h g S_x^C & 0 \\ 0 & 0 & S_y^C & S_{yy}^C & -S_{yx}^C & 0 \\ 0 & 0 & -S_x^C & -S_{xy}^C & S_{xx}^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-131}$$

5.2.8 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης κυλινδρικού πλωτήρα

Θεωρήθηκε κυλινδρικός πλωτήρας ακτίνας 1m, ύψους 1m και μάζας 1592kg. Όπως εξάγεται από την υδροστατική, ο πλωτήρας είναι βυθισμένος ως τη μέση του ύψους του. Ο πλωτήρας χαρακτηρίζεται επιπλέον από τα παρακάτω μεγέθη:

Τανυστής ροπών αδράνειας:

$${}^{b}\tilde{I}^{C} = \begin{bmatrix} 523.6 & 0 & 0 \\ 0 & 523.6 & 0 \\ 0 & 0 & 785.4 \end{bmatrix} \tag{5-132}$$

Για συχνότητα διέγερσης f=0.289 Hz με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων προκύπτουν τα παρακάτω:

Μητρώο προστιθέμενης μάζας:

$$\tilde{M}_{ad} = \begin{bmatrix} 872.5 & 0 & 0 & 0 & -42.4 & 0 \\ 0 & 872.5 & 0 & 42.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2109 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 37.4 & 0 & 221.9 & 0 & 0 \\ -37.4 & 0 & 0 & 0 & 221.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-133}$$

Μητρώο απόσβεσης εξ ακτινοβολίας:

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} 83.1 & 0 & 0 & 0 & 7.4 & 0 \\ 0 & 83.1 & 0 & -7.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1214 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -7.58 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.58 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-134}$$

Μητρώο υδροστατικής δυσκαμψίας:

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 31219 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3814 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3814 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5-135}$$

Δύναμη διέγερσης:

$${}^{s}\vec{F}_{e}^{C} = \begin{bmatrix} 7190 \\ 0.963 \\ 19818 \end{bmatrix} \cdot \sin(\omega_f t) \tag{5-136}$$

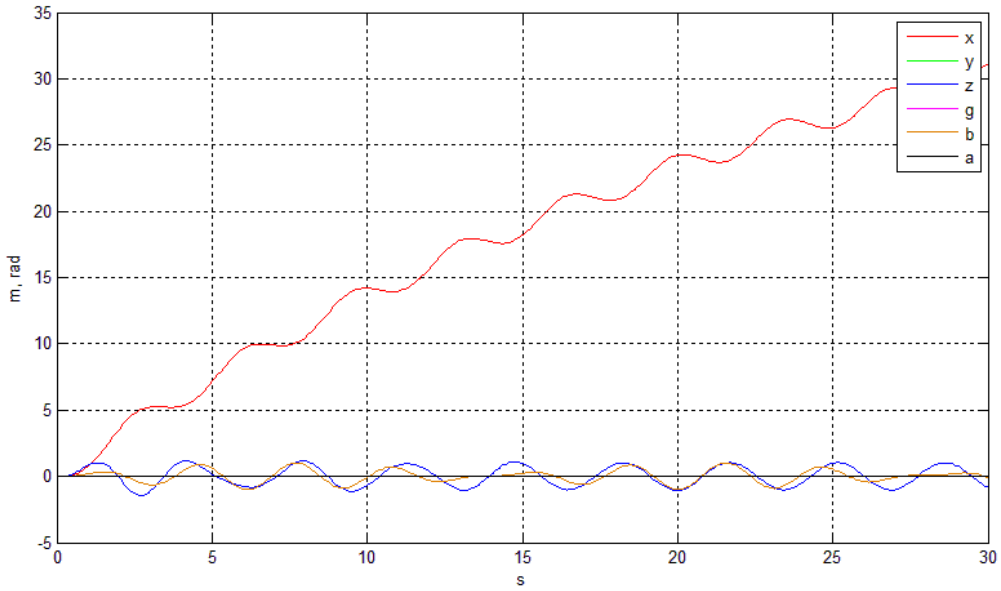
Ροπή διέγερσης

$${}^{s}\vec{M}_{e}^{C} = \begin{bmatrix} 0.197 \\ 657 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \sin(\omega_f t) \tag{5-137}$$

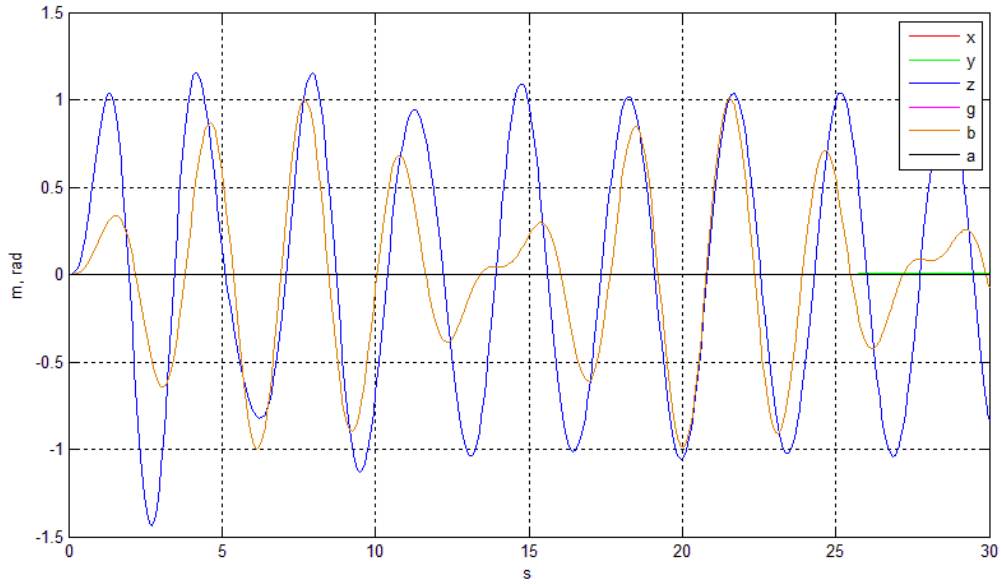
όπου $\omega_f = 2\pi f = 1.82$ rad/s.

Σύμφωνα με τα Σχ. 5-6 και 5-7 το σώμα εκτελεί ημιτονοειδή μεταφορική κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα z και ημιτονοειδή περιστροφική κίνηση ως προς τον άξονα y. Κατά τον x άξονα εκτελεί επαλληλία ημιτονοειδούς και σταθερής μετατόπισης. Αυτή η συμπεριφορά του κυλίνδρου (drifting) κατά την επίδραση των αρμονικών κυματισμών, είναι φυσιολογική λόγω των δευτεροτάξιων φορτίσεων που ασκούνται πάνω του (wave drift forces) και τις οποίες δυνάμεις παραλαμβάνουν τα συστήματα αγκύρωσης όταν το σώμα είναι δεμένο.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 5-8 οι ταχύτητες κατά z και x και η περιστροφή ως προς y είναι σημαντικές ενώ η κίνηση ως προς τους άλλους βαθμούς ελευθερίας είναι αμελητέα. Αυτό οφείλεται στη συμμετρία του κύματος (επίπεδο, απλό, αρμονικό) και του κυλινδρικού πλωτήρα καθώς και στην ανυπαρξία άλλων δυνάμεων και ροπών.



Σχήμα 5-6. Η θέση και ο προσανατολισμός του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα αξόνων.



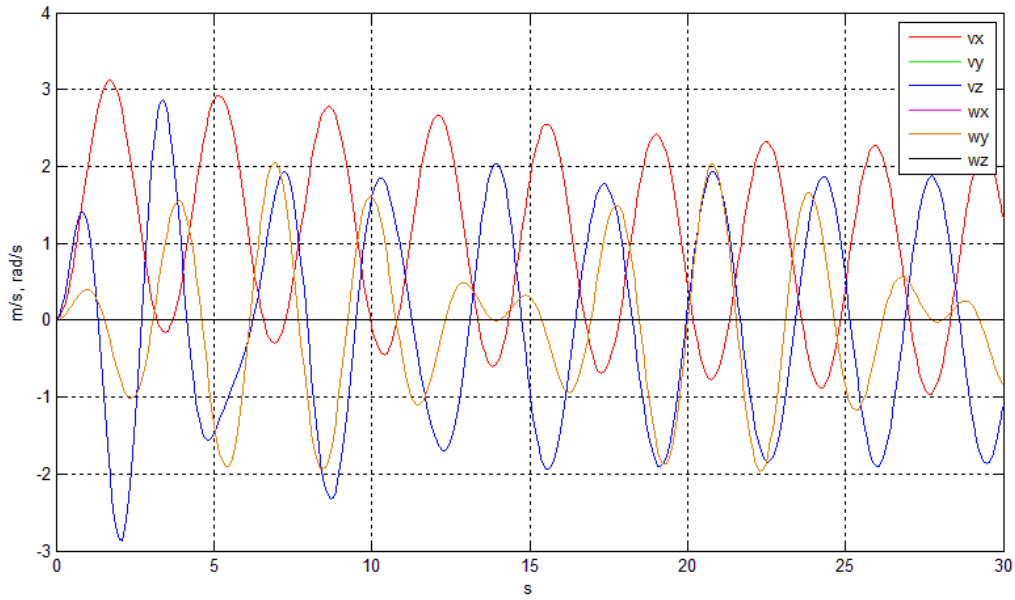
Σχήμα 5-7. Ξεχωριστά, η κατά z μετατόπιση και η ως προς y περιστροφή (εξωτερική γωνία Euler β)

Η μηχανική ισχύς που απορροφάται από τον κυλινδρικό πλωτήρα είναι:

$$P_{buoy} = {}^{s}\vec{F}_{e}^{C} \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} + {}^{s}\vec{M}_{e}^{C} \cdot {}^{s}\vec{\omega} \tag{5-138}$$

Από την προσομοίωση προκύπτει ότι ο πλωτήρας απορροφάει ισχύ P_{buoy}=3kW.

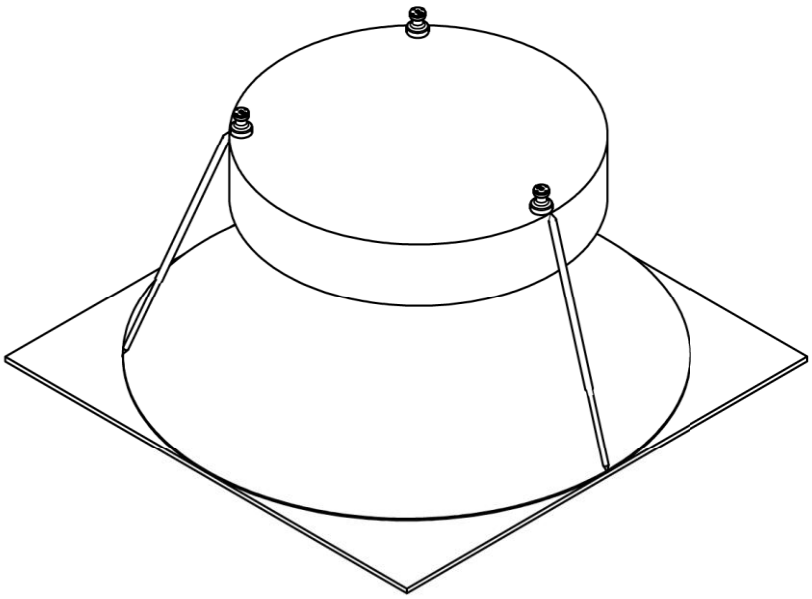
Σύμφωνα με την Εξ. (2-4) η ισχύς του κύματος είναι P_{wave}=3379 W/m και εφόσον η διάμετρος του πλωτήρα είναι 2m η ισχύς που προσπίπτει στον κύλινδρο είναι P_{wave}=6754W. Συνεπώς ο βαθμός απορρόφησης της ενέργειας από τον πλωτήρα είναι 44,4%.



Σχήμα 5-8. Οι συνιστώσες της μεταφορικής και περιστροφικής ταχύτητας του σώματος ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων.

5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση συνολικού συστήματος

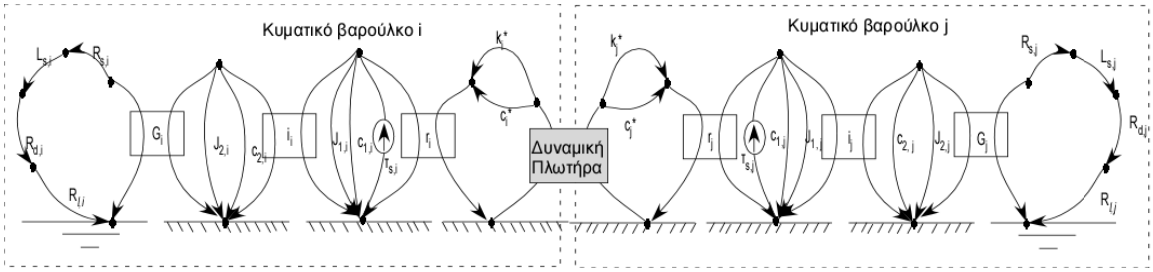
Θεωρούμε κυλινδρικό πλωτήρα στην ελεύθερη επιφάνεια του οποίου βρίσκονται εγκατεστημένα Ν κυματικά βαρούλκα. Οι εύκαμπτοι φορείς των κυματικών βαρούλκων συνδέονται με επίπεδο πυθμένα.



Σχήμα 5-9. Σύστημα τριών κυματικών βαρούλκων εγκατεστημένο σε κυλινδρικό πλωτήρα

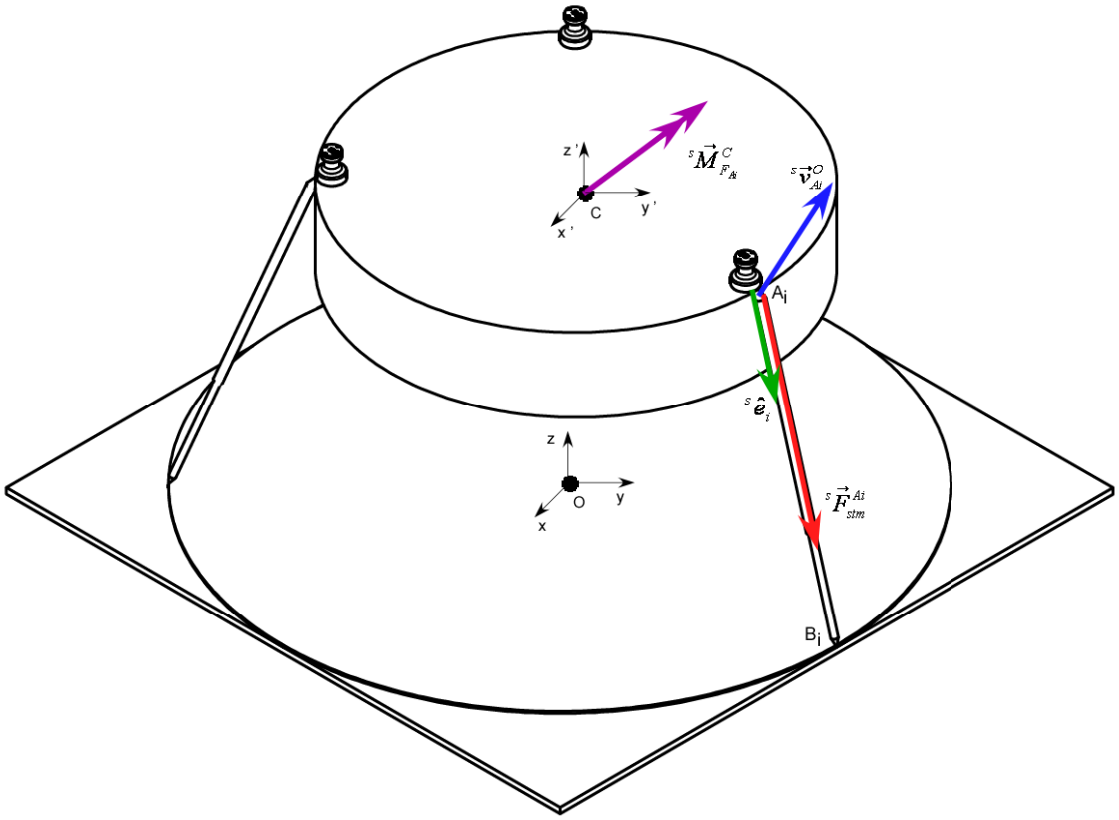
Γίνεται η προσεγγιστική παραδοχή πως ισχύουν οι εξισώσεις που προκύπτουν για πυθμένα απείρου βάθους και μικρά αρμονικά κύματα όπως στην προηγούμενη Παράγραφο.

