

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ τομέας ρεύστων

Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης συστήματος πλωτήρα-εμβόλου για ανάκτηση και αποθήκευση κυματικής ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΛΟΥΚΑ ΓΩΓΟΥΛΟΥ



Επιβλέπων : Ιωάννης Αναγνωστόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ | ABSTRACT (σελ.3)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία (σελ.5)
- 1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (σελ.7)
- 1.3 Ιστορική αναδρομή (σελ.9)
- 1.4 Κυματικό δυναμικό (σελ.10)
- 1.5 Κατηγοριοποίηση συσκευών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (WECs) (σελ.11)
- 1.6 Διαδεδομένες συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (WECs) (σελ.13)
- 1.7 Συνοπτική περιγραφή της συσκευής MP^2PTO (σελ.23)

ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 2.1 Γραμμική θεωρία κύματος (σελ.27) 2.2 Αλληλεπίδραση κύματος-επιπλέοντος σώματος (σελ.31)

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

- 3.1 Περιγραφή διάταξης συσκευής (σελ.37)
- 3.2 Κίνηση πλωτήρα (σελ.38)
- 3.3 Κίνηση εμβόλου και λύση του προβλήματος ΕΗL (σελ.41)
- 3.4 Σύστημα εξισώσεων και αρχικές συνθήκες (σελ.49)

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- 4.1 Παράμετροι κύματος και συσκευής (σελ.53)
- 4.2 Μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης και διάγραμμα ροής (σελ.57)
- 4.3 Αποτελέσματα απόκρισης συσκευής για προτεινόμενα χαρακτηριστικά κύματος και συσκευής (σελ.61)
- 4.4 Αποτελέσματα απόκρισης συσκευής για παραμετροποιημένα χαρακτηριστικά πλωτήρα και εμβόλου (σελ.72)
- 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ (σελ.79)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (σελ.81)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται και αναλύεται η λειτουργία μηχανισμού εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας, ο οποίος περιγράφεται ως MP²PTO (multipump, multi-piston power take-off) και αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου Grazer [1]. Το δυναμικό κυματικής ενέργειας δύναται να καλύψει μεγάλο μέρος Ocean της παραγωγής ενέργειας και να αντικαταστήσει σημερινές συμβατικές πηγές ενέργειας. Τεχνολογίες που αποσκοπούν στην εκμετάλλευση τέτοιας μορφής ενέργειας σχεδιάζονται και αναπτύσσονται από τις τελευταίες δεκαετίες του 20° αιώνα. Ωστόσο, δεν έχει καταφέρει κάποια από αυτές τις τεχνολογίες να επικρατήσει ως προς την εμπορική αξιοποίηση της, όπως συμβαίνει με αντίστοιχες τεχνολογίες που αξιοποιούν άλλες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Εν προκειμένω, ο μηχανισμός που μελετάται εδώ έχει ως στόχο την απορρόφηση ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από διάταξη εμβολοφόρων αντλιών, η οποία συνδέεται μέσω ράβδων μεγάλου μήκους με στρώμα πλωτήρων στην επιφάνεια της θάλασσας. Η διάταξη αυτή τοποθετείται μέσα σε κατασκευή που βρίσκεται στο πυθμένα της θάλασσας ανάμεσα σε δύο δεξαμενές σε διαφορετικό βάθος, ενώ κάθε έμβολο κινείται εντός κυλίνδρου, που συνδέει τις δεξαμενές αυτές. Η ενέργεια που αποσπούν από το κύμα οι πλωτήρες μεταφέρεται στην διάταξη αντλιών και από εκεί στο εργαζόμενο ρευστό ως υδραυλική ενέργεια, η οποία στη συνεχεία είτε μετατρέπεται απευθείας από υδροστρόβιλο σε μηγανικό έργο είτε αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Στη παρούσα εργασία μοντελοποιείται απλουστευμένη διάταξη ενός πλωτήρα, μιας αντλίας και ενός εμβόλου, έτσι ώστε τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν να συνεισφέρουν σε μελλοντικές έρευνες, οι οποίες θα εξετάζουν την λειτουργία ολόκληρου του μηγανισμού. Για τη μοντελοποίηση της διάταξης αυτής αναλύεται η κατακόρυφη παλινδρόμηση του πλωτήρα, που προκαλείται από κυματισμό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, καθώς και του εμβόλου. Αφού προσδιοριστούν οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις κινήσεις αυτές, σύμφωνα με προηγούμενη ερευνητική εργασία [2], προγραμματίζονται σε γλώσσα προγραμματισμού fortran και προσομοιώνεται αριθμητικά η λειτουργία του μηχανισμού. Τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν αφορούν μόνο τη κίνηση κάθε στοιγείου της διάταξης, αλλά και τις δυνάμεις, που ασκούνται στο κάθε στοιγείο, καθώς και τις ενεργειακές αποδόσεις και υδραυλικές απώλειές του. Ως εργαζόμενο μέσο στο κλειστό δίκτυο των δυο δεξαμενών χρησιμοποιείται υδραυλικό ρευστό HFC, το οποίο έχει ως βάση το νερό, αλλά μεγαλύτερη συνεκτικότητα. Η παλινδρομική κίνηση ενός πλωτήρα αναφοράς, που μελετήθηκε, δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από την κίνηση του κυματισμού, με περίπου ίσο πλάτος ταλάντωσης και αμελητέα διαφορά φάσης. Η ενεργειακή απόδοση του μηχανισμού διάταξης ενός πλωτήρα-εμβόλου είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με το ενεργειακό δυναμικό του κυματισμού. Ωστόσο υπάρχει περιθώριο για ανάκτηση μεγαλύτερων ποσών ενέργειας από μηγανισμό πολλαπλών πλωτήρων-εμβόλων, όπως προτείνεται και από άλλες ερευνητικές εργασίες [2]. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να βοηθήσουν στην περαιτέρω και πιο διεξοδική έρευνα της λειτουργίας του μηχανισμού.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is studying and modeling a novel wave energy converter (WEC) termed as MP²PTO (Multi-pump, multi-piston power take-off), which is developed for use with Ocean Grazer [1]. Sea wave's energy could fulfill vast amounts of global energy consumption and replace conventional energy sources. However, technologies which can harvest wave energy are in early stages of development and they haven't been able to compete, in terms of efficiency and economic viability, with other renewable energy source's technologies. Moreover, none of these technologies has prevailed or reached commercial form yet. MP^2PTO device is designed to transfer a group of oscillating buoys motion, which is caused by sea wave's motion, to multi-pistons pumps via a connecting rod. Every piston pumps working fluid in a closed circuit consisting of an upper and a lower reservoir. Working fluid is stored as potential energy in upper reservoir and can be converted in electricity via hydro-turbines. The device which is modeled in the current thesis consists of a single-piston pump connected with a single buoy. This device modeling requires mathematical analysis of oscillating buoy and piston's vertical motion. Sea wave and device's parameters and characteristics are determined by previous research [2]. Programming language fortran is used for programming and numerical simulation of device's performance. Every device's component motion and acted forces are considered during numerical simulation. A water-based hydraulic fluid HFC is used as working fluid due to its high viscosity. Reference buoy's oscillatory motion doesn't differ much from sea wave's motion since their amplitudes are almost equal and they have almost zero phase difference. Device's energy efficiency isn't satisfactory, considering sea wave's energy flux. However, a device consisting of multi-piston pumps and several buoys could harvest much greater energy, as it is proposed by previous work [2]. This paper's results provide helpful information for more thorough study and analysis of MP^2PTO performance in future works.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

<u>1.1 Εισαγωγικά στοιχεία</u>

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των σύγχρονων κοινωνιών αποτελεί μείζον ζήτημα για αυτές, καθώς απαιτούνται τεράστια ποσά ενέργειας για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες στην βιομηχανική παραγωγή, τη μεταφορά αλλά και την οικιακή χρήση. Οι περισσότερες χώρες της ανεπτυγμένης δύσης επιχειρούν οργανωμένα να περιορίσουν την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Ωστόσο, πολλές ταχέως οικονομικά αναπτυσσόμενες χώρες αναμένεται να απαιτούν όλο και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών τους [3] (Σχήμα-1.1).



Σχήμα 1.1 Κατανάλωση ενέργειας, σε παγκόσμια κλίμακα, κατά τα παρελθόντα έτη και εκτιμήσεις για την ενεργειακή κατανάλωση στο άμεσο μέλλον

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάλυψη της ενεργειακή ζήτησης πραγματοποιείται, ως επί το πλείστον, από την καύση στερεών ορυκτών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης και άλλοι γαιάνθρακες, από την καύση φυσικού αερίου, από υδροηλεκτρικά έργα, από τη λειτουργία πυρηνικών αντιδραστήρων, από την καύση πετρελαίου και παραγώγων του και δευτερευόντως από την αξιοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας, όπως τα βιοκαύσιμα και κάποιες ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εκτός από την υδραυλική ενέργεια που καλύπτει ήδη μεγάλο μέρος της ενεργειακής παραγωγής μέσω των υδροηλεκτρικών έργων, αν και έχει δυνατότητα για να καλύψει πολύ μεγαλύτερο μέρος της, αξιοσημείωτο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν και άλλες ήπιες μορφές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική, οι οποίες αναμένεται στο άμεσο μέλλον να έχουν ακόμη σημαντικό ρόλο στην ηλεκτροπαραγωγή [4] (Σχήμα-1.2). Η αναμενόμενη ανάπτυξή τους οφείλεται στα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως η μη αποδέσμευση υδρογονανθράκων, διοξειδίου του άνθρακα ή τοξικών και ραδιενεργών αποβλήτων, η δυνατότητα ενεργειακής αυτάρκειας μικρών κοινωνιών, καταργώντας την ανάγκη για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, και η δυνατότητα ανεξάντλητης χρήσης τους σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Η απουσία ρύπων αποτελεί από μόνη της τεράστιο προτέρημα, καθώς η μόλυνση του πλανήτη και η συνεπαγόμενη κλιματική αλλαγή συνιστούν μείζονα ζητήματα για τις σύγχρονες κοινωνίες.



Σχήμα 1.2 Κατανομή πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών

Η κυματική ενέργεια αποτελεί μια μορφή ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας), η οποία έχει ελάχιστα αξιοποιηθεί στην μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά κυρίως δοκιμάζεται σε ερευνητικό επίπεδο. Το κυματικό ενεργειακό δυναμικό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή τεράστιων ποσών ενέργειας. Εκτιμάται ότι η αξιοποίηση σχεδόν του 50% του δυναμικού αυτού θα μπορούσε να καλύψει την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, αφού υπολογίζεται ότι το θεωρητικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας ισούται με 32PWh/yr, ενώ οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη το έτος 2008 ήταν 17PWh/yr [5]. Η ενέργεια των κυμάτων προέρχεται από την αιολική και κατά συνέπεια από την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ακτινοβολία προσδίδει θερμότητα σε στρώματα αέρα της ατμόσφαιρας δημιουργώντας ανέμους. Οι άνεμοι προκαλούν την κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας, δημιουργώντας έτσι κύματα, την ενέργεια των οποίων προσπαθούν να εκμεταλλευτούν οι συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας WEC (Wave Energy Converter).

1.2 Ιστορική αναδρομή

Από την ανακάλυψη των ορυκτών καυσίμων και την ανάπτυξή τους ως καθολική πηγή ενέργειας, οι κοινωνίες επαναπαύτηκαν στη χρήση τους χωρίς να αναζητούν άλλες πηγές ενέργειας. Τα ορυκτά καύσιμα βρίσκονταν σε αφθονία στη φύση και η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης εξαρτιόταν από αυτά. Το γεγονός, όμως, ότι τα αποθέματα τους δεν είναι ανεξάντλητα οδήγησε σε αναζήτηση και ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Η αιολική, η υδροδυναμική και η ηλιακή ενέργεια έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιηθεί ήδη έως κάποιο βαθμό, αλλά δεν μπορούν ακόμη να υποσκελίσουν την εξάρτηση των σύγχρονων κοινωνιών από τα ορυκτά καύσιμα. Η ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης και άλλων πηγών ενέργειας οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να ασχοληθούν με την κυματική ενέργεια.

Η ιστορία της κυματικής ενέργειας ξεκίνησε πολύ πριν την ανάγκη για εναλλακτικές μορφές ενέργειας, ωστόσο, η πραγματική ανάπτυξη τεχνολογιών για την μετατροπή κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική ξεκίνησε προσφάτως [6,7,8]. Στα τέλη του 18^{ου} αιώνα ο Γάλλος μηχανικός Pierre Girard είχε μια καινοτόμα ιδέα για το πώς θα εκμεταλλευτεί την ενέργεια της θάλασσας. Το 1799 ο Girard αποκτά δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια συσκευή, την οποία σχεδίασε και κατασκεύασε μαζί με τους γιους του, η οποία αιγμαλώτιζε μηγανικά την ενέργεια των κυμάτων. Συνειδητοποίησαν ότι η κυματική ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να δώσει κίνηση σε αντλίες, νερόμυλους και άλλες παρόμοιες συσκευές της εποχής αυτής. Το 1910 ο Bochaux-Praceique στο Royan στην επαρχία Bordeaux της Γαλλίας, κατασκευάζει συσκευή ταλαντευόμενης στήλης νερού για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικίας του. Τη δεκαετία του 1940 ο Ιάπωνας Yoshio Masuda, ο οποίος θεωρείται πατέρας των σύγχρονων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, πειραματίστηκε με πολλές θεωρίες και ιδέες για την κυματική ενέργεια. Πολλοί άλλοι ερευνητές καταπιάστηκαν με την κυματική ενέργεια, κατοχυρώνοντας και πατέντες για τις συσκευές τους, χωρίς ωστόσο να υπάρχει συγκεντρωμένη προσπάθεια προς αυτή την κατεύθυνση. Μόλις το 1973 η ενεργειακή κρίση ανάγκασε τους ερευνητές να στοχεύουν πιο συγκροτημένα στην ανάπτυξη συσκευών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Ερευνητές από το πανεπιστήμιου του Εδιμβούργου, το Νορβηγικό πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας, το U.S. Naval Academy, τα πανεπιστήμια του Bristol και του Lancaster, και το ΜΙΤ ένωσαν τις δυνάμεις τους για να αναπτύξουν μια καινοτόμα συσκευή που θα εκμεταλλεύεται αποδοτικά την κυματική ενέργεια. Το σημαντικότερο επίτευγμα τους ήταν

η κατασκευή της συσκευής Edinburgh Duck, η οποία βασίστηκε σε ιδέα του Stephen Salter, ερευνητή του πανεπιστημίου του Εδιμβούργου. Η συσκευή αυτή, η οποία είχε σχήμα αχλαδιού (Εικόνα-1.1), χρησιμοποιούσε την κυματική ενέργεια, περιστρέφοντας γυροσκόπια τα οποία βρίσκονταν στο εσωτερικό της. Μια ηλεκτρική γεννήτρια μετέτρεπε την κινητική ενέργεια, από την περιστροφική κίνηση των γυροσκοπίων, σε ηλεκτρική με συνολική απόδοση περίπου 90% (Εικόνα-1.2). Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερες συσκευές αναπτύσσονται για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και εντείνονται οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης του συγκεκριμένου κλάδου.



Εικόνα 1.1 Αρχικό σχέδιο της συσκευής Edinburgh Duck το 1974



Εικόνα 1.2 Σχηματική διάταζη της συσκευή Edinburgh Duck το 1979

<u>1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών εκμετάλλευσης</u> κυματικής ενέργειας

Η αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων προσφέρει πολλές ευκαιρίες στα παρόντα ενεργειακά συστήματα [6,7]. Η κυματική ενέργεια αποτελεί συγκεντρωμένη και ευρέως διαθέσιμη ενεργειακή πηγή. Βρίσκεται πλησίον πυκνοκατοικημένων περιοχών και κατανέμεται σε όλη την υδρόγειο. Η οπτική όχληση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι σχεδόν αμελητέα, ενώ το ενεργειακό δυναμικό της μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια και είναι πιο σταθερό από το αντίστοιχο της αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων κυμάτων και το κόστος κατασκευής καθιστούν δύσκολη την δοκιμή τέτοιων συσκευών σε περιβάλλον ωκεανών. Οι δοκιμές συσκευών WEC σε θαλάσσιο περιβάλλον είναι πιο σύνθετες και δαπανηρές από ότι σε εργαστηριακό περιβάλλον, όμως, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες είναι απαραίτητες. Για την εγκατάσταση τέτοιων συσκευών είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών σκαφών. Ακόμη και σε δοκιμαστικό επίπεδο, η συσκευή οφείλει να έχει σχεδιαστεί για να αντέξει ακραία καιρικά φαινόμενα και να μπορεί να λειτουργήσει σε δύσκολα περιβάλλοντα. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν αρκετά το κόστος της συσκευής. Οι ασυνήθιστες ακραίες συνθήκες στη περιοχή εγκατάστασης καθορίζουν το κατασκευαστικό σχέδιο των συσκευών, το οποίο σχετίζεται άμεσα με το κεφαλαιακό κόστος της συσκευής. Τα αποθέματα των συμβατικών πηγών ενέργειας αναμφισβήτητα θα εξαντληθούν στο προσεχές μέλλον, κάνοντας τη μετάβαση σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναπόφευκτη. Το ανεξάντλητο δυναμικό της κυματικής ενέργειας δεν πρέπει να υποτιμηθεί. Πάνω από όλα, η κυματική ενέργεια αποτελεί μια ενεργειακή πηγή, η οποία θα μπορούσε να παρέχει τεράστια πλεονεκτήματα στα ενεργειακά συστήματα.

Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας συγκεντρώνει συνοπτικά τα εξής πλεονεκτήματα, σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας [6,7,9]:

- Αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που σε αντίθεση με τα πεπερασμένα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων δεν εξαντλείται
- Είναι φιλική προς το περιβάλλον χωρίς να παράγει παραπροϊόντα όπως οι ρυπογόνοι μορφές ενέργειας
- Βρίσκεται σε αφθονία και είναι ευρέως διαθέσιμη για αξιοποίηση καθώς μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού ζει πλησίον θαλάσσιων υδάτων
- Προβλέπεται εύκολα η παραγόμενη ενέργεια καθώς εμφανίζει σταθερότητα σε αντίθεση με άλλες ΑΠΕ που βασίζονται στον άνεμο ή την έκθεση στον ήλιο
- Παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να αξιοποιηθεί

Ωστόσο, παρουσιάζει και τα εξής μειονεκτήματα :

 Το θαλάσσιο περιβάλλον και οι ακραίες συνθήκες ,που επικρατούν ενίοτε σε αυτό, ευθύνονται για το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης τέτοιων συσκευών .Σε περιπτώσεις συσκευών εγκατεστημένων σε μεγάλη απόσταση από την ακτή, το κόστος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας δυσχεραίνει περαιτέρω την επένδυση

- Μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο σε παραθαλάσσιες περιοχές, με αποτέλεσμα χώρες ή περιοχές που δεν διαθέτουν ακτογραμμή να αποκλείονται από την χρήση της ενέργειας αυτής
- Ορισμένες φορές επηρεάζει το θαλάσσιο οικοσύστημα στην περιοχή που αξιοποιείται, ιδίως όταν οι συσκευές που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο όγκο
- Η ενέργεια που απορροφάται από τα κύματα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τους, όπως το μήκος, το ύψος και η χρονική περίοδος του κύματος, με αποτέλεσμα η διακύμανση των χαρακτηριστικών αυτών να επηρεάζει το αξιοποιήσιμο δυναμικό

Παρόλο που η κυματική ενέργεια παραμένει μη ανταγωνιστική σε σχέση με τις συμβατικές πηγές, αλλά και άλλες ΑΠΕ, τα περιθώρια εξέλιξης και βελτίωσης τεχνολογιών της είναι μεγάλα.

<u>1.4 Κυματικό δυναμικό</u>

Το θεωρητικό δυναμικό της κυματικής ενέργειας παρουσιάζει μεγάλη ποικιλομορφία κατά μήκος και πλάτος της γης [5]. Όπως φαίνεται στην Εικόνα-1.3, το μεγαλύτερο δυναμικό εμφανίζεται στη νότια περιοχή του Ινδικού Ωκεανού.



