



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών

“Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μηχανισμού ανάκτησης κυματικής ενέργειας μέσω της κατακόρυφης παλινδρομικής κίνησης βυθιζόμενου πλωτήρα”.



Όνοματεπώνυμο: Καραμήτρος Βασίλειος
Επιβλέπων καθηγητής: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης

Αθήνα 2013

Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη μιας συσκευής εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, η οποία βασίζεται σε σχέδια του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η συσκευή αυτή αποτελείται από έναν πλωτήρα ο οποίος συνδέεται με το κύριο μέρος του μηχανισμού μέσω ενός βραχίονα. Πάνω στον βραχίονα είναι προσαρτημένο ένα έμβολο το οποίο με την ταλάντωση του πλωτήρα, άρα και αυτή του βραχίονα, αναρροφά νερό από τη θάλασσα και στη συνέχεια το στέλνει μέσα σε ένα δοχείο πίεσης. Από εκεί το νερό καταλήγει σε έναν υδροστρόβιλο ο οποίος δίνει με την σειρά του κίνηση σε μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας.

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός προγράμματος, στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού `fortran77`, το οποίο να υπολογίζει την ιδανική διαστασιολόγηση του μηχανισμού ώστε να μπορεί αυτός να εκμεταλλεύεται βέλτιστα το κυματικό δυναμικό μιας συγκεκριμένης θαλάσσιας περιοχής. Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας σημαντική βοήθεια έλαβα από τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ιωάννη Αναγνωστόπουλο αλλά και από τον Δρ. Μιχάλη Παναγιωτόπουλο από το ΚΑΠΕ.

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική μοντελοποίηση ενός μηχανισμού που βασίστηκε σε σχέδια του ΚΑΠΕ ώστε στη συνέχεια μέσα από την δημιουργία ενός προγράμματος να είναι δυνατή η βελτιστοποίηση των διαστάσεων του. Στόχος λοιπόν της εργασίας είναι να βρεθούν οι διαστάσεις του πλωτήρα του μηχανισμού αλλά και των επιμέρους μερών αυτού ώστε να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την κυματική ενέργεια.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην προσπάθεια εκμετάλλευσης του κυματισμού αλλά και μια σύντομη ανασκόπηση στις υπάρχουσες τεχνολογίες κυματικής ενέργειας. Εν συνεχεία εξηγείται η φυσική της ταλάντωσης του πλωτήρα και η εύρεση των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του πλωτήρα. Στη συνέχεια ακολούθησε η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων του πλωτήρα για την οποία αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας. Η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων από το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε έγινε σε δύο στάδια. Στο πρώτο θεωρήθηκε ότι το έμβολο βρισκόταν σε κάθετη θέση πάνω στο πλωτήρα, ενώ στη συνέχεια μελετήθηκε η περίπτωση όπου το έμβολο είναι στηριγμένο σε πλάγιο βραχίονα. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για να βρεθεί ο καλύτερος πλωτήρας, είναι γνωστή ως “βελτιστοποίηση με μέθοδο πλέγματος” κατά την οποία δημιουργήθηκε ένα σύνολο από διαφορετικούς πλωτήρες και στη συνέχεια για κάθε ένα χωριστά, με την χρήση της αριθμητικής μεθόδου Runge-Kutta, έγινε αρχικά προσομοίωση της ταλάντωσης του για συγκεκριμένα κυματικά δεδομένα και στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της ενέργειας που αποδίδει. Τέλος έγινε παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων που έδωσε η εκτέλεση του κώδικα όπως και προτάσεις σχετικές με την εργασία.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που έδωσε ο κώδικας μπορεί να υποθεί πως και στις δύο περιπτώσεις τοποθέτησης του εμβόλου είναι λογικά. Συγκεκριμένα δείχνουν πως για ένα κυματικό δυναμικό που περιλαμβάνει μεγάλα κύματα ο καλύτερος πλωτήρας είναι αυτός με μεγάλο βύθισμα και μικρή ακτίνα ώστε να εκμεταλλευόμαστε όσο το δυνατόν περισσότερο την ενέργεια των μεγάλων κυμάτων. Αντίθετα σε ένα κυματικό δυναμικό πολλών μικρών κυμάτων θα πρέπει ο πλωτήρας να έχει μικρό βύθισμα αλλά μεγάλη ακτίνα ώστε ο πλωτήρας, άρα και ο μηχανισμός, να είναι σε θέση να “ακολουθούν” τα μικρά κύματα τα οποία κυριαρχούν.

Summary

The aim of this thesis is the study of a machine designed by the CRES, in order to find out which are the dimensions that will lead to maximum exploitation of the wave energy field. The dimensions that we want to find out are; draft, buoy radius, the length of the arm. Also we want to calculate the point where the piston will be supported/tied/screwed.

The study was made in two steps. First, was studied the buoy's movement considering that the piston was placed vertically on the buoy. Then, it was studied the case in which the piston was placed in athwart position and leaned on the arm. The method, that was used to find the best buoy, is named "optimization by using grid". In this method, a set of different buoys was made and then every buoy's oscillation, for predefined wave data, was calculated/simulated using the Runge-Kutta numerical method. Lastly, knowing the amplitude of the oscillation it was easy to calculate the power that every buoy was producing. The best buoy in every occasion, with the piston placed vertical and athwart, was the one that was producing the higher power.

The results of the program, which will be studied in another paragraph, were in both occasions reasonable.

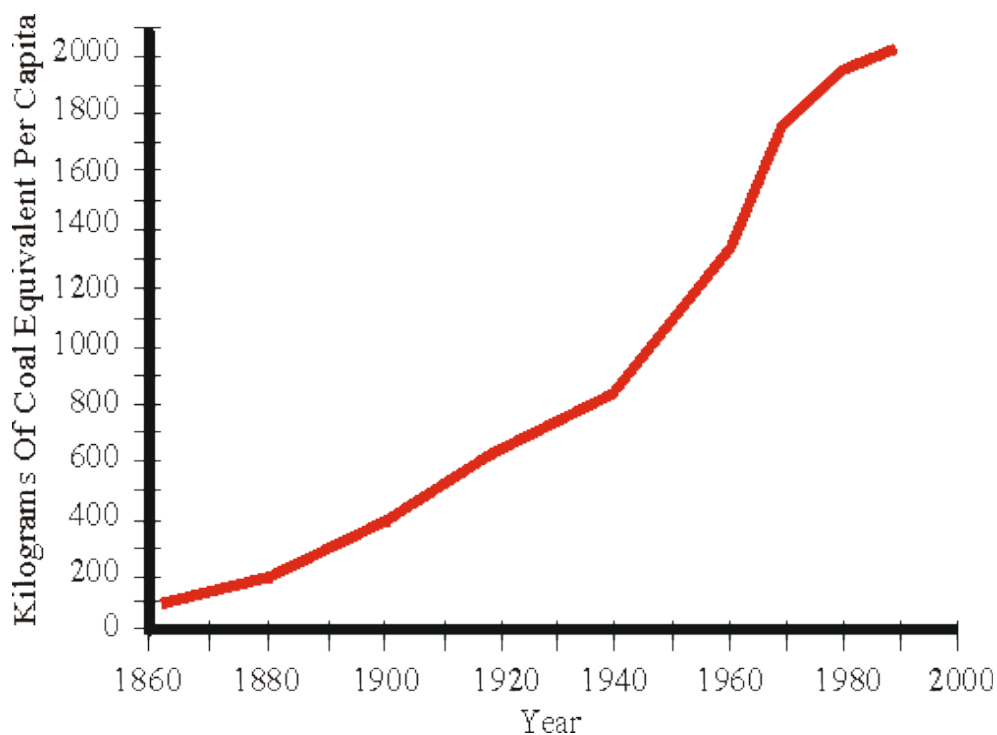
Περιεχόμενα

Εισαγωγή	7-11
1. Ιστορική αναδρομή και γενικές πληροφορίες.	
1.1 Ιστορική αναδρομή	12-14
1.2 Ενεργειακοί πόροι	15
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Τεχνολογιών Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας	16-17
1.4 Δραστηριότητες στη Ευρώπη	17-21
1.5 Συμπεράσματα και προοπτικές	22
2. Υπάρχουσες λύσεις εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.	
2.1 Συσσκευές μακρόστενης μορφής (attenuator)	22-23
2.2 Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorbers)	24
2.3 Συσσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδόμησης (Oscillating Wave Surge Converter)	25
2.4 Παλινδρομούσα Στήλη Νερού (Oscillating Water Column)	26
2.5 Συσσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device)	27
2.6 Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged Pressure differential)	28
2.7 Χωρίς συγκεκριμένη κατηγορία	28
3. Εισαγωγή στη κυματική Ενέργεια και περιγραφή MOKKY (Μηχανισμός αξιοποίησης της Οριζόντιας και Κάθετης κίνησης του Κυματισμού).	
3.1 Μορφές της ενέργειας των κυμάτων και αξιοποίησή της	29-30
3.2 Περιγραφή της προτεινόμενης συσκευής	30-35
4. Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος της κάθετης κίνησης	36-42
5. Δημιουργία κώδικα για την επίλυση του προβλήματος σε γλώσσα Fortran.	
5.1 Θεώρηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του εμβόλου επάνω στον πλωτήρα και κάθετα σε αυτόν.	43-46
5.1.1 Επεξήγηση κώδικα για την επιλογή βέλτιστου πλωτήρα	46-50
5.2 Θεώρηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του εμβόλου επάνω στο βραχίονα υπό γωνία θ .	51-52

5.2.1 Επεξήγηση κώδικα για τη βέλτιστη τοποθέτηση του εμβόλου	52-55
6. Αποτελέσματα.	
6.1 Αποτελέσματα με εφαρμογή της δύναμης του εμβόλου επάνω στον πλωτήρα στο κατακόρυφο επίπεδο	56-57
6.2 Η επίδραση της δύναμης στο μέγεθος του πλωτήρα	58-60
6.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης βραχίονα και τοποθέτησης εμβόλου.	61-62
7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων.	63-77
8. Συμπεράσματα-Προτάσεις	78-81
9. Βιβλιογραφία	82-83

Εισαγωγή

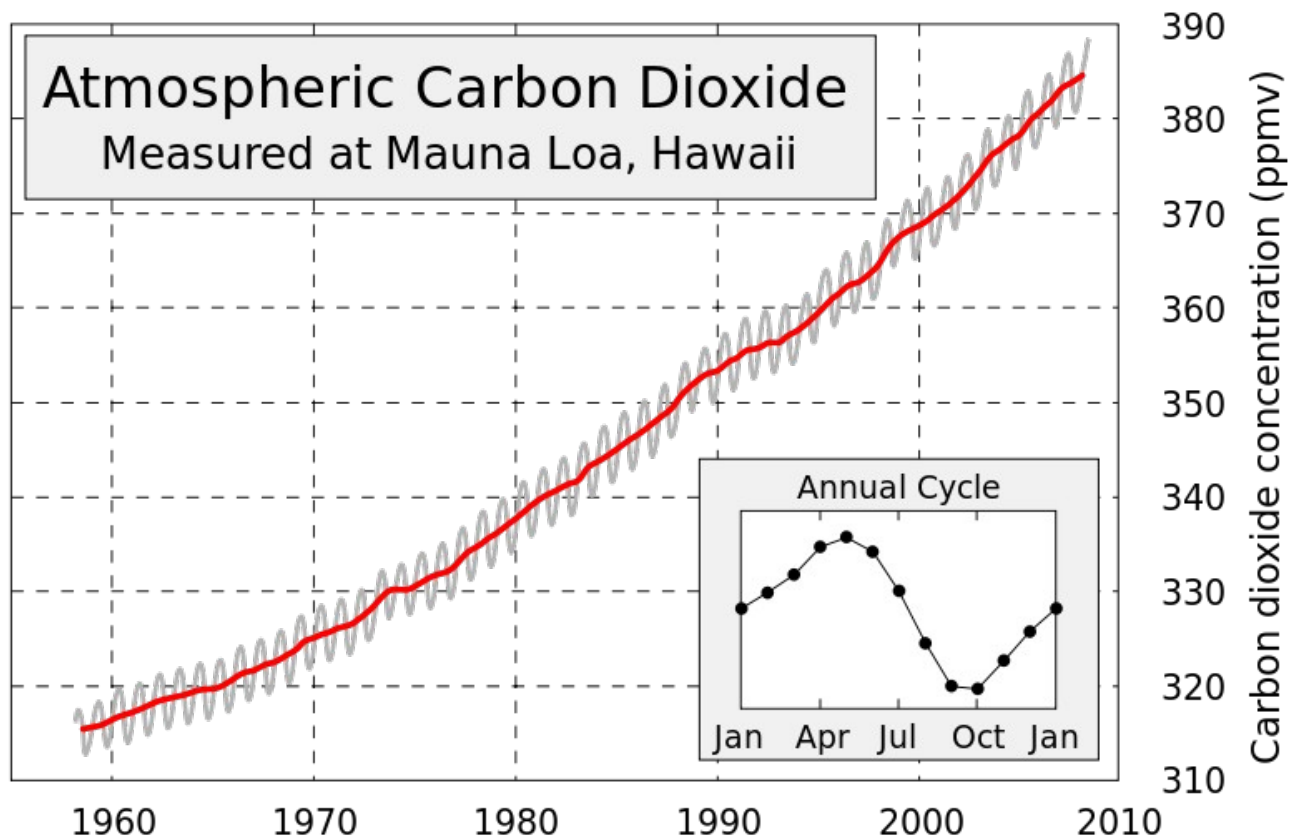
Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σημερινές κοινωνίες είναι αυτό της κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας. Οι λεγόμενες αναπτυγμένες κοινωνίες έχουν ανάγκη από μεγάλα ποσά ενέργειας τόσο για βιομηχανική τους παραγωγή όσο και για τις καταναλωτικές συνήθειες των πολιτών τους. Συγκεκριμένα, κάθε προϊόν της βιομηχανίας απαιτεί για κάθε στάδιο της δημιουργίας αλλά και της διανομής του μεγάλα ποσά ενέργειας. Επίσης, ο σύγχρονος τρόπος ζωής σε αυτές τις κοινωνίες απαιτεί την κατανάλωση από κάθε άνθρωπο μεγάλων ποσών ενέργειας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο για την μετακίνηση του όσο και για πιο απλές ασχολίες όπως μαγείρεμα και διασκέδαση. Εκτός όμως από τις ανεπτυγμένες κοινωνίες τεράστια ποσά ενέργειας απαιτούν και οι αποκαλούμενες αναπτυσσόμενες κοινωνίες τόσο στην προσπάθειά τους για αύξηση της παραγωγής τους όσο και για την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των πολιτών τους. Η παραπάνω κατάσταση είναι γνωστή ως ενεργειακό πρόβλημα.



Εικόνα 1: Ενεργειακή κατανάλωση κατά άτομο από το 1860 μέχρι και το 2000.

Η επίλυση του ενεργειακού προβλήματος αποτελείται από δύο διαφορετικές συνιστώσες: την αύξηση της παραγωγής και την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης επιτυγχάνεται με την έλευση νέων τεχνολογιών και την εφαρμογή τους στις συσκευές που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η αντικατάσταση των ενεργοβόρων λαμπτήρων πυρακτώσεως από λαμπτήρες τεχνολογίας LED και οι νέοι κινητήρες χαμηλής κατανάλωσης. Από την άλλη πλευρά η αύξηση της παραγωγής ενέργειας γίνεται με τον πιο απλό τρόπο στις περισσότερες περιπτώσεις: με την αύξηση του αριθμού των υπαρχόντων εργοστασίων. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας στις πλείστες περιπτώσεις είναι η καύση στερεών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης και ο άνθρακας, και η πυρηνική σχάση σε αντιδραστήρες. Είναι όμως γνωστό πως και οι δύο αυτές μέθοδοι επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον με τα απόβλητά τους ενώ είναι γνωστό πως οι πηγές καυσίμων τους γίνονται όλο και λιγότερο εύκολα προσβάσιμες.

Η καύση των στερεών καυσίμων έχει ως συνηθέστερο καυσαέριο το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 η παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια συνεχή αύξηση και αυτό αποδίδεται στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες κοινωνίες και στους τρόπους που το αντιμετωπίζουν όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Όμως δεν είναι μόνο η καύση που δημιουργεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Το ίδιο συμβαίνει και με την πυρηνική σχάση η οποία δημιουργεί τα γνωστά πυρηνικά απόβλητα. Το πρόβλημα που αυτά δημιουργούν είναι ο συνδυασμός της ελκυστικής από αυτά ραδιενέργειας και της αποθήκευσής τους. Τα πυρηνικά απόβλητα ακτινοβολούν για πολλά χιλιάδες χρόνια ραδιενέργεια και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αποθηκευτούν ή να ταφούν σε ειδικούς χώρους οι οποίοι όμως μετά από αυτά θεωρούνται ακατάλληλοι για οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα.