Όπως αναφέρθηκε θεωρούμε πως το πλωτό σώμα αποτελεί πηγή ταχύτητας για το σύστημα του κυματικού βαρούλκου και ταυτόχρονα πως τα κυματικά βαρούλκα δρουν ως πηγή δύναμης για το σώμα προκειμένου να συμπεριλάβουμε στη μελέτη μας τη δυναμική αλληλεπίδραση σώματος – κυματικών βαρούλκων και να έχουμε ακριβέστερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος. Η αλληλεπίδραση αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ. 5-10:



Σχήμα 5-10. Σχεδιάγραμμα που απεικονίζει δυναμική αλληλεπίδραση του πλωτήρα και των κυματικών βαρούλκων.

5.3.1 Δυνάμεις και ροπές από το μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας



Σχήμα 5-11. Δυνάμεις και ροπές

Η δύναμη που ασκείται από το μηχανισμό i στο σημείο Ai του σώματος ισούται με:

$$ {}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai} = f_{si} \cdot {}^{s}\hat{e}_i \text{, όπου} \qquad (5\text{-}139) $$

f_{si} είναι το μέτρο της δύναμης που ασκείται από το σύστημα του κυματικού βαρούλκου στον εύκαμπτο φορέα, ως αντίδραση και αντίσταση στην επιβαλλόμενη διέγερση και ${}^{s}\hat{e}_i$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της κατεύθυνσης της δύναμης αυτής.

Η δύναμη ${}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai}$ παράγει και μία ροπή ως προς το κέντρο μάζας του σώματος για την οποία ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{M}_{F_{Ai}}^{C} = {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \times {}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai} = \left({}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \times {}^{s}\hat{e}_i \right) f_{si} \tag{5-140} $$

Επιπλέον ισχύει:

$$ {}^{s}\hat{e}_i = \frac{\overrightarrow{A_i B_i}}{\left|\overrightarrow{A_i B_i}\right|} \text{, όπου} \tag{5-141} $$

$$ \overrightarrow{A_i B_i} = \overrightarrow{OB_i} - \overrightarrow{OA_i} \tag{5-142} $$

σύμφωνα με το Σχ. 5-11.

Εφαρμόζοντας τη θεωρία μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$ {}^{s}\overrightarrow{A_i B_i} = {}^{s}\vec{r}_{Bi}^{O} - {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{O} \tag{5-143} $$

$$ {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{O} = {}^{s}\vec{r}_{C}^{O} + {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \tag{5-144} $$

$$ {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} = \tilde{R}_{b}^{s} \cdot {}^{b}\vec{r}_{Ai}^{C} \tag{5-145} $$

Τα διανύσματα ${}^{s}\vec{r}_{Bi}^{O}$ και ${}^{b}\vec{r}_{Ai}^{C}$, δηλαδή η θέση των σημείων B_i ως προς την αρχή των αξόνων εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων και η θέση των σημείων A_i ως προς το κέντρο μάζας του σώματος εκφρασμένη στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων, μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες παράμετροι.

Για να βρούμε τη συνολική δύναμη που ασκείται στο κέντρο μάζας του σώματος από το σύστημα αρκεί να προσθέσουμε διανυσματικά τις επιμέρους δυνάμεις που ασκούνται σε συγκεκριμένα σημεία του σώματος από το σύστημα των κυματικών βαρούλκων:

Έτσι:

$$ {}^{s}\vec{F}_{stm}^{C} = \sum_{i=1}^{N} {}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai} = \sum_{i=1}^{N} f_{si} \cdot {}^{s}\hat{e}_i \tag{5-146} $$

Όμοια, υπολογίζουμε τη συνολική ροπή των δυνάμεων του συστήματος ως προς το κέντρο μάζας του σώματος:

$$ {}^{s}\vec{M}_{stm}^{C} = \sum_{i=1}^{N} {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \times {}^{s}\vec{F}_{stm}^{Ai} = \sum_{i=1}^{N} \left({}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \times {}^{s}\hat{e}_i \right) \cdot f_{si} \tag{5-147} $$

Οι δυνάμεις και ροπές εκφράζονται πάντα στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων.

Συνοψίζοντας γράφουμε:

$$ {}^{s}\vec{D}_{stm}^{C} = \sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} {}^{s}\hat{e}_i \\ \left({}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \times {}^{s}\hat{e}_i \right) \end{bmatrix} \cdot f_{si} \tag{5-148} $$

Η γραμμική ταχύτητα που θεωρούμε πως επιβάλλεται από τον πλωτήρα στο κυματικό βαρούλκο μέσω του εύκαμπτου φορέα, ισούται με τη μεταβολή του ευθύγραμμου μήκους του εύκαμπτου φορέα:

$$ \upsilon_{si} = \frac{d\left|\overrightarrow{A_i B_i}\right|}{dt} \tag{5-149} $$

Παράλληλα μπορούμε να γράψουμε:

$$ \upsilon_{si} = {}^{s}\hat{e}_i^{T} \cdot {}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O} \tag{5-150} $$

όπου η ταχύτητα υ_{si} αποτελεί την προβολή της διανυσματικής ταχύτητας του σημείου A_i ($ {}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O} $), στη διεύθυνση του εύκαμπτου φορέα ${}^{s}\hat{e}_i$ ή οποία ορίζεται από τα σημεία A_i, B_i, εφόσον ο εύκαμπτος φορέας παραμένει τεντωμένος (Σχ. 5-11).

Όπως αποδεικνύεται παρακάτω οι δύο εκφράσεις της ταχύτητας υ_{si} είναι μαθηματικά ισοδύναμες.

$$ \overrightarrow{A_i B_i} = \left(x_{Ai} - x_{Bi}, y_{Ai} - y_{Bi}, z_{Ai} - z_{Bi} \right)^{T} \tag{5-151} $$

$$ \left|\overrightarrow{A_i B_i}\right| = \sqrt{\left(x_{Ai} - x_{Bi}\right)^2 + \left(y_{Ai} - y_{Bi}\right)^2 + \left(z_{Ai} - z_{Bi}\right)^2} \tag{5-152} $$

$$ \frac{d\left|\overrightarrow{A_i B_i}\right|}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\left(x_{Ai} - x_{Bi}\right)\dot{x}_{Ai} + 2\left(y_{Ai} - y_{Bi}\right)\dot{y}_{Ai} + 2\left(z_{Ai} - z_{Bi}\right)\dot{z}_{Ai}}{\sqrt{\left(x_{Ai} - x_{Bi}\right)^2 + \left(y_{Ai} - y_{Bi}\right)^2 + \left(z_{Ai} - z_{Bi}\right)^2}} \Leftrightarrow \tag{5-153} $$

$$ \Leftrightarrow \frac{d\left|\overrightarrow{A_i B_i}\right|}{dt} = \frac{\left(x_{Ai} - x_{Bi}, y_{Ai} - y_{Bi}, z_{Ai} - z_{Bi}\right)}{\left|\overrightarrow{A_i B_i}\right|} \cdot \left(\dot{x}_{Ai}, \dot{y}_{Ai}, \dot{z}_{Ai}\right)^{T} = {}^{s}\hat{e}_i^{T} \cdot {}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O} \tag{5-154} $$

Για το διάνυσμα της ταχύτητας του σημείου Ai ισχύει:

$$ {}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O} = {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} + {}^{s}\vec{\omega} \times {}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C} \tag{5-155} $$

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε τον τρόπο με τον οποίο οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του πλωτήρα συνδέονται με τις εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των κυματικών βαρούλκων. Οι εξισώσεις της δυναμικής του πλωτήρα μεταφέρουν την ταχύτητα του σώματος ως πληροφορία στις εξισώσεις των κυματικών βαρούλκων ενώ από τις εξισώσεις των κυματικών βαρούλκων προκύπτουν δυνάμεις και ροπές ως είσοδος στις εξισώσεις της δυναμικής του πλωτήρα. Ενδιάμεσα

χρησιμοποιούνται κάποιοι μετασχηματισμοί των διανυσματικών μεγεθών σε μονόμετρα μεγέθη και αντίστροφα. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 5-12:

Σχήμα 5-12. Μεταφορά πληροφορίας μεταξύ πλωτήρα και κυματικών βαρούλκων κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος.

Οι συνολικές εξισώσεις του συστήματος έχουν ως εξής:

Εξισώσεις πλωτήρα:

$$\left\{\begin{array}{c}\left(\tilde{M}+\tilde{M}_{ad}\right)\dot{\vec{q}}+\tilde{Z}\vec{q}+\vec{C}(\vec{q})+\tilde{K}\vec{\xi}={}^{s}\vec{D}_{e}^{C}+{}^{s}\vec{D}_{v}^{C}+{}^{s}\vec{D}_{stm}^{C}\\ \vec{q}=\tilde{J}\cdot\dot{\vec{\xi}}\end{array}\right\} \tag{5-156}$$

Εξισώσεις κυματικών βαρούλκων:

$$\left\{\begin{array}{c}\dot{\vec{x}}_1=\tilde{A}_1\vec{x}_1+\tilde{C}_1\vec{w}_1\\ \vdots\\ \dot{\vec{x}}_i=\tilde{A}_i\vec{x}_i+\tilde{C}_i\vec{w}_i\end{array}\right\} \tag{5-157}$$

Εξισώσεις μετασχηματισμού δύναμης:

$$\left\{\begin{array}{c}{}^{s}\vec{D}_{stm}^{C}=\sum_{i=1}^{N}\left[\begin{array}{c}{}^{s}\hat{e}_i\\ \left({}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C}\times{}^{s}\hat{e}_i\right)\end{array}\right]\cdot f_{si}\\ f_{s_i}=\vec{C}_i^{T}\cdot\vec{x}_i+\vec{D}_i^{T}\cdot\vec{w}_i\end{array}\right\} \tag{5-158}$$

Εξισώσεις μετασχηματισμού ταχύτητας:

$$\left\{\begin{array}{c}\upsilon_{si}={}^{s}\hat{e}_i^{T}\cdot{}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O}\\ {}^{s}\vec{v}_{Ai}^{O}={}^{s}\vec{v}_{C}^{O}+{}^{s}\vec{\omega}\times{}^{s}\vec{r}_{Ai}^{C}\\ \left[{}^{s}\vec{v}_{C}^{O}\quad{}^{s}\vec{\omega}\right]^{T}=\vec{q}\end{array}\right\} \tag{5-159}$$

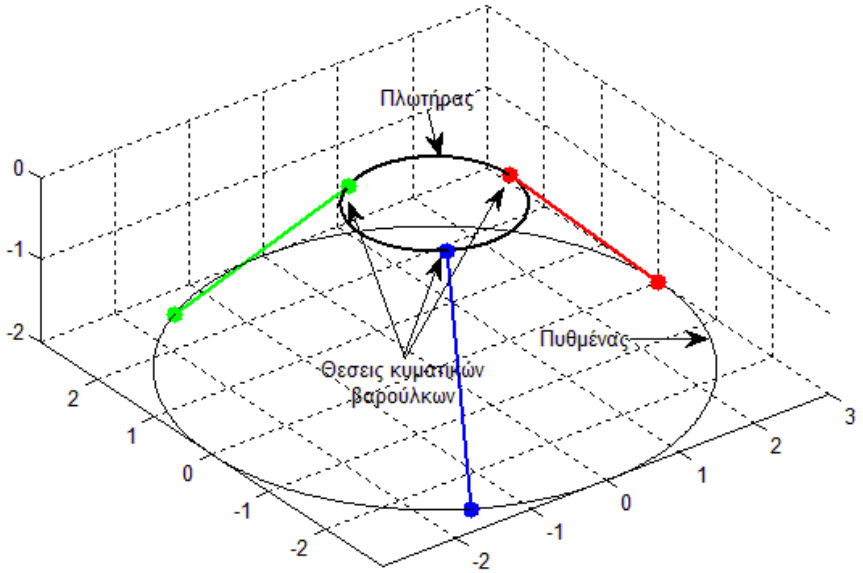
όπου i: ο αριθμός των εγκατεστημένων κυματικών βαρούλκων στο σκάφος.

Τα μεγέθη m, ${}^{b}\tilde{I}^{C}$, $\tilde{M}_{ad}$, $\tilde{Z}$, $\tilde{K}$ μαζί με τα μεγέθη ${}^{s}\vec{r}_{Bi}^{O}$ και ${}^{b}\vec{r}_{Ai}^{C}$, θεωρούνται ανεξάρτητες παράμετροι.

5.3.2 Αριθμητική επίλυση εξισώσεων συστήματος κυλινδρικού πλωτήρα – τριών κυματικών βαρούλκων

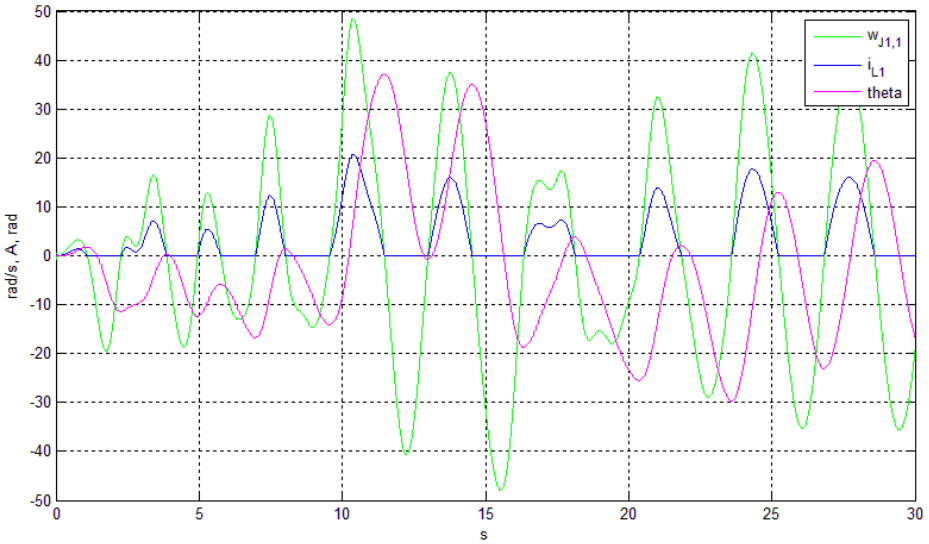
Στο Σχ. 5-13 φαίνεται γραφικά η υπό μελέτη διάταξη στο χώρο. Με το μικρό κύκλο επισημαίνεται η περιφέρεια της άνω επιφάνειας του κυλινδρικού πλωτήρα με την πράσινη