Εικόνα 1.3 Κατανομή δυναμικού υπεράκτιας κυματικής ενέργειας στην επιφάνεια της υδρόγειου

Οι περιοχές που παρουσιάζουν υψηλό κυματικό δυναμικό είναι η Βόρεια και Νότια Αμερική, η Ασία και η Αυστραλία (Πίνακας 1.1) [5]. Η περιοχή της Μεσογείου και της Κεντρικής Αμερικής έχουν αρκετά χαμηλό ενεργειακό δυναμικό.

Περιοχή	Κυματική ενέργεια TWh/yr
Δυτική & Βόρεια Ευρώπη	2.800
Μεσόγειος Θάλασσα	1.300
Βόρειος Αμερική & Γροιλανδία	4.000
Κεντρική Αμερική	1.500
Νότιος Αμερική	4.600
Αφρική	3.500
Ασία	6.200
Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία & νησιά Ειρηνικού Ωκεανού	5.600
Σύνολο	29.500

Πίνακας 1.1 Θεωρητικό ενεργειακό δυναμικό κυματικής ενέργειας ανά περιοχή (στον υπολογισμό συμπεριλήφθηκαν ισχείς, ανά μέτρο μετώπου κύματος, άνω των 5 kW/m)

Οι παραπάνω εκτιμήσεις δεν περιλαμβάνουν γεωγραφικούς, τεχνικούς ή οικονομικούς περιορισμούς, με αποτέλεσμα το δυναμικό της κυματικής ενέργειας, το οποίο μπορεί ρεαλιστικά να αξιοποιηθεί, να είναι τελικά υποπολλαπλάσιο των εκτιμήσεων αυτών. Οι Pelc και Fujita (2002) εκτιμούν ότι μόνο 5,5 PWh/yr είναι ρεαλιστικά αξιοποιήσιμα, ενώ λιγότερο αισιόδοξες εκτιμήσεις, όπως του Thorpe (1999) και του Cornett (2008), υπολογίζουν το αξιοποιήσιμο δυναμικό ως περίπου 2 PWh/yr [5]. Φυσικά, αυτές οι εκτιμήσεις βασίζονται σε διαφορετικές υποθέσεις και ό,τι φαίνεται οικονομικά μη βιώσιμο σήμερα, πιθανόν να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου, εάν μειωθεί το κόστος των σύγχρονων τεχνολογιών ή εμφανιστούν νέες τεχνικές και διατάξεις.

1.5 Κατηγοριοποίηση συσκευών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (WECs)

Μια συσκευή εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας συγκροτείται από έξι βασικά στοιχεία [5], τα οποία συνεργάζονται για την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική :

 Κύριο σώμα : Το βασικό μέρος της συσκευής που αιχμαλωτίζει την κινητική η την δυναμική ενέργεια των κυμάτων (πχ. πλωτήρας).

- Βάση και θεμέλια : Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να ασφαλιστεί η συσκευή στο βυθό της θάλασσας. Αυτή περιλαμβάνει, είτε μόνιμες κατασκευές θεμελίων όπως βαρυτικές βάσεις ή θεμέλια προσκολλημένα στο βυθό, είτε συστήματα σφιχτής ή χαλαρής αγκύρωσης.
- Ανάκτηση ενέργειας : Οι διατάξεις με τις οποίες αποσπάται η μηχανική ενέργεια από τα κύματα και μετατρέπεται σε τελικά ηλεκτρική. Υπάρχουν αρκετοί τύποι τέτοιων συσκευών, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, υδραυλικών ή ηλεκτρικών που χρησιμοποιούν γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη.
- Ελεγχος: Συστήματα ελέγχου που βελτιστοποιούν την απόδοση της συσκευής υπό ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας.
- Εγκατάσταση : Η μέθοδος της τοποθέτησης της συσκευής στην τελική της θέση για να παραχθεί ενέργεια, περιλαμβάνοντας σκάφη και βοηθητικό εξοπλισμό που χρειάζεται για την πλήρη ανάπτυξη μια συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.
- Σύνδεση : Τα καλώδια και η ηλεκτρολογική υποδομή για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη συσκευή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Εναλλακτικά το νερό αντλείται στην ακτή για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια και/ή για αφαλάτωσή του.

Οι συσκευές κυματικής ενέργειας γενικά τοποθετούνται σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα (Εικόνα-1.4) [5] : στην ακτή, κοντά στην ακτή και μακριά από την ακτή. Παρακάτω παραθέτονται οι περιγραφές αλλά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έκαστων:

- Συσκευές χερσαίας ζώνης (Shoreline devices) : Όντας ενσωματωμένες σε ένα φυσικό βράχο ή σε κυματοθραύστη, έχουν το πλεονέκτημα να είναι κοντά στο ηλεκτρικό δίκτυο και να είναι σχετικά εύκολη η συντήρησή τους. Είναι λιγότερο πιθανό να πάθουν κάποια βλάβη, αφού η ενέργεια ελαττώνεται, λόγω της τριβής της με το νερό. Ωστόσο το γεγονός αυτό μειώνει την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί.
- Παράκτιες συσκευές (Near-shore devices) : Τοποθετούνται σε αρκετά ρηχά νερά, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατό για την συσκευή, να συγκρατείται από το βυθό της θάλασσας, είτε μέσω πρόσδεσης στο βυθό, είτε μέσω θεμελίων μεγάλης μάζας. Αυτό προσφέρει μια σταθερή βάση για να μπορεί να λειτουργήσει ένα ταλαντευόμενο σώμα. Τα μειονεκτήματα είναι παρόμοια με αυτά των συσκευών χερσαίας ζώνης.
- Υπεράκτιες συσκευές (Offshore devices) : Τοποθετούνται σε νερό βάθους δεκάδων μέτρων και προσδένονται στο βυθό χρησιμοποιώντας μάζες σφιχτής ή χαλαρής πρόσδεσης. Μπορούν να αποδώσουν πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας αλλά συγκεντρώνουν πολύ μεγαλύτερες δυσκολίες στην κατασκευή, τη λειτουργία και την συντήρησή τους ενώ πρέπει και να σχεδιαστούν έτσι ώστε να αντέχουν πιο ακραίες συνθήκες.



Εικόνα 1.4 Σχηματική αποτύπωση συσκευών κυματικής ενέργειας

1.6 Διαδεδομένες συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (WECs)

Οι τεχνολογίες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί μετά από χρόνια έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της κυματικής ενέργειας, ποικίλουν στα μέσα που χρησιμοποιούν και τον τρόπο που εκμεταλλεύονται την ενέργεια των κυμάτων. Τα συνηθέστερα είδη των συσκευών αυτών κατηγοριοποιούνται, ως εξής [5,13]:

Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column(OWC)) Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν την παλινδρομική κίνηση μάζας νερού, που προκαλείται από τα θαλάσσια κύματα και εισέρχεται σε θάλαμο για να συμπιέσει αέρα ,ο οποίος, στη συνέχεια, κινεί εγκατεστημένο αεριοστρόβιλο (Εικόνα-1.5). Η στήλη νερού δρα ως εμβολοφόρος αντλία στον αέρα, ωθώντας τον στο στρόβιλο, όταν τα κύματα εξυψώνουν την επιφάνεια του νερού στο θάλαμο, καθώς και έλκοντάς τον, όταν η επιφάνεια του νερού κατέρχεται. Οι συσκευές αυτές είναι από τις πρώτες, που αναπτύχθηκαν για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας. Τέτοιου είδους συσκευές έχουν εγκατασταθεί σε ακτές, συνηθέστερα σε κυματοθραύστες. Πλωτές συσκευές *ΟWC* έχουν δοκιμαστεί και είναι υπό ανάπτυξη για υπεράκτια χρήση [10]. Μερικές από τις σημαντικότερες προσπάθειες, που έγιναν για την χρήση τέτοιου είδους τεχνολογιών, είναι η μονάδα LIMPET στο *Isle of Islay* της Σκοτίας, παράγοντας 500kW, η μονάδα του Mutriku της Ισπανίας (Εικόνα-1.7), η οποία έχει δυνατότητες παραγωγής 300kW, και το Ocean Energy (OE) buoy (Εικόνα-1.6), το οποίο βρίσκεται υπό ανάπτυξη σε υπεράκτια θέση με αγκυροβόληση στο βυθό και αναμένεται να αποδίδει περίπου 500MW.



Εικόνα 1.5 Σχηματική διάταξη OWC



Εικόνα 1.6 Φωτογραφία του Ocean Energy (OE) buoy.



Εικόνα 1.7 Φωτογραφία του κυματοθραύστη στο Mutricu

Συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping devices) Οι συσκευές αυτές μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε δυναμική ενέργεια που αποθηκεύεται σε δεξαμενή, υπό τη μορφή υδραυλικού ύψους, η οποία, στη συνέχεια, χρησιμοποιείται για να κινήσει στρόβιλο τοποθετημένο σε χαμηλό ύψος (Εικόνα-1.9). Η σχεδίαση των συσκευών αυτών διευκολύνει τα κύματα, που πέφτουν στο κυματοθραύστη, να συγκεντρώνονται σε δεξαμενή πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Το νερό που αποθηκεύεται στη δεξαμενή μπορεί να παράγει ενέργεια, ρέοντας μέσα σε υδροστρόβιλο. Οι συσκευές αυτές προτείνεται να χρησιμοποιηθούν, είτε σε κυματοθραύστη για λειτουργία χερσαίας ζώνης, όπως το Seawave Slot (Εικόνα-1.8), είτε για υπεράκτια χρήση, όπως το Waveplane (Εικόνα-1.10) και το Wave Dragon (Εικόνα-1.11).



Εικόνα 1.8 Διάταξη της συσκευής Seawave Slot



Εικόνα 1.9 Σχηματική διάταξη συσκευής υπερπήδησης



Εικόνα 1.10 Φωτογραφία της συσκευής Waveplane



Εικόνα 1.11 Φωτογραφία της συσκευής Wave Dragon

Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Oscillating Wave Surge Converter) Οι συσκευές αυτές εκμεταλλεύονται την κίνηση παράκτιων κυμάτων για να μετατρέψουν την παλινδρομική κίνηση ενός βραχίονα, ο οποίος κινείται σαν εκκρεμές, σε οριζόντια κίνηση. Η οριζόντια κίνηση αξιοποιείται από εμβολοφόρο αντλία. Συνήθως αυτές οι συσκευές εδράζονται στο πυθμένα της θάλασσας, αλλά βρίσκονται ήδη υπό ανάπτυξη πλωτές συσκευές τέτοιου τύπου. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η συσκευή Oyster (Εικόνα-1.12), η οποία όντας εδρασμένη στο βυθό αντλεί το θαλασσινό νερό στη ξηρά. Στη συνέχεια το αντλούμενο θαλασσινό νερό οδηγείται σε διάταξη υδροστροβίλου. Το Langlee System και το Neptun Triton αποτελούν άλλες δυο συσκευές, που χρησιμοποιούν τέτοια τεχνοτροπία.



Εικόνα 1.12 Σχηματική διάταξη συσκευής Oyster

Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point Absorber) Οι συσκευές αυτές είναι συνήθως πλωτές και εκμεταλλεύονται τη σχετική κίνηση μεταξύ ενός ταλαντευόμενου σώματος και μιας σταθερής κατασκευής, η οποία είτε είναι αγκυροβολημένη στο πυθμένα της θάλασσας είτε έχει εγκατασταθεί στο πυθμένα, μέσω θεμελίων μεγάλης μάζας. Οι σημειακοί απορροφητές είναι συγκριτικά μικρές συσκευές και έχουν αξονοσυμμετρικό σχήμα. Επομένως, η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από την κατεύθυνση των κυμάτων. Αξιοσημείωτες συσκευές τέτοιου τύπου αποτελούν το OPT powerBUOY (Εικόνα-1.13), το CPT (Εικόνα-1.14), το OSU/CPT L10 (Εικόνα-1.15), το Finareva AquaBUOY (Εικόνα-1.16) και ο σημειακός απορροφητής του πανεπιστημίου της Uppsala (Εικόνα-1.17).



Εικόνα 1.13 Φωτογραφία του ΟΡΤ powerBUOY



Εικόνα 1.14 Σχηματική διάταζη του σημειακού απορροφητή του Columbia Power Technologies(CPT)



Εικόνα 1.15 Σχηματική διάταζη του OSU/CPT L10



Εικόνα 1.16 Σχηματική διάταζη του Finareva AquaBUOY



Εικόνα 1.17 Σχηματική διάταξη του σημειακού απορροφητή του πανεπιστημίου της Uppsala

Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged Pressure Differential devices) Οι συσκευές αυτές είναι τελείως βυθισμένες και εκμεταλλεύονται την υδροδυναμική διαφορά πίεσης, η οποία οφείλεται στην κίνηση των κυμάτων, για να προκληθεί η άνω κίνηση της συσκευής, η οποία επιστρέφει στην αρχική της θέση, όταν αυτή η διαφορά πίεσης μειώνεται. Η πιο σημαντική, τέτοιου τύπου, συσκευή είναι το ArchimedesWaveSwing (AWS) (Εικόνα-1.18), το οποίο έχει εγκατασταθεί στις ακτές της Πορτογαλίας.



Εικόνα 1.18 Σχηματική διάταξη του AWS

Συσκευές μακρόστενης μορφής (attenuator) Τέτοιου είδους συσκευές χρησιμοποιούν της κίνηση των κυμάτων για να προκαλέσουν παλινδρομική κίνηση μεταξύ των στοιχείων της, τα οποία συνδέονται αρθρωτά. Η κίνηση αυτή οδηγεί στην παραγωγή ενέργειας, συνήθως αντλώντας υγρά υψηλής πίεσης, μέσω υδραυλικού κινητήρα. Τοποθετούνται υπεράκτια και συνηθέστερα στην επιφάνεια της θάλασσας, αν και έχει προταθεί και η χρήση τέτοιου τύπου συσκευών πλήρως βυθισμένων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι τοποθετούνται παράλληλα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με αποτέλεσμα να έχουν θεωρητικά μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης ενέργειας από τις άλλες αντίστοιχες τεχνολογίες και σχετικά μικρές καταπονήσεις, λόγω της μικρής μετωπικής επιφάνειας. Η πιο αντιπροσωπευτική συσκευή τέτοιας τεχνοτροπίας είναι η συσκευή Pelamis (Εικόνα-1.19), η οποία αποτελεί την πιο εμπορική συσκευή εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Άλλες τέτοιου τύπου συσκευές είναι το Oceantech και το Dexaware.



Εικόνα 1.19 Φωτογραφία του Pelamis

Bulge wave devices Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από έναν στεγανοποιημένο εύκαμπτο σωλήνα, αγκυροβολημένο στον πυθμένα, στο πρόσθιο μέρος του οποίου δημιουργείται, από την κίνηση του κύματος, ένας όγκος νερού. Καθώς το νερό αυτό κινείται κατά μήκος του σωλήνα, αυξάνεται το μέγεθος και η ταχύτητά του και τελικά κινεί το στρόβιλο, που βρίσκεται στο τέλος του σωλήνα, για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Συσκευή τέτοιου είδους είναι το Anaconda (Εικόνα-1.20), που εφευρέθηκε από τους καθηγητές Francis Farley και Rod Rainey, χωρίς να έχει αξιοποιηθεί ακόμα εμπορικά.



Εικόνα 1.20 Αρχή λειτουργίας της συσκευής Anaconda

Συσκευές περιστρεφόμενης μάζας (Rotating mass converters) Τέτοιου τύπου συσκευές αποτελούνται από μια περιστρεφόμενη μάζα ή από γυροσκόπιο, εντός του κελύφους πλωτήρα αγκυροβολημένου στο πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα-1.21). Η περιστρεφόμενη μάζα περιστρέφεται γύρω από κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα. Χαρακτηριστική συσκευή τέτοιου τύπου αποτελεί το CorPower WEC (Εικόνα-1.22).



Εικόνα 1.21 Σχηματική διάταξη συσκευής περιστρεφόμενης μάζας



Εικόνα 1.22 Φωτογραφία της συσκευής CorPower WEC

Οι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας που αναφέρθηκαν άνωθεν ποικίλουν, ως προς τον τρόπο που λειτουργούν και το μέρος του θαλάσσιου περιβάλλοντος, που τοποθετούνται. Οι συσκευές κατηγοριοποιούνται ως προς την λειτουργία τους, σε επιπλέοντες στην επιφάνεια της θάλασσας ή/και σε βυθισμένες κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και ως προς το σημείο που τοποθετούνται, σε συσκευές χερσαίας ζώνης, σε παράκτιες συσκευές και σε υπεράκτιες συσκευές (Πίνακας 1.2).

Device Type	Features	Locations
Attenuator	surface & subsurface	Offshore
Point Absorber	surface & subsurface	Offshore, Near-shore
Overtopping devices	surface & subsurface	Offshore, Near-shore, Onshore
Oscillating Water Columns	surface & subsurface	Offshore, Near-shore, Onshore
Submerged Pressure Differential devices	subsurface only	Near-shore
Oscillating Wave Surge converters	subsurface only	Offshore, Near-shore
Bulge Wave devices	surface only	Offshore
Rotating Mass converters	surface only	Offshore

Πίνακας 1.2 Κατηγοριοποίηση συσκευών (WEC) με βάση τον τρόπο λειτουργίας και τη τοποθέτησή τους

<u>1.7 Συνοπτική περιγραφή της συσκευής MP²PTO</u>

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η λειτουργία μιας συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (WEC -Wave Energy Converter), η οποία περιγράφεται ως MP^2PTO (multi-pump, multi-piston power take-off), ava π túx θ ηκε στα πλαίσια του εγχειρήματος Ocean Grazer (Εικόνα-1.23) και έχει ήδη γίνει αντικείμενο ερευνητικών εργασιών [2,11]. Το Ocean Grazer είναι μια πλατφόρμα, που στεγάζει διάφορες συσκευές εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σχεδιάζεται να εγκατασταθεί σε βαθιά νερά του ωκεανού [1]. Η συσκευή MP²PTO αποτελεί τη βασική του τεχνολογία, αφού συντελεί στο 80% της παραγωγής ενέργειας, και μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά για κύματα ύψους από 1 έως 12 μέτρα και περιόδου από 4 έως 20 δευτερόλεπτα. Το Ocean grazer αναμένεται να αποδίδει συνδυασμένα 260 GWh/yr, αρκετά για να ηλεκτροδοτηθούν σχεδόν 70,000 νοικοκυριά. Θα κατασκευασθεί κυρίως από σκυρόδεμα για να μπορεί να προστατευθεί από τα θαλάσσια κύματα και τον άνεμο, ενώ η μεγάλη μάζα του προσδίδει σταθερότητα ακόμη και σε πολύ ακραίες καιρικές συνθήκες. Το μεγαλύτερο μέρος του θα βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των θαλάσσιων κυμάτων στην αντοχή του. Το Ocean Grazer έχει σχεδιαστεί να έχει διάμετρο 435 μέτρα και ύψος 255 μέτρα, εκ των οποίων μόνο τα 30 θα βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Εκτός από το MP²PTO στην κατασκευή θα εγκατασταθούν και άλλες συσκευές παραγωγής ενέργειας, όπως ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα [1].



Εικόνα 1.23 Φωτογραφία της κατασκευής Ocean Grazer

Το MP²PTO αποτελείται από ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων πλωτήρων, ενώ ο κάθε πλωτήρας συνδέεται με εμβολοφόρο αντλητικό σύστημα πολλών εμβόλων (multi-piston pump) (Εικόνα-1.24). Σε αντίθεση με έναν σύστημα συμβατικών σημειακών απορροφητών, το στρώμα πλωτήρων (floater's blanket), λόγω της διασύνδεσης και της εγγύτητάς τους, ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα ακτινοβολίας των κυμάτων και τις υδροδυναμικές απώλειες ενέργειας. Κάθε αντλία κινείται από ένα πλωτήρα για να μετατοπίσει μια στήλη υγρού εργαζόμενου μέσου, μεταξύ της άνω και της κάτω δεξαμενής, δημιουργώντας έτσι υδραυλικό ύψος. Κάθε πλωτήρας απορροφά ενέργεια από κάθε κύμα που εισέρχεται στη συσκευή, έτσι ώστε, αφού το κύμα εξέλθει της συσκευής, να έχει απορροφηθεί όλη η αρχική του ενέργεια. Ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται υγρό με αυξημένες λιπαντικές ιδιότητες που έχει ως βάση το νερό για να ελαχιστοποιηθεί η τριβή και η διάβρωση των εσωτερικών στοιχείων της συσκευής.