Εικόνα 2: Η παρουσία του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα από το 1960 έως και το 2010 μετρούμενο στη Χαβάι, Μάουνα Λόα.

Εκτός των παραγώγων της καύσης και της πυρηνικής σχάσης πρόβλημα αποτελεί και το γεγονός ότι οι πηγές των καυσίμων είναι όλο και περισσότερο δυσεύρετες. Σύμφωνα με μια έρευνα της πετρελαϊκής εταιρείας BP, τα γνωστά ορυκτά καύσιμα, υγρά ή στερεά, επαρκούν μόνο για τα επόμενα περίπου 93 χρόνια θεωρώντας ότι ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας παραμένει σταθερός (πίνακας 1). Η δυσκολία στην ανεύρεση νέων κοιτασμάτων θα οδηγήσει προφανώς και στην αύξηση της τιμής αυτών. Η μεταβολή της τιμής του αργού πετρελαίου φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2, όπου είναι εμφανής η αύξησή της τα τελευταία χρόνια. Είναι εμφανή λοιπόν η ανάγκη για εύρεση νέων τρόπων παραγωγής ενέργειας.

	Αποθέματα		Ετήσια παραγωγή		Α/Π
	m ³	Joules	m ³	Joules	
Αργό πετρέλαιο	1.9 x 10 ¹¹	6.8 x 10 ²¹	4.7 x 10 ⁹	1.7 x 10 ²⁰	41
Φυσικό αέριο	1.8 x 10 ¹⁴	6.4 x 10 ²¹	2.7 x 10 ¹²	9.6 x 10 ¹⁹	67
Κάρβουνο	8.0 x 10 ¹⁷	1.7 x 10 ²²	2.9 x 10 ¹⁵	6.1 x 10 ¹⁹	277
Σύνολο		3.0 x 10 ²²		3.3 x 10 ²⁰	93

Πίνακας 1. Παγκόσμια αποδεδειγμένα αποθέματα και ετήσια παραγωγή υδρογονανθράκων σε όγκο (m³ αερίου σε συνθήκες 1 bar και 15 °C) και σε ενέργεια. Α/Π είναι ο λόγος των αποθεμάτων προς την ετήσια παραγωγή, και δίνει τον αριθμό των ετών που τα γνωστά αποθέματα θα διαρκέσουν αν εκμεταλλεύονται με τον τρέχοντα ρυθμό παραγωγής. Πηγή: BP στατιστική επιθεώρηση έτους 2008 (www.bp.com)

Τα τελευταία 30 χρόνια λόγω όλων των παραπάνω προβλημάτων, γίνονται προσπάθειες σε παγκόσμιο επίπεδο για την παραγωγή ενέργειας από πηγές ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον. Αυτές οι πηγές είναι γνωστές ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και σε αυτές περιλαμβάνονται μέθοδοι παραγωγής από τη γεωθερμία, τον ήλιο, τον άνεμο, τα παλιρροϊκά ρεύματα, τα επιφανειακά κύματα και τα βιοκαύσιμα. Ο θαλάσσιος κυματισμός είναι, όπως όλες οι μορφές ΑΠΕ, μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Επιπρόσθετα παρουσιάζει μεταξύ των ΑΠΕ την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 1000 kW/m μετώπου κύματος. Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μας θα κάλυπτε περίπου στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Η ιδέα για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου κυματισμού δεν είναι νέα. Η πρώτη ευρεσιτεχνία χρονολογείται στα 1799, ενώ πλήθος άλλων τεχνολογιών επινοήθηκε και λειτούργησε σε μικρή κλίμακα μέχρι τα μέσα του περασμένου αιώνα. Η συντονισμένη έρευνα όμως στον τομέα αυτό ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '70, μετά την μεγάλη πετρελαϊκή κρίση, όταν διάφορες χώρες της Δυτ. Ευρώπης με ακτές προς τον Αν.

Ατλαντικό, όπου εντοπίζονται ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα κυματικού δυναμικού, ξεκίνησαν εντατικές έρευνες για την ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων. Το αντίξοο περιβάλλον στο οποίο καλούνται να λειτουργήσουν οι διάφορες τεχνολογίες επέδρασε στο παρελθόν ανασταλτικά στις προσπάθειες αυτές. Οι τεράστιες καταπονήσεις σε ακραίες καιρικές συνθήκες απαιτούν υψηλούς δείκτες μηχανικής αντοχής, με αποτέλεσμα να συνεπάγεται υψηλό κόστος εγκατάστασης, διασύνδεσης και λειτουργίας. Το υψηλό κόστος των τεχνολογιών μπορεί να αντισταθμισθεί μόνον με βέλτιστη εκμετάλλευση της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας των κυμάτων, δηλαδή, υψηλούς δείκτες απόδοσης. Προς αυτή την κατεύθυνση εξελίσσονται οι διάφορες τεχνολογίες και σήμερα τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Σαν αποτέλεσμα, το ενεργειακό κόστος, το οποίο την δεκαετία του '80 έφτανε μέχρι και τις 0.30 €/kWh, έχει μειωθεί σήμερα στις 0.09 €/kWh. Η συνεχιζόμενη βελτίωση των δεικτών απόδοσης των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας αναμένεται να τις καταστήσει σύντομα βιομηχανικά εκμεταλλεύσιμες. Σε αυτή την εργασία θα μελετηθεί μια πρωτότυπη διάταξη που προτάθηκε από το ΚΑΠΕ για εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού, ως προς την δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της ώστε να παράγει τη μέγιστη ισχύ.

1.Ιστορική Αναδρομή και Γενικές Πληροφορίες

1.Ιστορική Αναδρομή

Η θάλασσα κρύβει μέσα της τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Η ενέργεια αυτή χωρίζεται σε κυματική και παλιρροϊκή και ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει προέρχεται και από διαφορετικές πηγές. Συγκεκριμένα, η κυματική ενέργεια αποτελεί ένα μετασχηματισμό της αιολικής ενέργειας, η οποία με την σειρά της αποτελεί μετασχηματισμό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Από την άλλη πλευρά, η παλιρροϊκή ενέργεια της θάλασσας προέρχεται από την βαρυτική έλξη την οποία ασκεί η σελήνη στην γη. Ανάλογα με την ενέργεια που θέλουμε να εκμεταλλευτούμε υπάρχουν και διαφορετικοί μηχανισμοί. Εμείς θα ασχοληθούμε με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας, της ενέργειας δηλαδή που μεταφέρουν στην επιφάνειά τους τα κύματα.

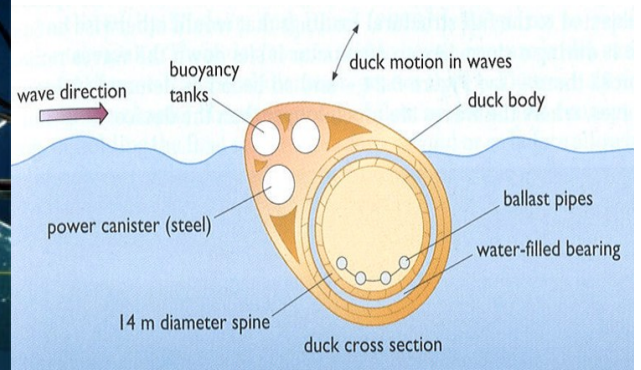
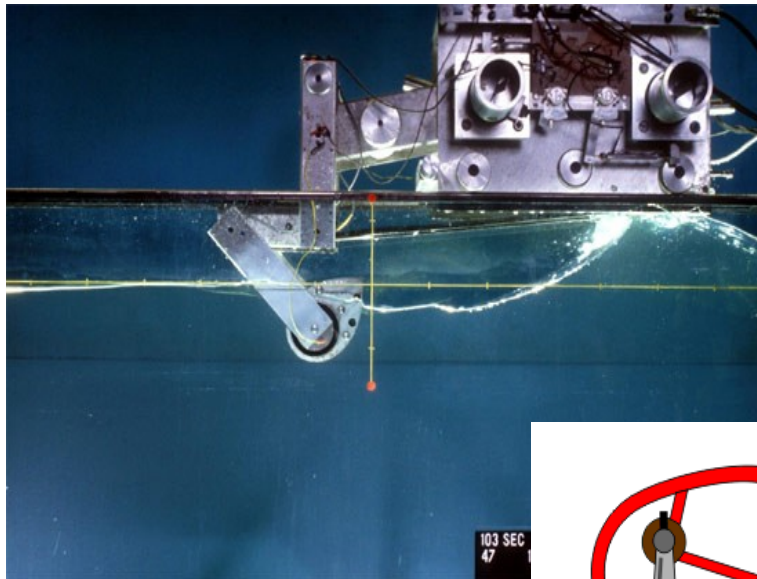
Η πρώτη γνωστή προσπάθεια εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας καταγράφηκε το 1799 και έγινε από τον Girard ^[1] και τον γιό του στο Παρίσι. Η πρώτη αυτή προσπάθεια αφορούσε εγκατάσταση που εκμεταλλευόταν τα ωκεάνια κύματα. Η επόμενη προσπάθεια έλαβε και αυτή χώρα στην Γαλλία, συγκεκριμένα στη πόλη του Μπορντώ, το 1910 από τον Bochaux-Praceique. Σκοπός αυτής της εγκατάστασης ήταν να δίνει σε ένα σπίτι την απαραίτητη ενέργεια τόσο για φωτισμό όσο και για άλλες εργασίες. Από όσο είναι γνωστά η εγκατάσταση ήταν τύπου “Ταλαντευόμενης Στήλης Νερού” ή “Oscillating Water Column”^[2]. Γενικότερα από το 1885 μέχρι και το 1973 έχουν καταγραφεί πολλές σχετικές με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας ευρεσιτεχνίες, ενδεικτικά μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο είχαν καταγραφεί 340 πατέντες^[1].

Η σύγχρονη όμως προσέγγιση εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας έγινε για πρώτη φορά από το [Yoshio Masuda](#)^[5] ο οποίος πρωτοπόρησε με τα πειράματά του τη δεκαετία του 1940-1950. Με την χρήση εκατοντάδων μηχανισμών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για φώτα ναυσιπλοΐας έλεγξε τις τότε διάφορες προσεγγίσεις γύρω από την κυματική ενέργεια. Ανάμεσα στις εκατοντάδες προσεγγίσεις που έλεγξε ήταν και αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την γωνιακή κίνηση που πραγματοποιείται στους συνδέσμους μιας αρθρωτής σχεδίας, η οποία και προτάθηκε από τον Masuda^[5] το 1950. Αυτή είναι και η προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε ένα από τα πιο δημοφιλή σύγχρονα προγράμματα, αυτό του [Pelamis](#). Μέχρι και το 1973, όταν και έλαβε μέρος η πετρελαϊκή κρίση δεν υπήρχε κάποιο άλλο οργανωμένο ενδιαφέρον. Τότε όμως και λόγω της κρίσης αυτής πολλά

πανεπιστημιακά τμήματα άρχισαν να ενδιαφέρονται ξανά για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα. Από τους πιο σημαντικούς συντελεστές σε αυτή τη προσπάθεια ήταν οι παρακάτω^[5]:

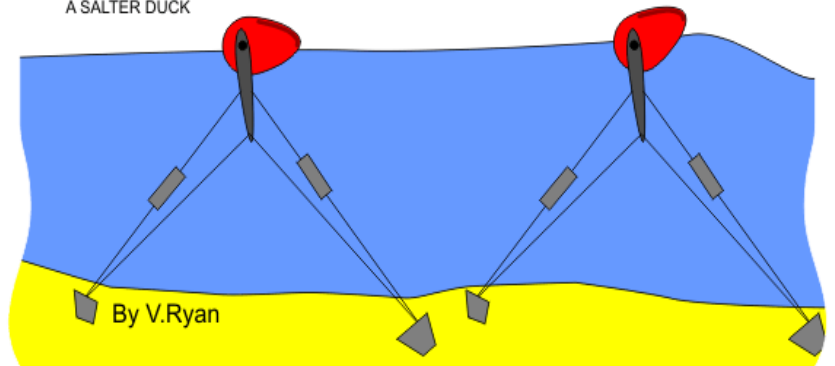
- [Stephen Salter](#) από το [University of Edinburgh](#),
- [Kjell Budal](#) και [Johannes Falnes](#) από [Norwegian Institute of Technology](#) (που τώρα είναι γνωστό ως [Norwegian University of Science and Technology](#)),
- [Michael E. McCormick](#) από την [U. S. Naval Academy](#),
- [David Evans](#) από το [Bristol University](#),
- Michael French από το [University of Lancaster](#),
- [John Newman](#) και [Chiang C. Mei](#) από το [MIT](#).

Από τις πιο αξιόλογες προσπάθειες των παραπάνω ήταν αυτή του Stephen Salter^[5], η οποία έγινε το 1974 και είναι γνωστή με το όνομα Salter's/Nodding/Edinburgh Duck. Αυτή η κατασκευή, η οποία φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, σύμφωνα με εργαστηριακές μετρήσεις μικρής κλίμακας, μπορεί να εκμεταλλευτεί το 90% της ενέργειας του κύματος και στη συνέχεια να μετατρέψει το 90% αυτής σε ηλεκτρική ενέργεια έχοντας έτσι ένα βαθμό απόδοσης της τάξης του 81%^[6].



INTERNAL VIEW OF
DEVICE SIMILAR TO
A SALTER DUCK

The wave device opposite incorporates an electricity generating system based on a pendulum connected to a generator. As the Salter Duck 'bobs' up and down on the waves, the pendulum swings forwards and backwards generating electricity.

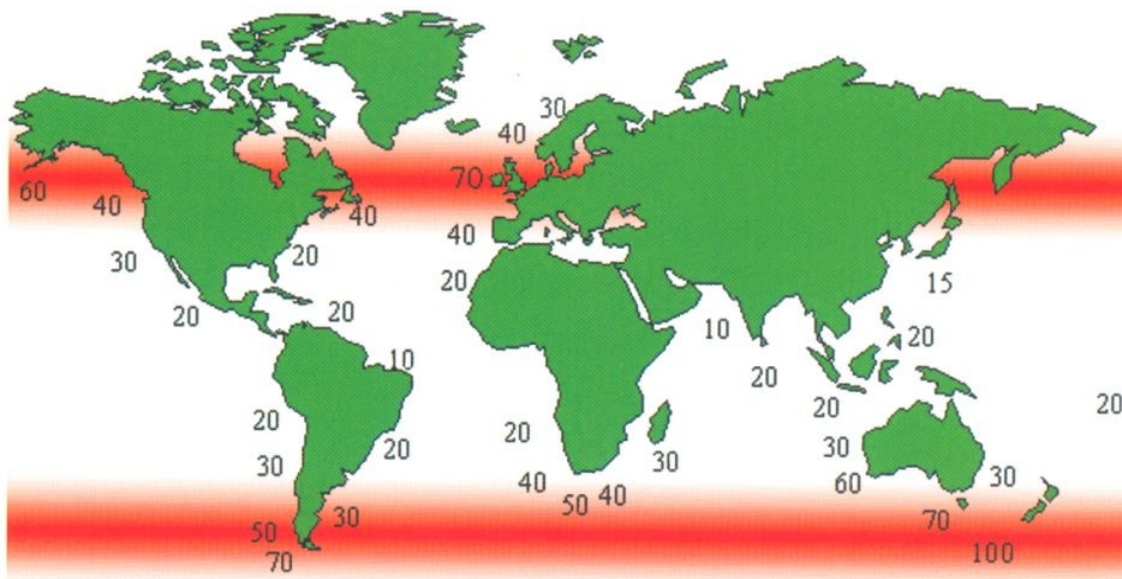


Εικόνα 1. Ο μηχανισμός Salter's Duck και η αρχή λειτουργίας του

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

2.Ενεργειακοί Πόροι

Τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στον πλανήτη μας εμφανίζονται στην περιοχή του Αν. Ατλαντικού και του Ν. Ειρηνικού. Σύμφωνα μάλιστα με πρόσφατες μελέτες [1], το υπεράκτιο κυματικό δυναμικό για τις χώρες της Ε.Ε., συμπεριλαμβανόμενης της Νορβηγίας, εκτιμάται σε ένα μέγεθος της τάξης των 320 GW, από τα οποία περίπου ένα ποσοστό 10%, δηλαδή 30 GW, αφορούν την Μεσόγειο Θάλασσα. Ετησίως, ο μέσος όρος κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος κυμαίνεται στον Αν. Ατλαντικό σε 25-70 kW/m, στην Β. Θάλασσα 10-25 kW/m και στο Αιγαίο, όπου σημειωτέον παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος στην περιοχή της Μεσογείου, 4-11 kW/m. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος, από τα οποία 5-9 TWh/έτος αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες. Φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω ότι στη περιοχή της Ευρώπης το κυματικό δυναμικό θα μπορούσε να συνδράμει σημαντικά στην παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2. Κυματικό Δυναμικό σε kw ανά μέτρο (www.pelamis.com)