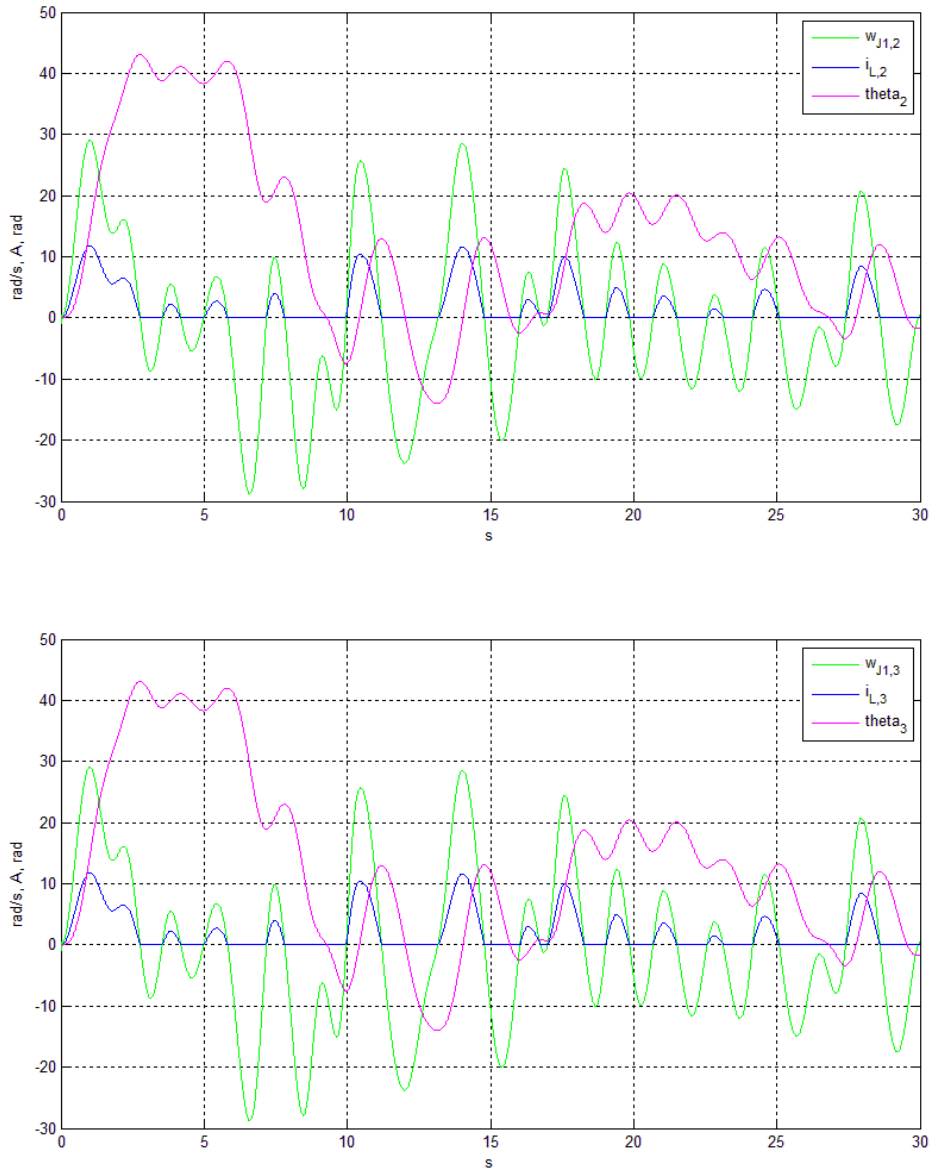
κόκκινη και μπλε γραμμή συμβολίζονται οι εύκαμπτοι φορείς των κυματικών βαρούλκων και επισημαίνεται η θέση τους στον πλωτήρα και ο τρόπος πρόσδεσης του συστήματος.



Σχήμα 5-13. Γραφική απεικόνιση του συστήματος.

Στο Σχ. 5-14 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης κάθε υποσυστήματος κυματικού βαρούλκου στο συνολικό σύστημα. Παρατηρούμε πως η γωνιακή ταχύτητα και η γωνία περιστροφής του τυμπάνου έχουν ημιτονοειδή συμπεριφορά αποτελούμενη από επαλληλία αρμονικών. Το ρεύμα παίρνει μόνο θετικές τιμές και μηδενίζεται λόγω της διόδου όταν η γωνιακή ταχύτητα γίνεται αρνητική.

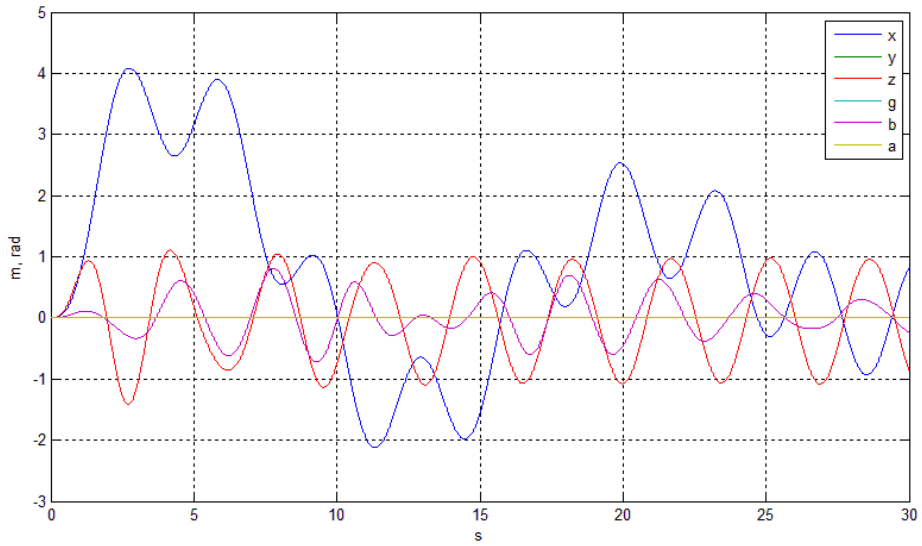




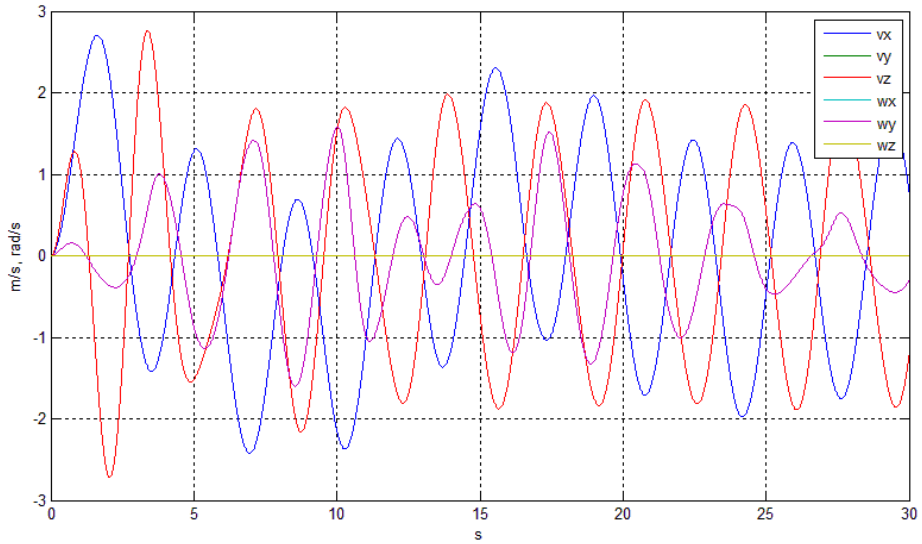
Σχήμα 5-14. Η συμπεριφορά των μεταβλητών κατάστασης κάθε υποσυστήματος κυματικού βαρούλκου στο συνολικό σύστημα.

Στα Σχ. 5-15, 5-16 εμφανίζονται οι συνιστώσες της θέσης, του προσανατολισμού και των ταχυτήτων του σώματος με κυρίαρχες τις κατά x και z συνιστώσες της μεταφορικής ταχύτητας και την κατά y συνιστώσα της περιστροφικής ταχύτητας.

Σύμφωνα με την προσομοίωση η ηλεκτρική ενέργεια που απορροφήθηκε από τις αντιστάσεις ήταν 10.912J σε 30s, το οποίο αντιστοιχεί σε 364W. Συνεπώς ο βαθμός απορρόφησης της ενέργειας του συστήματος των κυματικών βαρούλκων προκύπτει 12%. Αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων των κυματικών βαρούλκων έγινε κατ' εκτίμηση χωρίς να ακολουθηθεί κάποια μέθοδος βελτιστοποίησης, κάτι το οποίο προτείνεται για μελλοντική εργασία.



Σχήμα 5-15. Οι συνιστώσες της θέσης και του προσανατολισμού του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 5-16. Οι συνιστώσες της γραμμικής και περιστροφικής ταχύτητας του πλωτήρα ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων.

6 Οικονομοτεχνική ανάλυση

Το γεγονός ότι το κυματικό βαρούλκο είναι όμοιο με τα ηλεκτρικά βιντσιρέλα καθιστά σχετικά εύκολη την κοστολόγησή του. Τα ηλεκτρικά βιντσιρέλα κοστίζουν μεταξύ 2.000 και 4.000 ευρώ, ανάλογα με το μέγεθός τους. Το κυματικό βαρούλκο διαθέτει επιπλέον ενός ηλεκτρικού βιντσιρέλου, το ελατήριο και το ρυθμιστή φόρτισης ο οποίος μπορεί να κοστίζει 30-100 ευρώ ανάλογα με την απόδοσή του. Όμως το κυματικό βαρούλκο δε χρειάζεται να έχει το χαρακτηριστικό «self-tailing» που διαθέτουν τα ακριβότερα συμβατικά και σχεδόν όλα τα ηλεκτρικά βιντσιρέλα. Συνεπώς τα κυματικά βαρούλκα αναμένεται να κινούνται στο ίδιο εύρος τιμών (2.000 – 4.000 ευρώ) ανάλογα με την εφαρμογή και την απόδοσή τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται 3 βασικά σενάρια χρήσης του προϊόντος. Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε σύστημα που αποτελείται από τρία κυματικά βαρούλκα των 700W, συνολικής ηλεκτρικής ισχύος P_{el}=2,1 kW συνολικής αξίας 6000€. Θεωρούνται επιπλέον 8760h/έτος και συντελεστής απορρόφησης ενέργειας (coefficient factor) C_f = 50%. Σε ένα έτος η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα κυματικά βαρούλκα είναι:

$$E_{\eta\lambda} = P_{el} \times 8760 \times C_f = 9198 \text{ kWh / έτος} \qquad (6\text{-}1)$$

6.1 Σενάριο 1: Χρήση σε υβριδικό ή ηλεκτρικό σκάφος

Στην περίπτωση που το προϊόν εγκαθίσταται σε υβριδικό ή ηλεκτρικό σκάφος, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα συμβάλει στην εξοικονόμηση συμβατικού καυσίμου. Θεωρείται βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικού συστήματος η_1=89% και βαθμός απόδοσης των μηχανών εσωτερικής καύσης η_2=35%. Για δεδομένη ποσότητα μηχανικής ενέργειας $E_{\mu\eta\chi}$ από τους ηλεκτροκινητήρες απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια

$$E_{\eta\lambda} = E_{\mu\eta\chi} / \eta_1, \qquad (6\text{-}2)$$

ενώ από τους συμβατικούς κινητήρες ΜΕΚ απαιτείται θερμότητα

$$E_{\theta\varepsilon\rho\mu} = E_{\mu\eta\chi} / \eta_2 \qquad (6\text{-}3)$$

Θεωρώντας θερμογόνο ικανότητα καυσίμου H_u, η ποσότητα θερμότητας $E_{\theta\varepsilon\rho\mu}$ αντιστοιχεί σε:

$$L = E_{\theta\varepsilon\rho\mu} / H_u, \text{ λίτρα καυσίμου.} \qquad (6\text{-}4)$$

Η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του πετρελαίου diesel εκτιμάται στα 35.860kJ/*l*. Σε ένα έτος λοιπόν εξοικονομούνται:

$$L = \frac{E_{\eta\lambda} \cdot \eta_1}{\eta_2 \cdot \mathrm{H}_u} = 2348\,l \text{ καυσίμου diesel.} \qquad (6\text{-}5$$

Με τα σημερινά δεδομένα η τιμή ενός λίτρου diesel κίνησης είναι 1,58 €/l. Συνεπώς το οικονομικό όφελος για τον ιδιοκτήτη από την εξοικονόμηση καυσίμου, θεωρώντας σταθερές τις ισχύουσες τιμές, είναι: A = 3.710 €/έτος.

6.2 Σενάριο 2: Πώληση ενέργειας στο δίκτυο σε προνομιακή τιμή 100€/MWh

Τα ετήσια έσοδα αντιστοιχούν σε A = 919,80 €/έτος.

6.3 Σενάριο 3: Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συμβατικό σκάφος

Θεωρώντας τιμή πώλησης ηλεκτρικής κιλοβατώρας από τη ΔΕΗ προς τους καταναλωτές 54 €/MWh το ετήσιο οικονομικό όφελος είναι: A = 496,7 €/έτος.

6.4 Αξιολόγηση της επένδυσης

Θεωρείται συντελεστής επικαιροποίησης r_{fn}=7% και για τα τρία σενάρια. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 6-1:

Πίνακας 6-1: Ανάλυση ευαισθησίας της εγκατάστασης συστήματος κυματικών βαρούλκων σε σκάφος

	Σενάρια		
	1° (Αισιόδοξο)	2° (Μέτριο)	3° (Απαισιόδοξο)
Ετήσια Έσοδα	3.709,92 €	919,80 €	496,69 €
Κόστος εγκατάστασης	6.000,00 €	6.000,00 €	6.000,00 €
Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (2%)	120,00 €	120,00 €	120,00 €
Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) σε 10 χρόνια	17.957,11 €	-357,51 €	-3.134,83 €
Ενδογενές ποσοστό απόδοσης (IRR) σε 10 χρόνια	59%	6%	0%
Χρόνος αποπληρωμής (έτη)	3	12	-

Παρατηρούμε πως όταν αναφερόμαστε σε εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε υβριδικά σκάφη τα οικονομικά αποτελέσματα μπορούν να είναι πολύ ελκυστικά. Στην περίπτωση όμως που το σύστημα εγκαθίσταται σε συμβατικό σκάφος με σκοπό την παραγωγή και εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η θέσπιση αρκετά προνομιακών τιμών πώλησης προς το ηλεκτρικό δίκτυο για να παραμείνουν τα οικονομικά μεγέθη της επένδυσης ελκυστικά για ένα ιδιώτη. Διαφορετικά το κόστος κτήσης, λειτουργίας και συντήρησης αντισταθμίζεται μόνο αν λάβουμε υπόψη μαζί με τα

έσοδα και το μη χρηματικό όφελος της απόσβεσης των ταλαντώσεων και της συνεπακόλουθης μεγαλύτερης άνεσης των επιβατών.