Εικόνα 1.24 Σχηματική διάταξη της συσκευής MP²PTO εντός του Ocean Grazer

Στη παρούσα εργασία θα μοντελοποιηθεί και θα μελετηθεί η λειτουργία απλοποιημένου συστήματος ενός πλωτήρα και ενός εμβόλου, που συνδέονται μεταξύ τους με καλώδιο από χάλυβα. Αρχικά θα μελετηθούν και θα αναλυθούν οι θεωρητικές αρχές. που εφαρμόζονται στην κίνηση του κύματος, του πλωτήρα και του εμβόλου. Στη συνέχεια μέσα από τις μαθηματικές σχέσεις, που θα έχουμε πρωτύτερα αναλύσει, θα καταλήξουμε σε ένα δυναμικό μοντέλο που θα περιγράφει τη συμπεριφορά του συστήματος όσον αφορά τις μετατοπίσεις , τις ταχύτητες, τις δυνάμεις και την ενέργεια, που απορροφάται για κάθε στοιχείο του συστήματος. Τελικώς, εξετάζουμε πως η αλλαγή κάποιων παραμέτρων επιδρά στη συμπεριφορά του συστήματος.

2. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

<u>2.1 Γραμμική θεωρία κύματος</u>

Τα θαλάσσια κύματα είναι ουσιαστικά οι περιοδικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού, που προκαλούνται από τον άνεμο. Όταν δημιουργούνται, τα κύματα έχουν ακανόνιστη μορφή, αλλά, αφού διανύσουν κάποια απόσταση, αποκτούν πιο ομοιόμορφο σχήμα και έχουν διακριτά χαρακτηριστικά. Τα πραγματικά θαλάσσια κύματα είναι αρκετά δύσκολο να περιγραφούν με μαθηματική σχέση λόγω της συνεχούς μεταβολής των παραμετρικών χαρακτηριστικών τους, έτσι συνηθίζεται να περιγράφονται ως απλά αρμονικά κύματα με απλές ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Τα αποτελέσματα, που εξάγονται από τα θεωρητικά αυτά κύματα, χρησιμοποιούνται για αναγωγή σε πραγματικά θαλάσσια κύματα.

Για να απλοποιηθεί η μελέτη των κυμάτων θεωρούμε ότι κινούνται σε δυο διαστάσεις (x και z άξονες). Αυτά τα κύματα ονομάζονται επίπεδα κύματα (plane waves),αφού κινούνται σε παράλληλα επίπεδα. Το αξονικό τους σύστημα ορίζεται έτσι ώστε ο x άξονας βρίσκεται στην διεύθυνση μετάδοσης του κύματος και ο z άξονας είναι κάθετος στη κίνηση του κύματος. Θεωρούμε αρχή του άξονα z τη θέση της επιφάνειας του νερού όταν βρίσκεται σε ηρεμία (το κύμα έχει μηδενικό ύψος). Ο πλωτήρας θεωρείται συμμετρικός, έτσι ώστε το σύστημα x, z αξόνων να μπορεί να περιστραφεί για να συμπίπτει με το επίπεδο της κίνησης του κύματος. Επομένως, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε δισδιάστατα τον πλωτήρα. Ο ορισμός κάποιων χαρακτηριστικών είναι απαραίτητος για να περιγραφούν τα κύματα (Εικόνα-2.1). Τα βασικότερα εξ αυτών των χαρακτηριστικών είναι το ύψος του κύματος Η, το οποίο ορίζεται ως το διπλάσιου του πλάτους της ταλάντωσης του κύματος, η περίοδός του T, το βάθος του νερού d και το μήκος του λ . Η συχνότητα f και η κυκλική συχνότητα ω περιγράφονται συναρτήσει της περιόδου του κύματος f=1/T και $\omega=2\pi/T$, αντίστοιχα. Άλλοι παράμετροι που περιγράφουν το κύμα είναι ο αριθμός κύματος k και η ταχύτητα κύματος c, που δίνονται από τις σχέσεις $k=2\pi/\lambda$ και $c=\lambda/T=\omega/k$, αντίστοιχα. Τα κύματα κατηγοριοποιούνται, ως προς την τοποθεσία που βρίσκονται, σε ρηγά, βαθιά και ενδιάμεσα ύδατα. Στη παρούσα εργασία θεωρούμε ότι τα κύματα βρίσκονται σε βαθιά ύδατα $(d/L > \frac{1}{2})$. Για να περιγράψουμε ένα θαλάσσιο κύμα χρειαζόμαστε μια έκφραση της κίνησης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο z άξονα. Η μετατόπιση της ελεύθερης επιφάνειας, στην θέση x και σε χρόνο t, περιγράφεται ως $\eta(x,t)$.



Εικόνα 2.1 Ημιτονοειδές κύμα και τα παραμετρικά χαρακτηριστικά του

Η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τη κίνηση και την πίεση του ρευστού είναι η γραμμική θεωρία κύματος, γνωστή και ως θεωρία Airy [11-16]. Θεωρούμε ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο (σταθερή πυκνότητα) και μη συνεκτικό (μηδενικό ιξώδες). Αυτές οι υποθέσεις αποτελούν απλά προσέγγιση των συνθηκών των πραγματικών κυμάτων και, για να έχουμε ακόμη πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, εισάγουμε παρακάτω μια συνεκτική δύναμη, την δύναμη αντίστασης. Επίσης, θεωρούμε τη ροή αστρόβιλη (τα στοιχεία του ρευστού δεν περιστρέφονται τοπικά). Γραμμικοποιούμε την εξίσωση, που περιγράφει την κίνηση των σωματιδίων του ρευστού, αμελώντας όρους υψηλότερης τάξης.

Αρχικά εξετάζουμε την εξίσωση συνέχειας και την εξίσωση Navier-Stokes. Για ασυμπίεστο ρευστό η εξίσωση συνέχειας έχει την μορφή

$$\nabla \cdot \dot{r} = 0, \tag{2.1}$$

όπου r το διάνυσμα των θέσεων (x,z). Χρησιμοποιούμε μια απλοποιημένη έκφραση της εξίσωσης *Navier-Stokes*, θεωρώντας ασυμπίεστο, μη συνεκτικό ρευστό και αστρόβιλη ροή, η οποία ονομάζεται εξίσωση *Euler*:

$$\rho \frac{D\dot{r}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \dot{r}}{\partial t} + (\dot{r} \cdot \nabla) \dot{r} \right) = -\nabla p + f .$$
(2.2)

Ο όρος $D\dot{r}/Dt$ είναι η παράγωγος της ταχύτητας, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ενός σωματιδίου, που κινείται μαζί με το ρευστό. Το σύμβολο p αντιπροσωπεύει την ολική πίεση του ρευστού και το σύμβολο f την εξωτερική δύναμη που ασκείται στο ρευστό, στην περίπτωσή μας η βαρυτική δύναμη επαναφοράς, $f = -\nabla \rho g z$.

<u>Δυναμικό ταχύτητας</u>

Αν το ρευστό είναι ασυμπίεστο και η ροή αστρόβιλη, η ταχύτητά του μπορεί να περιγραφεί ως το δυναμικό ταχύτητας φ:

$$\dot{r} = \nabla \varphi \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= \dot{x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} &= \dot{z} \end{cases}$$
(2.3)

Όταν το δυναμικό της ταχύτητα χρησιμοποιείται στη εξίσωση συνέχειας, καταλήγουμε στην εξίσωση Laplace:

$$\nabla \cdot \dot{r} = \nabla^2 \varphi = 0 \dots \tag{2.4}$$

<u>Γραμμική εξίσωση Bernulli</u>

Αντικαθιστούμε το δυναμικό ταχυτήτων στην εξίσωση Euler:

$$\nabla \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\left(\nabla \varphi \right)^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0, \qquad (2.5)$$

και στη συνέχεια ολοκληρώνουμε την εξίσωση για να καταλήξουμε στην εξίσωση Bernulli:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\left(\nabla \varphi\right)^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = constant .$$
(2.6)

Γραμμικοποιώντας την εξίσωση *Bernulli*, απαλείφεται ο μη γραμμικός όρος $(\nabla \varphi)^2$:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = constant \Leftrightarrow$$
(2.7)

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho g z + constant . \qquad (2.8)$$

Όταν το νερό βρίσκεται σε ηρεμία, ισχύει ότι $\partial \varphi / \partial t = 0$, $\eta(0,t) = 0$. Η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική:

$$p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho g z + p_{atm}$$

$$-\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \rightarrow \delta \text{unaming} \pi \text{iegg},$$

$$-\rho g z \rightarrow \text{udrogating} \pi \text{iegg},$$

$$p_{atm} \rightarrow \alpha \text{tmograting} \pi \text{iegg}.$$

$$(2.9)$$

Οι εξισώσεις *Laplace* και *Bernulli* πρέπει να ικανοποιούνται σε όλα τα σημεία του ρευστού, έτσι ώστε να ικανοποιούνται και οι οριακές συνθήκες.

Οριακές συνθήκες

Στην επιφάνεια του νερού έχουμε αυτό που αποκαλείται κινηματική οριακή συνθήκη, το οποίο σημαίνει ότι η ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο της επιφάνειας του νερού πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας στην ίδια διεύθυνση. Αυτό προσεγγίζεται στη σχέση:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \dot{z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$
 yia $z = \eta(x, t)$. (2.10)

Η πίεση του ρευστού στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού η(x,t) είναι σταθερή. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της πίεσης, καταλήγουμε στην οριακή συνθήκη:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \Longrightarrow \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \qquad \gamma \iota \alpha \qquad z = \eta \left(x, t \right) \,. \tag{2.11}$$

Στο πυθμένα της θάλασσας (z = -h) η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδενική, επομένως προκύπτει η οριακή συνθήκη :

$$\dot{z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$
 $\gamma \iota \alpha$ $z = -h$. (2.12)

Οι οριακές συνθήκες συνοψίζονται στις παρακάτω σχέσεις :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \qquad \gamma \iota \alpha \qquad z = \eta \left(x, t \right) \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\eta = 0$$
 $\gamma \iota \alpha$ $z = \eta (x, t)$ (2.14)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$$
 $\gamma \iota \alpha$ $z = -h$. (2.15)

Από την εξίσωση *Laplace* και τις εξισώσεις των οριακών συνθηκών προκύπτουν οι σχέσεις που περιγράφουν την κίνηση του κύματος [18]. Η κίνηση της επιφάνειας περιγράφεται ως :

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) , \qquad (2.16)$$

ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη περιγράφονται από γενικές εξισώσεις αλλά και απλοποιημένες εξισώσεις για βαθιά ύδατα, δηλαδή για μεγάλες τιμές σχετικού βάθους (d/L>1/2) (Πίνακας-2.1).

	Γενικές εξισώσεις	Βαθιά ύδατα (<i>d</i> /λ>1/2)			
Αριθμός κύματος	$k = \frac{2\pi}{\lambda}$				
Κυκλική συχνότητα	$\omega = \frac{2\pi}{T}$				
Στάθμη επιφάνειας	$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t)$				
Μήκος κύματος	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$			
Ταχύτητα κύματος	$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd)$	$c = \frac{gT}{2\pi}$			
Οριζόντια μετατόπιση σωματιδίου	$\xi_x = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$	$\xi_x = -\frac{H}{2}e^{kz}\sin(kx - \omega t)$			
Οριζόντια ταχύτητα σωματιδίου	$u_{x} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t)$	$u_x = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$			
Οριζόντια επιτάχυνση σωματιδίου	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t)$	$a_x = 2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{kz} \sin(kx - \omega t)$			
Κατακόρυφη μετατόπιση σωματιδίου	$\xi_z = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$	$\xi_z = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$			
Κατακόρυφη ταχύτητα σωματιδίου	$u_{z} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t)$	$u_z = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$			
Κατακόρυφη επιτάχυνση σωματιδίου	$a_{z} = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t)$	$a_{z} = -2H\left(\frac{\pi}{T}\right)^{2}e^{kz}\cos(kx - \omega t)$			
Πίεση	$\frac{P}{\rho g} = \eta \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} - z$	$\frac{P}{\rho g} = \eta e^{kz} - z$			

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις γραμμικής θεωρίας κύματος

2.2 Αλληλεπίδραση κύματος-επιπλέοντος σώματος

Τα κύματα και τα σώματα που επιπλέουν σε αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να ασκούνται διάφορες δυνάμεις στην επιφάνεια των σωμάτων αυτών, προκαλώντας την κίνησή τους. Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι δυνάμεις, που προκαλούν την κίνηση του σώματος στο κατακόρυφο άξονα z. Όταν μελετούνται σώματα που επιπλέουν (πλωτήρες) είναι απαραίτητο να λαμβάνουμε υπόψη τις δυνάμεις μεταξύ του ρευστού και του σώματος, όχι μόνο σε στατική κατάσταση, αλλά και σε δυναμική.

Ανωστική δύναμη

Η βασική υδροστατική δύναμη που ασκείται στον πλωτήρα είναι η δύναμη της άνωσης. Σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη κάθε αντικείμενο που βρίσκεται ολόκληρο, ή εν μέρει, βυθισμένο σε ένα ρευστό ωθείται προς την επιφάνεια του ρευστού με δύναμη ίση με το βάρος του ρευστού που εκτοπίζει. Η συνιστώσα του δύναμης της άνωσης και του βάρους του πλωτήρα καθορίζεται από το ύψος του τμήματος του πλωτήρα που βρίσκεται βυθισμένο στο ρευστό.

$$F_b - W = \rho g A_b D_b - m_b g \tag{2.17}$$

Όπου F_b είναι η δύναμη της άνωσης που ασκείται στο σώμα, W το βάρος του σώματος, ρ η πυκνότητα του ρευστού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, A_b το εμβαδό της επιφάνειας της βάσης του σώματος, D_b το ύψος του τμήματος του σώματος που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του ρευστού και m_b η μάζα του σώματος.

Όταν μελετάται η κίνηση της επιφάνειας του ρευστού, λαμβάνονται υπόψη οι υδροδυναμικές δυνάμεις διέγερσης, ακτινοβολίας, περίθλασης και αντίστασης του ρευστού. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του κύματος, αλλά και από τις διαστάσεις και την γεωμετρία του πλωτήρα.

<u>Δύναμη Αντίστασης</u>

Αρχικά, θεωρήθηκε ότι μελετάται μη συνεκτικό ρευστό, όμως, για να λάβουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, θεωρούμε ότι, λόγω της κίνησης του σώματος, του ασκείται από το ρευστό δύναμη αντίστασης (οπισθέλκουσα). Η δύναμη αυτή οφείλεται στην διαφορά πίεσης στο άνω και στο κάτω μέρος του σώματος και αντιτίθεται στη κίνησή του. Το μέτρο της δύναμης αυτής υπολογίζεται ως :

$$\left|F_{drag}\right| = \frac{1}{2}\rho C_D A_b \dot{\xi}^2,$$
 (2.18)

όπου C_D ο συντελεστής αντίστασης και $\dot{\xi}$ η ταχύτητα του σώματος. Όμως η δύναμη αυτή πρέπει να είναι συνεχώς αντίθετη στη κατεύθυνση της κίνησης του σώματος

$$F_{drag} = -\frac{1}{2}\rho C_D A_b \left| \dot{\xi} \right| \dot{\xi} \quad . \tag{2.19}$$

Η δύναμη αντίστασης της τριβής, που οφείλεται σε τάσεις λόγω συνεκτικότητας, όντας πολύ μικρότερη για αμβλεία σώματα (σφαίρα, κύλινδρος, τετραγωνικό πρίσμα κλπ.), αμελείται.

<u>Αδρανειακές δυνάμεις</u>

Οι δυνάμεις που προκύπτουν από τη θεωρία της δυναμικής ροής είναι η δύναμη Froudekrylov, η δύναμη περίθλασης και η δύναμη ακτινοβολίας [11]. Όταν ένα κύμα με διακριτά χαρακτηριστικά (ύψος, περίοδος, μήκος κύματος) συναντά ένα σώμα, το κυματικό δυναμικό που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των δυναμικών ενός προσπίπτοντος κύματος, ενός κύματος περίθλασης και ενός ακτινοβολούντος κύματος.

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi}_{I} + \boldsymbol{\Phi}_{D} + \boldsymbol{\Phi}_{R} \tag{2.20}$$

Δυναμικό ταχύτητας προσπίπτοντος κύματος Φ₁: Το προσπίπτον κύμα είναι το κύμα, που προσεγγίζει το σώμα αγνοώντας την παρουσία. Όταν η χαρακτηριστική διάσταση του σώματος είναι κατά πολύ μικρότερη του μήκους του κύματος, το πεδίο του προσπίπτοντος κύματος δεν επηρεάζεται από την παρουσία του.

Δυναμικό ταχύτητας κύματος από περίθλαση $Φ_D$: Δημιουργείται εξαιτίας της παρουσίας του σώματος. Η ροή εκτρέπεται από την πορεία της, λόγω της παρουσίας του σώματος, θεωρώντας ότι το σώμα είναι σταθερό.

Δυναμικό ταχύτητας κύματος από ακτινοβολία Φ_R: Το κύμα αυτό δημιουργείται, λόγω της κίνησης ημιβυθισμένου σώματος στο νερό. Το σώμα απωθεί ποσότητα ρευστού, που συναντάει στη διεύθυνση της κίνησής του και επομένως δημιουργείται ένα νέο κύμα, ακόμη και όταν δεν υπάρχει προσπίπτον κύμα.

<u>Δύναμη διέγερσης</u>

Η δύναμη αυτή δημιουργείται από την συμβολή του προσπίπτοντος κύματος και του κύματος περίθλασης και προκύπτει από την ολοκλήρωση του φορτίου δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του βυθισμένου τμήματος του σώματος, αγνοώντας την επίδραση του κύματος ακτινοβολίας.

$$p_{e} = -\rho \frac{\partial (\Phi_{I} + \Phi_{D})}{\partial t}$$

$$F_{e} = F_{FK} + F_{D} = -\rho \int_{S} n_{z} \frac{\partial (\Phi_{I} + \Phi_{D})}{\partial t} dS \qquad (2.21)$$

Όταν το σώμα είναι σχετικά μικρών διαστάσεων ($\pi D/\lambda < 0,5$), το μέτρο της δύναμης Froude-Krylov (F_{FK}) είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του μέτρου της δύναμης περίθλασης, με αποτέλεσμα η επίδραση του κύματος περίθλασης να αμελείται. Όταν το σώμα έχει μεγάλες διαστάσεις, ως προς το μήκος κύματος, επικρατεί η δύναμη περίθλασης.

Δύναμη ακτινοβολίας

Όταν ένα πλωτό σώμα ταλαντώνεται, χωρίς την ύπαρξη κυματισμού, παράγει κύματα, έως ότου η ταλάντωσή του αποσβήσει τελείως. Η δύναμη αυτή προκύπτει, ολοκληρώνοντας το δυναμικό της ακτινοβολούμενης ταχύτητας :

$$p_{rad} = -\rho \, \frac{\partial \Phi_R}{\partial t}$$

$$F_{rad} = -\rho \int_{S} n_z \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} dS \quad . \tag{2.22}$$

Θεωρούμε ότι ο μαθηματικός τύπος της δύναμης αυτής μπορεί να χωριστεί σε δυο όρους, έναν αδρανειακό και έναν αποσβεστικό ,οι οποίοι είναι ανάλογοι της σχετικής επιτάχυνσης και της σχετικής ταχύτητας ,αντίστοιχα:

$$F_{rad} = -m_a \left(\ddot{\xi} - \ddot{\eta} e^{-kDb} \right) - B \left(\dot{\xi} - \dot{\eta} e^{-kDb} \right) , \qquad (2.23)$$

όπου m_a η προστιθέμενη μάζα και B ο συντελεστής απόσβεσης. Η προστιθέμενη μάζα εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή προστιθέμενης μάζας C_a.