3.Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Τεχνολογιών Εκμετάλλευσης Κυματικής Ενέργειας

Ο θαλάσσιος κυματισμός συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις ΑΠΕ: χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής, αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, απεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες ή/και υποβαθμισμένες περιοχές, τόνωση της βιομηχανικής παραγωγής, δημιουργία θέσεων εργασίας σε εταιρείες κατασκευής μηχανισμών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας κ.ά.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια “φάρμα” από μηχανές εκμετάλλευσης του κυματικού δυναμικού μιας περιοχής, όπως για παράδειγμα είναι η ακουστική ή οπτική όχληση, οι επιπτώσεις σε χλωρίδα και πανίδα, παρενόχληση της ναυσιπλοΐας κ.ά θεωρούνται ήπιες, ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εγκατάσταση σταθμών κυματικής ενέργειας δεν απαιτεί δέσμευση γης, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς όπως αυτός της καλλιέργειας τροφής. Η οπτική όχληση, καθώς και οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον, ενδεχομένως να αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για παράκτιες εγκαταστάσεις, αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων οι περιοχές με έντονη κυματική δραστηριότητα δεν είναι κατάλληλες για άλλου είδους αξιοποίηση, όπως π.χ. ιχθυοκαλλιέργεια ή τουριστική εκμετάλλευση λόγω του έντονου κυματισμού. Αντίθετα, παράκτιες εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας θα μπορούσαν με κατάλληλο σχεδιασμό να λειτουργήσουν παράλληλα σαν κυματοθραύστες για προστασία της ακτής ή λιμενοβραχίονες. Τα κυριότερα μειονεκτήματα τεχνολογιών κυματικής ενέργειας αφορούν την αξιοπιστία τους όσον αφορά την προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας αλλά και το κατασκευαστικό και λειτουργικό τους κόστος. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων είναι λογικό να συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις στην περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι οποίες μπορούν να υπερβούν το 100-πλάσιο των μέσων καταπονήσεων. Ως αποτέλεσμα θα πρέπει οι μηχανές να κατασκευάζονται με υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλο κατασκευαστικό κόστος. Ένας άλλος λόγος που αυξάνει σε σημαντικό ποσοστό τόσο το κόστος εγκατάστασης όσο και αυτό της συντήρησης είναι και η δυσπροσιτότητα υπεράκτιων ή υποβρύχιων εγκαταστάσεων η οποία αποτελεί τροχοπέδη στον εύκολο έλεγχο, την συντήρηση ή την επισκευή τους.

Ο μόνος τρόπος για να αντισταθμιστεί το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας είναι με την αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού στον μέγιστο δυνατό βαθμό, δηλαδή με την επίτευξη υψηλών δεικτών απόδοσης. Η τεχνολογική εξέλιξη έχει οδηγήσει μέχρι στιγμής σε σημαντική

βελτίωση του δείκτη απόδοσης για τις περισσότερες τεχνολογίες, ενώ τα περιθώρια βελτίωσης παραμένουν μεγάλα. Για τον λόγο αυτό, εκτιμάται ότι η συνεχιζόμενη έρευνα θα οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση του ηλεκτροπαραγωγικού κόστους, σε επίπεδα που θα είναι συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών μορφών ενέργειας ή άλλων υπαρχουσών ΑΠΕ. Ήδη το ηλεκτροπαραγωγικό κόστος για ορισμένες τεχνολογίες έχει μειωθεί στα επίπεδα των 10 cents/kWh ενώ στα επόμενα χρόνια αναμένεται και η περαιτέρω μείωσή του.

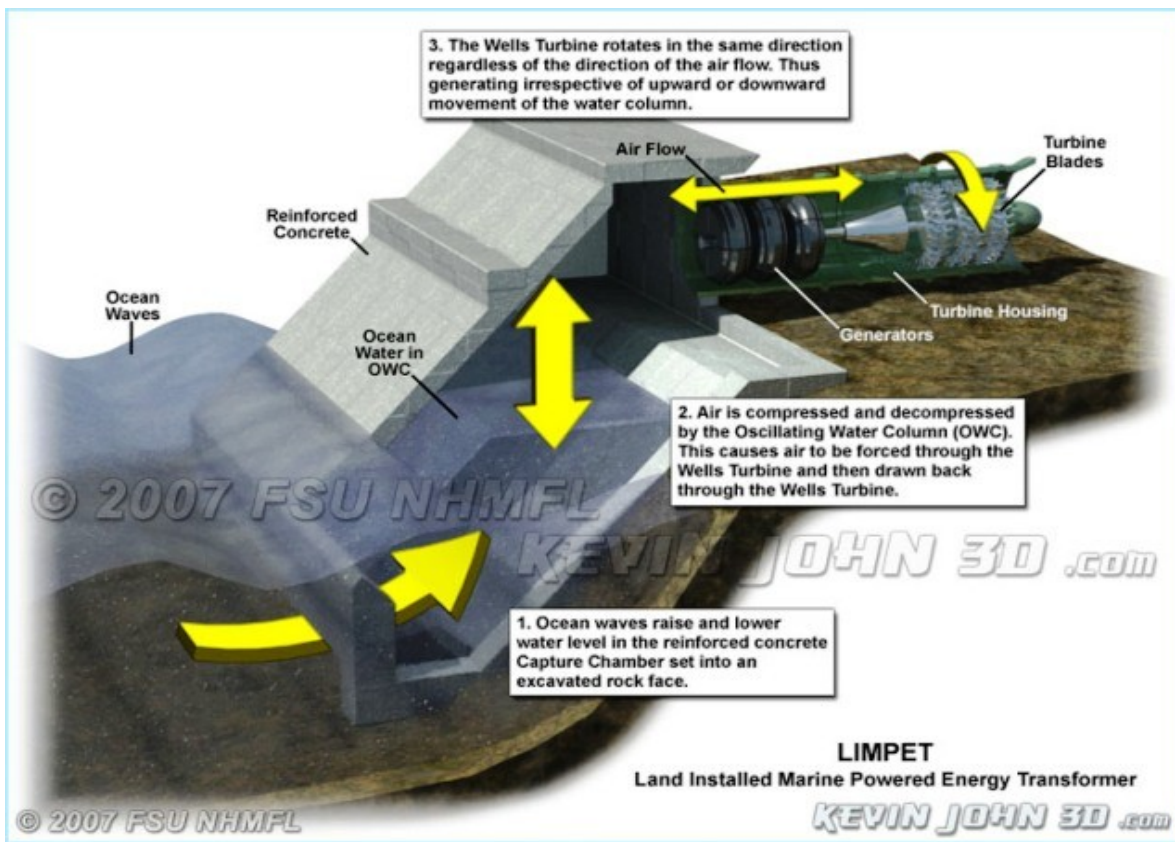
4. Δραστηριότητες στη Ευρώπη

Ο τομέας της Κυματικής Ενέργειας είναι ένας από αυτούς που απασχολούν την έρευνα σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες [2,3], και σε ορισμένες από αυτές εδώ και πολλές δεκαετίες μάλιστα. Χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό, ειδικά αυτές που έχουν ακτές προς τον Ατλαντικό προσβλέπουν στην κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από σταθμούς/φάρμες κυματικής ενέργειας. Χώρες με μέτριας στάθμης –πλην όμως εκμεταλλεύσιμο-κυματικό δυναμικό θα μπορούσαν να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά ή να εκμεταλλευθούν αυτό το είδος ενέργειας σε συμπαραγωγή με συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ. Σε χώρες όπως είναι η Ιρλανδία (Ειρε), την Μ. Βρετανία, την Νορβηγία και την Πορτογαλία διεξάγεται σημαντική έρευνα στον τομέα αυτό εδώ και αρκετές δεκαετίες καθώς αυτές οι χώρες χαρακτηρίζονται από υψηλό κυματικό δυναμικό, με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος της τάξης των 30 – 70 kW/m. Μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα παρατηρείται επίσης στην Δανία και την Σουηδία, χώρες με παράδοση στην εκμετάλλευση ΑΠΕ, όπου τα επίπεδα κυματικής ενέργειας είναι χαμηλότερα, παραμένουν όμως σε μεγάλο βαθμό εκμεταλλεύσιμα. Στη Δανία το σημαντικότερο κυματικό δυναμικό της βρίσκεται στα βόρεια του κομματιού της που βρέχεται από την Βόρεια Θάλασσα, μιας και αυτό είναι ακάλυπτο προς τον Ατλαντικό. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Δανίας εκτιμάται στις 30 TWh ετησίως, ενώ ο ετήσιος μέσος όρος κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος κυμαίνεται μεταξύ 7 kW/m και 24 kW/m. Οι ερευνητικές δραστηριότητες στην χώρα αυτή έχουν ξεκινήσει από την δεκαετία του 1980. Το 1996 θεσπίστηκε εθνικό πρόγραμμα χρηματοδότησης της έρευνας στον τομέα (Danish Wave Energy Programme), με προϋπολογισμό αρκετά εκατομμύρια για την περίοδο 1998-2002, ενώ έχουν ιδρυθεί διάφοροι οργανισμοί, με σκοπό τον συντονισμό και την μεθόδευση των ερευνητικών δραστηριοτήτων (Danish Wave Energy Association, Danish Energy

Agency, κ.ά.).

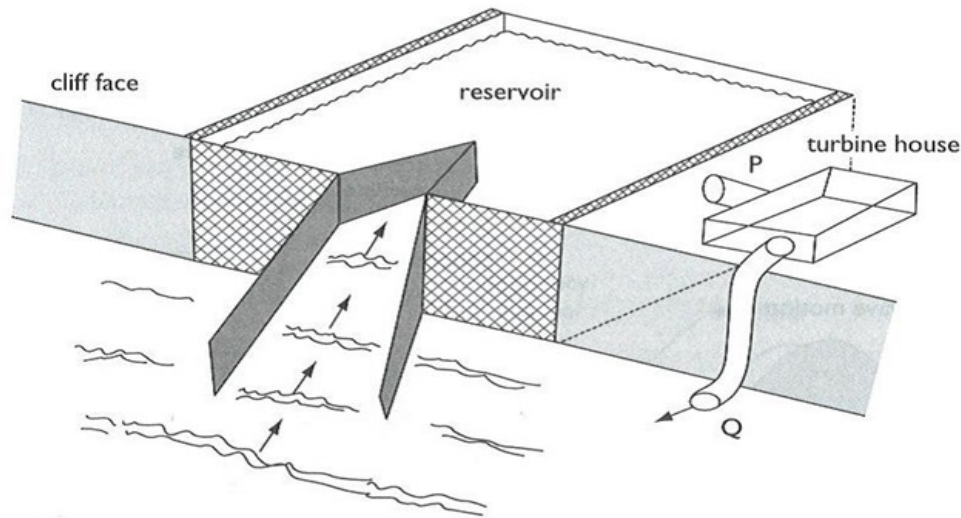
Η Ιρλανδία έχει σημαντικούς πόρους κυματικής ενέργειας μιας και μεγάλο μέρος των ακτών της είναι εκτεθειμένο στα ωκεάνια κύματα του Ατλαντικού. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της χώρας αυτής εκτιμάται σε περίπου 187.5 TWh, σε ετήσια βάση. Στην Ιρλανδία δεν έχει θεσπιστεί εθνικό πρόγραμμα χρηματοδότησης της έρευνας στην κυματική ενέργεια, πλην όμως ακολουθείται μία πολιτική «ενθάρρυνσης» της χρηματοδότησης προγραμμάτων στον τομέα από κρατικούς οργανισμούς στα πλαίσια εθνικών προγραμμάτων έρευνας. Σημαντική είναι επίσης η συμμετοχή ιρλανδικών ερευνητικών κέντρων και βιομηχανιών σε προγράμματα έρευνας της ΕΕ.

Η Μ. Βρετανία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμής προς τον Α. Ατλαντικό και έτσι έχει μεγάλο τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό, το οποίο εκτιμάται στις 1000 TWh ανά έτος. Τα υψηλά επίπεδα κυματικής ενέργειας οδήγησαν τη συγκεκριμένη χώρα σε συντονισμένη έρευνα για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, κατά τη διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης. Ένας μεγάλος αριθμός Πανεπιστημίων, Ερευνητικών Κέντρων, βιομηχανικών και μελετητικών εταιριών εμπλέκεται στις δραστηριότητες της έρευνας στην χώρα αυτή, τα κυριότερα από τα οποία είναι το Παν/μιο του Εδιμβούργου, το Παν/μιο του Belfast, η εταιρία OPD κ.ά. Επιπρόσθετα έχουν θεσπισθεί διάφορα κρατικά προγράμματα χρηματοδότησης των ερευνητικών δραστηριοτήτων στην κυματική ενέργεια, το πλέον πρόσφατο ύψους περίπου 5.000.000 € για την περίοδο 2000-2003. Επίσης έχουν ιδρυθεί διάφοροι οργανισμοί για τον συντονισμό και την προώθηση των δραστηριοτήτων της έρευνας (Marine Energy Technology Network, Sea Power Association, κ.ά.). Από τις τεχνολογίες, οι οποίες αναπτύσσονται στην Μ. Βρετανία, η πλέον εξελιγμένη είναι η «παλλόμενη στήλη Limpet» της νήσου Islay, η οποία λειτούργησε με επιτυχία σε μικρή κλίμακα (75 kW) από το 1991, ενώ σχεδιάζεται μεγαλύτερος σταθμός βασιζόμενος στην τεχνολογία αυτή, ισχύος 500 kW.



Εικόνα 3. Η παλλόμενη στήλη Limpet, της νήσου Islay.

Η Νορβηγία έχει μεγάλο μήκος ακτών προς τον Α. Ατλαντικό, όπου, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζονται ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα κυματικής ενέργειας. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό εκτιμάται στις 400 TWh, σε ετήσια βάση. Η έρευνα γύρω από την κυματική ενέργεια ξεκίνησε και στην χώρα αυτή το 1973, ενώ η κρατική επιχορήγηση προγραμμάτων κυματικής ενέργειας ξεκίνησε συστηματικά το 1978. Στην δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκαν δύο παράκτιοι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί κυματικής ενέργειας, ο "Multi-Resonant Oscillating Water Column" και ο "Tarchan", ονομαστικής ισχύος 500 kW και 350 kW αντίστοιχα. Και οι δύο αυτοί σταθμοί υπέστησαν σοβαρές ζημιές, ο πρώτος το 1988 και ο δεύτερος το 1991, όταν και σταμάτησε η λειτουργία τους. Η Νορβηγία, σαν πετρελαιοπαραγωγός χώρα, δεν έχει να επιδείξει ιδιαίτερες δραστηριότητες στον τομέα αυτό τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν σχέδια για επισκευή και επαναλειτουργία του Tarchan.



Εικόνα 4. Σκαρίφημα του μηχανισμού Tarchan

Η Πορτογαλία, η οποία επίσης έχει μεγάλο μήκος ακτών προς τον Α. Ατλαντικό, διαθέτει σημαντικούς πόρους κυματικής ενέργειας. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της ηπειρωτικής Πορτογαλίας εκτιμάται στις 45 TWh ανά έτος, ενώ σημαντικοί επίσης είναι οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι κυματικής ενέργειας στην περιοχή των Αζόρων νήσων. Σημαντική έρευνα στην κυματική ενέργεια στην Πορτογαλία διεξάγεται από το 1986, κατά κύριο λόγο στο Πολυτεχνείο της Λισσαβόνας και το ερευνητικό κέντρο IPETI. Οι επιχορηγήσεις των προγραμμάτων προέρχονται κατά κύριο λόγο από κρατικούς πόρους αλλά και από την ΕΕ. Σημαντικό επίτευγμα της ερευνητικής δραστηριότητας στην Πορτογαλία είναι οηλεκτροπαραγωγικός σταθμός τύπου «μετατροπέα παλλόμενης στήλης» στις νήσους Αζόρες, ονομαστικής ισχύος 400 kW, ο οποίος λειτουργεί με επιτυχία εδώ και μία δεκαετία περίπου και τροφοδοτεί την νήσο Pico.

Στην Σουηδία περιοχές με αξιοποιήσιμους πόρους Κ.Ε. εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα των ακτών της προς την Β. Θάλασσα, καθώς και σε ορισμένες περιοχές της Βαλτικής. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό εκτιμάται στις 5-10 TWh σε ετήσια βάση. Η έρευνα στον τομέα της κυματικής ενέργειας και σε αυτή τη χώρα ξεκίνησε το 1976, ενώ το 1979 ιδρύθηκε η «ερευνητική ομάδα κυματικής ενέργειας», αποτελούμενη από τέσσερα Τμήματα του Πολυτεχνείου Chalmers και μία βιομηχανία. Αποτελέσματα της συνεργασίας αυτής είναι το πλωτό σύστημα IPS, καθώς και το σύστημα Hose-Pump, τα οποία αναπτύχθηκαν μέσα στην δεκαετία του 1980.