Όταν αναφερόμαστε στη χρήση του προϊόντος θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας την ενδεχόμενη συνδυαστική εφαρμογή περισσότερων του ενός εκ των παραπάνω σεναρίων π.χ.: εξοικονόμηση καυσίμων σε υβριδικό σκάφος και ταυτόχρονη πώληση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τους χειμερινούς μήνες που οι ανάγκες σε καύσιμα είναι μειωμένες.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε μία παραλλαγή του ναυτικού βαρούλκου κατάλληλη ώστε αφενός να απορροφά και να αποθηκεύει τη μηχανική ενέργεια που προσδίδουν τα κύματα στο σκάφος αφετέρου να προσφέρει μεγαλύτερη άνεση στους επιβάτες κατά τη διαμονή τους στο σκάφος αποσβαίνοντας τις ταλαντώσεις του.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε η κυματική ενέργεια ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η κυματική ενέργεια υπάρχει διαθέσιμη σε όλες της χώρες που βρέχονται από θάλασσα και εμφανίζεται εντονότερη στα γεωγραφικά ύψη μεταξύ 30° και 60°. Η Ελλάδα ως χώρα νησιωτική με μεγάλη ακτογραμμή και ήπια κυματική δραστηριότητα θα μπορούσε να αντλεί ποσοστό των ηλεκτρικών της αναγκών από τα κύματα με εγκαταστάσεις μικρής και μέσης ισχύος. Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά το σχεδιασμό μονάδων κυματικής ενέργειας ώστε αυτές να μην επιδρούν αρνητικά άμεσα ή έμμεσα στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Αντιθέτως αν γίνει σωστός σχεδιασμός οι μονάδες κυματικής ενέργειας μπορούν να έχουν ευεργετικά παράπλευρα οφέλη όπως την προστασία των ακτών από τη διάβρωση, την ηλεκτροδότηση απομονωμένων περιοχών και την προσφορά νέων θέσεων εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε η σύγχρονη στάθμη της τεχνικής για την εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού. Υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία στις διατάξεις δέσμευσης κυματικής ενέργειας χωρίς ακόμη να έχει προκριθεί κάποια κυρίαρχη τεχνολογία όπως έχει γίνει σε άλλες ανανεώσιμες πηγές (αέρας, ήλιος κα) γεγονός που οφείλεται κυρίως στον απρόβλεπτο χαρακτήρα και τα ακραία φαινόμενα που παρουσιάζει το ωκεάνιο περιβάλλον. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχουν ξεκινήσει να γίνονται οι πρώτες πιλοτικές εγκαταστάσεις σε χώρες όπως η Πορτογαλία, η Μεγάλη Βρετανία, η Δανία και οι ΗΠΑ.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε ο μηχανολογικός σχεδιασμός του κυματικού βαρούλκου. Ορίστηκαν οι προδιαγραφές, επιλέχθηκε ο τρόπος λειτουργίας του και τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται, παρουσιάστηκε η μορφή και η δομή του μηχανισμού και αναλύθηκαν ο τρόπος χειρισμού και λειτουργίας του καθώς και οι πιθανές εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει. Η εφεύρεση χρησιμοποιεί ηλεκτρική δίοδο για την αποσύμπλεξη του τυμπάνου από το φορτίο. Η λειτουργία της ηλεκτρικής διόδου είναι αθόρυβη, αξιόπιστη, παρουσιάζει μικρές απώλειες ενέργειας ενώ οι ανάγκες συντήρησης είναι αμελητέες. Επίσης ο μηχανολογικός σχεδιασμός του συστήματος είναι βασισμένος σε αυτό του ναυτικού βαρούλκου (βιντσιρέλο) με αποτέλεσμα το σύστημα να

χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία, να εγκαθίσταται με ευκολία σε σκάφη, να είναι εύκολος και γνώριμος ο χειρισμός του από τους χρήστες και να εντάσσεται στον περιβάλλον του σκάφους αρμονικά χωρίς να προκαλεί αίσθημα ηχητικής ή οπτικής όχλησης. Χρησιμοποιούνται σε σημαντικό αριθμό τυποποιημένα εξαρτήματα που παράγονται από τη βιομηχανία σε μεγάλες ποσότητες καθιστώντας σχετικά εύκολη και φθηνή την παραγωγή τέτοιων συστημάτων ιδιαίτερα μάλιστα από βιομηχανικές μονάδες που ήδη διαθέτουν γραμμές παραγωγής βιντσιρέλων.

Στο Κεφάλαιο 5 καταστρώθηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά του κυματικού βαρούλκου και μελετήθηκε με τη χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης η εγκατάσταση τριών κυματικών βαρούλκων σε κυλινδρικό πλωτήρα. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης καθορίζεται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους: το βαθμό απορρόφησης ενέργειας του πλωτήρα, ο οποίος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και το σχήμα του πλωτήρα, και το βαθμό απορρόφησης ενέργειας κάθε εγκατεστημένου κυματικού βαρούλκου, ο οποίος εξαρτάται από τη διαστασιολόγηση του κυματικού βαρούλκου (αδράνεια τυμπάνου, ακτίνα τυμπάνου, λόγος μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων κλπ) και από τις ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες που αυτό παρουσιάζει.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται οικονομική αξιολόγηση διαφόρων χρήσεων του προϊόντος. Λόγω της ομοιότητας του κυματικού βαρούλκου με το ηλεκτρικό βιντσιρέλο μπορεί να δοθεί εύκολα μία πρώτη εκτίμηση του κόστους του, το οποίο αναμένεται στα 2.000-4.000 ευρώ ανάλογα με το μέγεθος και την ονομαστική ισχύ. Με την εγκατάσταση ενός συστήματος κυματικών βαρούλκων σε ένα σκάφος μπορούν να προκύψουν χρηματικά οφέλη από την εξοικονόμηση και την ενδεχόμενη πώληση ενέργειας και μη χρηματικά οφέλη από την απόσβεση των ταλαντώσεων και την επίτευξη μεγαλύτερης άνεσης για τους επιβάτες.

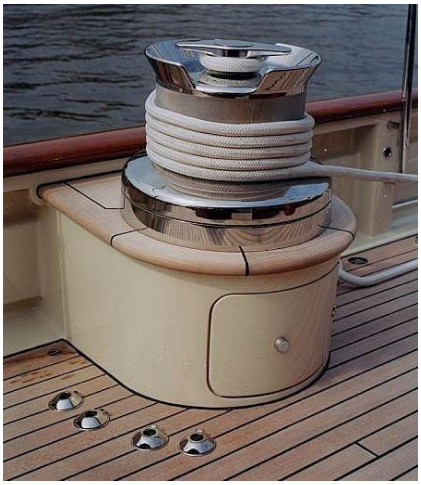
7.2 Μελλοντική εργασία

Σε συνέχεια της μελέτης του 5^{ου} κεφαλαίου θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κυματικού βαρούλκου με στόχο τη μεγιστοποίηση της απορροφόμενης ενέργειας, με τη χρήση στοχαστικών και αιτιοκρατικών μεθόδων βελτιστοποίησης.

Επιπλέον θα ήταν πολύ χρήσιμη η κατασκευή ενός πρότυπου και η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών και μετρήσεων προκειμένου να διαπιστωθεί η πραγματική συμπεριφορά του συστήματος και να γίνει μία καλύτερη εκτίμηση του κόστους παραγωγής του.

Τέλος θα μπορούσαν να εξεταστούν οι εξής παραλλαγές του συστήματος:

- Δημιουργία κυλινδρικής προεξοχής στο πάνω μέρος του βαρούλκου και εγκοπής στην πάνω περιφέρεια για την προσαρμογή του εύκαμπτου φορέα με θηλιά αντί για τη σταθερή πρόσδεση του εύκαμπτου φορέα στο τύμπανο.



Σχήμα 7-1. Βιντσιρέλο με διαμόρφωση στο πάνω μέρος για την πρόσδεση σκοινιού με τη χρήση θηλιάς.

- Μελέτη της δεύτερης παραλλαγής, δηλαδή συστήματος κυματικού βαρούλκου με χρήση καστάνιας αντί για ηλεκτρική δίοδο.
- Κυματικό βαρούλκου που μπορεί να λειτουργεί εναλλακτικά και ως συμβατικό ηλεκτρικό ή χειροκίνητο βιντσιρέλο (π.χ. για το ανέβασμα των ιστίων κατά τον πλου) συνδυάζοντας σε ένα προϊόν δύο λειτουργίες.
- Χρήση ηλεκτρικής μηχανής συνεχούς ρεύματος για την απορρόφηση ενέργειας κατά τη φάση της ανόδου καθώς και για την επαναφορά του τυμπάνου κατά τη φάση της καθόδου με χρήση αυτομάτου ελέγχου χωρίς την παρεμβολή υποσυστήματος τάνυσης (ελάτηριο) και υποσυστήματος αποσύμπλεξης (δίοδος ή καστάνια).

Βιβλιογραφία

[1] Amon, Ean A., Schacher Alphonse A., and Brekken Ted K.A.. “A Novel Maximum Power Point Tracking Algorithm for Ocean Wave Energy Devices” *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Σεπτέμβριος 2009, pp. 2635-2641.

[2] Centre for Renewable Energy Sources. “Ocean Energy Conversion in Europe”, Centre for Renewable Energy Sources, Greece, 2006.

[3] Craig, J. “Introduction to Robotics, Mechanics and Control”, Pearson Education, New Jersey, USA, 2005.

[4] Davliakos, I., and Papadopoulos, E., “Impedance Model-Based Control for an Electrohydraulic Stewart Platform”, *European Journal of Control*, Μάιος 2009, pp 1–18.

[5] Falnes, J., “Ocean Waves and Oscillating Systems”, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 2004.

[6] Fossen, T., “Guidance and Control of Ocean Vehicles”, John Winley & Sons, Great Britain, 1999.

[7] Fossen, T., “Marine Control Systems Guidance Navigation and Control of Ships Rigs and Underwater Vehicles”, Marine Cybernetics, Norway, 2002.

[8] Goldstein, Poole and Safko, “Classical Mechanics”, Addison Wesley, San Francisco, USA, 2002.

[9] Lewandowski, E. “The Dynamics of Marine Craft Maneuring and Seakeeping”, World Scientific, Singapore, 2004.

[10] Mavrakos, S. A., and Katsaounis, G. A., “Parametric Evaluation of the Performance Characteristics of Tightly Moored Wave Energy Converters for Several Floaters’ Geometries”, *8th European Wave and Tidal Energy Conference,* Uppsala, Sweden, 2009, pp. 1-9.

[11] Newman, J. N., “Marine Hydrodynamics”, The MIT Press, Massachusetts, USA, 1977.

[12] Papadopoulos, E., Mu B. and Frenette R. “On Modeling, Identification, and Control of a Heavy-Duty Electrohydraulic Harvester Manipulator”, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Ιούνιος 2003, pp. 178-186.

[13] Rowell, D., and Wormley, D. N., “System Dynamics: An Introduction”, Pearson Education, New Jersey, USA, 1997.

[14] Tsai, L., “Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, John Wiley & Sons, USA, 1999.

[15] "Wave Power." *Wikipedia, the free encyclopedia.* http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power (accessed August 2012).

[16] Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, “Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών”, ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., Αθήνα, Ελλάδα, 2007.

[17] "Κύματα." *AQUARET Delivering knowledge and understanding.* http://www.aquaret.com/el/-/-/4-/46- (πρόσβαση Αύγουστος 2012).

[18] Παπαδόπουλος, Α., "Σύστημα Ποσειδών." *Σύστημα Ποσειδών Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών.* http://poseidon.hcmr.gr/listview_gr.php?id=114 (πρόσβαση Αύγουστος 2012).

[19] Παπαδόπουλος, Ε. “Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα και Συστήματα”, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Ελλάδα, 1998.

[20] Παπαδόπουλος, Ε. “Ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας”, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Ελλάδα, 1999.

[21] Παπαδόπουλος, Ε., Κυριακόπουλος, Κ., “Σημειώσεις Ρομποτικής”, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, Αθήνα, Ελλάδα, 2004.

[22] Τσαγγάρης, Σ., “Μηχανική των Ρευστών”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, Ελλάδα, 2005.

A Παράρτημα: Ανάλυση σχέσεων

Χρήσιμες μαθηματικές σχέσεις

Θεώρημα μεταφοράς (Transport Theorem):

$$\frac{d}{dt}\int_V \vec{f}dV = \int_V \frac{\partial \vec{f}}{\partial t}dV + \int_S \vec{f}\left(\vec{u}\cdot\vec{n}\right)dS \qquad \text{(A-1)}$$

Θεώρημα Gauss:

$$\int_S \vec{Q}\cdot\vec{n}^{-}ds = \int_V \vec{\nabla}\cdot\vec{Q}dV \qquad \text{(A-2)}$$

Θεώρημα Gauss για εξωτερικό γινόμενο:

$$\int_S \vec{n}^{-}\times\vec{Q}ds = \int_V \vec{\nabla}\times\vec{Q}dV \qquad \text{(A-3)}$$

Σχέση εσωτερικού γινομένου τριών διανυσμάτων:

$$\left(\vec{\alpha}\cdot\vec{\beta}\right)\cdot\vec{\gamma} = \begin{bmatrix}\alpha_1\beta_1\gamma_1+\alpha_2\beta_2\gamma_1+\alpha_3\beta_3\gamma_1\\ \alpha_1\beta_1\gamma_2+\alpha_2\beta_2\gamma_2+\alpha_3\beta_3\gamma_2\\ \alpha_1\beta_1\gamma_3+\alpha_2\beta_2\gamma_3+\alpha_3\beta_3\gamma_3\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\alpha_1\gamma_1 & \alpha_2\gamma_1 & \alpha_3\gamma_1\\ \alpha_1\gamma_2 & \alpha_1\gamma_2 & \alpha_3\gamma_2\\ \alpha_1\gamma_3 & \alpha_2\gamma_3 & \alpha_3\gamma_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta_1\\ \beta_2\\ \beta_3\end{bmatrix} = \left(\vec{\gamma}\cdot\vec{\alpha}^{\mathrm{T}}\right)\cdot\vec{\beta} \qquad \text{(A-4)}$$

Ολοκλήρωση δύναμης και ροπής άνωσης

$${}^{s}\vec{B}^{CB} = -\int_{Sw}\rho_h g z\,{}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+}dS = \int_{Sw}\rho_h g z\,{}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-}dS = \int_{Vw}\rho_h g\vec{\nabla}z dV = \rho_h g\vec{\nabla}z\int_{Vw}dV = \rho_h g\left(\vec{\nabla}z\right)\forall$$

$$\begin{aligned}{}^{s}\vec{M}_B^C &= -\int_{Sw}\rho_h g z\left({}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C}\times{}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+}\right)dS = -\rho_h g\int_{Sw}{}^{s}\vec{n}_{Sw}^{-}\times\left(z\,{}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C}\right)dS = -\rho_h g\int_{Vw}\vec{\nabla}\times\left(z\,{}^{s}\vec{r}_{q,Vw}^{C}\right)dV =\\ &= -\rho_h g\int_{Vw}z\left(\vec{\nabla}\times{}^{s}\vec{r}_{q,Vw}^{C}\right)dV - \rho_h g\int_{Vw}\left(\vec{\nabla}z\right)\times{}^{s}\vec{r}_{q,Vw}^{C}dV = \vec{0} - \rho_h g\left(\vec{\nabla}z\right)\times\int_{Vw}{}^{s}\vec{r}_{q,Vw}^{C}dV =\\ &= -\rho_h g\left(\vec{\nabla}z\right)\times\left(\forall\,{}^{s}\vec{r}_{CB}^{C}\right) = -{}^{s}\vec{B}^{CB}\times{}^{s}\vec{r}_{CB}^{C} = {}^{s}\vec{r}_{CB}^{C}\times{}^{s}\vec{B}^{CB} = \rho_h g\forall\left({}^{s}y_B^C\vec{i} - {}^{s}x_B^C\vec{j}\right)\end{aligned}$$

Ο όρος $\rho_h g\int_{Vw}z\left(\vec{\nabla}\times{}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C}\right)dV$, μηδενίζεται διότι ${}^{b}\vec{r}_{q,Sw}^{C} = \text{σταθ.}$ και ${}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} = k(t)$ συνεπώς $\vec{\nabla}\times{}^{s}\vec{r}_{q,Sw}^{C} = 0$.

Δυναμική πλωτήρα για απειροστές μετατοπίσεις

Για μεγαλύτερη ευκρίνεια κρίνεται αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε ελαφρώς διαφορετικό συμβολισμό για να εκφράσουμε απειροστές ποσότητες στο χώρο και στο χρόνο. Έτσι με dx δηλώνουμε απειροστή μεταβολή της ποσότητας x στο χώρο (σε όγκο, επιφάνεια ή γραμμή) και με δx απειροστή μεταβολή της ποσότητας x στο χρόνο.

Θεωρούμε μία απειροστή μεταβολή της θέσης και του προσανατολισμού του σώματος στο χρόνο: $\delta\vec{\xi} = \left[{}^{s}\delta x_C^O, {}^{s}\delta y_C^O, {}^{s}\delta z_C^O, \delta\gamma, \delta\beta, \delta\alpha \right]^{\mathrm{T}}$. Τότε θα είναι:

$$\forall = \forall' + \delta\forall \tag{A-5}$$

$${}^{s}\vec{B}^{CB} = {}^{s}\vec{B}'^{CB} + {}^{s}\delta\vec{B} \tag{A-6}$$

$${}^{s}\vec{M}_B^C = {}^{s}\vec{M}_B'^C + {}^{s}\delta\vec{M}^C = {}^{s}\delta\vec{M}^C \tag{A-7}$$

όπου τα τονούμενα μεγέθη αναφέρονται στη χρονική στιγμή t και τα μη τονούμενα στη χρονική στιγμή t + δt.