Οι τιμές των συντελεστών που αναφέρθηκαν προηγουμένως (C_D, B, C_a) καθορίζουν την αλληλεπίδραση του κύματος και του πλωτού σώματος. Η δυσκολία του υπολογισμού των τιμών αυτών, ειδικά σε περιπτώσεις περίπλοκης γεωμετρίας των σωμάτων, οδηγεί σε προσεγγιστική εκτίμησή τους.

Συντελεστής προστιθέμενης μάζας

Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα πλωτό σώμα επιταχύνουν όχι μόνο τη μάζα του σώματος, αλλά και μάζα νερού που βρίσκεται γύρω από το σώμα. Η μάζα αυτή του νερού υπολογίζεται ως:

$$m_a = C_a \rho A_b D_b. \tag{2.24}$$

Ο συντελεστής προστιθέμενης μάζας C_a εξαρτάται από την κυκλική συχνότητα, ωστόσο προσεγγιστικά θεωρούμαι ότι για βαθιά νερά ο συντελεστής αυτός εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σώματος (Πίνακας 2.2).

Body shape	Direction of motion	CA		VR
	Vertical	b/a 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 10.0	C 4 0.68 0.36 0.24 0.19 0.15 0.13 0.11 0.08	a² b

Πίνακας 2.2 Τιμές συντελεστή προστιθέμενης μάζας για πρισματικό πλωτήρα συναρτήσει του διαστάσεών του

Συντελεστής απόσβεσης κύματος

Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας και εξαρτάται από την δύναμη διέγερσης. Η εξίσωση που συνδέει τον συντελεστή απόσβεσης του κύματος με το πλάτος της δύναμης διέγερσης ονομάζεται σχέση *Haskind*:

$$B = \frac{\omega k}{4\pi\rho g^2 D(kh)} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \Gamma(\beta) \right|^2 d\beta , \qquad (2.25)$$

όπου D(kh) είναι μια μεταβλητή που σχετίζεται με το βάθος του πυθμένα της θάλασσας, Γ το πλάτος της δύναμης διέγερσης προς το πλάτος του κύματος και β η γωνία πρόσπτωσης του κύματος, ως προς τη θέση του σώματος.

$$\Gamma = \frac{\left|F_e\right|}{H/2} \tag{2.26}$$

$$D(kh) = \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \tanh kh$$
(2.27)

Για βαθιά ύδατα, δηλαδή αν το ύψος του πυθμένα της θάλασσας *h* παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, η άνωθεν εξίσωση απλοποιείται:

$$D(kh) = 1 \qquad h \to \infty \quad . \tag{2.28}$$

Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση η σχέση Haskind παίρνει την μορφή :

$$B = \frac{\omega^3}{4\pi\rho g^3} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \Gamma(\beta) \right|^2 d\beta \qquad h \to \infty .$$
 (2.29)

Αν επιπλέον θεωρήσουμε το σώμα αξονοσυμμετρικό, τότε το πλάτος της ταλάντωσης δεν εξαρτάται πλέον από την γωνία πρόσπτωσης. Θεωρώντας ξανά ότι το σώμα βρίσκεται σε βαθιά ύδατα, η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται:

ń

$$B = \frac{\omega^3}{2\rho g^3} \frac{\left|F_e\right|^2}{H/2} \qquad h \to \infty$$
(2.30)

$$B = \frac{\omega k}{2\rho g^2} \frac{\left|F_e\right|^2}{H/2} \qquad h \to \infty .$$
(2.31)

Συντελεστής δύναμης αντίστασης

Ο υπολογισμός αυτού του συντελεστή προϋποθέτει τον υπολογισμό του αριθμού Keulegan-Carpenter. Ο αριθμός KC δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$KC = \frac{u_a T}{D} . (2.32)$$

Ενώ με την υπόθεση ότι το σώμα βρίσκεται σε βαθιά ύδατα ο μαθηματικός τύπος του KC απλοποιείται:
$$KC = 2\pi \frac{H/2}{D} = \pi \frac{H}{D}$$
 (2.33)

Όπου u_a είναι το πλάτος της ταχύτητας του ρευστού και D η χαρακτηριστική διάσταση του σώματος. Γνωρίζοντας την τιμή του αριθμό KC και την τιμή της σχετικής τραχύτητας των τοιχωμάτων του σώματος, βρίσκουμε γραφικά τιμές για το συντελεστή αντίστασης σε γραφήματα που έχουν σχεδιαστεί από πειραματικές τιμές του συντελεστή αντίστασης C_D για διάφορες γεωμετρίες του σώματος. Κάνοντας την παραδοχή ότι η ροή είναι μόνιμη, δηλαδή ότι οι ιδιότητες του ρευστού δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου, ο συντελεστής C_D υπολογίζεται προσεγγιστικά (Πίνακας 2.3).



Πίνακας 2.3 Τιμές συντελεστή αντίστασης σωμάτων συνήθων γεωμετριών για μόνιμη ροή

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

3.1 Περιγραφή διάταξης συσκευής

Η συσκευή *MP*²*PTO* (*multi-pump multi-piston power take off*) αποτελεί συσκευή ανάκτησης και αποθήκευσης κυματικής ενέργειας (*WEC*) χρησιμοποιώντας σύστημα πολλαπλών εμβολοφόρων αντλιών [1]. Πλωτήρες απορροφά ενέργεια από τους θαλάσσιους κυματισμούς και κινούν, μέσω της κατακόρυφης παλινδρομικής κίνησής τους, σύστημα εμβολοφόρων αντλιών. Τα έμβολα εκτελούν και αυτά παλινδρομική κίνηση και αντλούν εργαζόμενο μέσο (υδραυλικό ρευστό με βάση το νερό) από μια δεξαμενή ,που βρίσκεται στο κάτω μέρος του *Ocean Grazer*, σε μια άλλη ,που βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο του (Εικόνα-3.1). Το εργαζόμενο μέσο αντλείται, κατά την άνω κίνηση των εμβόλων μέσα σε κύλινδρο, που συνδέει τις δύο δεξαμενές, ενώ, όταν τα έμβολα κινούνται προς τα κάτω, τα πτερύγια των εμβόλων ανοίγουν για να μην δημιουργείται ροή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Στην παρούσα εργασία αναλύεται και μοντελοποιείται απλοποιημένη διάταξη, ενός πλωτήρα συνδεόμενου με αντλία ενός εμβόλου (Εικόνα-3.2), σύμφωνα με προηγούμενη ερευνητική εργασία [2].



Εικόνα 3.1 Σχηματική διάταξη (a) συσκευής MP²PTO και (b) αντλητικής διάταξης πολλαπλών εμβόλων



Εικόνα 3.2 Σχηματική διάταξη πλωτήρα-αντλίας

3.2 Κίνηση πλωτήρα

Η μοντελοποίηση του συστήματος βασίζεται στην ανάλυση κυρίως των δυνάμεων που ασκούνται στο πλωτήρα και στο έμβολο [2]. Η αλληλεπίδραση που έχει η κίνηση του πλωτήρα με αυτή του εμβόλου επηρεάζει την συμπεριφορά του συστήματος. Η μετατόπιση της στάθμης της επιφάνειας της θάλασσας (Πίνακας-2.1), με μηδενικό σημείο της στάθμη της σε κατάσταση ηρεμίας

$$z_w = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) \tag{3.1}$$

Θεωρώντας ότι οριζόντια θέση του σημείου που μελετάται δεν μεταβάλλεται (x=0) και προσθέτοντας αρχική φάση π (rad) καταλήγουμε στις εξισώσεις που περιγράφουν την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση της στάθμης της επιφάνειας του νερού :

$$z_{W} = -\frac{H}{2}\cos(\omega t)$$

$$\dot{z}_{W} = \frac{\omega H}{2}\sin(\omega t)$$

$$\ddot{z}_{W} = \frac{\omega^{2} H}{2}\cos(\omega t)$$
(3.2)

Αν η κατακόρυφη μετατόπιση του μέσου του πλωτήρα είναι z_b και το ύψος του πλωτήρα H_b, τότε το ύψος του τμήματος του πλωτήρα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ορίζεται ως

$$D_b = z_W - z_b + \frac{1}{2} H_b \,. \tag{3.3}$$

Η προστιθέμενη μάζα νερού m_a εξαρτάται από το ύψος του τμήματος του πλωτήρα που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού D_b.

$$m_{a} = \begin{cases} 0 , D_{b} \leq 0 \\ C_{a}\rho A_{b}D_{b} , 0 < D_{b} \leq H_{b} \\ C_{a}\rho A_{b}H_{b} , D_{b} > H_{b} \end{cases}$$
(3.4)

Αντίστοιχα από το ύψος D_b εξαρτάται και η δύναμη της άνωσης

$$F_{b} = \begin{cases} 0 & , D_{b} \leq 0 \\ \rho g A_{b} D_{b} & , 0 < D_{b} \leq H_{b} \\ \rho g A_{b} H_{b} & , D_{b} > H_{b} \end{cases}$$
(3.5)

Η πίεση που ασκείται στο κάτω μέρος του πλωτήρα για βαθιά ύδατα (Πίνακας-2.1) περιγράφεται από την μαθηματική σχέση :

$$P = F_b - \rho g A_b \cdot z_b + \rho g A_b \cdot z_W \cdot e^{-kD_b}.$$
(3.6)

Επίσης στο πλωτήρα ασκείται η δύναμη αντίστασης του ρευστού και η δύναμη ακτινοβολίας του κύματος, όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα (Εξ.-2.19,2.23):

$$F_D = -\frac{1}{2}\rho C_D A_b \left| \dot{z}_b \right| \tag{3.7}$$

$$F_{r} = -m_{a} \left(\ddot{z}_{b} - \ddot{z}_{W} e^{-kD_{b}} \right) - B \left(\dot{z}_{b} - \dot{z}_{W} e^{-kD_{b}} \right) .$$
(3.8)

Από τους εκθετικούς όρους της πίεσης (Εξ.-3.6) και της δύναμης ακτινοβολίας (Εξ.-3.8) προκύπτει η δύναμη διέγερσης, που ασκεί το ρευστό στον πλωτήρα:

$$F_{e} = \left(m_{a} \ddot{z}_{W} + B \dot{z}_{W} + \rho g A_{b} z_{W}\right) e^{-kD_{b}} .$$
(3.9)

Εκτός από τα χαρακτηριστικά του κύματος και τις διαστάσεις του πλωτήρα για να υπολογισθούν οι παραπάνω δυνάμεις πρέπει αρχικά να προσδιοριστούν οι τιμές του συντελεστή αντίστασης C_D , ο συντελεστής απόσβεσης B και ο συντελεστής προστιθέμενης μάζας C_a που καθορίζει την τιμή της μάζας m_a . Οι συντελεστές C_D και C_a υπολογίζονται προσεγγιστικά, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (Πίνακας-2.2, Πίνακας-2.3). Για να εκτιμηθεί ο συντελεστής απόσβεσης υπολογίζουμε το πλάτος της δύναμης διέγερσης F_E [8]. Για τον υπολογισμό της αξιοποιούμε την εξής τριγωνομετρική ιδιότητα :

$$\begin{cases} f(x) = a\sin(x) + b\cos(x) \\ = \sqrt{a^2 + b^2} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \sin(x) + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \cos(x) \right) \\ = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(x + \arctan(b/a)) \end{cases}$$

Εφαρμόζοντας την ιδιότητα αυτή στην εξίσωση της δύναμης διέγερσης (Εξ.-3.9) καταλήγουμε στη σχέση του πλάτους της:

$$F_{e} = \frac{H}{2} e^{-kD_{b}} \sqrt{\left(\omega^{2}m_{a} - \rho g A_{b}\right)^{2} + \left(\omega B\right)^{2}} \sin\left(\omega t + \arctan\left(\frac{\omega^{2}m_{a} - \rho g A_{b}}{\omega B}\right)\right) \Leftrightarrow \qquad (3.10)$$

$$F_{E} = \frac{H}{2} e^{-kD_{b}} \sqrt{\left(\omega^{2}m_{a} - \rho g A_{b}\right)^{2} + \left(\omega B\right)^{2}} \quad . \tag{3.11}$$

Όπως ορίστηκε προηγουμένως, η σχέση ,που συνδέει το πλάτος της δύναμης διέγερσης με τον συντελεστή απόσβεσης για βαθιά ύδατα, είναι η εξής :

$$B = \frac{\omega k}{2\rho g^2} \frac{F_E}{H/2} . \tag{3.12}$$

Από την λύση των εξισώσεων, που περιγράφουν το πλάτος της δύναμης διέγερσης F_E και τον συντελεστή απόσβεσης του κύματος B (Εξ.-3.11,3.12), προκύπτουν τα αντίστοιχα μεγέθη.

Στον πλωτήρα ασκούνται δυνάμεις από το κύμα, όπως αναλύθηκαν προηγουμένως, αλλά και από την ράβδου που τον συνδέει με το έμβολο. Η δύναμη, την οποία ασκεί η ράβδος στον πλωτήρα χωρίζεται σε δυο συνιστώσες, την δύναμη ελαστικότητας και την δύναμη απόσβεσης :

$$F_{rod} = -F_{K} - F_{C} = -K_{rod} \left(z_{b} - z_{p} \right) - C_{rod} \left(\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p} \right) , \qquad (3.13)$$

όπου K_{rod} είναι η σταθερά ελαστικότητας της ράβδου, C_{rod} ο συντελεστής απόσβεσης, z_b και z_p οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του πλωτήρα και του εμβόλου αντίστοιχα, \dot{z}_b και \dot{z}_p οι κατακόρυφες ταχύτητές τους αντίστοιχα. Η σταθερά ελαστικότητας της ράβδου K_{rod} εκφράζεται σύμφωνα με το νόμο του Hooke $(K_{rod}=F_K/(z_b-z_p))$ και υπολογίζεται από την εξίσωση του μέτρου ελαστικότητας E_r (Young modulus):

$$E_r = \frac{F_K / A_r}{\left(z_b - z_p\right) / L_r} \iff (3.14)$$

$$K_{rod} = E_r A_r / L_r \qquad , \tag{3.15}$$

όπου L_r είναι το μήκος της ράβδου και A_r το εμβαδό της επιφάνειας διατομής της ράβδου. Γνωρίζοντας τις τιμές του μήκους της ράβδου L_r , της μάζας της ράβδου m_r και της πυκνότητάς της ρ_r , υπολογίζουμε και το εμβαδό A_r ($A_r = m_r / \rho_r L_r$). Ο συντελεστής απόσβεσης C_{rod} δίνεται από τον κάτωθι τύπο :

$$C_{rod} = 2\zeta \sqrt{K_{rod} m_1 m_2 / (m_1 + m_2)} , \qquad (3.16)$$

όπου ζ είναι ο λόγος απόσβεσης της ράβδου, m₁ η μάζα, που επιταχύνει το άνω άκρο της ράβδου, και m₂ η μάζα, που επιταχύνει το κάτω άκρο της ράβδου. Η μάζα m₁ εκφράζει το άθροισμα της μάζας του πλωτήρα m_b και την προστιθέμενη μάζα νερού m_a (m₁ = m_b + m_a). Χρησιμοποιούμε τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για να συνδέσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στον πλωτήρα με την επιτάχυνσή του:

$$\Sigma F = m_b \ddot{z}_b \quad \Leftrightarrow$$

$$m_b \ddot{z}_b = -W + F_D + F_r + P + F_{rod} \quad \Leftrightarrow$$

$$m_b \ddot{z}_b = -m_b g + F_D - m_a \ddot{z}_b - B\dot{z}_b + F_b - \rho g A_b z_b + F_e - K_{rod} \left(z_b - z_p \right) - C_{rod} \left(\dot{z}_b - \dot{z}_p \right) \quad \Leftrightarrow$$

$$\left(m_a + m_b \right) \ddot{z}_b = -\left(\rho g A_b + K_{rod} \right) z_b - \left(B + C_{rod} \right) \dot{z}_b + K_{rod} z_p + C_{rod} \dot{z}_p - m_b g + F_b + F_D + F_e \quad \Leftrightarrow$$

$$\ddot{z}_{b} = \frac{-(\rho g A_{b} + K_{rod}) z_{b} - (B + C_{rod}) \dot{z}_{b} + K_{rod} z_{p} + C_{rod} \dot{z}_{p} - m_{b} g + F_{b} + F_{D} + F_{e}}{m_{1}}$$
(3.17)

<u>3.3 Κίνηση εμβόλου και λύση του προβλήματος EHL</u>

Για να εξετάσουμε την κίνηση του εμβόλου της αντλίας πρέπει να καθοριστούν οι διαστάσεις των άνω και κάτω δεξαμενών και του κυλίνδρου μέσα στο οποίο κινείται το έμβολο αυτό [2]. Θεωρούμε ότι το κέντρο μάζας του εμβόλου έχει απόσταση L_{COM} από το πάνω μέρος του και L_0 από τον πυθμένα της κάτω δεξαμενής (Εικόνα-3.3). Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη τουλάχιστον από τη μισή τιμή του πλάτους του κύματος.

L_{COM} : απόσταση του κέντρου μάζας του εμβόλου από το άνω μέρος του

- L₀ : απόσταση του κέντρου μάζας του εμβόλου από τον πυθμένα της κάτω δεξαμενής (η απόσταση αυτή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το μισό του ύψους του κύματος)
- L_C : ύψος κυλίνδρου εντός του οποίου κινείται το έμβολο
- L_U : ύψος στάθμης εργαζόμενου ρευστού άνω δεξαμενής
- L_L : ύψος στάθμης εργαζόμενου ρευστού κάτω δεξαμενής
- *A_U* : εμβαδό επιφάνειας πυθμένα άνω δεξαμενής
- *A_L* : εμβαδό επιφάνειας πυθμένα κάτω δεξαμενής



Εικόνα 3.3 Γραφική απεικόνιση διαστάσεων κυλίνδρου-εμβόλου και δεξαμενών

Θεωρώντας ότι το έμβολο έχει ύψος H_p , ακτίνα R_p και ότι, για να μπορεί να κινείται ελεύθερα το έμβολο μέσα στο κύλινδρο, υπάρχει διάκενο s μεταξύ τους, υπολογίζουμε το εμβαδό διατομής του κυλίνδρου ως :

$$A_c = \pi \left(R_p + s \right)^2 \tag{3.18}$$

Αν υπάρχει ροή Q, προς κάποια δεξαμενή επιφάνειας A, ο ρυθμός μεταβολής του υδραυλικού ύψους εκφράζεται ως $\dot{H}=Q/A$. Θεωρώντας ότι υπάρχει ροή από την κάτω δεξαμενή προς την άνω και ότι η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου είναι ρ_o , υπολογίζουμε τον ρυθμό μεταβολή της πίεσης στο πυθμένα της άνω και κάτω δεξαμενής \dot{p}_1 και \dot{p}_4 αντίστοιχα:

$$\dot{p}_1 = \frac{\rho_0 g Q}{A_U} = \frac{\rho_0 g A_c}{A_U} \dot{z}_p \tag{3.19}$$

$$\dot{p}_{4} = -\frac{\rho_{o}gQ}{A_{L}} = -\frac{\rho_{o}gA_{c}}{A_{L}}\dot{z}_{p}.$$
(3.20)

Οι πιέσεις αυτές μεταβάλλονται μόνο κατά την άνω κίνηση του εμβόλου, καθώς, όταν το έμβολο κατευθύνεται προς την κάτω δεξαμενή, βαλβίδες ελέγχου αποτρέπουν τη ροή. Η αντλητική δύναμη F_p που απαιτείται για να αντληθεί η μάζα στήλης εργαζόμενου μέσου, η οποία βρίσκεται άνωθεν του εμβόλου ορίζεται ως :

$$F_{p} = A_{c} \left(p_{2} - p_{3} \right), \qquad (3.21)$$

όπου p_2 και p_3 οι πιέσεις στην άνω και στη κάτω επιφάνεια των πτερυγίων του εμβόλου, αντίστοιχα. Για να ισχύει η αρχή συνέχειας στη ροή του εργαζόμενου μέσου, πρέπει να ισχύει :

$$p_{2} - p_{3} = p_{23} = p_{1} - p_{4} + p_{21} + p_{43} \Leftrightarrow$$

$$p_{2} - p_{3} = L_{U}\rho_{o}g - p_{4} + \left(\frac{\rho_{o}(L_{21} + L_{U})}{A_{c}}A_{c}\ddot{z}_{p} + L_{21}\rho_{o}g + \frac{1}{2}\rho_{o}\dot{z}_{p}^{2}\right)$$

$$+ \left(\frac{\rho_{o}L_{43}}{A_{c}}A_{c}\ddot{z}_{p} + L_{43}\rho_{o}g + \frac{1}{2}\rho_{o}\dot{z}_{p}^{2}\right) \Leftrightarrow$$

$$F_{p} = A_{c}(p_{2} - p_{3}) = -A_{c}p_{4} + \rho_{o}(L_{21} + L_{U} + L_{43})A_{c}\ddot{z}_{p}$$

$$+ \rho_{o}(L_{21} + L_{U} + L_{43})A_{c}g + \rho_{o}A_{c}\dot{z}_{p}^{2} \Leftrightarrow$$

$$F_{p} = -A_{c}p_{4} + \rho_{o}(L_{c} + L_{U})A_{c}(\ddot{z}_{p} + g) + \rho_{o}A_{c}\dot{z}_{p}^{2} .$$
(3.22)

Θεωρούμε ότι η αντλητική δύναμη περιγράφεται από την παραπάνω σχέση, μόνο κατά την άνω κίνηση του εμβόλου, αφού κατά την κάτω κίνηση του εμβόλου τα πτερύγιά του ανοίγουν και το έμβολο δεν συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο, ενώ η αντλητική δύναμη σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται μηδενική (για $\dot{z}_p < 0$). Στις δεξαμενές θεωρούμε ότι έχουμε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Το έμβολο τοποθετείται κοντά στο κάτω μέρος του κυλίνδρου για να αποφευχθούν αρνητικές πιέσεις, αλλά σε μεγαλύτερη απόσταση από το πλάτος της ταλάντωσης $H_w/2$.