Στις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες, που διαθέτουν ακτογραμμή, δηλ. το Βέλγιο, την Γαλλία, την Γερμανία, την Ελλάδα, την Ισπανία, την Ιταλία, την Ολλανδία και την Φιλανδία, δεν έχουν υπάρξει μέχρι στιγμής αξιολογές δραστηριότητες στον τομέα της κυματικής ενέργειας. Το Βέλγιο, η Γερμανία και η Ολλανδία δεν διαθέτουν μεγάλο μήκος ακτογραμμής, ενώ οι θαλάσσιες περιοχές από τις οποίες περιβρέχονται χαρακτηρίζονται από χαμηλή στάθμη κυματικής ενέργειας και μεγάλη κυκλοφοριακή πυκνότητα. Για τους λόγους αυτούς ο θαλάσσιος κυματισμός δεν θεωρείται εκμεταλλεύσιμη πηγή ενέργειας στις χώρες αυτές. Επίσης, τόσο στην Ισπανία όσο και την Φιλανδία, δεν έχουν καταγραφεί μέχρι στιγμής κάποιες δραστηριότητες στον τομέα. Η Γαλλία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμής τόσο προς τον Ατλαντικό όσο και προς την Μεσόγειο Θάλασσα. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Γαλλίας εκτιμάται στις 95 TWh σε ετήσια βάση. Στην Γαλλία δεν έχει υπάρξει μέχρι στιγμής κάποιο κρατικό πρόγραμμα επιχορήγησης E&TA στην κυματική ενέργεια. Σε ερευνητικές δραστηριότητες, κυρίως στα πλαίσια ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων, εμπλέκεται το Παν/μιο της Νάντης (ECN).

Η Ελλάδα έχει μία μεγάλη ακτογραμμή, μήκους περ. 16,000 χλμ. Το υψηλό αιολικό δυναμικό πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος επάγει σχετικά έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή αυτή, με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος της τάξης των 4-11 kW/m. Εντοπίζονται επίσης θαλάσσιες περιοχές «εστιασμού» κυματικής ενέργειας (“hot spots”), λόγω φαινομένων ανάκλασης και περίθλασης των κυμάτων. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Ελλάδας θεωρείται το υψηλότερο της Μεσογείου, της τάξης των 5-9 TWh σε ετήσια βάση. Το δυναμικό αυτό θα μπορούσε να συνεισφέρει σημαντικά στην ηλεκτροδότηση μεγάλου αριθμού νησιών στο Αιγαίο. Η E&TA στον τομέα της κυματικής ενέργειας διεξάγεται στην Ελλάδα κυρίως στο ΚΑΠΕ και το ΕΜΠ, κατά κύριο λόγο στα πλαίσια ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων. Σημειώνονται επίσης ερευνητικές δραστηριότητες στο Παν/μιο Πατρών, με αντικείμενο την ανάπτυξη τεχνολογιών προστασίας ακτών, και στο ΑΠΘ.

Η Ιταλία έχει μεγάλο μήκος ακτογραμμής, και για το λόγο αυτό ο θαλάσσιος κυματισμός θα μπορούσε να αποτελέσει μία οικονομικά βιώσιμη πηγή ενέργειας, παρ’ ότι ο ετήσιος μέσος όρος κυματικής ισχύος στις ιταλικές ακτές κυμαίνεται στα σχετικά χαμηλά επίπεδα των περίπου 5 kW/m. Ανοικτά της Σικελίας οι τιμές είναι υψηλότερες, μέχρι 10 kW/m. Η έρευνα στην Ιταλία διεξάγεται κυρίως στο Πολυτεχνείο της Ρώμης όπως και από διάφορες μελετητικές εταιρίες.

5. Συμπεράσματα και προοπτικές

Η θάλασσα είναι μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας, της υψηλότερης μεταξύ των ΑΠΕ. Στις ευρωπαϊκές ακτές προς τον Ανατολικό Ατλαντικό παρουσιάζονται από τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στον πλανήτη, γεγονός το οποίο έχει δώσει μεγάλη ώθηση στην E&TA στην Ευρώπη για την εκμετάλλευση του δυναμικού αυτού. Η εκμετάλλευση αυτών των ενεργειακών πόρων θα μπορούσε να καλύψει σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες πολλών ευρωπαϊκών χωρών.

Οι ευρωπαϊκές χώρες με τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας είναι η Μ. Βρετανία, η Ιρλανδία, η Πορτογαλία και η Νορβηγία. Στις χώρες αυτές διεξάγεται E&TA εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου, η οποία έχει οδηγήσει στην υλοποίηση πιλοτικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών ονομαστικής ισχύος 50 - 500 kW. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν ικανοποιητικά, η δε απόδοσή τους βελτιώνεται συνεχώς. Αριθμός άλλων τεχνολογιών βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο έρευνας σε μικρή κλίμακα ή στην φάση κατασκευής πρωτοτύπου σε πλήρη κλίμακα. Η Δανία, η Ελλάδα, η Ισπανία, η Ιταλία, η Γαλλία, και η Σουηδία είναι χώρες με χαμηλότερα, πλην όμως αξιοποιήσιμα, επίπεδα κυματικής ενέργειας. Ειδικά στην περίπτωση της Ελλάδας, ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί κυματικής ενέργειας θα μπορούσαν να αποτελέσουν βιώσιμη λύση ηλεκτροδότησης στον μεγάλο αριθμό νησιών του Αιγαίου.

Υπάρχουσες λύσεις για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας

Μετά από όλα αυτά τα χρόνια έρευνας και ανάπτυξης τεχνολογιών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες θα επιχειρηθεί να παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο.

1. **Συσκευές μακρόστενης μορφής (attenuator)** Πρόκειται για συσκευές, που όπως φαίνεται και από το όνομά τους, έχουν μεγάλο μήκος, είναι πλωτές και έχουν μικρή μετωπική επιφάνεια. Λειτουργούν παράλληλα με τον κυματισμό και κινούνται στην επιφάνεια του κύματος. Οι κινήσεις που συμβαίνουν κατά μήκος της μηχανής μας μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιλεκτικά ώστε να παράγουμε ενέργεια μέσω ενός υδραυλικού κατά κύριο λόγο μηχανισμού. Λόγω της μικρής του μετωπικής επιφάνειας ο μηχανισμός attenuator καταπονείται από μικρότερες δυνάμεις. Το [Pelamis](#) είναι από τις πιο γνωστές

υλοποιήσεις αυτής της προσέγγισης ενώ άλλα γνωστά project που βασίζονται σε αυτή τη λογική σχεδίασης είναι το Oceantech και το Dexawave (το οποίο είναι ένα ευρωπαϊκό project, σχεδιασμένο να εκμεταλλεύεται τα μεγάλα κύματα που υπάρχουν σε βαθιές θαλάσσιες περιοχές [www.dexawave.com/profile]). Το Pelamis για πρώτη φορά τέθηκε σε λειτουργία το 2004 και λειτούργησε με αρκετή επιτυχία μέχρι το 2007. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα νέο βελτιωμένο πρότυπο το οποίο τοποθετήθηκε στα ανοικτά της Πορτογαλίας σε σχηματισμό των τριών μονάδων και με παραγωγική ικανότητα 2.25MW. Γενικότερα το Pelamis θεωρείται από τα εμπορικά εκμεταλλεύσιμα project καθώς είναι από τα λίγα που έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 4. Το πρωτότυπο Pelamis.

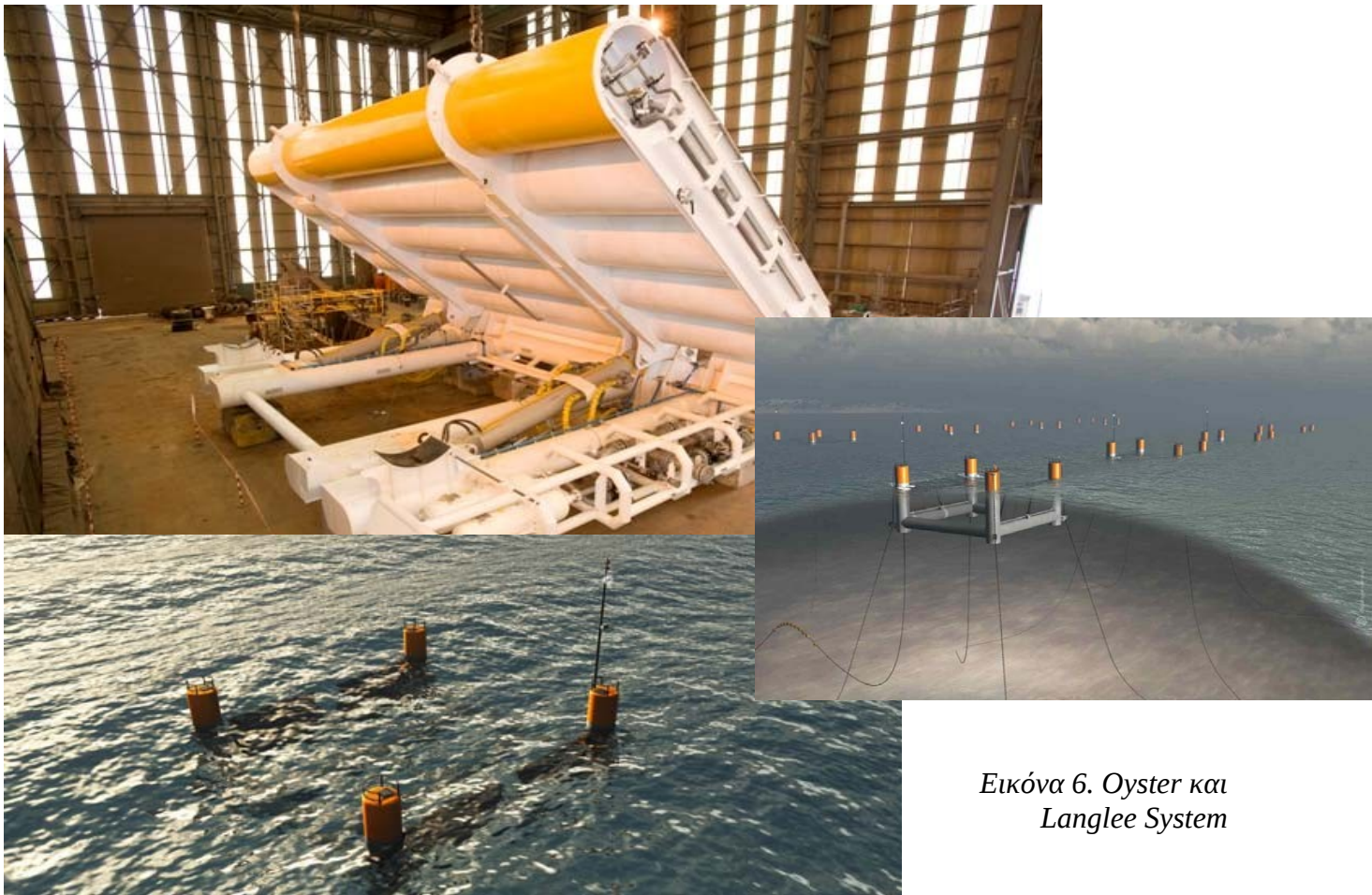
2. **Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorbers)** και αυτές οι συσκευές είναι πλωτές κατά κύριο λόγο και το θετικό στοιχείο που τις διέπει είναι ότι μπορούν να απορροφούν ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις κύματος είτε βρίσκονται στην επιφάνεια του κύματος ή κάτω από αυτή. Το σύστημα ανάκτησης της ενέργειας (Power take-off) μπορεί να παίρνει διάφορες μορφές ανάλογα με τη διαμόρφωση της αντίδρασης στη κίνηση του πλωτήρα. Τα πιο ευρέως γνωστά παραδείγματα εφαρμογής αυτής της προσέγγισης είναι τα Wave Star, OPT, Wavebob, Fred Olsen & Co, Manchester bobber



Εικόνα 5. Wave Star, OPT και Wavebob

WAVEBOB

3. Συσσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Oscillating Wave Surge Converter) Η μεγαλύτερη διαφορά που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες συσκευές σε σχέση με αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως είναι ότι αυτές δεν είναι πλωτές αλλά βρίσκονται δεμένες στον πυθμένα της θάλασσας. Για να παράγουν ενέργεια έχουν έναν βραχίονα ο οποίος παλινδρομεί σαν εκκρεμές και ο οποίος είναι στηριγμένος σε περιστρεφόμενη άτρακτο. Η διεύθυνση της άτρακτου είναι κάθετη τόσο σε αυτή του νερού όσο και σε αυτή του βραχίονα. Τέλος οι συσκευές αυτές προσλαμβάνουν την ενέργεια κατά την οριζόντια κατεύθυνση μέσα από την κίνηση των στοιχείων του νερού που συμβαίνει κατά των κυματισμό. Τα πιο γνωστά project που ακολουθούν την συγκεκριμένη σχεδίαση είναι το Oyster, Waveroller, Langlee System, Neptune Triton.



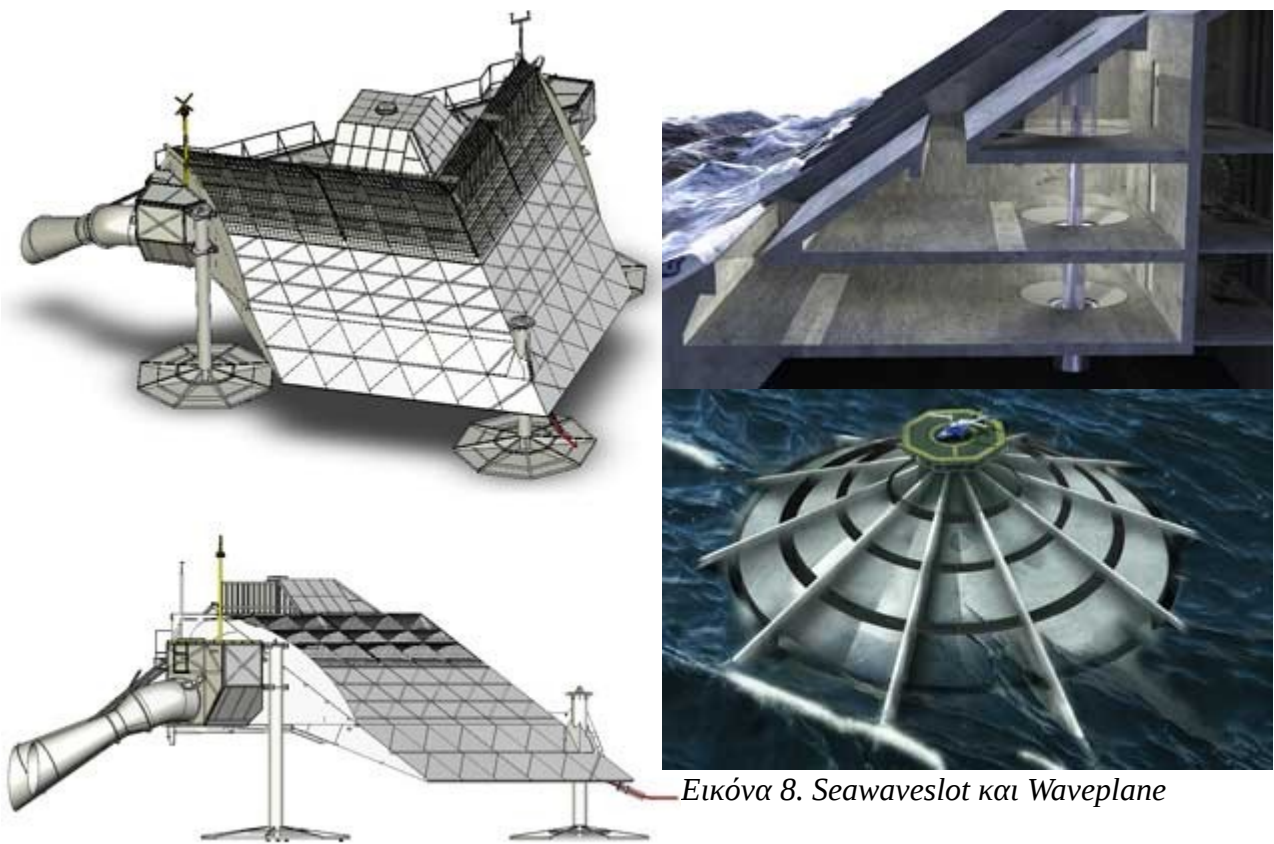
Εικόνα 6. Oyster και Langlee System

4.Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column) Είναι συσκευές που διαθέτουν μια ημιβυθισμένη κενή εσωτερικά κατασκευή που μοιάζει με θάλαμο. Ο θάλαμος αυτός είναι ανοικτός προς την μεριά της θάλασσας και έχει το άνω τμήμα του ανοίγματος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Στο εσωτερικό του, πάνω από την επιφάνεια του νερού, έχει μια στήλη αέρα. Τα κύματα κινούν παλινδρομικά τη στήλη του νερού στο εσωτερικό του θαλάμου η οποία με τη σειρά της συμπιέζει και εκτονώνει την υπερκείμενη στήλη αέρα. Όταν η στήλη νερού ανέρχεται ο εγκλωβισμένος αέρας οδηγείται προς την ατμόσφαιρα μέσω ενός αεροστρόβιλου. Όταν η στήλη κατέρχεται, αναρροφάται αέρας από την ατμόσφαιρα μέσω του ίδιου αεροστρόβιλου, που στρέφεται γενικά προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την φορά κίνησης του αέρα. Η ροπή από την περιστροφική κίνηση του αεροστρόβιλου χρησιμοποιείται για την κίνηση μια γεννήτριας και στη συνέχεια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσκευές αυτές αρχικά σχεδιάστηκαν για εγκατάσταση επί της ακτής σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές. Στη συνέχεια όμως δοκιμάστηκαν συσκευές αυτής της τεχνολογίας που επέπλεαν για εγκατάσταση στην ανοικτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση στον πυθμένα. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το Wavegen, το Oceanlinx, το Ocean Energy Buoy