Επιπλέον αν και μόνο αν οι περιστροφές είναι απειροελάχιστες θα ισχύει

$$\tilde{R}(\delta\theta) \simeq \tilde{1} \text{ και } \tilde{E}(\delta\theta) \simeq \tilde{1} \tag{A-8}$$

Επιπλέον μόνο γι' αυτή την περίπτωση μπορούμε να γράψουμε

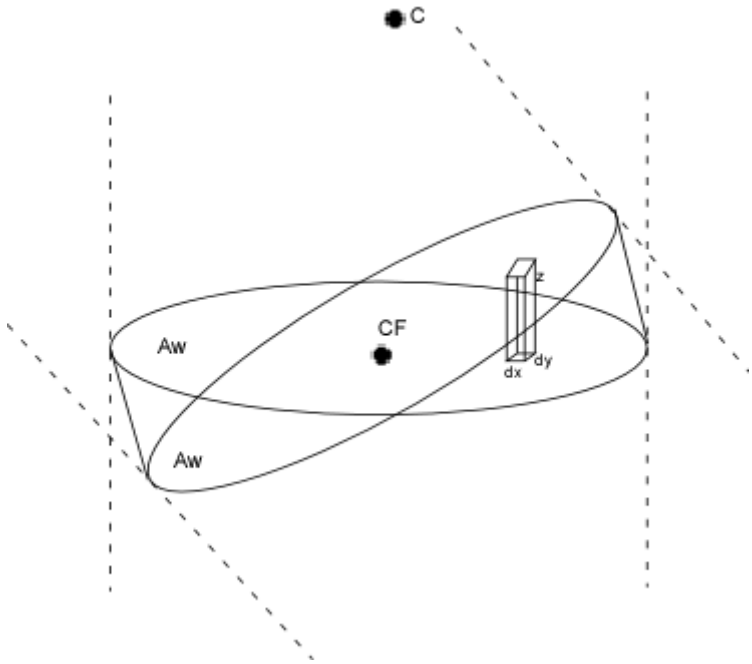
$${}^{s}\vec{\omega} \simeq \frac{\delta\vec{\theta}}{\delta t} \tag{A-9}$$

Παρόλο που οι γωνίες Euler δεν αποτελούν καρτεσιανό διάνυσμα εντούτοις για απειροστές περιστροφές ισχύει η επαλληλία και μπορεί να γραφεί:

$${}^{s}\delta\vec{r}_q^O = {}^{s}\delta\vec{r}_C^O + \delta\vec{\theta} \times {}^{s}\vec{r}_q^C \tag{A-10}$$

Όπου q ένα οποιοδήποτε σημείο του σώματος.

Σχόλιο: Για απειροελάχιστες περιστροφές θα είναι ${}^{s}\vec{r}_q^C \simeq {}^{b}\vec{r}_q^C$ και ${}^{s}\delta\vec{r}_q^C \simeq {}^{b}\delta\vec{r}_q^C = 0$.



Σχήμα Α-1. Απειροστή μετατόπιση της ισάλου επιφάνειας

Από το σχήμα Α-1 παρατηρούμε ότι:

$$d\forall = -{}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} dxdy \tag{A-11}$$

όπου το αρνητικό πρόσημο προστίθεται διότι όταν ο πλωτήρας κινείται προς τα επάνω τότε το εκτόπισμα μειώνεται.

$$\delta\forall = \int_{Aw} d\forall = -\int_{Aw} {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} dxdy \tag{A-12}$$

$${}^{s}d\vec{B} = \rho_h g d\forall \cdot \vec{k} = -\rho_h g \cdot {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} dxdy \cdot \vec{k} \tag{A-13}$$

$${}^{s}\delta\vec{B} = \int_{Aw} d\vec{B} = -\int_{Aw} \rho_h g \, {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} dxdy \cdot \vec{k} \tag{A-14}$$

$$\begin{aligned} {}^{s}d\vec{M}^{C} &= {}^{s}\vec{r}_{q}^{C} \times {}^{s}d\vec{B} = \\ &= -\rho_h g \cdot {}^{s}y_{q,Aw}^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} \cdot dxdy \cdot \vec{i} + \rho_h g \cdot {}^{s}x_{q,Aw}^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} \cdot dxdy \cdot \vec{j} \end{aligned} \tag{A-15}$$

$$\begin{aligned} {}^{s}\delta\vec{M}^{C} &= \int_{Aw} {}^{s}d\vec{M}^{C} = \\ &= -\int_{Aw} \rho_h g \cdot {}^{s}y_{q,Aw}^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} \cdot dxdy \cdot \vec{i} + \int_{Aw} \rho_h g \cdot {}^{s}x_{q,Aw}^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} \cdot dxdy \cdot \vec{j} \end{aligned} \tag{A-16}$$

Με βάση την Εξ. ((A-10), προκύπτει:

$${}^{s}\delta z_{q}^{O} = {}^{s}\delta z_{C}^{O} + {}^{s}y_{q}^{C} \cdot \delta\gamma - {}^{s}x_{q}^{C} \cdot \delta\beta \tag{A-17}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\begin{aligned} \delta\forall &= -\int_{Aw} {}^{s}\delta z_{q,Aw}^{O} dxdy = \\ &= -\int_{Aw} {}^{s}\delta z_{C}^{O} dxdy - \int_{Aw} {}^{s}y_{q,Aw}^{C} dxdy \cdot \delta\gamma + \int_{Aw} {}^{s}x_{q,Aw}^{C} dxdy \cdot \delta\beta = \\ &= -\left({}^{s}\delta z_{C}^{O} A_w + S_y^{C} \cdot \delta\gamma - S_x^{C} \cdot \delta\beta \right) \end{aligned} \tag{A-18}$$

$${}^{s}\delta\vec{B} = -\left(\rho_h g A_w \cdot {}^{s}\delta z_{C}^{O} + \rho_h g S_y^{C} \cdot \delta\gamma - \rho_h g S_x^{C} \cdot \delta\beta \right)\vec{k} \tag{A-19}$$

$$\begin{aligned} {}^{s}\delta\vec{M}^{C} &= -\int_{Aw} \rho_h g \cdot {}^{s}y_{q,Aw}^{C} \cdot \left({}^{s}\delta z_{C}^{O} + {}^{s}y_{q,Aw}^{C} \cdot \delta\gamma - {}^{s}x_{q,Aw}^{C} \cdot \delta\beta \right) \cdot dxdy \cdot \vec{i} + \\ &+ \int_{Aw} \rho_h g \cdot {}^{s}x_{q,Aw}^{C} \cdot \left({}^{s}\delta z_{C}^{O} + {}^{s}y_{q,Aw}^{C} \cdot \delta\gamma - {}^{s}x_{q,Aw}^{C} \cdot \delta\beta \right) \cdot dxdy \cdot \vec{j} \end{aligned} \quad \Leftrightarrow \tag{A-20}$$

$${}^{s}\delta\vec{M}^{C} = -\left(S_y^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{C}^{O} + S_{yy}^{C} \cdot \delta\gamma - S_{yx}^{C} \cdot \delta\beta \right) \cdot \vec{i} + \left(S_x^{C} \cdot {}^{s}\delta z_{C}^{O} + S_{xy}^{C} \cdot \delta\gamma - S_{xx}^{C} \cdot \delta\beta \right) \cdot \vec{j}$$

Συνοπτικά μπορούμε να γράψουμε:

$$\begin{bmatrix} {}^s\delta\vec{B} \\ {}^s\delta\vec{M}^C \end{bmatrix} = -\tilde{K}\cdot\begin{bmatrix} {}^s\delta x_C^O \\ {}^s\delta y_C^O \\ {}^s\delta z_C^O \\ \delta\gamma \\ \delta\beta \\ \delta\alpha \end{bmatrix} \tag{A-21}$$

όπου

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_w & \rho_h g S_y^C & -\rho_h g S_x^C & 0 \\ 0 & 0 & S_y^C & S_{yy}^C & -S_{yx}^C & 0 \\ 0 & 0 & -S_x^C & -S_{xy}^C & S_{xx}^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{A-22}$$

Σε περίπτωση που το σώμα έχει δύο άξονες συμμετρίας στο μητρώο δυσκαμψίας παραμένουν μόνο οι διαγώνιοι όροι.

Ολοκλήρωση δύναμης και ροπής ακτινοβολίας

Δύναμη ακτινοβολίας

$${}^s\vec{F}_{rd}^C = -\int_{Sw} \rho_h \frac{\partial\left(\vec{\varphi}_t\cdot{}^s\vec{v}_C^O + \vec{\varphi}_r\cdot{}^s\vec{\omega}\right)}{\partial t}\,{}^s\vec{n}_{Sw}^+ dS \tag{A-23}$$

$${}^s\vec{F}_{rd}^C = -\int_{Sw}\rho_h\left(\frac{\partial\vec{\varphi}_t}{\partial t}\cdot{}^s\vec{v}_C^O\right){}^s\vec{n}_{Sw}^+ dS - \int_{Sw}\rho_h\left(\vec{\varphi}_t\cdot{}^s\dot{\vec{v}}_C^O\right)\cdot{}^s\vec{n}_{Sw}^+ dS - \int_{Sw}\rho_h\left(\frac{\partial\vec{\varphi}_r}{\partial t}\cdot{}^s\vec{\omega}\right)\cdot{}^s\vec{n}_{Sw}^+ dS - \int_{Sw}\rho_h\left(\vec{\varphi}_r\cdot{}^s\dot{\vec{\omega}}\right)\cdot{}^s\vec{n}_{Sw}^+ dS$$

$${}^s\vec{F}_{rd}^C = -\int_{Sw}\rho_h\left({}^s\vec{n}_{Sw}^+\cdot\frac{\partial\vec{\varphi}_t^T}{\partial t}\right)dS\cdot{}^s\vec{v}_C^O - \int_{Sw}\rho_h\left({}^s\vec{n}_{Sw}^+\cdot\vec{\varphi}_t^T\right)dS\cdot{}^s\dot{\vec{v}}_C^O - \int_{Sw}\rho_h\left({}^s\vec{n}_{Sw}^+\cdot\frac{\partial\vec{\varphi}_r^T}{\partial t}\right)dS\cdot{}^s\vec{\omega} - \int_{Sw}\rho_h\left({}^s\vec{n}_{Sw}^+\cdot\vec{\varphi}_r^T\right)dS\cdot{}^s\dot{\vec{\omega}}$$

$${}^s\vec{F}_{rd}^C = -\tilde{Z}_{tt}\cdot{}^s\vec{v}_C^O - \tilde{M}_{ad,tt}\cdot{}^s\dot{\vec{v}}_C^O - \tilde{Z}_{tr}\cdot{}^s\vec{\omega} - \tilde{M}_{ad,tr}\cdot{}^s\dot{\vec{\omega}} \tag{A-24}$$

Ροπή ακτινοβολίας

$${}^s\vec{M}_{rd}^C = -\int_{Sw}\rho_h\frac{\partial\left(\vec{\varphi}_t\cdot{}^s\vec{v}_C^O + \vec{\varphi}_r\cdot{}^s\vec{\omega}\right)}{\partial t}\left({}^s\vec{r}_{Sw}^C\times{}^s\vec{n}_{Sw}^+\right)dS \tag{A-25}$$

$${}^s\vec{M}_{rd}^C = -\int_{Sw}\rho_h\left(\frac{\partial\vec{\varphi}_t}{\partial t}\cdot{}^s\vec{v}_C^O\right)\left({}^s\vec{r}_{Sw}^C\times{}^s\vec{n}_{Sw}^+\right)dS - \int_{Sw}\rho_h\left(\vec{\varphi}_t\cdot{}^s\dot{\vec{v}}_C^O\right)\left({}^s\vec{r}_{Sw}^C\times{}^s\vec{n}_{Sw}^+\right)dS - \Leftrightarrow$$

$$-\int_{Sw}\rho_h\left(\frac{\partial\vec{\varphi}_r}{\partial t}\cdot{}^s\vec{\omega}\right)\left({}^s\vec{r}_{Sw}^C\times{}^s\vec{n}_{Sw}^+\right)dS - \int_{Sw}\rho_h\left(\vec{\varphi}_r\cdot{}^s\dot{\vec{\omega}}\right)\left({}^s\vec{r}_{Sw}^C\times{}^s\vec{n}_{Sw}^+\right)dS$$

$$
\begin{aligned}
{}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} = & -\int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_t}{\partial t}^{T} \right) \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} dS - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \vec{\varphi}_t^{T} \right) \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_{C}^{O} dS - \\
& - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_r}{\partial t}^{T} \right) \cdot {}^{s}\vec{\omega}\, dS - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \vec{\varphi}_r^{T} \right) \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}}\, dS
\end{aligned}
\Leftrightarrow
$$

$$
\begin{aligned}
{}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} = & -\int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_t}{\partial t}^{T} \right) dS \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \vec{\varphi}_t^{T} \right) dS \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_{C}^{O} - \\
& - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \frac{\partial \vec{\varphi}_r}{\partial t}^{T} \right) dS \cdot {}^{s}\vec{\omega} - \int_{Sw} \rho_h \left(\left({}^{s}\vec{r}_{Sw}^{C} \times {}^{s}\vec{n}_{Sw}^{+} \right) \cdot \vec{\varphi}_r^{T} \right) dS \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}}
\end{aligned}
\Leftrightarrow
$$

$$
{}^{s}\vec{M}_{rd}^{C} = -\tilde{Z}_{rt} \cdot {}^{s}\vec{v}_{C}^{O} - \tilde{M}_{ad,rt} \cdot {}^{s}\dot{\vec{v}}_{C}^{O} - \tilde{Z}_{rr}\, {}^{s}\vec{\omega} - \tilde{M}_{ad,rr} \cdot {}^{s}\dot{\vec{\omega}} \qquad \text{(A-26)}
$$

B Παράρτημα: Κώδικες Matlab

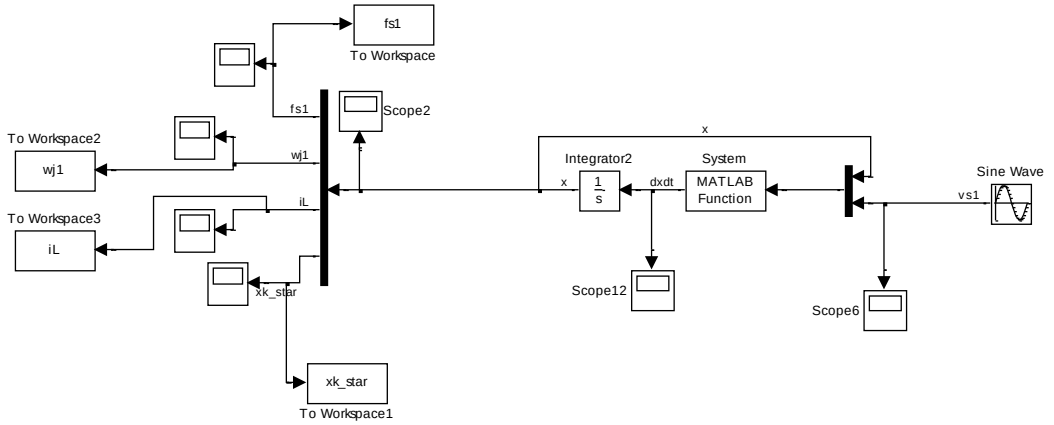
Κώδικας επίλυσης συστήματος κυματικού βαρούλκου

```
x0=[0 0 0 0]';
global rd i G ts c1 c2 Rs Rl Ls J1 J2 Jtot Vb vs wf
rd=0.06; % aktina: m
i=3; % logos metadosis
G=1.4; % stathera  gennitrias: V/(rad/s)
c1=0.001; % syntelestis aposvesis: N*m/(rad/s)
c2=0.001; % syntelestis aposvesis: N*m/(rad/s)
Rs=5;%9.5; % esoteriki antistasi: Ohm
Rl=5;%0.5; % fortio Ohm
Ls=0.0375; % epagogeas: H
J1=0.001099; %0.107134;% 0.02;% peristrofiki adraneia 1: kg*m^2
J2=0.011; % peristrofiki adraneia 2: kg*m^2;
Jtot=J1+i^2*J2;
ctot=c1+i^2*c2;
Vb=0.3; % dynamiko parembodisis: V
vs=2; % platos taxititas diegersis
wf=1.815840554; % rad/s syxnotita diegersis
Period=2*pi/wf; %s periodos diegersis
s=2.5; % sintelestis asfaleias
ts=-4*vs*(2*Jtot/Period+ctot)/(pi*rd)*s;
%
[T,X] = ode15s(@SpringDiode4,[0 10],x0);
figure(1)
plot(T,X(:,1),'r')
hold on
grid on
plot(T,X(:,2),'g')
plot(T,X(:,3),'b')
plot(T,X(:,4),'k')
```

```
function [dxdt]=SpringDiode4(t,x)
% x=[1.fk, 2.wj1, 3.iL, 4.xk_star ]
global wf vs
us=vs*sin(wf*t);
dxdt=System(x(1),x(2),x(3),x(4),us);
end
```