Η μάζα της στήλης εργαζόμενου ρευστού προκύπτει από τον δεύτερο όρο της αντλητικής δύναμης και αποτελεί, όπως και η αντλητική δύναμη, βηματική συνάρτηση της ταχύτητας του εμβόλου.

$$m_{f} = \begin{cases} 0 , \dot{z}_{p} < 0 \\ \rho_{o} (L_{c} + L_{U}) A_{c} , \dot{z}_{p} \ge 0 \end{cases}$$
(3.23)

$$F_{p} = \begin{cases} 0 , \dot{z}_{p} < 0 \\ -A_{c}p_{4} + m_{f}(\ddot{z}_{p} + g) + \rho_{o}A_{c}\dot{z}_{p}^{2} , \dot{z}_{p} \ge 0 \end{cases}$$
(3.24)

Εκτός από την δύναμη άντλησης, τη βαρυτική δύναμη του εμβόλου, της δυνάμεις ελαστικότητας και απόσβεσης της ράβδου, οι οποίες έχουν ίδιο μέτρο αλλά αντίθετη κατεύθυνση από αυτές που ασκούνται στο πλωτήρα, στο έμβολο ασκούνται και δυνάμεις τριβής. Για να υπολογιστούν αυτές οι δυνάμεις πρέπει να λυθεί το πρόβλημα ελαστο-υδροδυναμικής λίπανσης (EHL).

Παρόλο που στην ανάλυση των δυνάμεων που έχουμε κάνει έως αυτό το σημείο έχουμε θεωρήσει ότι το έμβολο δεν παρεκκλίνει από την θέση του στην οριζόντια διεύθυνση, για να λύσουμε το πρόβλημα *EHL*, χρειάζεται να θεωρήσουμε ότι το κέντρο μάζας του εμβόλου και το αντίστοιχο κέντρο μάζας του κυλίνδρου παρουσιάζουν εκκεντρότητα *e*. Κάνοντας την παραδοχή ότι η ράβδος μπορεί να αναπαρασταθεί με ευθεία γραμμή, σχηματίζεται γωνία φ ανάμεσα στον άξονα *z* και στη ράβδο που συνδέει τον πλωτήρα με το έμβολο. Η γωνία αυτή καθορίζει την εκκεντρότητα.

$$e = L_r \sin \varphi \tag{3.25}$$

Η κλίση του εμβόλου προκαλεί διαφορετικά πάχη στρώματος εργαζόμενου μέσου hανάμεσα στην επιφάνεια του εμβόλου και του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα η διαφορετική πίεση, που προκαλεί το στρώμα εργαζόμενου μέσου κατά μήκος του εμβόλου να προκαλεί ελαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια του εμβόλου. Η μεταβολή του κέντρου μάζας του εμβόλου κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($\delta z=L_r(1-cos\varphi)$) αμελείται, καθώς η γωνία παρέκκλισης θεωρείται πολύ μικρή. Λόγω συμμετρίας θεωρούμε ότι η θέση του εμβόλου μεταβάλλεται μόνο κατά την διεύθυνση του άξονα x. Για να διευκολυνθεί η ανάλυση του EHL η θέση του εμβόλου περιγράφεται από κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) (Εικόνα-3.4).



Εικόνα 3.4 Σχηματική διάταζη κυλίνδρου παρεκκλίνοντος εμβόλου σε (α) πλάγια και (β) άνω όψη

Για να υπολογίσουμε το πάχος στρώματος του εργαζόμενου ρευστού $h(\theta,z)$ και την πίεσή του $p(\theta,z)$, λύνουμε την δισδιάστατη εξίσωση *Reynolds* σε κυλινδρικές συντεταγμένες, που βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας και της εξισώσεις *Navier-Stokes* για ασυμπίεστο και μη συνεκτικό ρευστό, ενώ η ροή θεωρείται στρωτή και η μεταβολή της πίεσης στην ακτινική διεύθυνση αμελητέα, λόγω των μικρών συγκριτικά διαστάσεων του πάχους του στρώματος του ρευστού (μ συμβολίζεται η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού).

$$\frac{\partial \left(h^{3} \frac{\partial p}{\partial z}\right)}{\partial z} + \frac{\partial \left(h^{3} \frac{\partial p}{\partial \theta}\right)}{R_{p}^{2} \partial \theta} = 6\dot{z}_{p} \mu \frac{\partial h}{\partial z}$$
(3.26)

Η εξίσωση Reynolds αποτελεί μερική διαφορική εξίσωση (PDE) και για την λύση της χρησιμοποιούμε μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (FDM) [19]. Δημιουργούμε πλέγμα με N στοιχεία οριζόντια και M στοιχεία κατακόρυφα, στο οποίο κάθε στοιχείο *i,j* αντιπροσωπεύει μια θέση (z, θ). Κάθε στοιχείο *i* έχει απόσταση Δz από κάθε στοιχείο *i*+1 στον άξονα z, ενώ, αντίστοιχα, κάθε στοιχείο *j* έχει απόσταση Δθ από κάθε στοιχείο *j*+1 στον άξονα θ.

$$\begin{aligned} \gamma \iota \alpha & -\pi \le \theta \le \pi \quad , \quad L_{COM} - H_p \le z \le L_{COM} \\ i = 1, 2, 3, ..., N \quad & \rightarrow \quad z = L_{COM} - H_p + (i - 1) \Delta z \quad , \quad \left(\Delta z = \frac{H_p}{M - 1} \right) \\ j = 1, 2, 3, ..., M \quad & \rightarrow \quad \theta = -\pi + (j - 1) \Delta \theta \qquad , \quad \left(\Delta \theta = \frac{2\pi}{N - 1} \right) \end{aligned}$$

Το πάχος του στρώματος του ρευστού ανάμεσα της επιφάνειες πλωτήρα και κυλίνδρου περιγράφεται από την σχέση :

$$h_{i,j} = w_{r\,i,j} + \left(r_c - r_p\right) \iff$$

$$h_{i,j} = w_{r\,i,j} + s - \left(\left(L_r - z_i\right)\varphi + x\right) \cdot \cos\left(\theta_j\right), \qquad (3.27)$$

όπου x είναι η οριζόντια μετατόπιση του κέντρου μάζας του εμβόλου, w_r η ελαστική παραμόρφωση του εμβόλου σε ένα σημείο της επιφάνειάς του, ενώ η γωνία παρέκκλισης φ θεωρείται πολύ μικρή $(sin(\varphi) \approx \varphi)$.

Διακριτοποιούμε την εξίσωση Reynolds χρησιμοποιώντας κεντρική διαφόριση.

$$\frac{\left(h_{i+\frac{1}{2},j}^{3}\frac{\partial p}{\partial z_{i+\frac{1}{2},j}}-h_{i-\frac{1}{2},j}^{3}\frac{\partial p}{\partial z_{i-\frac{1}{2},j}}\right)}{\Delta z}+\frac{\left(h_{i,j+\frac{1}{2}}^{3}\frac{\partial p}{\partial \theta_{i,j+\frac{1}{2}}}-h_{i,j-\frac{1}{2}}^{3}\frac{\partial p}{\partial \theta_{i,j-\frac{1}{2}}}\right)}{R_{p}^{2}\Delta\theta}=\frac{6\dot{z}_{p}\mu\left(h_{i+\frac{1}{2},j}-h_{i-\frac{1}{2},j}\right)}{\Delta z}$$
(3.28)

Οι παράγωγοι της πίεσης στο μέσο του βήματος Δz ή $\Delta \theta$ (half steps) αναλύονται ξανά με κεντρική διαφόριση.

$$\frac{\partial p}{\partial z_{i+\frac{1}{2},j}} = \frac{\left(p_{i+1,j} - p_{i,j}\right)}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z_{i-\frac{1}{2},j}} = \frac{\left(p_{i,j} - p_{i-1,j}\right)}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta_{i,j+\frac{1}{2}}} = \frac{\left(p_{i,j+1} - p_{i,j}\right)}{\Delta \theta}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta_{i,j-\frac{1}{2}}} = \frac{\left(p_{i,j} - p_{i,j-1}\right)}{\Delta \theta}$$
(3.29)

Ενώ το πάχος του στρώματος του ρευστού ανάμεσα της δύο επιφάνειες h αναλύεται, ως η μέση τιμή των δυο στοιχείων που το περικλείουν.

$$h_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{h_{i+1,j} + h_{i,j}}{2}$$

$$h_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2}$$

$$h_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j}}{2}$$

$$h_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{h_{i,j} + h_{i,j-1}}{2}$$
(3.30)

Αντικαθιστώντας στην διακριτοποιημένη εξίσωση *Reynolds* (Εξ.-3.28) τις παραγώγους της πίεσης (Εξ.-3.29) και τα πάχη του στρώματος (Εξ.-3.20) και λύνοντας ως προς το στοιχείο πίεσης $p_{i,j}$, καταλήγουμε στην σχέση που περιγράφει την τοπική πίεση κάθε σημείου του πλέγματος.

$$p_{i,j} = \frac{\frac{\left(h_{i+1,j} + h_{i,j}\right)^{3} p_{i+1,j}}{8\Delta z^{2}} + \frac{\left(h_{i,j} + h_{i-1,j}\right)^{3} p_{i-1,j}}{8\Delta z^{2}} + \frac{\left(h_{i,j+1} + h_{i,j}\right)^{3} p_{i,j+1}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}} + \frac{\left(h_{i,j} + h_{i,j-1}\right)^{3} p_{i,j-1}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}}}{\frac{\left(h_{i+1,j} + h_{i,j}\right)^{3}}{8\Delta z^{2}} + \frac{\left(h_{i,j} + h_{i-1,j}\right)^{3}}{8\Delta z^{2}} + \frac{\left(h_{i,j+1} + h_{i,j}\right)^{3}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}} + \frac{\left(h_{i,j} + h_{i,j-1}\right)^{3}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}}}{\frac{3\dot{z}_{p}\mu\left(h_{i-1,j} - h_{i+1,j}\right)}{4z}}{\frac{\Delta z}} + \frac{\frac{3\dot{z}_{p}\mu\left(h_{i-1,j} - h_{i+1,j}\right)}{8\Delta z^{2}} + \frac{\left(h_{i,j+1} + h_{i,j}\right)^{3}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}} + \frac{\left(h_{i,j} + h_{i,j-1}\right)^{3}}{8R_{p}^{2}\Delta\theta^{2}}}$$

$$(3.31)$$

Θεωρώντας ότι οι επιφάνειες του κυλίνδρου και του εμβόλου παραμορφώνονται μόνο ελαστικά, η ελαστική παραμόρφωση wr περιγράφεται από την σχέση:

$$\frac{\partial w_r}{\partial z} = \frac{2}{\pi E^*} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(\zeta)}{z - \zeta} d\zeta \quad , \tag{3.32}$$

όπου η μεταβλητή ζ έγκειται στον άξονα z και το συνδυασμένο μέτρο ελαστικότητας E^* υπολογίζεται βάσει των μέτρων ελαστικότητας του δομικού υλικού του κυλίνδρου E_c και του εμβόλου E_p και των μέτρων Poisson της v_c και v_p αντίστοιχα.

$$E^* = \left(\frac{1 - v_c^2}{E_c} + \frac{1 - v_r^2}{E_r}\right)^{-1}$$
(3.33)

Η εξίσωση της ελαστικής παραμόρφωσης διακριτοποιείται και υπολογίζεται έτσι η τιμή της τοπικής παραμόρφωσης.

$$w_{r\,i,j} = w_{r\,i,j-1} + \frac{2\varDelta z}{\pi E^*} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p(\zeta)}{z - \zeta} d\zeta \tag{3.34}$$

Θα χρησιμοποιηθεί η επαναληπτική μέθοδος Gauss Seidel για να υπολογιστεί η κατανομή τοπικών πιέσεων του στρώματος του ρευστού. Κατά την πρώτη επανάληψη υπολογίζουμε το πάχος του στρώματος του ρευστού (Εξ.-3.27), θεωρώντας μηδενικές της τιμές της ελαστικής παραμόρφωσης w_r, και αντικαθιστούμε της τιμές αυτές στην σχέση, που υπολογίζει τις πιέσεις του (Εξ.-2.31). Σημειώνεται ότι στην λύση του προβλήματος χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες Dirichlet και Neumann της φαίνονται παρακάτω.

Dirichlet :
$$p_{1,j} = p_3 \left(z = L_{COM} - H_p\right)$$
 $\kappa \alpha i \quad p_{N,j} = p_2 \left(z = L_{COM}\right)$
Neumann : $\frac{\partial p}{\partial \theta_{i,1}} = 0 \left(\theta = -\pi\right)$ $\kappa \alpha i \quad \frac{\partial p}{\partial \theta_{i,M}} = 0 \quad \left(\theta = \pi\right)$

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας της τιμές της πίεσης, υπολογίζουμε την ελαστική παραμόρφωση (Εξ.-3.34). Οι τιμές του πάχους του στρώματος του ρευστού επαναπροσδιορίζονται (Εξ.-

3.27), επ' ακολούθως υπολογίζονται ξανά οι τιμές των πιέσεων (Εξ.-3.31). Οι τιμές πίεσης των γειτονικών στοιχείων λαμβάνονται από το νέο πλέγμα αν αυτό είναι δυνατό, αλλιώς λαμβάνονται από το προηγούμενο πλέγμα. Οι νέες τιμές της ελαστικής παραμόρφωσης οδηγούν σε νέες τιμές πάχους του στρώματος, έως ότου οι τιμές της πίεσης να συγκλίνουν και να ικανοποιείται η συνθήκη σύγκλισης, δηλαδή, όταν οι τιμές πίεσης του πλέγματος προσεγγίζουν της τιμές του προηγούμενου πλέγματος.

$$h^{1}(w_{r}=0) \rightarrow p^{1} \rightarrow w_{r}^{-1} \rightarrow h^{2} \rightarrow p^{2} \rightarrow w_{r}^{-2} \rightarrow \dots \rightarrow h^{k-1} \rightarrow p^{k-1} \rightarrow w_{r}^{-k-1} \rightarrow h^{k} \rightarrow p^{k} \rightarrow w_{r}^{-k}$$
$$\sum_{i,j} \left| p_{i,j}^{k} - p_{i,j}^{k-1} \right| \leq tol$$

Όπου tol ορίζουμε την παράμετρο ανοχής, που ικανοποιεί την συνθήκη σύγκλισης. Επειδή η τάξη μεγέθους των πιέσεων είναι εκατοντάδες χιλιάδες Pa, η τάξη μεγέθους της ανοχής είναι η μονάδα ή δέκατα της μονάδας Pa. Σε περίπτωση που το πάχος του στρώματος του ρευστού πάρει μηδενικές ή αρνητικές τιμές σε κάποιο σημείο, δηλαδή αν υπάρξει επαφή κυλίνδρου και εμβόλου, ασκείται δύναμη F_{re} στο έμβολο [2], που το επαναφέρει στο κέντρο του κυλίνδρου:

$$F_{re} = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \left(s - \left(x + \left(H_p - L_{COM} \right) \sin \varphi \right) \right)^{3/2} .$$
(3.35)

Το ρευστό ασκεί δύναμη διάτμησης F_f στο έμβολο που αντιτίθεται στην κατακόρυφη κίνηση του εμβόλου και έχει κατεύθυνση αντίθετη σε αυτήν.

$$F_{f} = \int_{L_{COM} - H_{p}}^{L_{COM}} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\mu \dot{z}_{p}}{h} + \frac{h \partial p}{2 \partial z} \right) R_{p} d\theta dz$$
(3.36)

Όταν το κέντρο μάζας εμβόλου δεν ταυτίζεται με το κέντρο του κυλίνδρου, το ρευστό, λόγω διαφορετικής πίεσης στην περιμετρική επιφάνεια του εμβόλου του, του ασκεί ορθή δύναμη *F_n* (δύναμη έδρασης)που ωθεί το έμβολο της το κέντρο του κυλίνδρου.

$$F_n = \int_{L_{COM}}^{L_{COM}} \int_{-H_p}^{\pi} p \cos \theta R_p d\theta dz$$
(3.37)

Η στιγμιαία παροχή διαρροής του ρευστού υπολογίζεται στο κάτω μέρος του εμβόλου (z=L_{COM}-H_p):

$$Q_{leak} = \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{h \dot{z}_p}{2} - \frac{h^3 \partial p}{12 \mu \partial z} \right) R_p d\theta \bigg|_{z = L_{COM} - H_p}$$
(3.38)

Η αντίστοιχη ταχύτητα διαρροής υπολογίζεται ως :

$$v_{leak} = \frac{Q_{leak}}{A_c - A_p} \ . \tag{3.39}$$

Για να καταλήξουμε στην εξίσωση, που περιγράφει την κίνηση του εμβόλου, κάνουμε την παραδοχή ότι στην μάζα του εμβόλου προστίθεται η μάζα του καλωδίου και αναλύουμε τις δυνάμεις, που ασκούνται στο έμβολο, χρησιμοποιώντας, όπως και για τον πλωτήρα, τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

$$\Sigma F = (m_{p} + m_{r}) \ddot{z}_{p} \Leftrightarrow (m_{p} + m_{r}) \ddot{z}_{p} = -(m_{p} + m_{r}) g - F_{f} + F_{re} \mu_{st} + F_{p} + F_{rod} \Leftrightarrow (m_{p} + m_{r}) \ddot{z}_{p} = -(m_{p} + m_{r}) g - F_{f} + F_{re} \mu_{st} + A_{c} p_{4} - m_{f} (\ddot{z}_{p} + g) - \rho A_{c} \dot{z}_{p}^{2} + K_{rod} (z_{b} - z_{p}) + C_{rod} (\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p}) \Leftrightarrow (m_{p} + m_{r} + m_{f}) \ddot{z}_{p} = -(m_{p} + m_{r} + m_{f}) g - F_{f} + F_{re} \mu_{st} + A_{c} p_{4} - \rho A_{c} \dot{z}_{p}^{2} + K_{rod} (z_{b} - z_{p}) + C_{rod} (\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p}) \Leftrightarrow (m_{p} \dot{z}_{p} = -m_{2}g - F_{f} + F_{re} \mu_{st} + A_{c} p_{4} - \rho A_{c} \dot{z}_{p}^{2} + K_{rod} (z_{b} - z_{p}) + C_{rod} (\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p}) \Leftrightarrow (\ddot{z}_{p} = \frac{K_{rod} (z_{b} - z_{p}) + C_{rod} (\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p}) - m_{2}g - F_{f} + F_{re} \mu_{st} + A_{c} p_{4} - \rho A_{c} \dot{z}_{p}^{2}}{m_{2}}$$

$$(3.40)$$

Υπενθυμίζεται ότι η αντλητική δύναμη ασκείται στο έμβολο μόνο κατά την άνω κίνηση του εμβόλου ($\dot{z}_p \ge 0$). Όταν το έμβολο κινείται με κατεύθυνση προς την κάτω δεξαμενή ($\dot{z}_p < 0$) η επιτάχυνση του υπολογίζεται ως :

$$\ddot{z}_{p} = \frac{K_{rod} \left(z_{b} - z_{p} \right) + C_{rod} \left(\dot{z}_{b} - \dot{z}_{p} \right) - m_{2}g - F_{f} + F_{re}\mu_{st}}{m_{2}}$$
(3.41)