Εικόνα 7. Ocean Energy Buoy

5.Συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device) Οι συσκευές αυτές διαθέτουν στο ανώτερό τους σημείο μια ανοικτή δεξαμενή στην οποία συλλέγεται με φυσικό τρόπο νερό. Συγκεκριμένα τα κύματα που μπορούν να υπερπηδήσουν το χείλος της δεξαμενής καταλήγουν μέσα σε αυτή. Το νερό που έχει συγκεντρωθεί σε αυτή τη δεξαμενή στη συνέχεια επιστρέφει στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροστροβίλου ο οποίος λειτουργεί με μικρό ύψος πτώσης. Ο υδροστρόβιλος αυτός δίνει στη συνέχεια την απαραίτητη ενέργεια σε μια γεννήτρια η οποία με την σειρά της παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Περιληπτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η παραγόμενη ενέργεια είναι κατά βάση μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού που βρίσκεται στην ανοικτή δεξαμενή και ψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι το Wave Dragon, το Waveplane, το Seawaveslot.



Εικόνα 8. Seawaveslot και Waveplane

6.Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged pressure differential) Το συγκεκριμένο είδος συσκευών είναι παράκτιο, στηριζόμενο στο βυθό και βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η αλλαγή της πίεσης που συμβαίνει στην επιφάνεια λόγω της κίνησης του κύματος διαφοροποιεί και την πίεση κάτω από την επιφάνεια η οποία εν συνεχεία μεταφέρεται στον μηχανισμό. Εκεί γίνεται η συμπίεση του αέρα, ο οποίος στην συνέχεια οδηγείται σε στρόβιλο για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή την κατηγορία δεν υπάρχουν πολλά αξιοσημείωτα παραδείγματα παρά μόνο αυτό του AWS ο οποίος λειτουργεί με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω [www.awsocan.com].

7.Χωρίς συγκεκριμένη κατηγορία Εκτός από όλα τα παραπάνω είδη συσκευών υπάρχουν και αυτά τα οποία δεν μπορούν να ενταχθούν σε μια συγκεκριμένη κατηγορία. Τέτοιος είναι και ο Wave Rotor ο οποίος όπως αναφέρει και το όνομά του είναι ένα είδος στρόβιλου το οποίο παίρνει κίνηση απευθείας από τα κύματα. Τέλος υπάρχει και μια αρκετά νέα τεχνολογία η οποία περιλαμβάνει κατασκευές που παράγουν ενέργεια με την αλλαγή του σχήματός του και του όγκου τους.

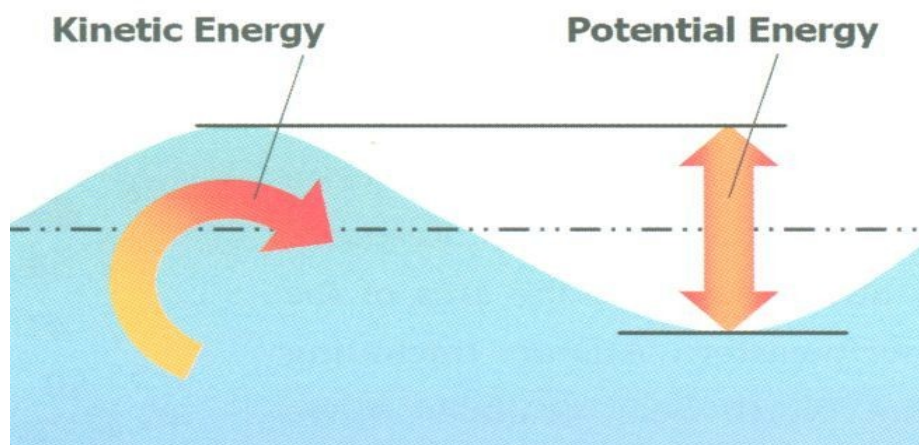


Εικόνα 9. Το σύστημα AWS της AWS Ocean Energy.

3.Εισαγωγή στη κυματική Ενέργεια και περιγραφή ΜΟΚΚΥ (Μηχανισμός αξιοποίησης της Οριζόντιας και Κάθετης κίνησης του Κυματισμού).

Μορφές της ενέργειας των κυμάτων και αξιοποίησή της

Τα θαλάσσια κύματα περιέχουν δύο μορφές ενέργειας. Την κινητική ενέργεια των στοιχείων του νερού που εν γένει ακολουθούν κυκλική τροχιά και τη δυναμική ενέργεια των ανυψωμένων στοιχείων του νερού. Γενικά μιλώντας η κινητική ενέργεια ενός γραμμικού κύματος είναι περίπου ίση με την δυναμική του ενέργεια. Στο σχήμα 9 φαίνονται οι δύο μορφές της ενέργειας του κύματος.



Εικόνα 10. Σχηματική παράσταση της κινητικής και δυναμικής ενέργειας διάδοσης κύματος.

Επομένως κοντά στην επιφάνεια στο άνω τμήμα του κύματος υπάρχει μια κινητική ενέργεια με κατεύθυνση οριζόντια και φορά αυτήν της διάδοσης του κύματος. Την κινητική αυτή ενέργεια χρησιμοποιούν οι συσκευές ‘οριζόντιας παλινδρόμησης’ (Oscillating Wave Surge Converter) για την παραγωγή ενέργειας, χωρίς να αξιοποιούν την δυναμική. Σχεδόν όλες οι άλλες συσκευές χρησιμοποιούν κυρίως την δυναμική ενέργεια του κυματισμού και συχνά η κινητική ενέργεια προκαλεί μια δύναμη που πρέπει να υπερνικηθεί για να παραμείνει σταθερός ο μηχανισμός και να μην παρασυρθεί αλλά και για να μειωθεί η καταπόνησή του. Οι συσκευές μακρόστενης μορφής (attenuator) μειώνουν αυτή την αντίσταση με τη μικρή μετωπική τους επιφάνεια με μεταφορά της δύναμης αυτής

στο σύστημα αγκύρωσης. Το ίδιο περίπου συμβαίνει και με τους σημειακούς απορροφητές (point absorbers) που με το συμμετρικό τους σχήμα γλιστρούν και αυτοί μέσα στο κύμα. Για την Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column) η οριζόντια κίνηση του κύματος πρέπει να σταματήσει προκαλώντας σημαντική μετωπική καταπόνηση στην κατασκευή. Στις συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device), που είναι εκ της σχεδίασής του δυναμικής ενέργειας και είναι ογκώδεις κατασκευές, το πρόβλημα των μεγάλων οριζόντιων δυνάμεων αντιμετωπίζεται με αύξηση της βύθισης της κατασκευής σε έντονες καιρικές συνθήκες. Στις βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged pressure differential), χρησιμοποιούν επίσης εκ της σχεδίασης την δυναμική ενέργεια του κύματος.

Παρατηρείται ότι σε όλες τις μορφές συσκευών που δοκιμάζονται και που δεν έχουν φθάσει σε εμπορική μορφή, χρησιμοποιείται είτε η δυναμική συνηθέστερα, είτε η κινητική ενέργεια του κύματος, παρ' ότι και οι δύο είναι σε γενικές γραμμές ισοδύναμες ως προς το μέγεθος. Η κινητική ενέργεια δε προκαλεί ανεπιθύμητα μεγάλες δυνάμεις αντίστασης που πρέπει να υπερνικηθούν. Για τους λόγους αυτούς έγινε ιδιαίτερα ευρεία και λεπτομερειακή αναφορά στους διαφόρους τύπους των συσκευών που υπάρχουν

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μεγάλο πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει η κάθε συσκευή που τοποθετείται στη θάλασσα, είναι η αξιοπιστία κατά λειτουργία της και η επιβιωσιμότητα κατά τις ακραίες καιρικές συνθήκες, που καλείται να αντιμετωπίσει.

Η καινοτομία της παρούσας πρότασης είναι η σχεδίαση ενός συστήματος σημειακού απορροφητή κυματικής ενέργειας που να απορροφά και τις δύο μορφές της κυματικής ενέργειας με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της κατασκευής χωρίς ανάλογη αύξηση του κόστους.

Περιγραφή της προτεινόμενης συσκευής

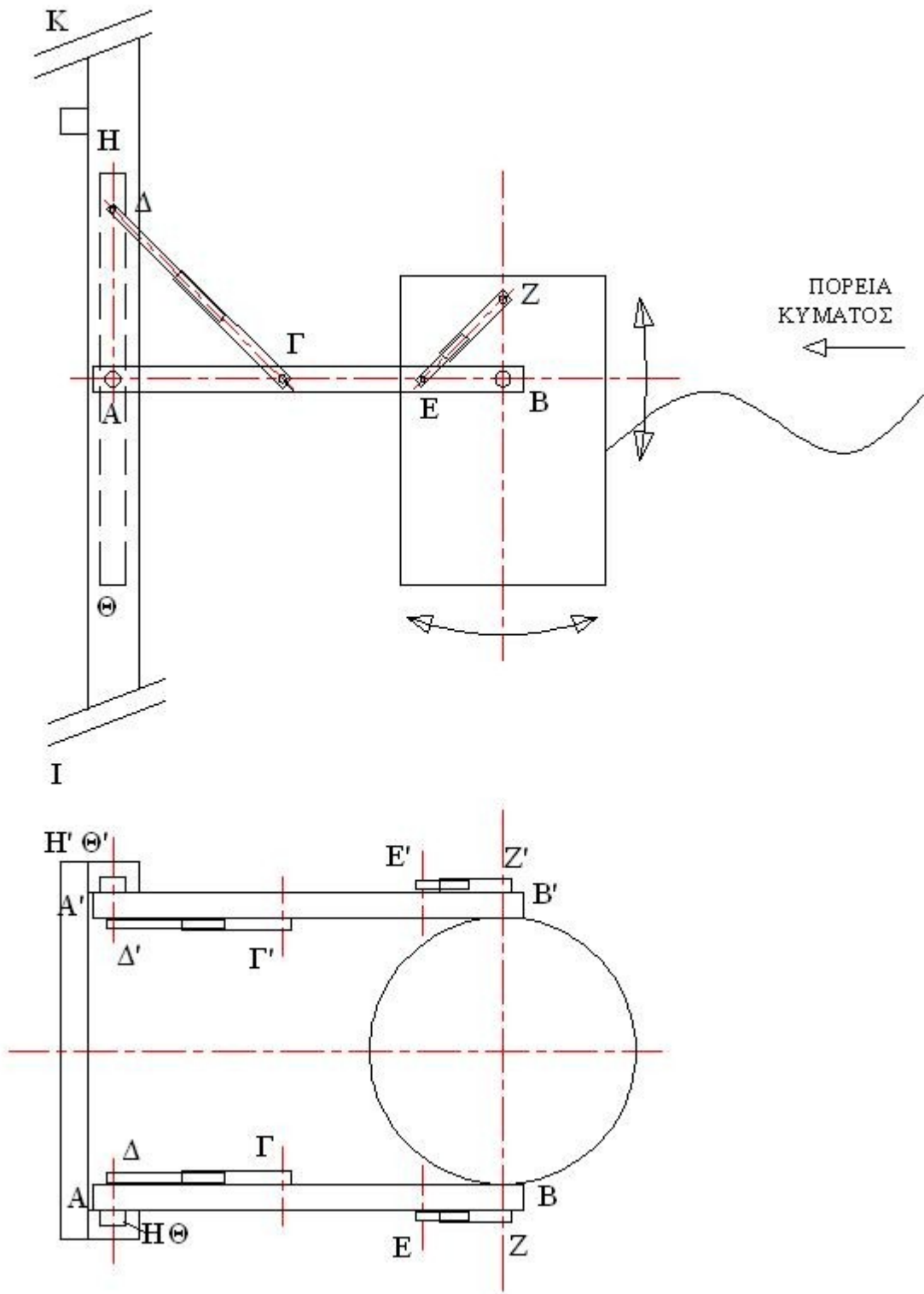
Η συσκευή αποτελείται από πλωτήρα κυλινδρικού σχήματος με την παράπλευρη επιφάνειά του κάθετη, ο οποίος στηρίζεται εκατέρωθεν με δύο βραχίονες σε κατασκευή, που θα βρίσκεται έξω από το νερό, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Ο βραχίονας AB είναι δυνατόν να περιστρέφεται γύρω από το κέντρο A. Υπό την επίδραση της δυναμικής ενέργειας των κυμάτων ο πλωτήρας πραγματοποιεί μια σχεδόν κάθετη παλινδρομική κίνηση, σε περιφέρεια τόξου με κέντρο το A. Στους δύο βραχίονες AB

και Α'Β' εκατέρωθεν του πλωτήρα προσαρμόζονται οι υδραυλικοί κύλινδροι ΓΔ και Γ'Δ' που συνδέουν τους βραχίονες με το πλαίσιο στήριξης ΗΘΗ'Θ'. Η παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα γύρω από το Α συμπιέζει ή εκτείνει τους υδραυλικούς κυλίνδρους. Υπό την επίδραση της άνωσης κατά την άνοδο του κύματος οι κύλινδροι συμπιέζονται, ενώ κατά την καθοδική κίνηση του πλωτήρα υπό την επίδραση του βάρους του αυτοί εκτείνονται.

Συγχρόνως με την παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα γύρω από το κέντρο Α, υπό την επίδραση της δυναμικής ενέργειας του κυματισμού, τα διερχόμενα κύματα τείνουν να περιστρέψουν τον πλωτήρα γύρω από το κέντρο περιστροφής Β, λόγω της κινητικής ενέργειας των στοιχείων του ρευστού. Ο πλωτήρας έχει την δυνατότητα να εκτελεί μια παλινδρομική περιστροφική κίνηση γύρω από το σημείο Β. Εκατέρωθεν του πλωτήρα προσαρμόζονται οι υδραυλικοί κύλινδροι ΕΖ και Ε'Ζ' που συνδέουν τον πλωτήρα με τους βραχίονες ΑΒ και Α'Β' αντίστοιχα. Η παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα γύρω από το Β συμπιέζει ή εκτείνει το δεύτερο αυτό ζεύγος υδραυλικών κυλίνδρων. Υπό την επίδραση του διερχομένου κύματος οι κύλινδροι συμπιέζονται. Μετά την διέλευσή του κύματος ο πλωτήρας υπό την επίδραση του βάρους του τείνει να επανέλθει στην αρχική κατακόρυφη κατάσταση ισορροπίας οπότε αυτοί εκτείνονται.