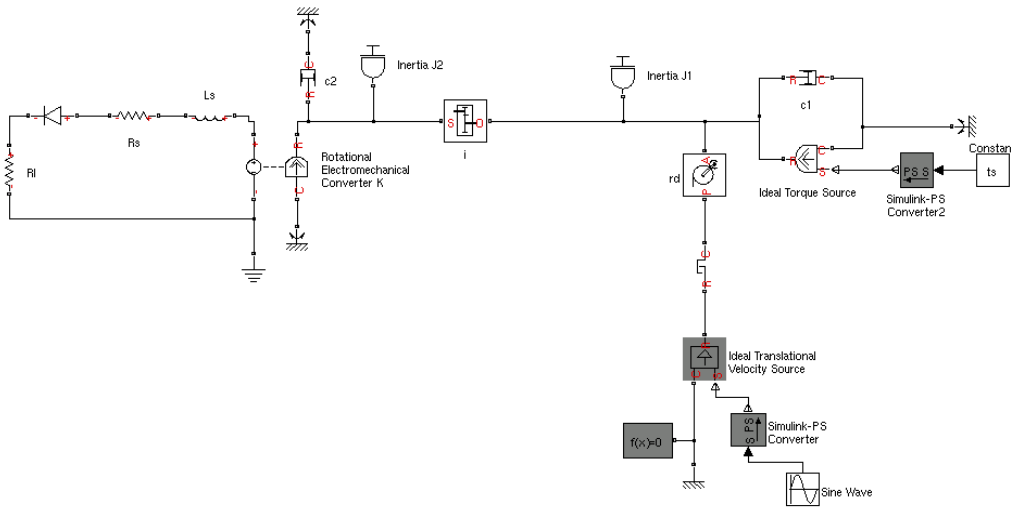
```
function dxdt=System(x1,x2,x3,x4,vs1)
global rd i G ts c1 c2 Rs Rl Ls Jtot Vb
a=10^4;
k_star=1e+06*(tanh(a*(x4-0.001))+1)/2;
c_star=150*(tanh(a*(x4-0.001))+1)/2;
if x3>0
    Rd=0;
else
    Rd=1e+08;
end
dxdt=zeros(4,1);
dxdt(1)=-k_star*rd* x2 +k_star * vs1; % dfkdt
dxdt(2)=rd/Jtot* x1-(c_star*rd^2+c1+i^2*c2)/Jtot* x2 -i*G/Jtot* x3
+ts/Jtot-rd*c_star/Jtot * vs1; %dwJ1dt
dxdt(3)=i*G/Ls* x2 -(Rs+Rd+Rl)/Ls* x3; % diLdt
dxdt(4)=-rd* x2 + vs1; % dxkdt
end
```

Δομικό διάγραμμα του συστήματος κυματικού βαρούλκου στο Simulink



Σχήμα Β-1. Δομικό διάγραμμα του συστήματος κυματικού βαρούλκου στο Simulink.

Γράφος του συστήματος του κυματικού βαρούλκου στο Simscape



Σχήμα Β-2. Γράφος του συστήματος του κυματικού βαρούλκου στο Simscape

Κώδικας επίλυσης κίνησης του πλωτήρα στο χώρο

```
global m Ib Mad Z K Fx Fy Fz Mx My Mz wf z0 rA1Cb rB1Os rA2Cb rB2Os rA3Cb
rB3Os
z0=0; % h thesi tou kentrou mazas os pros to O in arxiki xroniki stigmi
H=1; % to ypsos tou kymatos
m=1591.737363; %kg
Ib=[523.6 0 0; 0 523.6 0; 0 0 785.4]; % kgm2
Mad=[872.51324  0   0   0   -42.40706441    0; 0    872.5238    0
42.41438108 0   0; 0    0   2109.5386   0   0   0; 0    37.421654   0
221.8551483 0   0; -37.421463   0   0   0   221.8481926 0; 0    0   0   0
0   0];
Z=[83.124519    0   0   0   7.404184617 0; 0    83.126808   0   -
7.402431367    0   0; 0    0   1213.9757   0   0   0; 0    -7.5786605  0
0   0   0; 7.5786233    0   0   0   0   0; 0    0   0   0   0   0];
```

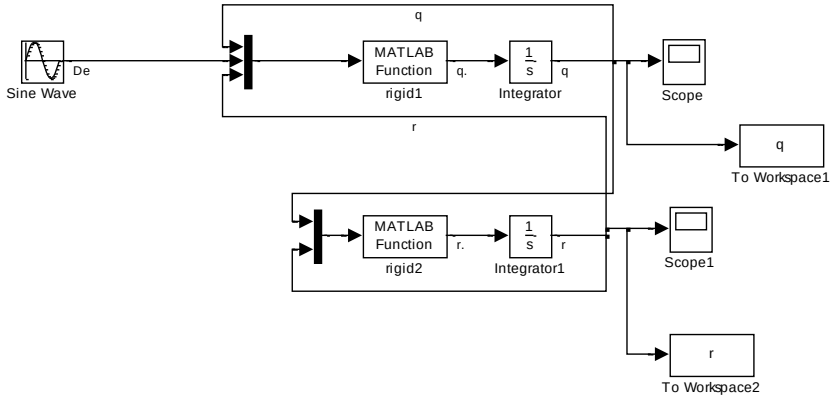
```
K=[0    0    0    0    0    0; 0    0    0    0    0    0; 0    0    31219.213    0
0    0; 0    0    0    3813.755996 0    0; 0    0    0    0    3813.756454 0; 0
0    0    0    0    0];
Fx=7189.9883*H;
Fy=0.9628337*H;
Fz=19817.953*H;
Mx=0.1973559*H;
My=657.14319*H;
Mz=0*H;
Period=3.460207612; %s
wf=2*pi/Period; % rad/s
% --- arxikes sinthikes --
q0=[0 0 0 0 0 0]';
r0=[0 0 z0 0 0 0]';
p0=[q0; r0];
%-------------------------
[T,P] = ode45(@CylindricFloater2,[0 30],p0);
```

```
function [dpdt]=CylindricFloater2(t,p)
global Fx Fy Fz Mx My Mz wf
%
dqdt=zeros(6,1);
drdt=zeros(6,1);
%
q=[p(1) p(2) p(3) p(4) p(5) p(6)]';
r=[p(7) p(8) p(9) p(10) p(11) p(12)]';
%
De=[Fx*sin(wf*t); Fy*sin(wf*t); Fz*sin(wf*t); Mx*sin(wf*t); My*sin(wf*t);
Mz*sin(wf*t)];
dqdt=rigid1(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6),De(1),De(2),De(3),De(4),De(5),D
e(6),r(1),r(2),r(3),r(4),r(5),r(6));
drdt=rigid2(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6),r(1),r(2),r(3),r(4),r(5),r(6));
dpdt=[dqdt;drdt];
%
end
```

```
function
dqdt=rigid1(q1,q2,q3,q4,q5,q6,Fx,Fy,Fz,Mx,My,Mz,r1,r2,r3,r4,r5,r6)
global m Ib Mad Z K
dqdt=zeros(6,1);
q=[q1,q2,q3,q4,q5,q6]';
r=[r1,r2,r3,r4,r5,r6]';
De=[Fx,Fy,Fz,Mx,My,Mz]';
%--------------------------
g=r(4);
b=r(5);
a=r(6);
R=[cos(a)*cos(b), cos(a)*sin(b)*sin(g)-sin(a)*cos(g),
cos(a)*sin(b)*cos(g)+ sin(a)*sin(g); sin(a)*cos(b), sin(a)*sin(b)*sin(g)+
cos(a)*cos(g), sin(a)*sin(b)*cos(g)-cos(a)*sin(g); -sin(b), cos(b)*sin(g)
cos(b)*cos(g)];
Is=R*Ib*R';
M=[m*eye(3) zeros(3);
    zeros(3) Is];
w=[q(4),q(5),q(6)]';
C=[0; 0; 0; cross(w,Is*w)];
%--------------------------
dqdt=(M+Mad)\(-Z*q-C-K*r+De);
end
function drdt=rigid2(q1,q2,q3,q4,q5,q6,r1,r2,r3,r4,r5,r6)
drdt=zeros(6,1);
q=[q1,q2,q3,q4,q5,q6]';
r=[r1,r2,r3,r4,r5,r6]';
```

```
g=r(4);
b=r(5);
a=r(6);
E=[cos(a)*cos(b), -sin(a), 0; sin(a)*cos(b), cos(a), 0; -sin(b), 0, 1];
J=[eye(3) zeros(3);
    zeros(3) E];
drdt=J\q;
end
```

Δομικό διάγραμμα των εξισώσεων κίνησης του πλωτήρα στο Simulink



Σχήμα Β-3. Δομικό διάγραμμα του πλωτήρα στο Simulink

Κώδικας συνολικού συστήματος

```
global m Ib Mad Z K Fx Fy Fz Mx My Mz wf z0 rA1Cb rB1Os rA2Cb rB2Os rA3Cb
rB3Os rA1Cs e1 rA2Cs e2 rA3Cs e3
z0=0; %m h thesi tou kentrou mazas os pros to O tin arxiki xroniki stigmi
H=1; %m to ypsos tou kymatos
m=1591.737363; %kg
Ib=[523.6 0 0; 0 523.6 0; 0 0 785.4]; % kgm2
Mad=[872.51324  0   0   0   -42.40706441    0; 0    872.5238    0
42.41438108 0   0; 0    0   2109.5386   0   0   0; 0    37.421654   0
221.8551483 0   0; -37.421463   0   0   0   221.8481926 0; 0    0   0   0
0   0];
%
Z=[83.124519    0   0   0   7.404184617 0; 0    83.126808   0   -
7.402431367    0   0; 0    0   1213.9757   0   0   0; 0    -7.5786605  0
0   0   0; 7.5786233    0   0   0   0   0; 0    0   0   0   0   0];
%
K=[0    0   0   0   0   0; 0    0   0   0   0   0; 0    0   31219.213   0
0   0; 0    0   0   3813.755996 0   0; 0    0   0   0   3813.756454 0; 0
0   0   0   0   0];
%
Fx=7189.9883*H;
Fy=0.9628337*H;
Fz=19817.953*H;
Mx=0.1973559*H;
My=657.14319*H;
Mz=0*H;
Period=3.460207612; %s
wf=2*pi/Period; % rad/s
rA1Cs=[0;0;0];% Arxikopoihsh
e1=[0;0;0];% Arxikopoihsh
```

```
rA2Cs=[0;0;0];% Arxikopoihsh
e2=[0;0;0];% Arxikopoihsh
rA3Cs=[0;0;0];% Arxikopoihsh
e3=[0;0;0];% Arxikopoihsh
x0=[0 0 0 0]';
global rd i G ts c1 c2 Rs Rl Ls J1 J2 Jtot Vb vs wf
rd=0.06; % aktina: m
i=3; % logos metadosis
G=1.4; % stathera  gennitrias: V/(rad/s)
c1=0.001; % syntelestis aposvesis: N*m/(rad/s)
c2=0.001; % syntelestis aposvesis: N*m/(rad/s)
Rs=5;%9.5; % esoteriki antistasi: Ohm
Rl=5;%0.5; % fortio Ohm
Ls=0.0375; % epagogeas: H
J1=0.001099; %0.107134;% 0.02;% peristrofiki adraneia 1: kg*m^2
J2=0.011; % peristrofiki adraneia 2: kg*m^2;
Jtot=J1+i^2*J2;
ctot=c1+i^2*c2;
Vb=0.3; % dynamiko parembodisis: V
vs=2; % platos taxititas diegersis
wf=1.815840554; % rad/s syxnotita diegersis
Period=2*pi/wf; %s periodos diegersis
s=2.5; % sintelestis asfaleias
ts=-4*vs*(2*Jtot/Period+ctot)/(pi*rd)*s;
% --- arxikes sinthikes --
q0=[0 0 0 0 0 0]';
r0=[0 0 z0 0 0 0]';
x10=[0 0 0 0]';
x20=[0 0 0 0]';
x30=[0 0 0 0]';
p0=[q0; r0; x10; x20; x30];
%-------------------------
[T,P] = ode45(@TotalSystem,[0 30],p0);
```

```
function [dpdt]=TotalSystem(t,p)
global Fx Fy Fz Mx My Mz wf
q=[p(1) p(2) p(3) p(4) p(5) p(6)]';
r=[p(7) p(8) p(9) p(10) p(11) p(12)]';
%
fk1=p(13);
wj1=p(14);
iL1=p(15);
xk_star1=p(16);
%
fk2=p(17);
wj2=p(18);
iL2=p(19);
xk_star2=p(20);
%
fk3=p(21);
wj3=p(22);
iL3=p(23);
xk_star3=p(24);
%----------------System 1-------------------------
vs1=Metasximatismos1(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6));
dx1dt=System(fk1,wj1,iL1,xk_star1,vs1);
fs1=AnastrofosMetasximatismos(fk1,wj1,iL1,xk_star1,vs1);
%----------------System 2-------------------------
vs2=Metasximatismos2(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6));
dx2dt=System(fk2,wj2,iL2,xk_star2,vs2);
fs2=AnastrofosMetasximatismos(fk2,wj2,iL2,xk_star2,vs2);
%----------------System 3-------------------------
```

```
vs3=Metasximatismos3(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6));
dx3dt=System(fk3,wj3,iL3,xk_star3,vs3);
fs3=AnastrofosMetasximatismos(fk3,wj3,iL3,xk_star3,vs3);
%-----------------CylindricFloater---------------
De(1)=Fx*sin(wf*t);
De(2)=Fy*sin(wf*t);
De(3)=Fz*sin(wf*t);
De(4)=Mx*sin(wf*t);
De(5)=My*sin(wf*t);
De(6)=Mz*sin(wf*t);
dqdt=RigidSpringDiodos1(fs1,q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6),fs2,fs3,De(1),D
e(2),De(3),De(4),De(5),De(6),r(1),r(2),r(3),r(4),r(5),r(6));
drdt=RigidSpringDiodos2(q(1),q(2),q(3),q(4),q(5),q(6),r(1),r(2),r(3),r(4)
,r(5),r(6));
%--------------------------------------------------
dpdt=[dqdt;drdt;dx1dt;dx2dt;dx3dt];
end
```

```
function vs1=Metasximatismos1(q1,q2,q3,q4,q5,q6)
global rA1Cs e1
uCOs=[q1;q2;q3];
ws=[q4;q5;q6];
uA1Os=uCOs + cross(ws,rA1Cs);
vs1=0;
vs1=dot(e1,uA1Os);
end
```

```
function vs2=Metasximatismos2(q1,q2,q3,q4,q5,q6)
global rA2Cs e2
uCOs=[q1;q2;q3];
ws=[q4;q5;q6];
uA2Os=uCOs + cross(ws,rA2Cs);
vs2=0;
vs2=dot(e2,uA2Os);
end
```

```
function vs3=Metasximatismos3(q1,q2,q3,q4,q5,q6)
global rA3Cs e3
uCOs=[q1;q2;q3];
ws=[q4;q5;q6];
uA3Os=uCOs + cross(ws,rA3Cs);
vs3=0;
vs3=dot(e3,uA3Os);
end
```