Οι πιέσεις στο άνω και κάτω μέρος του εμβόλου, p₂ και p₃ αντίστοιχα, περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$p_{2} = \begin{cases} \rho_{o} \left(L_{c} + L_{U} - L_{0} - L_{COM} - z_{p} \right) \left(\ddot{z}_{p} + g \right) & , \dot{z}_{p} \ge 0 \\ \rho_{o} g \left(L_{c} + L_{U} - L_{0} - L_{COM} - z_{p} \right) & , \dot{z}_{p} < 0 \end{cases}$$
(3.42)

$$p_{3} = \begin{cases} \rho_{o} \left(gL_{L} - \left(L_{0} + L_{COM} + z_{p} \right) \left(\ddot{z}_{p} + g \right) - \dot{z}_{p}^{2} - \frac{1}{2} v_{leak}^{2} \right) &, \dot{z}_{p} \ge 0 \\ \rho_{o} g \left(L_{c} + L_{U} - L_{0} - L_{COM} - z_{p} \right) = p_{2} &, \dot{z}_{p} < 0 \end{cases}$$
(3.43)

Αρχικά υπολογίζεται η επιτάχυνση του εμβόλου \ddot{z}_p (Εξ.-3.41), αγνοώντας της δυνάμεις F_f και F_{re} . Θεωρώντας μηδενική την ταχύτητα διαρροής, υπολογίζονται οι πιέσεις p_2 (Εξ.-3.42) και p_3 (Εξ.-3.43). Γνωρίζοντας τις τιμές των πιέσεων αυτών, μπορούμε να λύσουμε την μερική διαφορική εξίσωση *Reynolds*, που αναλύθηκε προηγουμένως. Από την

κατανομή των πιέσεων του στρώματος του ρευστού υπολογίζονται οι δυνάμεις F_f , F_{re} και η ταχύτητας διαρροής v_{leak} . Γνωρίζοντας της τιμές αυτών των μεγεθών υπολογίζουμε ξανά την επιτάχυνση του εμβόλου \ddot{z}_p . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου η τιμή της επιτάχυνσης σταματήσει να μεταβάλλεται.

$$\begin{split} \ddot{z}_{p}^{1} \begin{pmatrix} F_{f} = 0 \\ F_{re} = 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{(v_{leak} = 0)} p_{2}^{1}, p_{3}^{1} \xrightarrow{Reynolds} F_{f}^{-1}, F_{f}^{-1}, v_{leak}^{1} \rightarrow \\ \ddot{z}_{p}^{2} \rightarrow p_{2}^{2}, p_{3}^{2} \xrightarrow{Reynolds} F_{f}^{-2}, F_{f}^{-2}, v_{leak}^{2} \rightarrow \\ \dots \rightarrow \ddot{z}_{p}^{k-1} \rightarrow p_{2}^{k-1}, p_{3}^{k-1} \xrightarrow{Reynolds} F_{f}^{-k-1}, F_{f}^{-k-1}, v_{leak}^{k-1} \rightarrow \\ \ddot{z}_{p}^{k} \rightarrow p_{2}^{k}, p_{3}^{k} \xrightarrow{Reynolds} F_{f}^{-k}, F_{f}^{-k}, v_{leak}^{k} \rightarrow \\ & \left| \ddot{z}_{p}^{k} - \ddot{z}_{p}^{k-1} \right| \leq tol \end{split}$$

Εκτός από την δύναμη F_n , για μικρή γωνία παρέκκλισης του εμβόλου ρόλο δύναμης επαναφοράς έχει και η δύναμη F_{φ} :

$$F_{\varphi} = \frac{m_2 g}{L_r} x \quad . \tag{3.44}$$

Η οριζόντια μετατόπιση του κέντρου μάζας του εμβόλου περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$m_2 \ddot{x} = -F_{\varphi} - F_n - F_r \Leftrightarrow m_2 \ddot{x} + \frac{m_2 g}{L_r} x = -F_n + F_{re} . \qquad (3.45)$$

3.4 Σύστημα εξισώσεων και αρχικές συνθήκες

Η απόκριση του συστήματος πλωτήρα εμβόλου μπορεί να περιγραφεί από την απόκριση των μεγεθών z_b , \dot{z}_b , z_p , \dot{z}_p , x, \dot{x} , p_1 και p_4 συναρτήσει του χρόνου (Εξ.-3.17,3.19,3.20,3.40,3.41,3.45). Το σύστημα εξισώσεων μετασχηματίζεται σε μορφή πίνακα για να μπορούν να λυθούν ταυτόχρονα. Αν τα μεγέθη περιγράφονται από διάνυσμα κατάστασης y, το σύστημα εξισώσεων παίρνει την εξής μορφή :

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{B} \quad , \tag{3.46}$$

όπου το διάνυσμα κατάστασης έχει την μορφή $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} z_b & \dot{z}_b & z_p & \dot{z}_p & x & \dot{x} & p_1 & p_4 \end{bmatrix}^T$.

Ο πίνακας A έχει διαστάσεις 8x8 και περιέχει τους όρους που εξαρτούνται από τις μεταβλητές κατάστασης:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(\rho g A b + K_{rod})}{m_1} & -\frac{(B + C_{rod})}{m_1} & \frac{K_{rod}}{m_1} & \frac{C_{rod}}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{rod}}{m_2} & \frac{C_{rod}}{m_2} & -\frac{K_{rod}}{m_2} & -\frac{C_{rod}}{m_2} & 0 & 0 & \frac{A_c}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{g}{L_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho_0 g A_c}{A_U} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho_0 g A_c}{A_L} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(3.47)

Ενώ ο πίνακας **B** έχει διαστάσεις 8x1 και έχει την εξής μορφή :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-gm_b + F_b + F_D + F_e}{m_1} \\ 0 \\ \frac{-m_2g - F_f + \mu_{st}F_{re} - \rho_0A_c\dot{z}_p^2}{m_2} \\ 0 \\ \frac{-F_n + F_{re}}{m_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.48)

Η μορφή που έχουν οι πίνακες **A** και **B** ισχύει μόνο κατά την άνω κίνηση του εμβόλου $(\dot{z}_p \ge 0)$. Σε αντίθετη περίπτωση αμελούμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο έμβολο από τη στήλη μάζας ρευστού εντός του κυλίνδρου αλλά και την μεταβολή των πιέσεων p_1 και p_4 . Σε αυτή την περίπτωση $(\dot{z}_p \ge 0)$ οι πίνακες έχουν την παρακάτω μορφή.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gm_b + F_b + F_{drag} + F_e \\ m_1 \\ 0 \\ -m_2g - F_f + \mu_{st}F_{re} \\ m_2 \\ 0 \\ \frac{-F_n + F_{re}}{m_2} \\ m_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.50)

Για την λύση του συστήματος των συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ODEs) χρησιμοποιείται αλγόριθμος Runge Kutta 4^{ης} τάξης. Παρόλο που το σύστημα κινείται περιοδικά δεν θεωρούμε τις αρχικές συνθήκες των μεταβλητών κατάστασης μηδενικές, αλλά τους δίνουμε κάποιες προσεγγιστικές τιμές [2], έτσι ώστε να βρεθούν ταχύτερα σε μόνιμη κατάσταση.

$$z_{b,0} = z_{w,0} - \frac{m_b + m_r + m_p}{\rho A_b} + C_a \left(z_{w,0} + \frac{H_b}{2} \right)$$

$$\dot{z}_{b,0} = 0$$

$$z_{p,0} = z_{w,0} - \frac{m_b + m_r + m_p}{\rho A_b} + C_a \left(z_{w,0} + \frac{H_b}{2} \right)$$

$$\dot{z}_{p,0} = 0$$

$\begin{aligned} x_{0} &= 0 \\ \dot{x}_{0} &= 0 \\ p_{1,0} &= \rho_{o} g L_{U,0} + P_{U} \\ p_{4,0} &= \rho_{o} g L_{L,0} + P_{L} \end{aligned}$

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Παράμετροι κύματος και συσκευής

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων του μοντελοποιημένου συστήματος πλωτήρα εμβόλου, όπως αναλύθηκαν προηγουμένως. Επίσης επιλέγονται οι παράμετροι, που καθορίζουν την απόκριση του συστήματος, σύμφωνα με προηγούμενη ερευνητική εργασία [2], όπως τα χαρακτηριστικά του κύματος, οι διαστάσεις πλωτήρα και εμβόλου, και εξετάζεται η επίδραση της μεταβολής κάποιων εξ αυτών στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Όσον αφορά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του κύματος, θεωρούμε τυπικές τιμές για κύμα σχετικά μεγάλου μεγέθους (Πίνακας-4.1).

Παράμετροι & σταθερές	Σύμβολα & Τιμές
Ύψος κύματος	H = 4 (m)
Περίοδος κύματος	T = 10 (s)
Κυκλική συχνότητα κύματος	$\omega = 0,628 \text{ (rad/s)}$
Μήκος κύματος	$\lambda = 156,13 \text{ (m)}$
Αριθμός κύματος	k = 0,04 (rad/m)
Ταχύτητα κύματος	c = 15,61 (m/s)
Πυκνότητα θαλάσσιου ύδατος	$\rho = 1035 (\text{kg/m}^3)$
Σταθερά βαρυτικής έλξης	$g = 9,81 \text{ (m/s^2)}$

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά κύματος και άλλες σταθερές

Οι παράμετροι του κύματος υπολογίστηκαν, έχοντας κάνει την υπόθεση ότι η συσκευή τοποθετείται σε βαθιά ύδατα (d=225(m), $d/\lambda>1/2$).

Το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιείται στο κλειστό κύκλωμα των δυο δεξαμενών είναι ρευστό που έχει ως βάση το νερό (*HFC*) [2,21]. Το ρευστό αυτό, το οποίο αποτελείται κυρίως από νερό (~98% κατά όγκο σύσταση), επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί αντί του νερού καθώς η δυναμική του συνεκτικότητα (ιξώδες) παίρνει πολύ μεγαλύτερες τιμές από αυτή του νερού. Αυτή η ιδιότητά του προκαλεί καλύτερη απόδοση άντλησης, αφού είναι πολύ μικρότερες οι διαρροές ρευστού, αλλά και δυνατότητα αύξησης του διακένου εμβόλου – κυλίνδρου. Θεωρούμε επίσης ότι το ρευστό (*HFC*) βρίσκεται σε θερμοκρασία 20°C και αμελούμε οποιαδήποτε μεταβολή της (Πίνακας-4.2).

Χαρακτηριστικά εργαζόμενου μέσου HFC	Σύμβολα & Τιμές
Πυκνότητα	$\rho_o = 1080 (\text{kg/m}^3)$
Δυναμική συνεκτικότητα (ιξώδες)	$\mu = 0,0734$ (Pas)
Πίεση ατμοποίησης	$p_v = 2200 \text{ (Pa)}$

Πίνακας 4.2	Χαρακτηριστικά	εργαζόμενου	μέσου	HFC
-------------	----------------	-------------	-------	-----

Ως δομικό υλικό του εμβόλου, του καλωδίου, που το συνδέει με τον πλωτήρα, και του κυλίνδρου, εντός του οποίου κινείται ο κύλινδρος, έχει επιλεχθεί ο χάλυβας (Steel) (Πίνακας4.3).

Χαρακτηριστικά χάλυβα	Σύμβολα & Τιμές
Πυκνότητα	$\rho_{st} = 7850 \ (\text{kg/m}^3)$
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	$E_{st} = 210 \; (\text{GPa})$
Λόγος Poisson	$v_{st} = 0,28$
Συντελεστής τριβής (χάλυβας με χάλυβα)	$\mu_{st} = 0,65$

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά χάλυβα

Ο πλωτήρας έχει σχήμα τετραγωνικού πρίσματος με μικρό ύψος, συγκριτικά με τις διαστάσεις της βάσης του, καθώς και μικρή μάζα (Πίνακας-4.4).

Χαρακτηριστικά πλωτήρα	Σύμβολα & Τιμές
Μάζα	$m_b = 1500 \; (\text{kg})$
Ύψος	$H_b = 2 (m)$
Εύρος	$L_b = 7 (m)$
Εμβαδό βάσης	$A_b = 49 \ (m^2)$

Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά πλωτήρα

Η ράβδος, που συνδέει τον πλωτήρα με το έμβολο, έχει ως δομικό στοιχείο τον χάλυβα, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρθηκαν προηγουμένως (Πίνακας-4.3). Η μάζα της ράβδου εξαρτάται από την πυκνότητα του χάλυβα και τις διαστάσεις της ράβδου $(m_r = \rho_r (\pi R_r^2) L_r)$ (Πίνακας-4.5).

Χαρακτηριστικά ράβδου	Σύμβολα & Τιμές
Μήκος	$L_r = 170 \; (m)$
Ακτίνα	$R_r = 0.04 \text{ (m)}$
Λόγος απόσβεσης	$\zeta = 0,05$

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά ράβδου

Ο κύλινδρος, μέσα στον οποίο κινείται το έμβολο, έχει διάμετρο ελάχιστα μεγαλύτερη του εμβόλου για να μην δημιουργούνται διαρροές (Εικόνα-4.1) (Πίνακας-4.6). Το διάκενο μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου επιλέγεται βάσει, ως επί το πλείστον, της συνεκτικότητας του ρευστού.



Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση διαστάσεων εμβόλου

Χαρακτηριστικά εμβόλου-κυλίνδρου	Σύμβολα & Τιμές	
Ύψος εμβόλου	$H_p = 0,1 \text{ (m)}$	
Ακτίνα εμβόλου	$R_p = 0,1 \text{ (m)}$	
Μάζα εμβόλου	$m_p = 150 \; (\text{kg})$	
Ύψος κυλίνδρου	$L_c = 100 \ (m)$	
Απόσταση κέντρου μάζας κυλίνδρου από το άνω	I = 0.02 (m)	
μέρος του	$L_{COM} = 0,02$ (III)	
Απόσταση αρχικής θέσης του κέντρου μάζας του	I = 10 (m)	
εμβόλου από τον πυθμένα της κάτω δεξαμενής	$L_0 = 10$ (III)	
Διάκενο εμβόλου-κυλίνδρου	$s = 0,4 ({\rm mm})$	
Αρχική εκκεντρότητα εμβόλου-κυλίνδρου	e = 0,2 (mm)	

Πίνακας 4.6 Χαρακτηριστικά εμβόλου-κυλίνδρου

Το ύψος της στάθμης του ρευστού (Εικόνα-4.2) στην άνω δεξαμενή καθορίζει το μέγεθος της αξιοποιήσιμης ενέργειας (Πίνακας-4.7). Βαλβίδες στις επαφές κυλίνδρου με την άνω και κάτω δεξαμενή καθιστούν δυνατή την αποθήκευση ενέργειας, υπό μορφή υδραυλικού ύψους, στην άνω δεξαμενή. Αναμενόμενα, ο ρυθμός αύξησης του υδραυλικού ύψους στην κάτω δεξαμενή ισούται με τον ρυθμό μείωσης του υδραυλικού ύψους στην κάτω δεξαμενή.



Εικόνα 4.2 Σχηματική απεικόνιση διαστάσεων δεξαμενών-κυλίνδρου

Χαρακτηριστικά δεξαμενών	Σύμβολα & Τιμές
Αρχική στάθμη επιφάνειας άνω δεξαμενής	$L_{U,0} = 10 \text{ (m)}$
Αρχική στάθμη επιφάνειας κάτω δεξαμενής	$L_{L,0} = 30 \text{ (m)}$
Εμβαδό επιφάνειας πυθμένα άνω δεξαμενής	$A_{U,0} = 49 \text{ (m)}$
Εμβαδό επιφάνειας πυθμένα κάτω δεξαμενής	$A_{L,0} = 49 \text{ (m)}$
Αρχική συμπίεση δεξαμενών	$P_{U,L} = 0 \text{ (Pa)}$

Πίνακας 4.7 Χαρακτηριστικά δεξαμενών

Ο συντελεστής προστιθέμενης μάζας C_a υπολογίζεται προσεγγιστικά (Πίνακας-2.2) για λόγο ύψους προς το εύρος του πλωτήρα $H_b/L_b=2/7$ για πλωτήρα τετραγωνικής βάσης. Αντίστοιχα υπολογίζεται (Πίνακας-2.3) και ο συντελεστής αντίστασης του ρευστού C_D (Πίνακας-4.8).

Συντελεστές	Σύμβολα & Τιμές
Προστιθέμενης μάζας	$C_a = 0,9$
Αντίστασης ρευστού	$C_D = 1,5$

Πίνακας 4.8 Συντελεστές C_a και C_D

Όταν προσομοιώνουμε την απόκριση του συστήματος πλωτήρα –εμβόλου είναι σημαντικό να διαλέξουμε τιμή χρονικού βήματος Δt τέτοια ώστε να μην αποκλίνει η αριθμητική λύση του συστήματος (Πίνακας-4.9).

Παράμετροι προσομοίωσης	Σύμβολα & Τιμές
Χρονική διάρκεια (λύση εξ. 3.45)	$t_{final} = 50 \ (s)$
Χρονικό βήμα (λύση εξ. 3.45)	$\varDelta t = 10^{-3} (s)$
Αριθμός οριζόντιων σημείων πλέγματος (λύση εξ. <i>Reynolds)</i>	<i>N</i> = 11
Αριθμός κατακόρυφων σημείων πλέγματος (λύση εξ. <i>Reynolds)</i>	<i>M</i> = 25

Πίνακας 4.9 Παράμετροι προσομοίωσης

4.2 Μέθοδοι αριθμητικής επίλυσης και διάγραμμα ροής

Ο υπολογισμός των μεταβλητών των εξισώσεων κατάστασης, όπως αυτές περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα (Εξ.-3.46,3.50), επιτυγχάνεται μέσω αριθμητικών μεθόδων επίλυσης συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Εν προκειμένω, επιλέγεται μέθοδος Runge – Kutta 4^{ης} τάξης, μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδος για λύση τέτοιου είδους προβλημάτων[22,23].

$$k_{1} = dt \cdot f(t, y(t))$$

$$k_{2} = dt \cdot f(t + \frac{1}{2} dt, y(t) + \frac{1}{2} k_{1})$$

$$k_{3} = dt \cdot f(t + \frac{1}{2} dt, y(t) + \frac{1}{2} k_{2})$$

$$k_{4} = dt \cdot f(t + dt, y(t) + k_{3})$$
(4.1)

$$y(t+dt) = y(t) + 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Για να υπάρξει αξιόπιστη λύση πρέπει το χρονικό βήμα να παίρνει αρκετά μικρές τιμές ($\leq 0,001(s)$), όχι τόσο μικρές όμως που η μεταβολή των τιμών των μεταβλητών κατάστασης να μην μπορεί να αποτυπωθεί στα ψηφία που εμφανίζονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα ($\geq 0,000005(s)$).