Το σύστημα μετατροπής της ενέργειας είναι ένα κλασικό υδραυλικό σύστημα, όπως αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές. Οι υδραυλικοί κύλινδροι ΓΔ-Γ'Δ' και ΕΖ-Ε'Ζ' υπό την επίδραση των κινήσεων του πλωτήρα συμπιέζουν λάδι σε ένα δοχείο πίεσης. Στη συνέχεια από το δοχείο πίεσης υπό τον έλεγχο του αυτοματισμού, το πεπιεσμένο λάδι εκτονώνεται σε ένα υδραυλικό κινητήρα, που κινεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η κίνηση των κυλίνδρων ελέγχεται από το σύστημα αυτοματισμού. Η κίνηση των βραχιόνων γύρω από τον άξονα Α-Α' και του πλωτήρα γύρω από τον άξονα Β-Β' έχουν κάποια μέγιστα όρια, τα οποία δεν επιτρέπεται να υπερβούν, σύμφωνα με τη σχεδίαση της μηχανής. Στην περίπτωση ύπαρξης μεγαλύτερου κύματος, από το μέγιστο κύμα σχεδιασμού, οπότε αυτό θα τείνει να επιβάλει στον πλωτήρα παλινδρομική κίνηση μεγαλύτερου εύρους από τη μέγιστη σχεδιαζόμενη, οι υδραυλικοί κύλινδροι ΓΔ και Γ'Δ' μέσω κατάλληλων βαλβίδων, θα διακόπτουν προοδευτικά την διαστολή ή συστολή τους πέρα από ένα ορισμένο όριο και θα περιορίζουν την κίνηση του άξονα Β-Β' στη μέγιστη επιτρεπτή. Με τον ίδιο τρόπο η περιστροφική κίνηση του Ζ-Ζ' του πλωτήρα γύρω από τον άξονα Β-Β' περιορίζεται από τους υδραυλικούς κυλίνδρους ΕΖ-Ε'Ζ' εντός των ορίων σχεδιασμού.



Εικόνα 11. Σχηματική παράσταση της προτεινόμενης μηχανής σε όψη και κάτοψη.

Αντοχή και στήριξη μηχανής

Κύρια προϋπόθεση ύπαρξης κάθε μηχανής είναι η αξιόπιστη λειτουργία της και ανθεκτικότητά της. Η τελευταία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για μηχανές που βρίσκονται στη θάλασσα και έχουν να αντιμετωπίσουν τα έντονα καιρικά φαινόμενα με συχνότητα επαναφοράς 50, 100 ή περισσότερων ετών. Οι ανεμογεννήτριες που αντιμετωπίζουν αντίστοιχες συνθήκες, όταν ο αέρας ξεπεράσει μια ταχύτητα, διακόπτουν τη λειτουργία τους. Οι συγκεκριμένη μηχανή μετά από ένα ορισμένο ύψος κύματος διακόπτει τη λειτουργία της για λόγους ασφαλείας. Επιπλέον σχεδιάζεται έτσι ώστε τα κινούμενα μέρη να αποσύρονται από το νερό, ώστε να μην καταπονούνται, ενώ είναι ακίνητα, από τις ισχυρές δυνάμεις που προκαλούν τα κύματα.

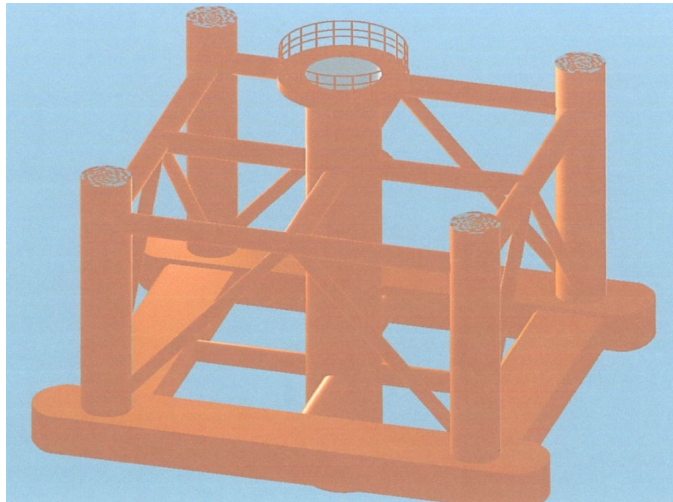
Στην εικόνα 11, οι βραχίονες AB και A'B' θα ακινητοποιούνται στο μέγιστο δυνατό ύψος και στη συνέχεια όλο το πλαίσιο στήριξης HΘH'Θ' θα γλιστράει επί του πλαισίου ΙΚ και όλα τα κινούμενα μέρη θα βρίσκονται σε ψηλότερη θέση έξω από τον κυματισμό της περιόδου συμβάντος θαλασσοταραχής για τον οποίο θα σχεδιασθεί η μηχανή.

Η όλη κατασκευή έχει δύο δυνατότητες στήριξης. Σε μικρά βάθη αυτή θα εδράζεται στο βυθό με πασσάλους που θα διαπερνούν το βυθό και θα στερεώνονται στο υποθαλάσσιο έδαφος. Σε μεγαλύτερα βάθη η όλη διάταξη θα εδράζεται σε πλωτή εξέδρα κατακόρυφης αγκυροβολίας και περισσειας άντωσης κατά τα συνήθη πρότυπα των πλωτών αυτών κατασκευών του σχήματος 12 (www.martech.gr).

Διαστασιολόγηση μηχανής

Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι η κατασκευή μηχανής που να συντονίζεται εύκολα στις επικρατούσες κυματικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης και να λειτουργεί το μέγιστο δυνατό διάστημα του έτους με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέγεθος του πλωτήρα σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του κύματος προσδιορίζουν την ονομαστική ισχύ της μηχανής. Στην περίπτωση απαίτησης εγκατάστασης μεγαλύτερης ισχύος η βασική αυτή μονάδα επαναλαμβάνεται με στήριξη σε μια ευρύτερη εξέδρα μεγάλων διαστάσεων με τρόπο ώστε να εγκατασταθεί μια σειρά τέτοιων μηχανών όπως στο σχήμα 13. Στην περίπτωση αυτή θα χρησιμοποιείται μια μόνο μονάδα παραγωγής ενέργειας (power take off) με δοχείο πίεσης, υδραυλικό

κινητήρα και γεννήτρια για μια σειρά πλωτήρων. Η εγκατάσταση είναι τέτοια ώστε οι όποιες εργασίες συντήρησης να γίνονται επί τόπου επί της εξέδρας στήριξης. Οι εκτεταμένες εργασίες συντήρησης που απαιτούν αντικατάσταση των πλωτήρων κλπ θα γίνονται επί της ακτής με μεταφορά ολόκληρης της μονάδας.

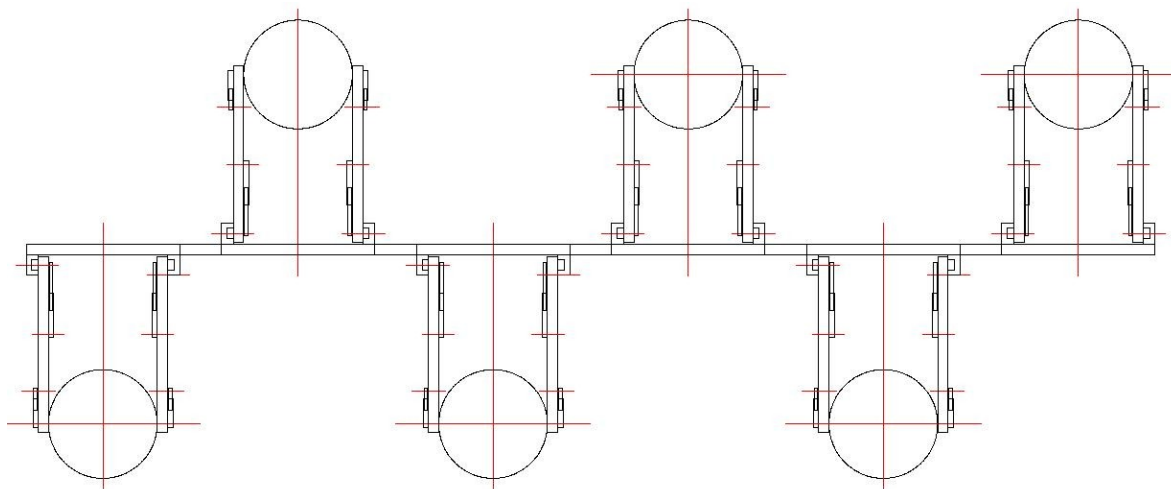


Εικόνα 12. πλωτή εξέδρα κατακόρυφης αγκυροβολίας και περίσσειας άντωσης

Περαιτέρω έρευνα στην προτεινόμενη σχεδίαση

Σχήμα του πλωτήρα: Το προτεινόμενο σχήμα του πλωτήρα είναι κυλινδρικό. Η υδροδυναμική μελέτη της σύνθετης κίνησής του και το πείραμα, θα καταδείξει το καταλληλότερο σχήμα, σφαιρικό ή άλλο πιο σύνθετο, της βρεχόμενης επιφάνειας του πλωτήρα, ώστε αυτό να αποδίδει τα μέγιστα με χρήση της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του μηχανισμού.

Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας: Η μονάδα παραγωγής ενέργειας που προτείνεται είναι ένα κλασικό υδραυλικό σύστημα παραγωγής με δοχείο πίεσεως, υδραυλικό κινητήρα και γεννήτρια. Η παλινδρομική κίνηση των βραχιόνων και του πλωτήρα κάνει τη μηχανή ιδιαίτερα κατάλληλη ώστε το ρεύμα να παράγεται κατ' ευθείαν από γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Η τεχνολογία των γραμμικών ηλεκτρικών μηχανών έχει κάνει πρόσφατα σημαντικά βήματα προόδου, ώστε να είναι εφικτή η απ' ευθείας παραγωγή ρεύματος από την παλινδρομική κίνηση χωρίς την παρεμβολή της υδραυλικής μονάδας.



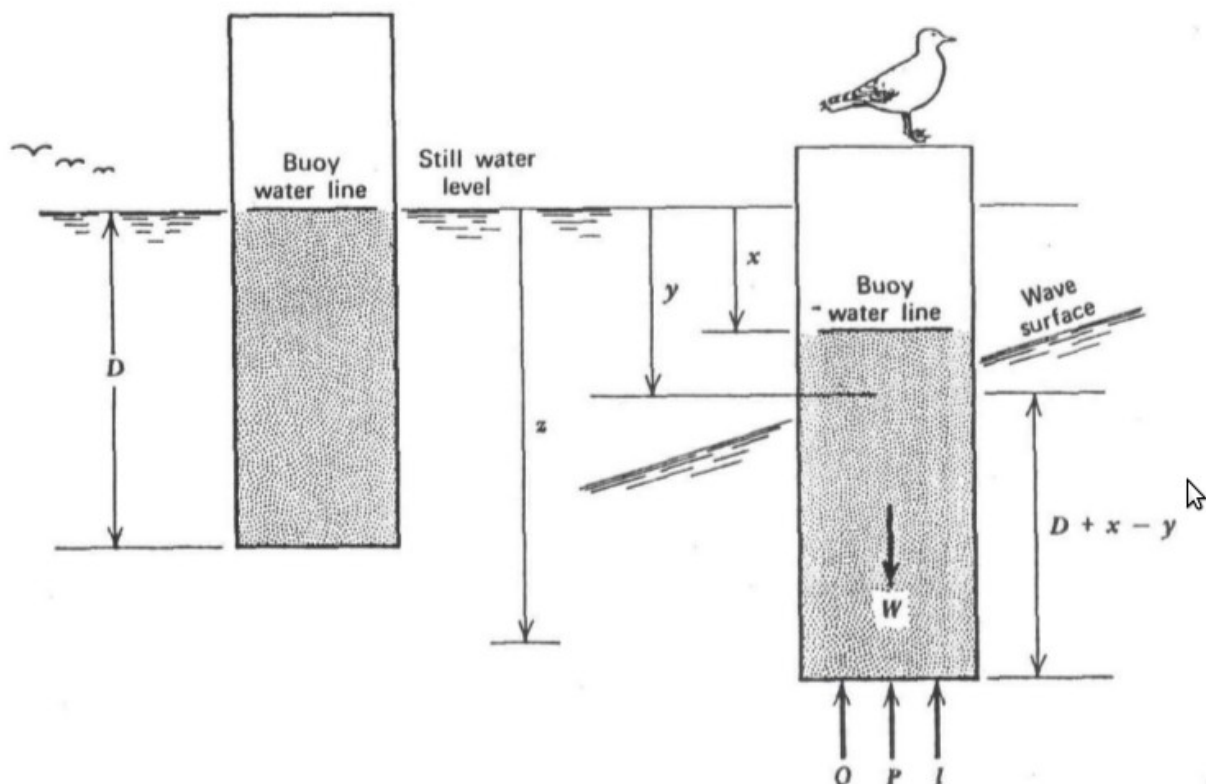
Εικόνα 13. σχηματική κάτοψη διάταξης περισσότερων μηχανών

Αξιοποίηση κινητικής ενέργειας κυμάτων: Σύμφωνα με την πρόταση η οριζόντια διεύθυνση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων αξιοποιείται μέσω της άρθρωσης του πλωτήρα και της παλινδρομικής κίνησής του γύρω από τον άξονα B-B'. Αντί της κάθετης διάταξης του πλωτήρα προτείνεται η διερεύνηση εγκατάστασης κυλινδρικού πλωτήρα με την παράπλευρη επιφάνεια οριζόντια και δυνατότητα περιστροφής γύρω από το B-B'. Η περιστροφή του κυλίνδρου θα γίνεται υπό την επίδραση των διερχόμενων κυμάτων, η δε ροπή που αναπτύσσεται θα κινεί ένα υδραυλικό κινητήρα που θα συμπιέζει λάδι ή θα κινεί κατ' ευθείαν μια γεννήτρια.

4. Μαθηματική Ανάλυση του Προβλήματος

Κάθετη Ταλάντωση

Στις περισσότερες περιπτώσεις η μοντελοποίηση του θαλάσσιου κύματος γίνεται με μια συνάρτηση ημίτονου ή συνημιτόνου. Έτσι λοιπόν, μοντελοποιήθηκε το κύμα με συνάρτηση συνημιτόνου όπου το πλάτος (amplitude) του κύματος είναι μια παράμετρος που αλλάζει ανάλογα με την περιοχή, ενώ το ίδιο ισχύει προφανώς και για την περίοδο (period) του κύματος. Εκτός όμως από την μοντελοποίηση του κύματος σημαντικό είναι να μπορούμε να ορίσουμε και την θέση του πλωτήρα σε σχέση με το κύμα. Γι αυτόν τον λόγον θα συμφωνήσουμε στις σχετικές συντεταγμένες του πλωτήρα με το κύμα όπως αυτές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 14. Συντεταγμένες και δυνάμεις που εφαρμόζονται από το νερό στον πλωτήρα

Για επίπεδο αναφοράς επιλέγουμε την επιφάνεια της θάλασσας όταν αυτή βρίσκεται σε απόλυτη ηρεμία. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 14 στο αριστερά σχήμα. Σε αυτό διακρίνουμε την απόσταση D που είναι το βύθισμα του πλωτήρα σε ήρεμη θάλασσα. Στο δεξιά σχήμα βλέπουμε ένα στιγμιότυπο του πλωτήρα σε κυματισμό. Σε αυτό το σχήμα διακρίνουμε και τις βασικότερες εκ των συντεταγμένων. Έτσι έχουμε το x , του οποίου οι θετικές τιμές είναι προς τα πάνω. Με x ορίσαμε την κάθετη απόσταση από το επίπεδο αναφοράς μέχρι και την ίσαλο γραμμή που είχαμε σε κατάσταση ηρεμίας. Είναι δηλαδή η απόσταση, κατά τον κάθετο άξονα, που έχει αποκλίνει ο πλωτήρας από το επίπεδο αναφοράς. Η απόσταση που συμβολίζεται με y , της οποίας και πάλι οι θετικές τιμές είναι προς τα πάνω, είναι η κάθετη απόσταση από το επίπεδο αναφοράς μέχρι και την επιφάνεια του κύματος. Αυτή η απόσταση δίνεται από την εξίσωση $y = r \cdot \cos \omega t$ όπου r είναι το πλάτος (amplitude) του κυματισμού και ω είναι η γωνιακή συχνότητα (angular frequency) του. Η συντεταγμένη που ονομάζεται στο σχήμα με το γράμμα z είναι η κάθετη απόσταση από το επίπεδο αναφοράς μέχρι και οποιοδήποτε σημείο που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Όπως και στις προηγούμενες συντεταγμένες έτσι και στη z το θετικό πρόσημο θεωρείται προς τα πάνω,

Η μοντελοποίηση της κίνησης του πλωτήρα είναι αρκετά πολύπλοκη, καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές διαφορετικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις που δρουν στον πλωτήρα είναι βαρυτικής αλλά και υδροδυναμικής φύσης και θα αναλυθούν στη συνέχεια με λεπτομέρεια. Το βάρος, το οποίο στην εικόνα 14 έχει συμβολιστεί με το γράμμα W , είναι η μοναδική δύναμη βαρυτικής φύσης που εμφανίζεται και παίρνει θετικές τιμές προς τα κάτω. Στη συνέχεια έχουμε την υδροδυναμική πίεση που ασκείται στον πυθμένα του πλωτήρα (pressure force on the buoy bottom). Η πίεση παίρνει τις θετικές της τιμές προς τα πάνω. Η εξίσωση με την οποία υπολογίζουμε την πίεση σε ένα βάθος z είναι η παρακάτω:

$$p = \rho \cdot g \cdot z - \rho \cdot g \cdot \xi$$

$$p = \rho \cdot g \cdot (z - y \cdot e^{-kz}) \quad (2)$$

όπου με ξ συμβολίζεται η κάθετη απόσταση της επιφάνειας του νερού από την ίσαλο γραμμή κατά την ηρεμία και υπολογίζεται από τον τύπο $\xi = y \cdot e^{-kz}$ όπως φαίνεται και στην εικόνα 15.