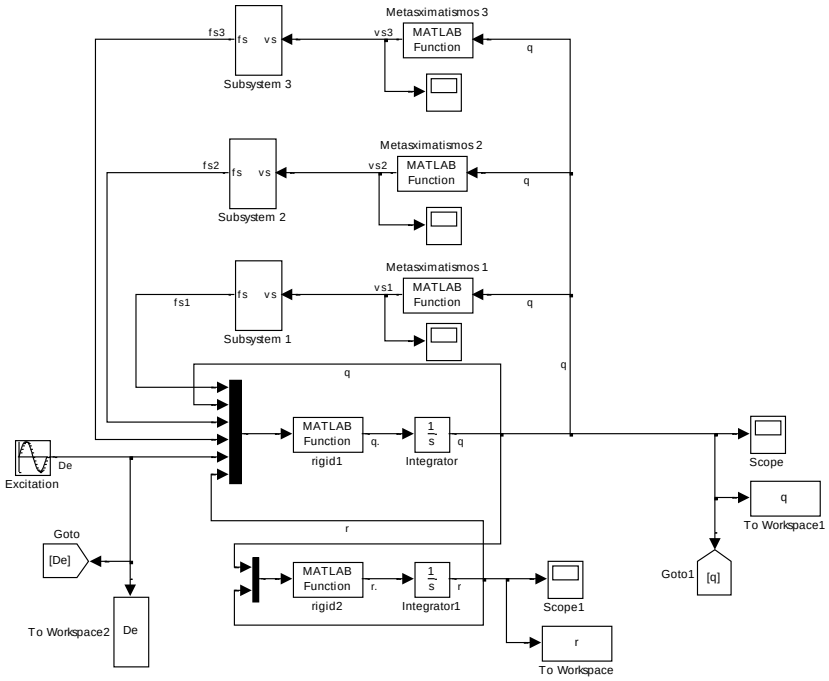
```
function fs=AnastrofosMetasximatismos(fk,wj,iL,xk_star,vs)
global rd
a=10^4;
k_star=1e+06*(tanh(a*(xk_star-0.001))+1)/2;
c_star=150*(tanh(a*(xk_star-0.001))+1)/2;
fs=fk - rd*c_star*wj + c_star*vs;
end
```

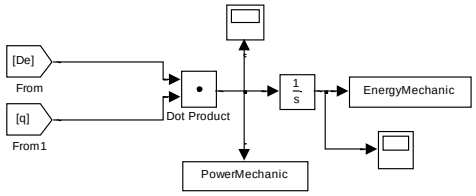
```
functiondqdt=RigidSpringDiodos1(fs1,q1,q2,q3,q4,q5,q6,fs2,fs3,Fx,Fy,Fz,Mx
,My,Mz,r1,r2,r3,r4,r5,r6)
global m Ib Mad Z K rA1Cb rB1Os rA1Cs e1 rA2Cb rB2Os rA2Cs e2 rA3Cb rB3Os
rA3Cs e3
dqdt=zeros(6,1);
q=[q1,q2,q3,q4,q5,q6]';
r=[r1,r2,r3,r4,r5,r6]';
De=[Fx,Fy,Fz,Mx,My,Mz]';
%--------------------------
g=r(4);
b=r(5);
a=r(6);
```

```
R=[cos(a)*cos(b), cos(a)*sin(b)*sin(g)-sin(a)*cos(g),
cos(a)*sin(b)*cos(g)+ sin(a)*sin(g); sin(a)*cos(b), sin(a)*sin(b)*sin(g)+
cos(a)*cos(g), sin(a)*sin(b)*cos(g)-cos(a)*sin(g); -sin(b), cos(b)*sin(g)
cos(b)*cos(g)];
Is=R*Ib*R';
M=[m*eye(3) zeros(3);
    zeros(3) Is];
w=[q(4),q(5),q(6)]';
C=[0; 0; 0; cross(w,Is*w)];
%--------------------------
%rAiCs=R*rAiCb;
rCOs=[r1;r2;r3];
%rAiOs=rCOs+rAiCs;
%AiBi=rBiOs-rAiOs;
%ei=AiBi/norm(AiBi);
%S=[ei; cross(rAiCs,ei)];
%
rA1Cs=R*rA1Cb;
rA1Os=rCOs+rA1Cs;
A1B1=rB1Os-rA1Os;
e1=A1B1/norm(A1B1);
S1=[e1; cross(rA1Cs,e1)];
%
rA2Cs=R*rA2Cb;
rA2Os=rCOs+rA2Cs;
A2B2=rB2Os-rA2Os;
e2=A2B2/norm(A2B2);
S2=[e2; cross(rA2Cs,e2)];
%
rA3Cs=R*rA3Cb;
rA3Os=rCOs+rA3Cs;
A3B3=rB3Os-rA3Os;
e3=A3B3/norm(A3B3);
S3=[e3; cross(rA3Cs,e3)];
%--------------------------
dqdt=(M+Mad)\(-Z*q-C-K*r+De+S1*fs1+S2*fs2+S3*fs3);
end
```

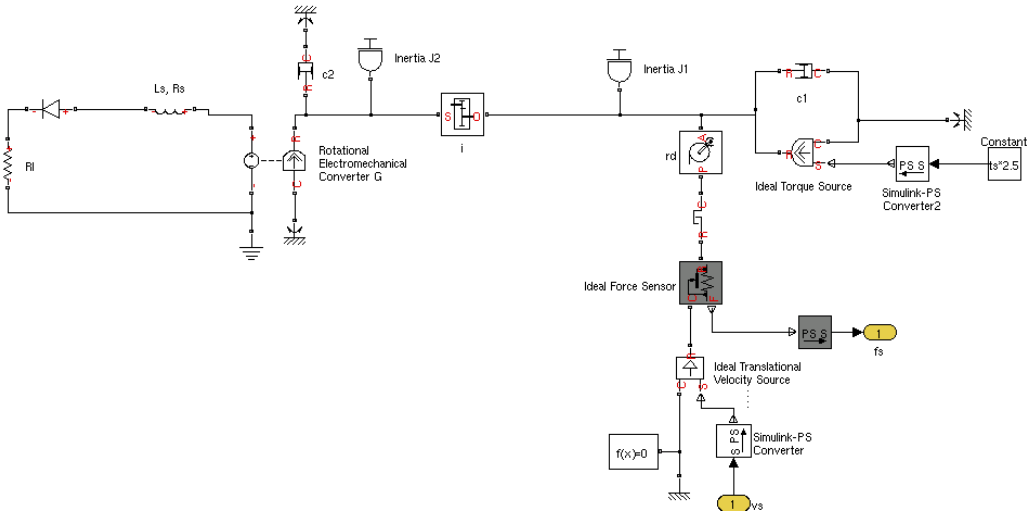
```
function drdt=RigidSpringDiodos2(q1,q2,q3,q4,q5,q6,r1,r2,r3,r4,r5,r6)
% einai idia me tin rigid2. Gia logous symmetrias ftiaxtike...
drdt=zeros(6,1);
q=[q1,q2,q3,q4,q5,q6]';
r=[r1,r2,r3,r4,r5,r6]';
g=r(4);
b=r(5);
a=r(6);
E=[cos(a)*cos(b), -sin(a), 0; sin(a)*cos(b), cos(a), 0; -sin(b), 0, 1];
J=[eye(3) zeros(3);
    zeros(3) E];
drdt=J\q;
end
```

Συνδυασμός δομικού διαγράμματος Simulink και γράφων του Simscape





Σχήμα Β-4. Συνολικό σύστημα.



Σχήμα Β-5. Subsystem 1.

Γ Παράρτημα: Περιβαλλοντικά ζητήματα

Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπεράκτιων / παράκτιων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας και του περιβάλλοντος στις θέσεις εγκατάστασης τους

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Προκαταρκτικές εργασίες	Έρευνα	Όχληση του πυθμένα λόγω της δειγματοληψίας	Δευτερεύουσες επιδράσεις μπορούν να προκύψουν από βασικές περιβαλλοντικές έρευνες παραδείγματος χάριν, εντοπισμένη απώλεια υποστρωμάτων, φυτών και ζώων στις εκβολές των ποταμών μέσω της διάτρησης και της δειγματοληψίας, όχληση των θηλαστικών από τις σεισμικές έρευνες και άλλες έρευνες με την χρήση σκαφών.			Μπορεί να απασχοληθούν τοπικοί ανάδοχοι και εμπειρογνώμονες για να διεξάγουν και να υποστηρίξουν βασικές έρευνες, π.χ. ως χειριστές σκαφών, σύμβουλοι και δύτες, κλπ.
		Ηχητική όχληση λόγω αυξημένης δραστηριότητας των σκαφών και έρευνας μέσω σόναρ/σεισμικής έρευνας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή ζημία στα είδη αλιείας	Διατάραξη της συμπεριφοράς των θαλάσσιων θηλαστικών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση
	Προετοιμασία της θέσης	Διαταραχή του πυθμένα και της υδάτινης στήλης κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της βυθοσκόπησης	Μεγάλες περιοχές των εκβολών του ποταμού μπορούν να βυθοκορηθούν επιδρώντας στη μορφολογία του πυθμένα και αυξάνοντας την θολότητα των υδάτων.	Τα φυτά και τα ζώα μπορεί να απομακρυνθούν και να επηρεαστούν άμεσα από οποιαδήποτε βυθοσκόπηση που λαμβάνει χώρα πριν από την κατασκευή	Μπορεί να επηρεαστούν τα προστατευόμενα μεταναστευτικά είδη ψαριών και τα προστατευόμενα αρπακτικά είδη πτηνών.	Προσωρινή διαταραχή σε άλλους χρήστες της θάλασσας και τη ναυσιπλοΐα ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας των σκαφών και των θαλάσσιων εργασιών.
Κατασκευή και εγκατάσταση	Μεταφορά των συσκευών κυμάτων/υποστήριξη δομών στην περιοχή	Φυσική παρουσία σκαφών και σχετικών εξοπλισμών/ δομών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Αυξημένος κίνδυνος για άλλα σκάφη λόγω της αργής ρυμούλκησης μεγάλων αντικειμένων. Οι συσκευές μπορούν επίσης να μεταφερθούν 'αιωρούμενες' γεγονός που μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τον θαλάσσιο κίνδυνο.
		Τοπικές ευκαιρίες επιχειρηματικότητας και απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιριών υποστήριξης και των υπηρεσιών
	Εγκατάσταση πρόσδεσης και υποδομής	Διαταραχή του πυθμένα και της υδάτινης στήλης μέσω της εγκατάστασης των αγκύρων	Εντοπισμένη επίδραση στην μορφολογία του πυθμένα – θα δημιουργηθούν εκχώσεις στον πυθμένα. Αυτές μπορεί στη συνέχεια να επεκταθούν σε μια ευρύτερη περιοχή. Αιώρηση εκ νέου μεμονωμένων σωματιδίων στην υδάτινη στήλη	Άμεση εντοπισμένη επίπτωση στους βιότοπους και στα είδη του πυθμένα Οι άγκυρες μπορούν να στηθούν κατά αποικίες	Υποθέτοντας ότι όλες οι σχετικές μελέτες σε βασικές γραμμές έχουν ολοκληρωθεί αποτελεσματικά, δεν αναμένεται καμία επίδραση	Απώλεια αλιείας Τα ψάρια μπορεί να συγκεντρωθούν προς άλλες διατάξεις, μακριά από τις παραδοσιακές περιοχές αλιείας Πρόσθετος κίνδυνος για την ναυσιπλοΐα
		Διαταραχή της θαλασσογραφίας και ηχορρύπανση μέσω της συσσώρευσης (εάν απαιτείται)	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Ο υποβρύχιος θόρυβος μπορεί να επηρεάσει τα είδη των θαλάσσιων θηλαστικών για σημαντικές αποστάσεις	Τα άγνωστα σκάφη και οι υπέρ κατασκευές που συνδέονται με την επιτόπου κατασκευή και εγκατάσταση θα είναι ορατά εντός της τοπικής θαλασσογραφίας για εκτεταμένες χρονικές περιόδους
		Τοπικές ευκαιρίες επιχειρηματικότητας και απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανά οικονομικά οφέλη από την α αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιριών υποστήριξης και των υπηρεσιών

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Λειτουργία και συντήρηση	Απόσπαση ενέργειας από τα κύματα	Μείωση της παράκτιας κυματικής δράσης	Επιπτώσεις στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακτογραμμή δηλ. διάβρωση και μεταφορά ιζημάτων	Πιθανές αλλαγές στους διαπαλιρροιακούς και υποπαράλιους βιότοπους	Οι προστατευόμενεςς διπαλιρροιακές δομές κοινοτήτων και αυτές αλιπέδου μπορεί να τροποποιηθούν λόγω της περιορισμένης κυματικής δράσης και των επιπτώσεων από τις θύελλες. Τα προστατευόμενα είδη που αναζητούν την τροφή τους και μεταναστεύουν εντός της υδάτινης στήλης μπορεί να βλαφτούν/ διαταραχθούν. Ο θόρυβος από την εγκατάσταση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μπορεί να έχει επιπτώσεις στη φυσιολογική συμπεριφορά των θαλασσίων θηλαστικών της περιοχής	Μειωμένο δυναμικό για παροχές αναψυχής που σχετίζονται με τα κύματα, π.χ. σερφ. Πιθανή μείωση των επιδράσεων από την παράκτια διάβρωση και της καταστροφές από θύελλες Πιθανά οφέλη για τη διαπαλιρροιακή και παράκτια υδατοκαλλιέργεια
		Δημιουργία μιας επίδρασης σκιών κυμάτων	Εντοπισμένη αυξημένη καθίζηση ιζημάτων κυρίως στις περιοχές υπόγειων κυμάτων	Πιθανή πνιγμονή στην επιφάνεια των υφιστάμενων ειδών και των βιότοπων του πυθμένα	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανές επιπτώσεις στην αγκυροβόληση, την ναυσιπλοΐα και άλλες θαλάσσιες δραστηριότητες εντός των κυμάτων
	Συνεχής φυσική παρουσία της συσκευής κυμάτων, προσδέσεων και δομών υποστήριξης στη θάλασσα	Εισαγωγή δομών στον πυθμένα, στην υδάτινη στήλη και επάνω από την επιφάνεια	Μπορεί να προκύψει καθαρισμός γύρω από τις διατάξεις στον πυθμένα	Μπορεί να παρατηρηθεί συγκέντρωση ψαριών γύρω από τις εγκαταστάσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη δραστηριοποίηση αρπακτικών. Τα πτηνά μπορεί να φωλιάσουν στις διαπεραστικές διατάξεις της επιφάνειας.	Τα προστατευόμενα θαλάσσια θηλαστικά μπορούν να προσελκυστούν προς την εγκατάσταση με την συνάθροιση πηγών τροφής	Συνεχής παρουσία διατάξεων στην θαλασσογραφία Συνεχής πρόσθετος κίνδυνος και για άλλους χρήστες του θαλάσσιου χώρου Συνεχής αποκλεισμός άλλων σκαφών συμπεριλαμβανομένων των αλιευτικών σκαφών γύρω από τις εγκαταστάσεις
	Παραγωγή και μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας	Παραγωγή Ηλεκτρο-μαγνητικών πεδίων (ΗΜΠ)	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή ηλεκτρική και μαγνητική παρέμβαση από τις κινήσεις διαφόρων ειδών ψαριών πχ καρχαρίες και σαλάχια	Τα ΗΜΠ μπορεί να έχουν επιπτώσεις στα προστατευόμενα είδη που διασχίζουν τις γειτονικές στην εγκατάσταση περιοχές	Μπορεί να επηρεαστεί η αλιεία που είναι εξαρτώμενη από ευαίσθητα είδη
		Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και εκπομπές καυσαερίων από την καύση ορυκτών καυσίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων	Θα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση		Οι τοπικές κοινότητες μπορούν να ωφεληθούν από οποιοδήποτε εισόδημα που παράγεται από την ανάπτυξη Απασχόληση για το προσωπικό συντήρησης και το διοικητικό προσωπικό Θα μετριαστούν οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή
Τυχαία γεγονότα	Περιστατικό που οδηγεί στην χημική έγχυση	Χημική ρύπανση	Τοπικές/διαδεδομένες αλλαγές στην χημεία των υδάτων και των ιζημάτων	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση		Η χημική ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ
	Περιστατικό που οδηγεί στην έγχυση πετρελαίου/ καυσίμου	Πετρελαϊκή ρύπανση	Παροδικές κηλίδες πετρελαίου στα επιφανειακά ύδατα και κίνδυνος για μακροπρόθεσμη ρύπανση του πυθμένα	Τα είδη και οι βιότοποι μπορούν να καταστραφούν και να βλαφτούν από την πετρελαϊκή ρύπανση		Η πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές,