Για την λύση του προβλήματος *EHL* υπολογίζουμε τις τοπικές πιέσεις όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για υπολογισμούς ολοκληρωμάτων χρησιμοποιείται η υπολογιστική μέθοδος τραπεζίου [23].

$$\int_{b}^{a} f(x)dx \approx \sum_{k=1}^{N} \frac{f(x_{k-1}) + f(x_{k})}{2} \cdot \Delta x_{k}$$

$$\begin{pmatrix} a = x_{0} < x_{1} < \dots < x_{N-1} < x_{N} = b \\ \Delta x_{k} = x_{k} - x_{k-1} \end{pmatrix}$$
(4.2)

Αντίστοιχα για τα ορισμένα διπλά ολοκληρώματα χρησιμοποιείται τύπος της μεθόδου τραπεζίου δυο-διαστάσεων (2D Trapezoidal rule) για σταθερή απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος [24].

$$\begin{split} & \iint_{a c}^{b} f(x, y) dx dy \approx \frac{\Delta x \Delta y}{4} \Big(f(a, c) + f(b, c) + f(a, d) + f(b, d) \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i, c) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i, d) + 2 \sum_{j=1}^{M-1} f(a, y_j) + 2 \sum_{j=1}^{M-1} f(a, y_j) \Big) \\ &\quad + 4 \sum_{j=1}^{M-1} \left(\sum_{i=1}^{N-1} f(x_i, y_j) \right) \Big) \end{split}$$
(4.3)

$$\begin{pmatrix} a = x_0 < x_1 < \dots < x_{N-1} < x_N = b \\ \Delta x = \frac{b-a}{N} \\ c = y_0 < y_1 < \dots < y_{M-1} < y_M = d \\ \Delta y = \frac{d-c}{M} \end{pmatrix}$$

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κατάστασης και τον αριθμητικό υπολογισμό δυνάμεων, ισχύων και άλλων μεγεθών, που περιγράφουν την λειτουργία της συσκευής, είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού fortran. Αφού τα αποτελέσματα εξάγονται σε αρχεία. dat εισάγονται σε πρόγραμμα matlab για την κατασκευή γραφημάτων. Τα διαγράμματα ροής, που περιγράφουν την δομή του προγράμματος που κατασκευάστηκε, παρατίθενται κάτωθι (Εικόνα-4.3,4.4).







Εικόνα 4.3 Διάγραμμα ροή προγράμματος λύσης εξισώσεων κατάστασης





Εικόνα 4.4 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας λύσης εξίσωσης Reynolds (EHL)

4.3 Αποτελέσματα απόκρισης συσκευής για προτεινόμενα χαρακτηριστικά κύματος και συσκευής

Η κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου μάζας του πλωτήρα (Σχήμα-4.1), σε σχέση με τον χρόνο, παρουσιάζει κυματομορφή παρόμοια με αυτήν της μετατόπισης της επιφάνειας του κύματος. Το ύψος του τμήματος του πλωτήρα, που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του κυματισμού, είναι αρκετά μεγαλύτερο από το ύψος του βυθισμένου τμήματος του πλωτήρα (~90% του πλωτήρα βρίσκεται πάνω από την στάθμη της θάλασσας), λόγω της σχετικά μικρής μάζας του συστήματος.



Σχήμα 4.1 Κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του πλωτήρα z_b σε σχέση με το κύμα z_w

Παρόμοια κίνηση κάνει και το έμβολο (Σχήμα-4.2), το οποίο συνδέεται με τον πλωτήρα μέσω μιας ράβδου. Τα χαρακτηριστικά της ράβδου, όπως επίσης και οι δυνάμεις που δέχεται από τη μάζα του ρευστού, το οποίο αντλεί, και οι δυνάμεις τριβής από τον κύλινδρο, μέσα στον οποίο κινείται, καθορίζουν την κίνηση αυτή. Παρατηρείται ότι, κατά την αλλαγή της κατεύθυνσης της κίνησης του πλωτήρα, η τιμή της επιτάχυνσης του εμβόλου παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται στο στιγμιαίο άνοιγμα/κλείσιμο των πτερυγίων του εμβόλου.



Σχήμα 4.2 Κατακόρυφη (a) μετατόπιση z_p , (β) ταχύτητα \dot{z}_p και (γ) επιτάχυνση \ddot{z}_p εμβόλου

Η δύναμη διέγερσης, που ασκεί το κύμα, στον πλωτήρα επηρεάζεται από την τιμή του συντελεστή απόσβεσης του κύματος (~30,6 (kNs/m)) (Σχήμα-4.3). Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κύματος. Όμως, η τιμή επηρεάζεται και από το ύψος του τμήματος του πλωτήρα, που βρίσκεται βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά αυτό τον τρόπο, αναμένουμε η τιμή του συντελεστή απόσβεσης να αυξομειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αυξομείωση της τιμής του ύψους του βυθισμένου τμήματος του πλωτήρα.



Σχήμα 4.3 Συντελεστής απόσβεσης κύματος Β

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πλωτήρα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πλωτήρα και του κύματος. Η δύναμη διέγερσης είναι αυτή, που καθορίζει σημαντικά την συνισταμένη των δυνάμεων, που ασκείται από το κύμα στο πλωτήρα, συγκριτικά με την δύναμη της άνωσης ή αυτή της αντίστασης του ρευστού (Σχήμα-4.4).



Σχήμα 4.4 Δυνάμεις που ασκούνται στον πλωτήρα : (a) δύναμη άνωσης F_b , (β) δύναμη αντίστασης του ρευστού F_D , (γ) δύναμη διέγερσης κύματος F_e και (δ) συνολική δύναμη που ασκείται στον πλωτήρα F_{net}

Λόγω της μη μηδενικής εκκεντρότητας κυλίνδρου-εμβόλου το έμβολο παρουσιάζει οριζόντια παλινδρομική κίνηση μέσα στο κύλινδρο (Σχήμα-4.5). Η κίνηση αυτή προκαλείται από την δύναμη επαναφοράς, που δημιουργείται από την διαφορά πίεσης του ρευστού που βρίσκεται στο διάκενο κυλίνδρου-εμβόλου. Επίσης το ρευστό ασκεί δύναμη διάτμησης στο έμβολο, η οποία αντιτίθεται μόνιμα στην οριζόντια κίνησή του (Σχήμα-4.6). Η επιλογή εργαζόμενου ρευστού μεγάλης συνεκτικότητας, επιτρέπει την χρήση μεγάλου διακένου κυλίνδρου-εμβόλου, αφού η δύναμη επαναφοράς (ορθή δύναμη) αποτρέπει το έμβολο από το να έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Η δύναμη αυτή παρουσιάζει μη περιοδική μεταβολή, κυρίως, λόγω των απότομων μεταβολών των οριακών συνθηκών της πίεσης, κατά την εναλλαγή της κατεύθυνσης της ταχύτητας του εμβόλου.



Σχήμα 4.5 (α)Οριζόντια μετατόπιση x του κέντρου του εμβόλου από το κέντρο του κυλίνδρου και (β) η οριζόντια ταχύτητα v_x του εμβόλου



Σχήμα 4.6 (α) Δύναμη διάτμησης F_f που ασκείται αντίθετα στην κατεύθυνση κίνησης του εμβόλου και (β) ορθή δύναμη F_n που ωθεί το έμβολο προς το κέντρο του κυλίνδρου

Η αντλητική δύναμη, που ασκείται, μέσω του εμβόλου, στο ρευστό για να το μεταφέρει στην άνω δεξαμενή, είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη της συνολικής δύναμης που ασκείται στο πλωτήρα, λόγω της σχετικά μικρής διαμέτρου του εμβόλου, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει σημαντικά την κίνηση του πλωτήρα. Η τιμή της δύναμης αυτής (Σχήμα-4.7) είναι ελαφρώς μικρότερη, όταν το έμβολο βρίσκεται στο ανώτερο σημείο της παλινδρόμησής του



Σχήμα 4.7 Αντλητική δύναμη F_p

Κατά την άνω κίνηση του εμβόλου, δημιουργείται ροή του ρευστού προς την άνω δεξαμενή, η οποία υπολογίζεται, θεωρώντας ότι το ρευστό κινείται με την ταχύτητα του εμβόλου και στο διάκενο εμβόλου-κυλίνδρου υπάρχει διαρροή προς την αντίθετη κατεύθυνση:

$$Q_{net} = \dot{z}_p \cdot A_c - Q_{leak} \quad . \tag{4.4}$$

Η παροχή διαρροής (Σχήμα-4.9) είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη (1~2%) της συνολικής παροχής (Σχήμα-4.8) και εξαρτάται από την συνεκτικότητα του ρευστού και το πάχος του

διακένου εμβόλου-κυλίνδρου. Μικρότερη τιμή της συνεκτικότητας του ρευστού οδηγεί σε αύξηση της τιμής του μέτρου της παροχής διαρροής. Κατά την κίνηση του εμβόλου προς την κάτω δεξαμενή, θεωρούμε ότι τα πτερύγια του εμβόλου είναι τελείως ανοιχτά και δεν υπάρχει ροή του ρευστού.



Σχήμα 4.8 Συνολική παροχή ρευστού Q_{net}



Σχήμα 4.9 Παροχή διαρροής ρευστού Q_{leak}

Καθώς το έμβολο αντλεί νερό από την κάτω δεξαμενή στην άνω δεξαμενή, το ύψος της στάθμης του ρευστού μειώνεται και αυξάνεται αντίστοιχα. Το ύψος αυτό, επομένως και η υδροστατική πίεση, αυξάνεται στην άνω δεξαμενή και μειώνεται ισόποσα στην κάτω δεξαμενή, ανάλογα με τον όγκο του νερού που αντλείται. Από τη διαφορά των πιέσεων της άνω και της κάτω δεξαμενής προκύπτει το υδραυλικό ύψος (Σχήμα-4.10), που δύναται να εκμεταλλευτεί από υδροστρόβιλο, καθώς και από την μεταβολή του προκύπτει το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή.

$$H_{m} = L_{c} + (p_{1} - p_{4}) / \rho g$$
(4.5)



Σχήμα 4.10 Πίεση πυθμένα (α) άνω p1 και (β) κάτω δεξαμενής p4 και (γ) μέγιστο υδραυλικό ύψος διαθέσιμο για εκμετάλλευση από υδροστρόβιλο (H_m)

Όταν το έμβολο κινείται προς την άνω δεξαμενή, τα πτερύγιά του κλείνουν για να ωθήσουν το ρευστό σε αυτήν. Όταν αυτά τα πτερύγια είναι κλειστά, δημιουργείται διαφορά πίεσης στο ρευστό, που βρίσκεται στο άνω και στο κάτω μέρος τους (Σχήμα-4.11). Το στιγμιαίο κλείσιμο/άνοιγμα των πτερυγίων του εμβόλου δημιουργεί μικρές διαταραχές στις τιμές των πιέσεων αυτών.



Σχήμα 4.11 Πίεση του ρευστού (α) στην άνω πλευρά του εμβόλου p₂ και (β) στην κάτω πλευρά του p₃

Η κατανομή της πίεσης του ρευστού που βρίσκεται στο διάκενο κυλίνδρου-εμβόλου διαφέρει ανάλογα με την κίνηση του εμβόλου. Κατά την άνω κίνηση του εμβόλου η πίεση έχει πολύ μεγαλύτερες διακυμάνσεις (>800 kPa) (Σχήμα-4.12) σε σχέση με την κάτω κίνηση του εμβόλου (<1kPa) (Σχήμα-4.13,4.14). Όπως είναι φυσικό, οι μέγιστες τιμές πίεσης του στρώματος του ρευστού παρατηρούνται όπου το πάχος του είναι ελάχιστο, δηλαδή για μέγιστες θετικές μετατοπίσεις ,όταν $\theta = 0$, και για αρνητικές, όταν $|\theta| = \pi$. Όπου θεωρούμε συνολική μετατόπιση του κέντρου του εμβόλου από το κέντρο του πλωτήρα το άθροισμα x+e, όπου e η αρχική εκκεντρότητα των κέντρων εμβόλου-κυλίνδρου (Εικόνα-4.3).



Εικόνα 4.3 Σχηματική διάταζη κυλίνδρου παρεκκλίνοντος εμβόλου σε (α) πλάγια και (β) άνω όψη



Σχήμα 4.12 Κατανομή της πίεσης στο διάκενο εμβόλου-κυλίνδρου, κατά την άνω κίνηση του εμβόλου (t=12,5(s))



Σχήμα 4.13 Κατανομή της πίεσης στο διάκενο εμβόλου-κυλίνδρου, κατά την κάτω κίνηση του εμβόλου, και για μέγιστη (τοπική) μετατόπιση του κέντρου του (t=6,511(s) & x=0,1356(mm))



Σχήμα 4.14 Κατανομή της πίεσης στο διάκενο εμβόλου-κυλίνδρου, κατά την κάτω κίνηση του εμβόλου, και για ελάχιστη (τοπική) μετατόπιση του κέντρου του (t=15,844(s) & x=-0,519(mm))

Παρατηρείται ότι στην γραφική απεικόνιση της κατανομής της πίεσης, κατά την άνω κίνηση του εμβόλου (Σχήμα-4.12), δεν γίνεται εμφανής η άνιση κατανομή της πίεσης, κατά μήκος του θ άξονα, σε αντίθεση με τη κατανομή της πίεσης κατά την κάτω κίνηση του εμβόλου (Σχήμα-4.13,4.14). Αυτό δεν οφείλεται στο ότι η πίεση δεν παρουσιάζει άνιση κατανομή στον θ άξονα κατά την άνω κίνηση του εμβόλου, αλλά στο ότι η άνιση αυτή κατανομή είναι αμελητέα, συγκριτικά με την κατανομή της πίεσης στο z άξονα, λόγω της μεγάλης διαφοράς της πίεσης στην άνω και την κάτω πλευρά του εμβόλου (p_2 >> p_3). Με την χρήση του HFC ως εργαζόμενο ρευστό, επιτυγχάνουμε κατανομή πίεσης, τέτοια ώστε να αποτρέπεται η επαφή εμβόλου κυλίνδρου.

Για να υπολογιστεί η ισχύς κάθε δύναμης χρησιμοποιούμε τον γενικό τύπο του γινομένου της δύναμης επί την ταχύτητα του στοιχείου που δέχεται την δύναμη αυτή,. Η συνολική ισχύς του πλωτήρα (Σχήμα-4.15), που προκύπτει από τις δυνάμεις άνωσης, αντίστασης του ρευστού και κυρίως τη δύναμη διέγερσης, επηρεάζεται κυρίως από την τελευταία, καθώς είναι κατά μέτρο πολύ μεγαλύτερη των άλλων δυο.



$$P_{buoy} = \left(F_b + F_D + F_e\right) \cdot \dot{z}_b = F_{net} \cdot \dot{z}_b \tag{4.6}$$

Σχήμα 4.15 Συνολική ισχύς που απορροφάται από τον πλωτήρα P_{buoy}

Αντίστοιχα υπολογίζουμε την ισχύ που προκύπτει από τον ελαστικό (Σχήμα-4.16) και τον αποσβεστικό όρο του καλωδίου (Σχήμα-4.17) που συνδέει τον πλωτήρα με το έμβολο. Οι διαταραχές, που παρουσιάζουν οι τιμές των δυο όρων του καλωδίου αρχικά, οφείλονται στο γεγονός ότι το σύστημα δεν ισορροπεί αμέσως, αλλά αφού παρέλθει ένα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο βρίσκεται σε μεταβατική κατάσταση. Οι διαταραχές δύναται να μειωθούν με καλύτερη εκτίμηση των αρχικών συνθηκών του συστήματος. Ο αποσβεστικός όρος οδηγεί σε απώλεια ισχύος του συστήματος. Επιπλέον απώλειες ισχύος δημιουργούνται και κατά την κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο λόγω του προβλήματος *EHL* (Σχήμα-4.18).

$$P_{K} = K_{rod} (z_{b} - z)(\dot{z}_{b} - \dot{z})$$
(4.7)

$$P_{c} = -C_{rod}(\dot{z}_{b} - \dot{z})(\dot{z}_{b} - \dot{z})$$
(4.8)

$$P_{P-C} = F_f \cdot \dot{z} + F_n \cdot \dot{x} \tag{4.9}$$

Στο τύπο των απωλειών ισχύος, λόγω της διεπαφής εμβόλου-κυλίνδρου, δεν συμπεριλήφθηκε η δύναμη επαναφοράς σε περίπτωση επαφής των τοιχωμάτων εμβόλου-κυλίνδρου *F_{re}*, επειδή δεν παρουσιάστηκε επαφή στη προκείμενη περίπτωση.



Σχήμα 4.16 Ισχύς ελαστικότητας ράβδου P_{K,rod}



Σχήμα 4.17 Ισχύς απόσβεσης ράβδου P_{C,rod}



Σχήμα 4.18 Απώλεια ισχύος λόγω της διεπαφής εμβόλου-κυλίνδρου P_{P-C}

Το δυναμικό ισχύος, που μπορεί θεωρητικά να απορροφήσει ο πλωτήρας, εκτιμάται ανάλογα με τις διαστάσεις του και τα χαρακτηριστικά του κύματος.

$$P_w = H^2 / 2 \cdot T \cdot \sqrt{A_b} = 560 kW \tag{4.10}$$

Η ισχύς μεταφέρεται στο έμβολο από τον πλωτήρα, μέσω της ράβδου που τους συνδέει. Οι απώλειες ισχύος κατά την μεταφορά αυτή συνοψίζονται στις απώλειες του ελαστικού (Σχήμα-4.16) και του αποσβεστικού όρου (Σχήμα-4.17). Στην συνέχεια η ισχύς μέσω του εμβόλου μεταδίδεται στο εργαζόμενο ρευστό, αφού προηγηθούν απώλειες ισχύος στην διεπαφή εμβόλου-κυλίνδρου (λόγω του προβλήματος *EHL*) (Σχήμα-4.18). Η ισχύς άντλησης και η ισχύς που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή ,ως δυναμική ενέργεια, υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{pumping} = F_p \cdot \dot{z}_p \tag{4.11}$$

$$P_{pontetial} = \rho_{o} \cdot g \cdot H_{m} \cdot Q_{net}$$

$$\tag{4.12}$$



Σχήμα 4.19 Ισχύς άντλησης (P_{pumping}) και δυναμική ισχύς (P_{potential}) που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή, υπό τη μορφή υδραυλικού ύψους

Η ενέργεια που αποδίδεται από τις παραπάνω ισχείς υπολογίζεται, ολοκληρώνοντας τις ισχείς στην μονάδα του χρόνου ($E=\int Pdt$). Εν προκειμένω υπολογίζεται η ενέργεια που αποδίδεται στη χρονική διάρκεια μιας περιόδου του συστήματος (T=10s). Στον υπολογισμό αυτό για ρεαλιστικότερα αποτελέσματα χρησιμοποιούμε τιμές των ισχύων στη μόνιμη κατάσταση (t>10s). Κατά αυτό τον τρόπο, υπολογίζεται και η θεωρητική ενέργεια που μπορεί να προσδώσει το κύμα στο πλωτήρα (σταθερή ισχύς):

$$E_{W} = P_{W} \cdot T = H^{2} / 2 \cdot T^{2} \cdot \sqrt{A_{b}} = 5,6MJ \quad .$$
(4.13)

Ο υδροδυναμικός βαθμός απόδοσης του πλωτήρα υπολογίζεται ως ο λόγος της ενέργειας, που απορροφάει ο πλωτήρας, προς την θεωρητική ενέργεια του κύματος.
$$E_{buoy} = \int P_{buoy} \cdot dt = 346,944kJ \tag{4.14}$$

$$\eta_{buoy} = \frac{E_{buoy}}{E_{W}} \cdot 100\% = 6,2\%$$
(4.15)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η απόδοση αυτή είναι πολύ μικρή, επειδή το σύστημα ενός πλωτήρα-εμβόλου που εξετάζεται αποτελεί ένα μόνο τμήμα της όλης διάταξης, η οποία θα περιλαμβάνει έναν αριθμό τέτοιων συστημάτων στη σειρά, τα οποία απορροφούν προοδευτικά την ενέργεια του κύματος. Επομένως, κάθε σύστημα απορροφά μικρό μέρος της διαθέσιμης ενέργειας του κύματος .Από τον λόγο της ενέργειας που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή, προς την ενέργεια άντλησης, εκτιμούμε το βαθμό απόδοσης της αντλίας-εμβόλου.

$$E_{pumping} = \int P_{pumping} \cdot dt = 108,677kJ \tag{4.16}$$

$$E_{potential} = \int P_{potential} \cdot dt = 106,809kJ \tag{4.17}$$

$$\eta_{pumping} = \frac{E_{potential}}{E_{pumping}} \cdot 100\% = 98,28\%$$
(4.18)

Η απόδοση της αντλίας είναι πολύ υψηλή, καθώς οι απώλειες οφείλονται κυρίως στις υδραυλικές απώλειες ροής του διακένου. Ο βαθμός απόδοσης, ο οποίος απεικονίζει την ενέργεια που μεταφέρεται στο έμβολο από τον πλωτήρα, περιγράφεται ως:

$$\eta_{piston} = \frac{E_{pumping}}{E_{buoy}} \cdot 100\% = 31,32\%$$
(4.19)

Η συνολική απόδοση της συσκευής υπολογίζεται ως ο λόγος της ενέργειας, που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή, προς τη θεωρητική ενέργεια, που μπορεί να απορροφήσει ο πλωτήρας από το κύμα.

$$\eta_{total} = \eta_{buoy} \cdot \eta_{piston} \cdot \eta_{pumping} = \frac{E_{potential}}{E_W} \cdot 100\% = 1,91\%$$
(4.20)

<u>4.4 Αποτελέσματα απόκρισης συσκευής για παραμετροποιημένα</u> χαρακτηριστικά πλωτήρα και εμβόλου

Τα χαρακτηριστικά του πλωτήρα, όπως το ύψος και το πλάτος του, καθορίζουν τη κίνηση που κάνει ο πλωτήρας σε σχέση με το κύμα. Η κίνηση του πλωτήρα μπορεί να επηρεάσει την ενεργειακή απόδοση της συσκευής. Αρχικά, εξετάζουμε πως η σταδιακή μείωση της επιφάνειας της βάσης του πλωτήρα επηρεάζει την κίνησή του. Στους υπολογισμούς που κάναμε, έως εδώ, θεωρήσαμε ότι η βάση του πλωτήρα έχει τετράγωνο σχήμα εμβαδού $A_b=49 m^2$. Για σταθερή μάζα πλωτήρα και διαφορετικές διαστάσεις της βάσης του πλωτήρα, υπολογίζεται η κατακόρυφη μετατόπιση του πλωτήρα (Σχήμα-4.20).