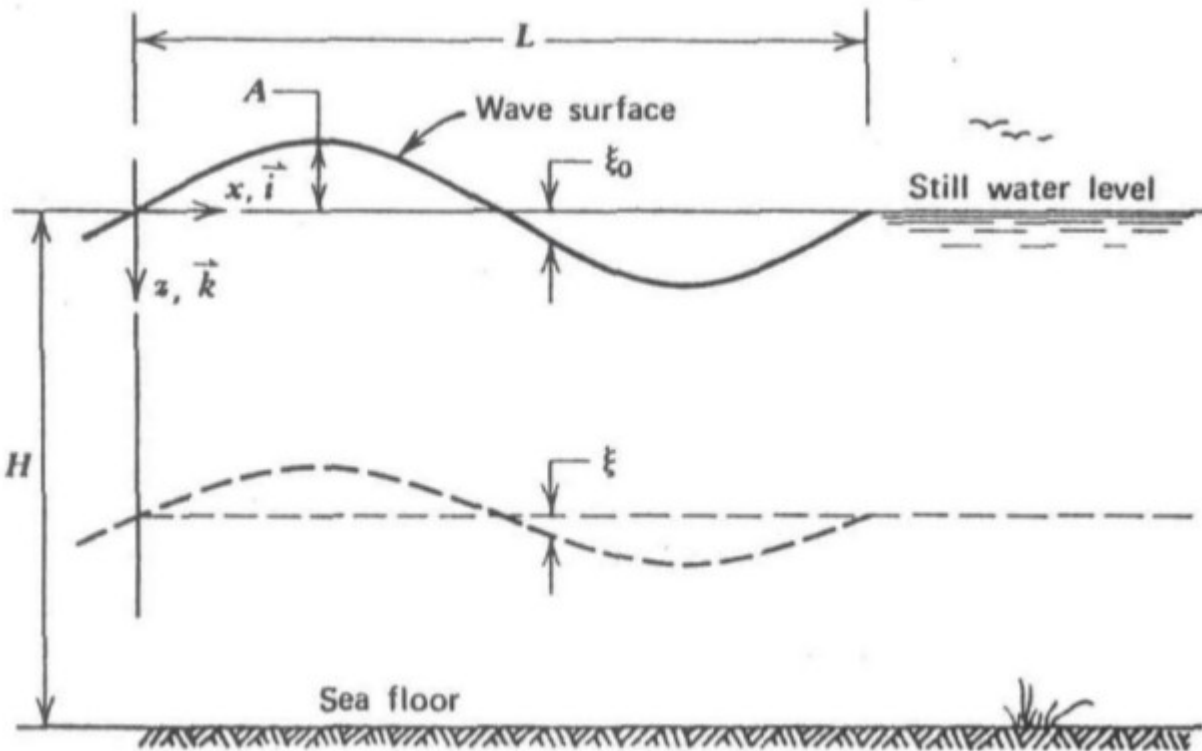


Figure 2.1.

Εικόνα 15. Χαρακτηριστικά κύματος. A πλάτος κύματος, L μήκος κύματος, ξ κάθετη απόσταση επιφάνειας νερού από την ίσαλο γραμμή, H βάθος.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 14 η απόσταση z μπορεί να αντικατασταθεί με $z = x + D$ για τον πυθμένα του πλωτήρα. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω με D συμβολίζουμε το βύθισμα του πλωτήρα. Για να βρούμε όμως και την συνολική δύναμη που εφαρμόζεται στον πλωτήρα λόγω της υδροστατικής πίεσης θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το παραπάνω με την επιφάνεια του πυθμένα του πλωτήρα, η οποία συμβολίζεται με A . Έτσι έχουμε

$$P = \rho \cdot g \cdot A \cdot (x + D - y \cdot e^{-kz}) \quad (3)$$

Όμως ενώ για πλωτήρες με μικρό βύθισμα το z είναι πολύ μικρό και έτσι μπορούμε να παραμελήσουμε τον όρο e^{-kz} καθώς θα είναι σχεδόν ίσος με τη μονάδα. Αυτό όμως δεν ισχύει και

για πλωτήρες με μεγάλο βύθισμα. Συγκεκριμένα σε αυτούς ο όρος e^{-kz} μπορεί να αντικατασταθεί με e^{-kD} μιας και το z είναι σχεδόν ίδιο με το D . Έχοντας στο μυαλό την τελευταία παρατήρηση καταλήγουμε ότι ο τύπος για πλωτήρες με μεγάλο βύθισμα παίρνει την μορφή

$$P = \rho \cdot g \cdot A \cdot D + \rho \cdot g \cdot A \cdot x - \rho \cdot g \cdot A \cdot y \cdot e^{-kD} \quad (4)$$

Στον παραπάνω τύπο όπως και στους επόμενους εμφανίζεται ο όρος $e^{-k \cdot z}$ όπου ο συντελεστής k εξαρτάται από το κύμα^[19] και πιο ειδικά από το μήκος L του κύματος (wavelength). Ο τύπος που το υπολογίζει είναι

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{L} \quad (5)$$

Τέλος, υπάρχουν και οι δυνάμεις Q και I , οι οποίες ονομάζονται δύναμη απόσβεσης λόγω του ιξώδους του νερού (damping force due to water viscosity) και αδρανειακή δύναμη λόγω του φαινομένου της προστιθέμενης μάζας (inertial force to the the added mass effect) αντίστοιχα. Τόσο η Q όσο και η I παίρνουν τις θετικές τους τιμές προς τα πάνω. Η δύναμη Q όταν είναι γραμμική θεωρείται πως είναι άμεσα αναλογική της σχετικής ταχύτητας μεταξύ πλωτήρα και νερού. Η ταχύτητα του πλωτήρα είναι ίση με τη πρώτη παράγωγο του x ως προς τον χρόνο, ενώ η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας ενός σωματιδίου του νερού είναι $\dot{y} \cdot e^{-kz}$. Υποθέτοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος της δύναμης απόσβεσης εφαρμόζεται στον πυθμένα του πλωτήρα, δηλαδή για $z=D$, τότε αυτή μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο

$$Q = b \cdot (\dot{x} - \dot{y} e^{-kz}) \quad (6)$$

όπου ο όρος που συμβολίζεται με b είναι ο συντελεστής της τριβής. Κλείνοντας τον σχολιασμό των δυνάμεων που εφαρμόζονται στον πλωτήρα, όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, υπάρχει και η αδρανειακή δύναμη I που οφείλεται στο φαινόμενο της προστιθέμενης μάζας. Αυτή η δύναμη ισούται με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της προστιθέμενης μάζας m' με τη σχετική επιτάχυνση

μεταξύ πλωτήρα και νερού. Θεωρώντας και πάλι όπως και προηγούμενα ότι $z=D$ έχουμε

$$I = m' \cdot (\ddot{x} - \ddot{y} \cdot e^{-kD}) \quad (7)$$

Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαίο να γίνει αναφορά στο φαινόμενο της προστιθέμενης μάζας. Προστιθέμενη μάζα ονομάζουμε την μάζα του νερού που παρασέρνει ένα αντικείμενο που επιπλέει κατά την κίνηση του μέσα στο νερό. Το μέγεθος της μάζας του νερού που παρασύρεται εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου, από τη πυκνότητα του νερού (αλλάζει από μέρος σε μέρος) και τέλος από τον βυθισμένο όγκο του αντικειμένου. Ο τύπος που υπολογίζει την προστιθέμενη μάζα

$$m' = C_m \cdot \rho_F \cdot (Vol) \quad (8)$$

όπου C_m είναι ο συντελεστής προστιθέμενης μάζας (added mass coefficient) που εξαρτάται από το σχήμα του πλωτήρα και για κυλινδρικό πλωτήρα ισούται με 1^[11], το ρ_F είναι η πυκνότητα του νερού μετρούμενη σε slugs/ft³ και τέλος ο όρος (Vol) είναι ο βυθισμένος όγκος του πλωτήρα μετρούμενος σε κυβικά πόδια.

Με τους τύπους υπολογισμού των δυνάμεων που εφαρμόζονται στον πλωτήρα κατά την κατακόρυφη ταλάντωση του, είναι δυνατό να εκφραστεί η εξίσωση της κίνησης του. Αυτή δίνεται από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, ο οποίος αναφέρει ότι το άθροισμα των δυνάμεων ισούται με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της μάζας του σώματος επί την επιτάχυνση αυτού.

$$\Sigma F = m \cdot \ddot{x} \quad (9)$$

Στην περίπτωσή μας παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$W - P - Q - I = m \ddot{x} \quad (10)$$

$$W - \rho g A (D + x - y e^{-kD}) - b (\dot{x} - \dot{y} e^{-kD}) - m' (\ddot{x} - \ddot{y} e^{-kD}) = m \ddot{x} \quad (11)$$

Παρατηρώντας την τελευταία εξίσωση είναι φανερό ότι το $W = \rho g A D$ εμφανίζεται δύο φορές με διαφορετικό πρόσημο και έτσι οι δύο όροι αλληλοακυρώνονται. Επίσης αν αντικατασταθούν τα $c = \rho g A$ και $m_v = m + m'$, στη συνέχεια είναι δυνατόν να ομαδοποιηθούν οι όροι του x και του y και η εξίσωση της κίνησης να γίνει

$$\begin{aligned} -\rho \cdot g \cdot A \cdot x + \rho \cdot g \cdot A \cdot y \cdot e^{-kD} - b \cdot \dot{x} + b \cdot y \cdot e^{-kD} - m' \cdot \ddot{x} + m' \cdot y \cdot e^{-kD} &= m \cdot \ddot{x} \Rightarrow \\ -c \cdot x + c \cdot y \cdot e^{kD} - b \cdot \dot{x} + b \cdot y \cdot e^{-kD} - (m' + m) \cdot \ddot{x} + m' \cdot y \cdot e^{-kD} &= 0 \Rightarrow \\ -c \cdot x + c \cdot y \cdot e^{kD} - b \cdot \dot{x} + b \cdot y \cdot e^{-kD} - m_v \cdot \ddot{x} + m' \cdot y \cdot e^{-kD} &= 0 \Rightarrow \\ c \cdot x + b \cdot \dot{x} + m_v \cdot \ddot{x} &= (c \cdot y + b \cdot \dot{y} + m' \cdot \ddot{y}) e^{-kD} \end{aligned}$$

όπου σε αυτή ισχύει ότι

$$\begin{aligned} y &= r \cdot \cos \omega t \\ \dot{y} &= -\omega r \sin \omega t \\ \ddot{y} &= -\omega^2 r \cos \omega t \end{aligned}$$

και έτσι σύμφωνα με τα τελευταία το δεξί μέρος της εξίσωσης κίνησης μπορεί να γραφτεί ως

$$(cy + b \dot{y} + m' \ddot{y}) e^{-kD} = r e^{-kD} [(c - m' \omega^2) \cos \omega t - b \omega \sin \omega t] \quad (12)$$

θέτοντας

$$F_o = r e^{-kD} \sqrt{(c - m' \omega^2)^2 + b^2 \omega^2} \quad (13)$$

$$\text{και } \sigma = \tan^{-1} \frac{-b \omega}{c - m' \omega^2} \quad (14)$$

όπου F_o ονομάζεται δύναμη διέγερσης και η σ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της δύναμης αυτής και του κύματος. Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση κίνησης του πλωτήρα παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$cx + b \dot{x} + m_v \ddot{x} = F_o \cos(\omega t + \sigma) \quad (15)$$

η οποία δεν είναι και η τελική της μορφή. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να διαιρεθεί με την λεγόμενη εικονική μάζα, m_v . Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + p^2 x = \frac{F_o}{m_v} \cos(\omega t + \sigma) \quad (16)$$

όπου

$$2n = \frac{b}{m_v} \quad p^2 = \frac{c}{m_v} \quad (17)$$

όπου p είναι η φυσική γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης.

Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο ότι κατά την άνοδο του πλωτήρα εκτός από τις προηγούμενες δυνάμεις δρα και αυτή του εμβόλου το οποίο τείνει να βυθίζει τον πλωτήρα. Έτσι, κατά την άνοδο του πλωτήρα η εξίσωση είναι της μορφής

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + p^2 x = \frac{F_o}{m_v} \cos(\omega t + \sigma) - \frac{F_{emv}}{m_v} \quad (18)$$

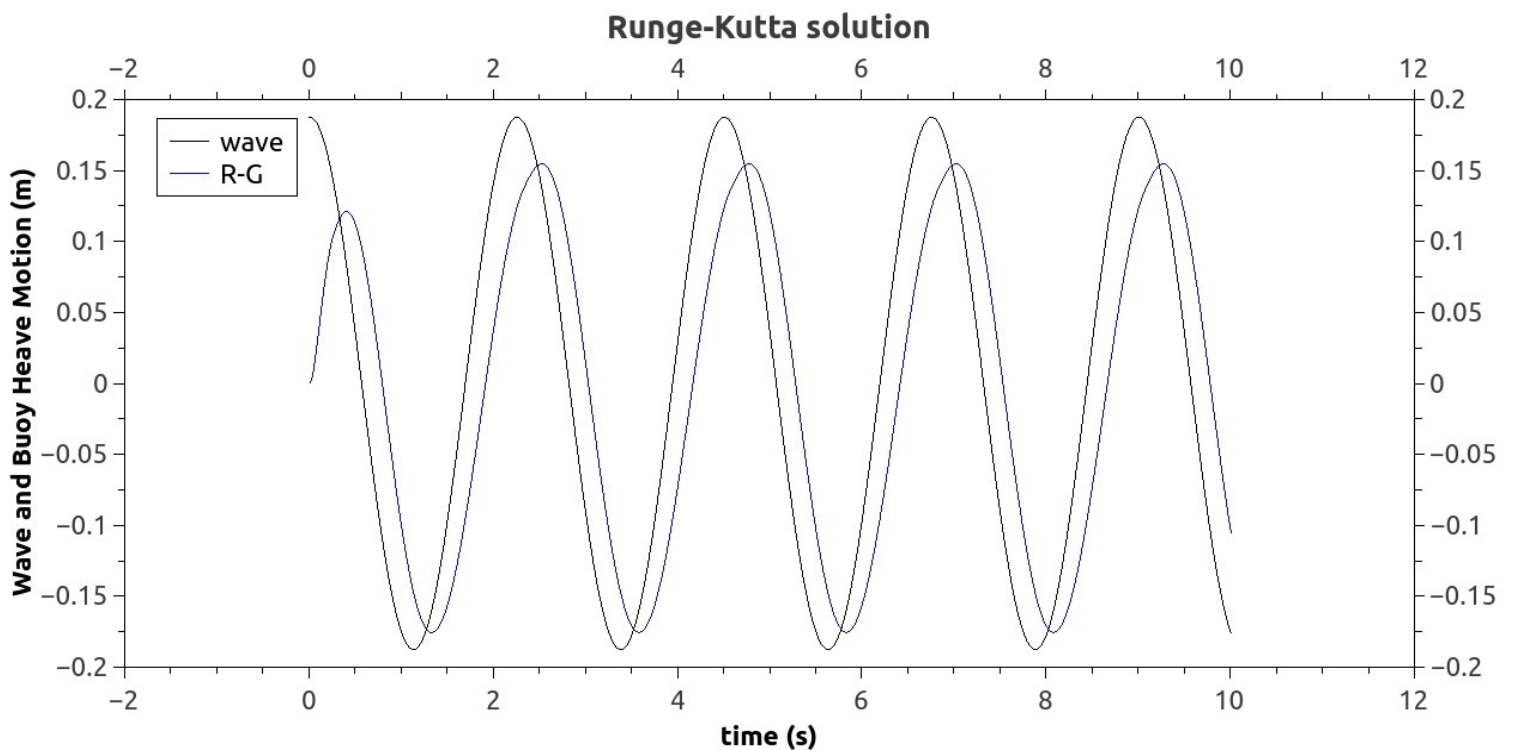
όπου με F_{emv} έχει συμβολιστεί η δύναμη του εμβόλου.