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
			και των ακτών.			τουρίστες και ναυτικούς κλπ
	Απώλεια εξοπλισμού / δομικών συστατικών	Διαταραχή του πυθμένα από βυθιζόμενα συντρίμμια	Αλλαγές στην κατατομή του πυθμένα και στην σύνθεση των ιζημάτων	Εντοπισμένη διάσπαση στα είδη της κοίτης του ποταμού και τους βιότοπους.		Πρόσθετος κίνδυνος για την ναυσιπλοΐα, διατάραξη των ιχθυότοπων
		Διαταραχή και ρύπανση των επιφανειακών υδάτων και των ακτογραμμών από επιπλέοντα συντρίμμια	Καμία σημαντική επίπτωση	Διάσπαση στους βιότοπους των ακτογραμμών λόγω πνιγμονής και καταστροφή των ειδών μέσω της λήψης τροφής/εμπλοκής		Απώλεια του δυναμικού αναψυχής, διατάραξη των διαπαλιροιακών ιχθυότοπων
Decommissioning	Συνολική αφαίρεση της εγκατάστασης	Επαναφορά των βασικών υδρογραφικών συνθηκών	Διασπορά συσσωρευμένων ιζημάτων γύρω από την εγκατάσταση. Απώλεια καταπραϋντικών επιδράσεων γύρω από την εγκατάσταση και στα παράκτια ύδατα	Πιθανή διάσπαση στα καθιερωμένα οικοσυστήματα, που έχουν προσαρμοστεί στις –μετά την εγκατάσταση- υδρογραφικές συνθήκες	Οι προστατευόμενες διπαλιρροιακές κοινότητες και αυτές αλπέδου που είναι προσαρμοσμένες στις μετα-εγκατάστασης δομές μπορεί να τροποποιηθούν λόγω της αυξημένης κυματικής δράσης και των επιπτώσεων από τις θύελλες. Τα προστατευόμενα είδη που αναζητούν την τροφή τους και μεταναστεύουν εντός της υδάτινης στήλης μπορεί να διαταραχθούν.	Αυξημένο δυναμικό για παροχές αναψυχής που σχετίζονται με τα κύματα, π.χ. σερφ. Απώλεια οφελών που αποκομίζονται από τα κύματα στους διπαλιρροιακούς/παράκτιους ιχθυότοπους, κλπ.
		Τοπικές ευκαιρίες επιχειρηματικότητας και απασχόλησης	Καμία σημαντική προβλεπόμενη επιπρόσθετη επίπτωση	Καμία σημαντική προβλεπόμενη επιπρόσθετη επίπτωση		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιρικών υποστήριξης και των υπηρεσιών
	Αντικατάσταση της συσκευής κυμάτων	Τοπικές ευκαιρίες επιχειρηματικότητας και απασχόλησης	Καμία σημαντική προβλεπόμενη επιπρόσθετη επίπτωση	Καμία σημαντική προβλεπόμενη επιπρόσθετη επίπτωση		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιρικών υποστήριξης και των υπηρεσιών

Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παράκτιων και των επακτίων εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας και του περιβάλλοντος στις θέσεις εγκατάστασης τους

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Προκαταρκτικές εργασίες	Έρευνα	Όχληση του πυθμένα / της ακτής λόγω της δειγματοληψίας	Δευτερεύουσες επιδράσεις μπορούν να προκύψουν από βασικές περιβαλλοντικές έρευνες παραδείγματος χάριν, εντοπισμένη απώλεια υποστρωμάτων, φυτών και ζώων στις εκβολές των ποταμών μέσω της διάτρησης και της δειγματοληψίας, όχληση των θηλαστικών από τις σεισμικές έρευνες και άλλες έρευνες με την χρήση σκαφών.			Μπορεί να απασχοληθούν τοπικοί ανάδοχοι και εμπειρογνώμονες για να διεξάγουν και να υποστηρίξουν βασικές έρευνες, π.χ. ως χειριστές σκαφών, σύμβουλοι και δύτες, κλπ. Προσωρινή απώλεια των παροχών αναψυχής στην ακτογραμμή. Προσωρινή διατάραξη της αλιείας ακτογραμμής
		Ηχητική όχληση λόγω αυξανόμενης δραστηριότητας των σκαφών και έρευνας μέσω σόναρ / σεισμικής έρευνας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή ζημία στα είδη αλιείας	Τα προστατευόμενα είδη πτηνών και θαλάσσιων θηλαστικών μπορεί να μετατοπιστούν προσωρινά από την περιοχή	Ο θόρυβος και η αυξημένη δραστηριότητα μπορεί να αποτελέσουν όχληση για τους κοντινούς κατοίκους
Κατασκευή και εγκατάσταση	Προετοιμασία της θέσης	Διαταραχή του πυθμένα, της ακτής και της υδάτινης στήλης κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της βυθοσκόπησης	Περιοχές του πυθμένα μπορούν να βυθοκορηθούν, επηρεάζοντας την μορφολογία του πυθμένα και αυξάνοντας την θολότητα των υδάτων. Μπορεί να γίνει εξαγωγή μεγάλων όγκων υλικών από τις ακτογραμμές με επιπτώσεις στην τοπική τοπογραφία	Τα φυτά και τα ζώα μπορούν να απομακρυνθούν και να επηρεαστούν άμεσα από οποιαδήποτε βυθοσκόπηση στην εκβολή του ποταμού που λαμβάνει χώρα πριν από την κατασκευή	Τα προστατευόμενα είδη πτηνών μπορεί να διαταραχθούν	Προσωρινή όχληση για λοιπούς χρήστες της ακτογραμμής, χρήστες του θαλάσσιου χώρου και της ναυσιπλοΐας ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας σκαφών, των θαλάσσιων εργασιών και της προετοιμασίας των διαπαλιρροιακών εργοταξίων.
	Υποστήριξη κυματικών συσκευών /υποστήριξη δομών στην περιοχή	Φυσική παρουσία μηχανικού εξοπλισμού στην ακτογραμμή/ στον πυθμένα	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Διαταραχή των διαπαλιρροιακών και υπερπαλιρροιακών βιότοπων και ειδών	Οι προστατευόμενοι βιότοποι και είδη μπορεί να επηρεαστούν	Ο εξοπλισμός/τα μηχανήματα θα είναι ορατά για εκτεταμένες χρονικές περιόδους
		Φυσική παρουσία σκαφών και σχετικών εξοπλισμών/ δομών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή διαταραχή για τα θαλάσσια θηλαστικά	Αυξανόμενος κίνδυνος για άλλα σκάφη από την αργή ρυμούλκηση μεγάλων αντικειμένων. Οι διατάξεις μπορούν επίσης να μεταφερθούν 'αιωρούμενες' κάτι το οποίο μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τον θαλάσσιο κίνδυνο.
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των επιχειρήσεων υποστήριξης και των υπηρεσιών
	Υποστήριξη δομών εγκατάστασης	Διατάραξη στην περιοχή της ακτογραμμής	Εντοπισμένος αντίκτυπος στην παράκτια μορφολογία Αιώρηση εκ νέου μεμονωμένων σωματιδίων στην υδάτινη στήλη Όχληση του παράκτιου πυθμένα	Άμεσος εντοπισμένος αντίκτυπος στους επάκτιους βιότοπους και είδη Οι διατάξεις υποστήριξης μπορούν να γίνουν σε αποικίες	Πιθανή διαταραχή για τους προστατευμένους βιότοπους και είδη	Απώλεια των παράκτιων περιοχών για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Εντοπισμένη διαταραχή και για άλλους χρήστες

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Λειτουργία και συντήρηση	Απόσπαση ενέργειας από τα κύματα	Διατάραξη της τοπογραφίας και παραγωγή θορύβου μέσω της συσσώρευσης/γεώτρησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Τα προστατευόμενα είδη πτηνών και φώκιας μπορεί να μετακινηθούν προσωρινά από την περιοχή	Οι υπερκατασκευές που συνδέονται με την κατασκευή και την εγκατάσταση επιπόπου θα είναι ορατές εντός της τοπικής τοπογραφίας / θαλασσογραφίας
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των επιχειρήσεων υποστήριξης και των υπηρεσιών
		Μείωση της παράκτιας κυματικής δράσης	Πιθανός αντίκτυπος στις επάκτιες διεργασίες δηλ. διάβρωση και μεταφορά ιζημάτων	Πιθανές αλλαγές στους διαπαλίρροιακούς και στους υπερπαλιρροιακούς βιότοπους	Οι προστατευόμενες διπαλιρροιακές δομές κοινοτήτων και αυτές αλιπέδου μπορεί να τροποποιηθούν λόγω της αυξημένης κυματικής δράσης και των επιπτώσεων από τις θύελλες. Τα προστατευόμενα είδη που αναζητούν την τροφή τους και μεταναστεύουν εντός της υδάτινης στήλης μπορεί να βλαφτούν/διαταραχθούν	Πιθανή μείωση των επιρροών της επάκτιας διάβρωσης και των ζημιών από τις θύελλες Απώλεια οποιασδήποτε παροχής αναψυχής στην ακτογραμμή σχετικής με την δραστηριότητα των κυμάτων
	Συνεχής φυσική παρουσία στην εγκατάσταση	Εισαγωγή εγκατάστασης στην ακτογραμμή και μέσα στα παράκτια ύδατα	Μπορεί να προκύψει καθαρισμός γύρω από τις διατάξεις στον πυθμένα.	Μπορεί να παρατηρηθεί συγκέντρωση ψαριών γύρω από τις εγκαταστάσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη δραστηριοποίηση αρπακτικών. Τα πουλιά μπορεί να φωλιάσουν στις διαπεραστικές διατάξεις/κατασκευές της επιφάνειας. Η εγκατάσταση μπορεί να γίνει υπό μορφή αποικίας και να οδηγήσει σε περαιτέρω αλλαγές στο τοπικό οικοσύστημα	Τα προστατευόμενα θαλάσσια θηλαστικά μπορούν να προσελκυστούν προς την εγκατάσταση με τη συνάθροιση πηγών τροφής	Συνεχής παρουσία διατάξεων στην τοπογραφία και στη θαλασσογραφία Συνεχής απώλεια επάκτιων περιοχών για ψυχαγωγικές δραστηριότητες Συνεχής διαταραχή στις παροχές αναψυχής που σχετίζονται με τα κύματα στην ακτογραμμή και στα παράκτια ύδατα Η παράκτια αλιεία μπορεί να επηρεαστεί για μια συνεχόμενη χρονική περίοδο
	Παραγωγή ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των καυσαερίων από την καύση των ορυκτών καυσίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων	Θα περιοριστούν οι οικολογικές επιδράσεις που προκύπτουν από τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου όπως και η ατμοσφαιρική ρύπανση		Οι τοπικές κοινότητες μπορούν να ωφεληθούν από οποιοδήποτε εισόδημα που παράγεται από την ανάπτυξη Απασχόληση για το προσωπικό συντήρησης και το διοικητικό προσωπικό Θα μετριαστούν οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή
Τυχαία γεγονότα	Περιστατικό που οδηγεί στην χημική έγχυση	Χημική ρύπανση	Τοπικές/εκτεταμένες αλλαγές στην χημεία των υδάτων και των ιζημάτων	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση		Η χημική ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ
	Περιστατικό που οδηγεί στην έγχυση πετρελαίου/ καυσίμου	Πετρελαϊκή ρύπανση	Παροδικές κηλίδες πετρελαίου στα ύδατα επιφάνειας και κίνδυνος για μακροπρόθεσμη ρύπανση του πυθμένα και των ακτογραμμών.	Τα είδη και οι βιότοποι μπορούν να καταστραφούν και να βλαφτούν από την ρύπανση λόγω πετρελαίου		Η πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
	Απώλεια εξοπλισμού / δομικών συστατικών	Διαταραχή του πυθμένα από βυθιζόμενα συντρίμμια	Αλλαγές στη μορφή του πυθμένα και τη σύνθεση των ιζημάτων	Εντοπισμένη διαταραχή στα είδη του πυθμένα και τους βιότοπους.		Πρόσθετος κίνδυνος για την ναυσιπλοΐα, διατάραξη των ιχθυότοπων
		Διατάραξη και ρύπανση των επιφανειακών υδάτων και των ακτών από επιπλέοντα συντρίμμια	Καμία σημαντική επίπτωση	Διαταραχή στους βιότοπους των ακτογραμμών μέσω της πνιγμονής και καταστροφή των ειδών μέσω της λήψης τροφής/επιπλοκής		Μειωμένο δυναμικό για παροχές αναψυχής, διατάραξη της διαπαλιρροιακής και υπεράκτιας αλιείας
Παροπλισμός	Συνολική αφαίρεση της εγκατάστασης	Επαναφορά των βασικών υδρογραφικών συνθηκών	Διασπορά οποιονδήποτε συσσωρευμένων ιζημάτων γύρω από την εγκατάσταση Απώλεια οποιονδήποτε καταπραϋντικών επιπτώσεων γύρω από την εγκατάσταση και στα επάκτια ύδατα	Πιθανή διαταραχή στα οικοσυστήματα που έχουν καθιερωθεί και προσαρμοστεί στις μετα-εγκατάστασης υδρογραφικές συνθήκες	Οι προστατευόμενες διπαλιρροιακές δομές κοινοτήτων και αυτές αλιπέδου που είναι προσαρμοσμένες στις προ-εγκαταστάσεων δομές, μπορεί να τροποποιηθούν λόγω της αυξημένης κυματικής δράσης και των επιπτώσεων από τις θύελλες.	Η τοπογραφία / θαλασσογραφία επανέρχονται σχεδόν στην αρχική κατάσταση Όλες οι παροχές αναψυχής που συνδέονται με την περιοχή που επηρεάστηκε από την εγκατάσταση, είναι το πιθανότερο να αποκατασταθούν στο μεγαλύτερο ποσοστό στις προ την εγκατάσταση συνθήκες
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Κανένας σημαντικός πρόσθετος αντίκτυπος	Κανένας σημαντικός πρόσθετος αντίκτυπος		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιρικών υποστήριξης και των υπηρεσιών
	Αντικατάσταση της συσκευής κυμάτων	Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Κανένας σημαντικός πρόσθετος αντίκτυπος	Κανένας σημαντικός πρόσθετος αντίκτυπος		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιρικών υποστήριξης και των υπηρεσιών