Σχήμα 4.20 Μετατόπιση του πλωτήρα z_b, συγκριτικά με την μετατόπιση της επιφάνειας του νερού z_w για διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του A_b

Παρατηρούμε ότι, καθώς μειώνεται η επιφάνεια της τετράγωνης διατομής του πλωτήρα, το ύψος του τμήματος του πλωτήρα που βρίσκεται βυθισμένο αυξάνεται, ενώ, όταν παίρνει τιμές μικρότερες από $4m^2$, ο πλωτήρας είναι ολόκληρος βυθισμένος κάτω από την επιφάνεια του κύματος. Εμφανίζεται επίσης και μια μικρή αύξηση στη διαφορά φάσης, σχεδόν αμελητέα ωστόσο, μεταξύ των κατακόρυφων μετατοπίσεων του κύματος και του πλωτήρα. Καθότι το έμβολο, που συνδέεται μέσω ράβδου με τον πλωτήρα, έχει τοποθετηθεί αρκετά χαμηλά στον κύλινδρο (αρχική απόσταση από τον πυθμένα της κάτω δεξαμενής L_0 =10m),που ενώνει τις δυο δεξαμενές, η μετατόπιση του εμβόλου άρα και του πλωτήρα δεν γίνεται να λάβει τιμές πολύ μικρές. Ακόμα και να μην λαμβάνει τόσο χαμηλές τιμές, σε περίπτωση που ο πλωτήρας βρίσκεται ολόκληρος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας θεωρούμε τη συσκευή μη λειτουργική. Παρατηρείται ότι, ενώ η ενέργεια που απορροφάει ο πλωτήρας αυξάνεται ,όσο αυξάνεται η επιφάνεια της βάσης του πλωτήρα.



Σχήμα 4.21 Δυναμική ενέργεια $E_{potential}$ που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή και ενέργεια που απορροφάται από τον πλωτήρα E_{buoy} για διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του A_b

Μολονότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφοροποίηση, η θεωρητική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει ο πλωτήρας από το κύμα μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η επιφάνεια της βάσης του πλωτήρα. Επομένως μεταβάλλεται και ο συνολικός βαθμός απόδοσης της συσκευής (Σχήμα-4.22). Όσο αυξάνεται η επιφάνεια του πλωτήρα μειώνεται ακόμη περισσότερο ο ολικός βαθμός απόδοσης, καθώς το μεμονωμένο έμβολο εξακολουθεί να μένει πολύ μικρό για να απορροφήσει την ενέργεια του κύματος αναφοράς.



Σχήμα 4.22 Βαθμός απόδοσης πλωτήρα η_{buoy} και συνολικός βαθμός απόδοσης η_{total} για διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του πλωτήρα A_b

Στη συνέχεια, προσομοιώνουμε την λειτουργία της συσκευής για διπλάσιο ύψος πλωτήρα (*H_b*=4(m)), για διάφορες τιμές του εμβαδού της βάσης του πλωτήρα, αντίστοιχα. Κατά τις προσομοιώσεις αυτές, παρόλο που μεταβάλλονται οι διαστάσεις του πλωτήρα, θεωρούμε ότι η μάζα του πλωτήρα είναι σταθερή .Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του πλωτήρα δεν φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από το ύψος του πλωτήρα (Σχήμα-4.23).



Σχήμα 4.23 Κατακόρυφη μετατόπιση του πλωτήρα z_b, συγκριτικά με την μετατόπιση της επιφάνειας του νερού z_w για ύψος πλωτήρα H_b=4m και διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του A_b

Αντίστοιχα, αμελητέες θεωρούνται και οι μεταβολές της ενέργειας που ανακτάται από τη συσκευή (Σχήμα-4.24) και οι βαθμοί απόδοσης (Σχήμα-4.25) .Ωστόσο, παρατηρείται ότι η συσκευή καθίσταται λειτουργική για μικρότερες τιμές του εμβαδού της επιφάνειας της βάσης του πλωτήρα, έως ότου δηλαδή να βυθιστεί ο πλωτήρας κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 4.24 Δυναμική ενέργεια $E_{potential}$ που αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή και ενέργεια που απορροφάται από τον πλωτήρα E_{buoy} για ύψος πλωτήρα $H_b=4m$ και διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του A_b



Σχήμα 4.25 Βαθμός απόδοσης πλωτήρα η_{buoy} και συνολικός βαθμός απόδοσης η_{total} για ύψος πλωτήρα H_b=4m και διαφορετικές τιμές της επιφάνειας της βάσης του A_b

Παρατηρείται ότι η αύξηση του ύψους του πλωτήρα επηρεάζει αμελητέα τη κίνηση και την ενέργεια που απορροφά η συσκευή. Ωστόσο το γεγονός ότι η αύξηση αυτή δεν ακολουθείται από ανάλογη αύξηση της μάζας του πλωτήρα οδηγεί σε μείωση, αναλογικά, του μήκους του τμήματος του πλωτήρα που βρίσκεται βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια του νερού. Επομένως, η συσκευή παραμένει λειτουργική για μικρότερες τιμές του εμβαδού της επιφάνειας της βάσης του πλωτήρα. Επισημαίνεται ότι αμελήθηκαν οι μεταβολές των συντελεστών αντίστασης και προστιθέμενης μάζας.

Η επιφάνεια του εμβόλου είναι αυτή που καθορίζει τη μάζα του εργαζόμενου ρευστού, το οποίο αντλείται στην άνω δεξαμενή. Προσομοιώνεται η απόκριση του συστήματος για αυξανόμενες τιμές της ακτίνας του εμβόλου, άρα και του εμβαδού της μετωπικής επιφάνειας του εμβόλου. Το πλάτος της παλινδρομικής κίνησης του πλωτήρα αναμένεται να μειωθεί, όσο αυξάνεται η ακτίνα του εμβόλου (Σχήμα-4.26), καθώς αυξάνεται και η ενέργεια που απαιτείται για να αντληθεί το ρευστό στην άνω δεξαμενή.



Σχήμα 4.26 Κατακόρυφη μετατόπιση του κέντρου του πλωτήρα z_b, συγκριτικά με την μετατόπιση της επιφάνειας του νερού z_w για διαφορετικές τιμές της ακτίνας της μετωπικής επιφάνειας του εμβόλου R_p

Η ενέργεια που ανακτάται από την συσκευή αναμένεται αρχικά να αυξηθεί, όσο αυξάνεται η ακτίνα του εμβόλου. Ωστόσο, αν η επιφάνεια του εμβόλου αυξηθεί αρκετά, πάνω από κάποιο όριο, ο πλωτήρας αδυνατεί να κινήσει το έμβολο και η ενέργεια που ανακτάται αρχίζει να εμφανίζει φθίνουσα τάση (Σχήμα-4.27).



Σχήμα 4.27 Δυναμική ενέργεια E_{potential} που αποθηκεύεται στην άνω δεζαμενή και ενέργεια που απορροφάται από τον πλωτήρα E_{buoy} για διαφορετικές τιμές της ακτίνας της μετωπικής επιφάνειας του εμβόλου R_p

Ανάλογα με τις ενέργειες μεταβάλλονται και οι βαθμοί απόδοσης, αφού η θεωρητική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει ο πλωτήρας από το κύμα παραμένει σταθερή (Σχήμα-4.28).



Σχήμα 4.28 Βαθμός απόδοσης πλωτήρα η_{buoy} και συνολικός βαθμός απόδοσης η_{total} για διαφορετικές τιμές της ακτίνας της μετωπικής επιφάνειας του εμβόλου R_p

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, ο πλωτήρας και το κύμα των συγκεκριμένων διαστάσεων που μελετώνται, δύνανται να κινήσουν έμβολο αρκετά μεγαλύτερης ακτίνας, μεγιστοποιώντας τον ολικό βαθμό απόδοσης της διάταξης για ακτίνα εμβόλου περίπου 0,75m. Ωστόσο, μια τέτοια βελτιστοποίηση δεν έχει πρακτική αξία στη συγκεκριμένη διάταξη, η οποία βασίζεται στη εν σειρά λειτουργία πολλών συστημάτων πλωτήρα-εμβόλου μικρότερης διαμέτρου, ώστε η ενέργεια του κύματος να ανακτάται σταδιακά.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και αριθμητική μοντελοποίηση της συσκευής MP^2PTO , όπως αυτή αναλύθηκε σε προγενέστερη ερευνητική εργασία [2]. Με τη μοντελοποίηση της συσκευής MP²PTO, ως απλουστευμένη διάταξη ενός πλωτήρα και ενός εμβόλου, εξετάστηκε η συμπεριφορά των στοιχείων αυτών για συγκεκριμένες διαστάσεις τους και για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κύματος. Αρχικά αναλύθηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του κύματος, αλλά και την δυναμική αλληλεπίδραση των στοιχείων του μηχανισμού. Το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο προέκυψε από την ανάλυση των εξισώσεων, προσομοιώθηκε, κατασκευάζοντας υπολογιστικό κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού fortran, για την εξαγωγή γραφικών παραστάσεων των μεγεθών που περιγράφουν την λειτουργία του μηγανισμού. Για την προσομοίωση λήφθηκαν υπόψη οι δυνάμεις που ασκούνται από το κύμα στον πλωτήρα, η αλληλεπίδραση πλωτήρα-εμβόλου, μέσω της ράβδου που τα συνδέει, και η αλληλεπίδραση εμβόλου-εργαζόμενου ρευστού. Για τον υπολογισμό δυνάμεων και μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση της συσκευής έγιναν παραδοχές και εκτιμήσεις συντελεστών, βασισμένες σε προηγούμενη ερευνητική εργασία [2], οι οποίοι μπορούν να υπολογισθούν ακριβέστερα σε μελλοντικές ερευνητικές μελέτες.

Όσον αφορά την κίνηση του πλωτήρα, σημαντικό ρόλο έχει η τιμή της απόσβεσης του κύματος. Επίσης, οι διαστάσεις του πλωτήρα για συγκεκριμένη μάζα πλωτήρα και επιφάνεια εμβόλου καθορίζουν τη θέση του σε σχέση με την επιφάνεια του κύματος. Παρατηρήθηκε ότι η κίνηση του πλωτήρα δεν αποκλίνει από την κίνηση του κυματισμού, αφού η διαφορά φάσης είναι αμελητέα και το πλάτος ταλάντωσης περίπου ίσο με αυτό του κύματος. Η μεταβολή των διαστάσεων του πλωτήρα δεν επηρεάζει σημαντικά την ενέργεια που αποθηκεύεται στη συσκευή, καθώς δεν μεταβάλλεται σημαντικά το πλάτος της παλινδρόμησης, όσο η επιφάνεια του εμβόλου παραμένει μικρή. Ειδικά, η αύξηση του ύψους του πλωτήρα δεν επηρεάζει την κίνησή του, παρά μόνο καθιστά δυνατή την λειτουργία του συστήματος για μικρότερες επιφάνειες της βάσης του πλωτήρα, καθώς κάτω από την στάθμη του νερού.

Για την λύση του προβλήματος της ελαστο-υδροδυναμικής λίπανσης (EHL), εξετάστηκε η χρήση υδραυλικού ρευστού, το οποίο έχει ως βάση το νερό (HFC),ως εργαζόμενο μέσο. Η χρήση του ρευστού αυτού φαίνεται να έχει αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Η χρήση ρευστού συγκεκριμένης πυκνότητας και συνεκτικότητας μειώνει την παροχή διαρροής, η οποία συνεπάγεται απώλειες ισχύος, και αποτρέπει την επαφή μεταξύ των τοιχωμάτων του εμβόλου με αυτά του κυλίνδρου μέσα στον οποίο κινείται.

Το ενεργειακό δυναμικό που δύναται να αποθηκεύσει το μοντέλο ενός πλωτήραεμβόλου είναι σχετικά μικρό ως προς το ενεργειακό δυναμικό του κύματος. Ο σχετικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξης του 5% για τις εξεταζόμενες διαστάσεις εμβόλου. Όμως η συσκευή σε πλήρη ανάπτυξη, που θα περιλαμβάνει πολλά τέτοια συστήματα πλωτήραεμβόλου σε σειρά, θα έχει τη δυνατότητα ανάκτησης πολύ υψηλότερου ποσοστού ενέργειας από κάθε κύμα. Η διάταξη της αντλίας ενός εμβόλου, για τις ονομαστικές τιμές των διαστάσεών της, λειτουργεί αρκετά αποδοτικά (σχετικός βαθμός ενεργειακής απόδοσης 98-99%). Επίσης, αν και μελετήθηκε μόνο η ενεργειακή απόδοση του μηχανισμού για αποθήκευση ενέργειας στην άνω δεξαμενή, η αξιοποίηση της ενέργειας αυτής με κατάλληλο υδροστρόβιλο δεν αναμένεται να έχει πολύ μεγάλες απώλειες, αφού ο υδροστρόβιλος θα μπορεί να λειτουργεί στην περιοχή του σημείου σχεδιασμού του με ολικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 90%.

Γενικότερα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της διάταξης ενός πλωτήρα-εμβόλου είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Ωστόσο, απαιτείται περεταίρω έρευνα και μελέτη, όσον αφορά τη λειτουργία της συσκευής σε ευρύτερο φάσμα χαρακτηριστικών του κύματος, τις βέλτιστες διαστάσεις και μάζα του πλωτήρα, τη λειτουργία της πλήρους διάταξης πολλαπλών πλωτήρων σε συνεργασία με αντλίες πολλαπλών εμβόλων. Οι παράμετροι σχεδιασμού της ολοκληρωμένης συσκευής (αριθμός και σχετικές γεωμετρικές διαστάσεις των επιμέρους συστημάτων πλωτήρα-εμβόλου, χωρητικότητα δεξαμενών αποθήκευσης, αριθμός και μέγεθος υδροστροβίλων κλπ.) μπορούν στη συνέχεια να βελτιστοποιηθούν, ανάλογα με το συγκεκριμένο κυματικό δυναμικό μιας δεδομένης πιθανής θέσης εγκατάστασής της. Στο πλαίσιο αυτό μπορεί να μελετηθεί και η δυνατότητα χρήσης εμβόλων ρυθμιζόμενης επιφάνειας, ώστε να επιτυγχάνουν υψηλό βαθμό ανάκτησης της κυματικής ενέργειας σε όλο το εύρος του κυματικού δυναμικού (ύψος και μήκος κυμάτων) μιας τοποθεσίας. Τα αποτελέσματα που θα ληφθούν σε θεωρητικές έρευνες μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης της συσκευής οφείλουν να επιβεβαιώνονται από πειραματικές μελέτες σε εργαστηριακό ή σε θαλάσσιο περιβάλλον. Τέλος, σε μεταγενέστερο στάδιο, προτού η συσκευή αξιοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες, είναι απαραίτητη μια οικονομοτεχνική ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας μιας τέτοιας επένδυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ocean Grazer Group, "The Ocean Grazer: A novel ocean energy collection and storage device" (www.oceangrazer.com)
- [2] Vakis A.I., Anagnostopoulos J.S., "Mechanical design and modeling of a single-piston pump for a novel wave energy converter" Renewable Energy, 2016
- [3] BP, "BP Energy Outlook 2017" BP (2017)
- [4] BP, "BP Statistical Review of World Energy 2017" BP, 2017
- [5] World Energy Council, "World Energy Resources, Marine Energy" World Energy Council, 2016
- [6] Center for Renewable Energy Sources, "Wave energy Utilization in Europe: Current Status and Perspectives" European Thematic Network on Wave Energy, 2002
- [7] Καραμήτρος Β., "Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μηχανισμού ανάκτησης κυματικής ενέργειας μέσω της κατακόρυφης παλινδρομικής κίνησης βυθιζόμενου πλωτήρα" Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών ΕΜΠ, 2013
- [8] Κούρτζης Χ., "Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη-εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα" Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών ΕΜΠ, 2013
- [9] ΤΕΕ, "Οι προοπτικές των ΑΠΕ στην Ελλάδα" (web.tee.gr)
- [10] Heath T.V., "A review of oscillating water columns" (http://rsta.royalsocietypublishing.org/)
- [11] Clemente Pinol S., "Dynamical modelling, analysis and optimization of a floater blanket for the Ocean Grazer" Master's thesis, University of Groningen, 2015
- [12] Falnes J., "Ocean waves and oscillating systems" Cambridge University Press, 2002
- [13] Falcao A. F. O., "Modelling of Wave Energy Conversion" Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014
- [14] Det Norske Veritas, "Modelling and analysis of marine operations" Det Norske Veritas AS, 2014
- [15] Falnes J., Halls J., "Heaving buoys, point absorbers and arrays" Phil. Trans. R. Soc. A., 2012

- [16] Dean R. G., Dalrymple R. A., "Water waves mechanics for engineers and scientists" World Scientific, 1991
- [17] Newman J. N., "Marine hydrodynamics" The MIT Press, 1977
- [18] Berteaux H. O., "Buoy Engineering" Wiley, 1976
- [19] Gabron W., Smykla J., "Computer program for simulation of pressure distribution in the hydrodynamic radial bearing" (http://www.foibg.com/ibs_isc/ibs-27/ibs-27-p26.pdf)
- [20] Williams J., "Engineering tribology" Cambridge University Press, 2005
- [21] Khonsari M. M., Booster E. R., "Applied tribology: bearing design and lubrication" John Wiley & Sons, 2008
- [22] Γιαννάκογλου Κ. Χ., Αναγνωστόπουλος Ι., Μπεργελές Γ., "Αριθμητική ανάλυση για μηχανικούς" ΕΜΠ, 2003
- [23] Kreyzig E., "Advanced engineering mathematics" John Wiley & Sons, 2011
- [24] Nagel J. R., "Introduction to numerical integration" University of Utah, 2012