Η δύναμη που εφαρμόζεται στο έμβολο υπολογίζεται βάσει της παροχής που θέλω να έχει το σύστημά μου αλλά και τις διαστάσεις του εμβόλου. Στα παρακάτω διαγράμματα η δύναμη που υποτίθεται ότι εφαρμόζεται στον πλωτήρα είναι 502.4N και αυτό προκύπτει ως εξής: αν θέλουμε να έχουμε μια παροχή ρευστού με πίεση $2 \text{ bar} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pascal}$ και το έμβολο έχει κυκλική διατομή με διάμετρο 5 cm τότε η δύναμη υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το εμβαδόν του εμβόλου με την πίεση του ρευστού, δηλαδή $F_{emv} = 2 \cdot 10^5 \cdot 0.03^2 = 502.4 \text{ N}$

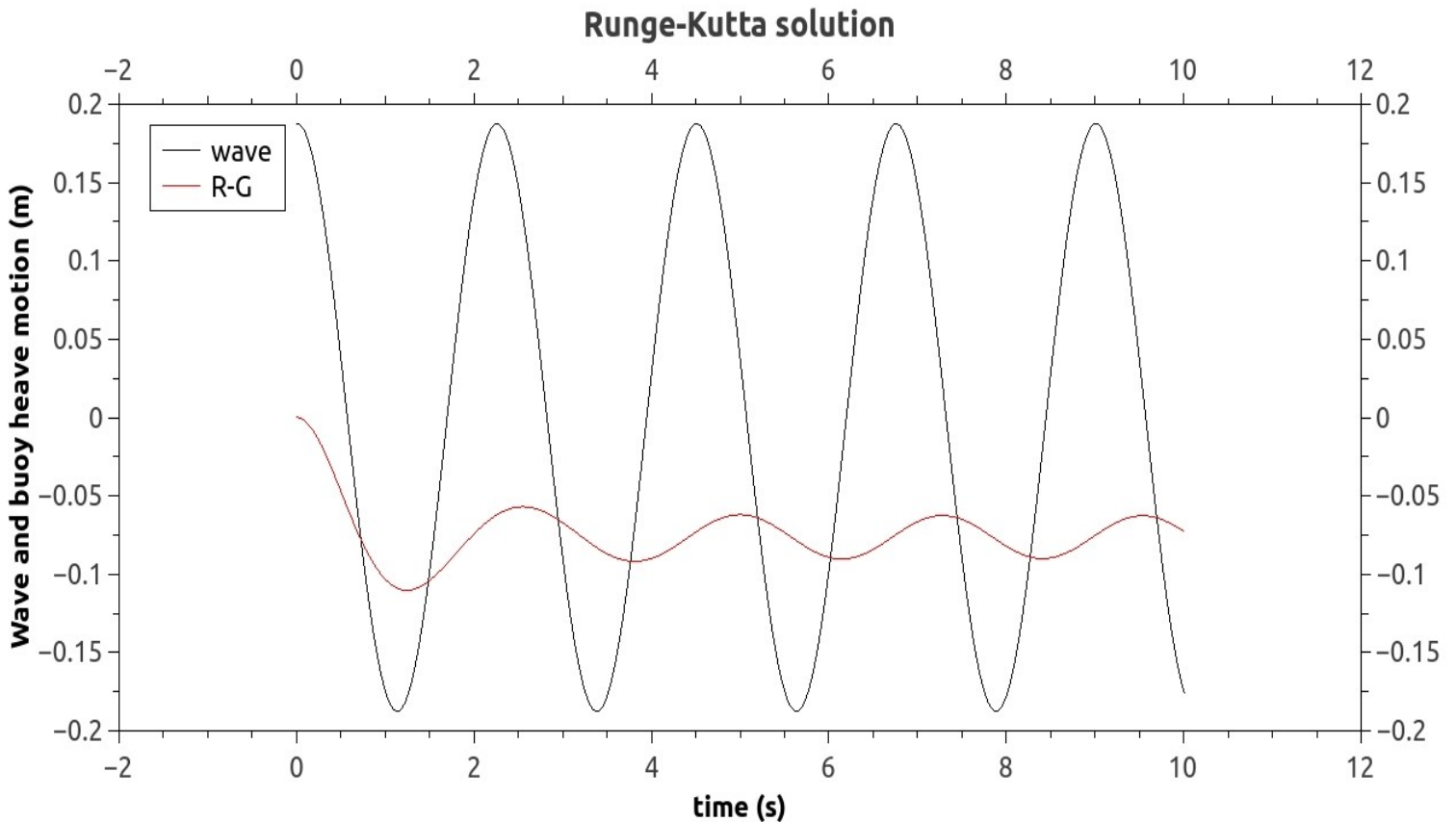
5. Δημιουργία κώδικα για την επίλυση του προβλήματος

Σκεπτικό ανάπτυξης του κώδικα

Στο πρώτο στάδιο ο κώδικας έπρεπε απλώς για δοσμένες τις διαστάσεις του πλωτήρα και για γνωστά κυματικά δεδομένα να μπορεί να βρίσκει την θέση του πλωτήρα σε κάθε χρονικό σημείο σε σχέση με το κύμα. Παραδείγματα εφαρμογής αυτού του κώδικα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 16. Αποτελέσματα της μεθόδου Runge-Kutta για κύμα με εύρος 0.375m , περίοδο 2.25sec και πλωτήρα ακτίνας 1.1m και βυθίσματος 0.11m . Η δύναμη που εφαρμόζεται στον πλωτήρα ισούται με 502.4 N



Εικόνα 17. Αποτελέσματα της μεθόδου Runge-Kutta για κύμα με εύρος 0.375m , περίοδο 2.25sec και πλωτήρα ακτίνας 0.5m και βυθίσματος 1.01m . Η δύναμη που εφαρμόζεται στον πλωτήρα ισούται με 502.4N

Όπως φαίνεται στις 2 παραπάνω εικόνες για ένα συγκεκριμένο κύμα δεν είναι όλοι οι πλωτήρες κατάλληλοι. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω όγκου καθώς όσο αυξάνει ο όγκος του πλωτήρα, αυξάνει και η προστιθέμενη μάζα άρα και η αδράνεια του πλωτήρα και έτσι ένα μικρό κύμα να μην μπορεί να τον μετακινήσει. Επίσης μπορεί η άνωση του πλωτήρα να μην είναι αρκετή για να υπερνικήσει την εφαρμοζόμενη δύναμη από το έμβολο. Αυτή η περίπτωση φαίνεται στο δεύτερο σχήμα όπου λόγω μεγάλης υδροστατικής αντίστασης, όγκου και βάρους, ο πλωτήρας αδυνατεί να “ακολουθήσει” το κύμα και σχεδόν μένει ακίνητος.

Επομένως για να επιλεγεί ο κατάλληλος πλωτήρας θα πρέπει να δοκιμαστούν πολλοί διαφορετικοί πλωτήρες και από αυτούς να επιλεγεί ο κατάλληλος.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει μια επεξήγηση για το πώς δίνονται τα κυματικά δεδομένα.

Location M3 (37.83°N, 23.47°E)

T_p [s]	H_p [m]															Total
	0.00 0.25	0.25 0.50	0.50 0.75	0.75 1.00	1.00 1.25	1.25 1.50	1.50 1.75	1.75 2.00	2.00 2.50	2.50 3.00	3.00 3.50	3.50 4.00	4.00 5.00	5.00 6.00	6.00 7.50	
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.9-2.6	134	196	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6-3.1	45	103	36	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1-3.8	24	69	75	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.8-4.6	34	13	15	17	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.6-5.0	18	9	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0-5.5	26	17	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5-6.1	29	13	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.1-6.7	14	11	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.7-7.4	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.4-8.1	12	17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.1-8.9	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.9-9.8	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.8-10.8	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.8-11.9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.9-13.0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.0-14.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.4-17.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>17.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	350	460	145	34	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Εικόνα 17. Κυματικά δεδομένα για ένα πεδίο στο Αιγαίο Πέλαγο από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας, ΕΛΚΕΘΕ μέσω του δικτύου ΠΟΣΕΙΔΩΝ [20]

Τα κυματικά δεδομένα για ένα θαλάσσιο πεδίο δίνονται μετά από μετρήσεις πολλών ετών (το λιγότερο 10 έτη) με ειδικό εξοπλισμό (ειδικοί πλωτήρες εφοδιασμένου με GPS, επιταχυνσιόμετρα και άλλα μετρητικά όργανα), ο οποίος μετρά το εύρος και την περίοδο του κάθε κύματος και για κάθε κύμα μετρά και την συχνότητα εμφάνισης. Τα δεδομένα μας δίνονται στη μορφή της εικόνας 17. Σε αυτή φαίνεται στον κάθετο άξονα η περίοδος του κάθε κύματος και στον οριζόντιο το ύψος του. Έτσι δημιουργείται το πλέγμα πολλών διαφορετικών κυμάτων των οποίων η διαφορετική συχνότητα εμφάνισης φαίνεται από τον αριθμό στον πίνακα. Για παράδειγμα το κύμα με εύρος ύψους 0.25~0.5 m και εύρος περιόδου 1.9~2.6 sec έχει συχνότητα εμφάνισης 196 φορές κάθε 996 κύματα, μιλώντας πάντα για το συγκεκριμένο πεδίο. Είναι εμφανές λοιπόν ότι μπορεί για παράδειγμα το κύμα με ύψος 1.25~1.5 και περίοδο 3.8~4.6 sec να έχει μεγαλύτερη ισχύ αλλά εμφανίζεται μονάχα μια φορά στις χίλιες σε αντίθεση με το κύμα ύψους 0.25~0.5 m, περίοδο 1.9~2.6 sec και έτσι στη διάρκεια ενός έτους

να μην είναι συμφέρον να εκμεταλλευτεί κανείς πλήρως λίγα μεγάλα κύματα αλλά πολλά μικρότερα. Εδώ φαίνεται λοιπόν η ανάγκη ο αλγόριθμος όχι απλά να επιλέγει τον καλύτερο πλωτήρα για ένα συγκεκριμένο κύμα αλλά για ένα πεδίο συνολικά. Θα πρέπει δηλαδή να είναι σε θέση να βρει για όλα τα διαφορετικά κύματα ποιος είναι ο πλωτήρας που τα εκμεταλλεύεται το κάθε ένα ξεχωριστά πλήρως και στη συνέχεια να μπορεί να επιλέξει ποιος από όλους αυτούς τους πλωτήρες είναι αυτός που εκμεταλλεύεται καλύτερα το συνολικό ετήσιο κυματικό δυναμικό. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η καλύτερη εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού γίνεται εφόσον ο πλωτήρας απορροφά τα κύματα που στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος αποδίδουν τη μεγαλύτερη ενέργεια. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε φαίνεται στο παράρτημα.

5.1 Θεώρηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του εμβόλου επάνω στον πλωτήρα και κατακόρυφα.

5.1.1 Επεξήγηση κώδικα για την κάθετη κίνηση.

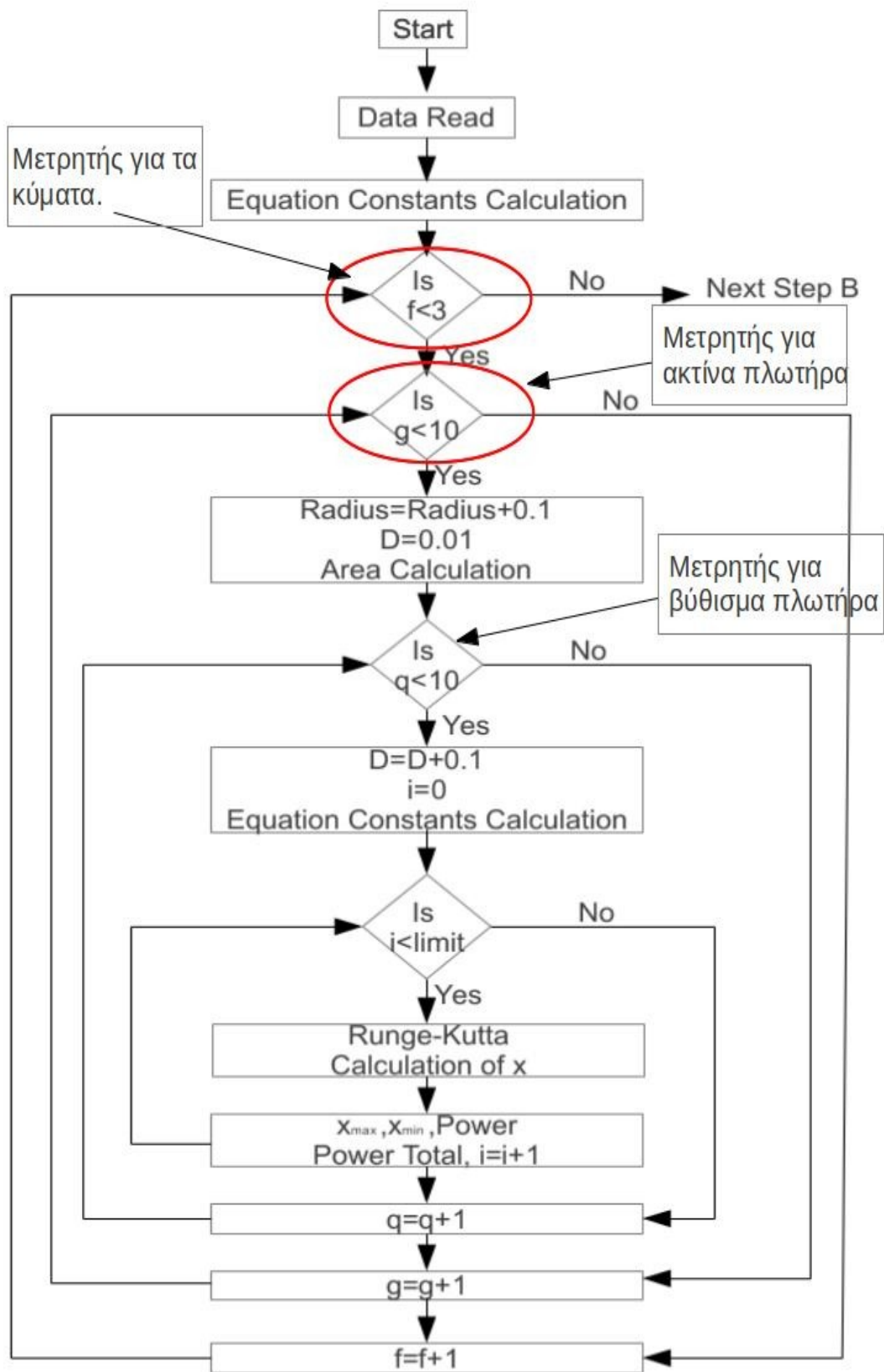
Στο κώδικα που παρατίθεται παραπάνω αρχικά εισάγονται σε πίνακα με τις κατάλληλες διαστάσεις, τα απαραίτητα κυματικά δεδομένα τα οποία είναι το εύρος του κυματισμού ϵ , η περίοδος T και τέλος η συχνότητα εμφάνισης του κύματος ανά 1000, ενώ στη συνέχεια ορίζεται η επιθυμητή ακρίβεια της μεθόδου Runge-Kutta μέσω του χρονικού βήματος Δt . Επίσης γίνεται και η εισαγωγή της δύναμης που εφαρμόζει το έμβολο στον πλωτήρα. Η δύναμη αυτή ισούται με τη πίεση που πρέπει να έχει η παροχή του νερού προς τον στρόβιλο επί το εμβαδόν του εμβόλου όπως εξάλλου αναφέρθηκε και πιο πάνω. Έχοντας αυτά τα δεδομένα μπορούν να ξεκινήσουν οι επαναλήψεις. Θα πρέπει όμως να δοθεί προσοχή στο ότι εξετάζεται η κίνηση του πλωτήρα μετά από ένα χρονικό σημείο, συνήθως μετά από 3 περιόδους του κύματος, ώστε να έχει προλάβει αυτός να βρεθεί σε μια “σταθερή” κατάσταση. Η πρώτη που λαμβάνει χώρα είναι αυτή της εισαγωγής των κυματικών δεδομένων. Έχοντας το κάθε κυματικό δεδομένο ακολουθεί ο υπολογισμός διαφόρων σταθερών που υπάρχουν στην προς επίλυση εξίσωση. Τέτοιες είναι η γωνιακή ταχύτητα ω , το μήκος του κύματος και η σταθερά k . Μετά το πέρας των παραπάνω βημάτων έρχεται η στιγμή για να δημιουργηθεί το πλέγμα των πλωτήρων. Στο κώδικα που παρατέθηκε παραπάνω το πλέγμα αποτελείται από 100 στο σύνολό τους πλωτήρες οι οποίοι σταδιακά αυξάνουν κατά 0.1m στην ακτίνα τους και άλλο τόσο στο βύθισμα τους, όπως φαίνεται και στον πίνακα 1 που δίνεται παρακάτω. Έχοντας την ακτίνα του πλωτήρα είναι εύκολο να υπολογιστεί

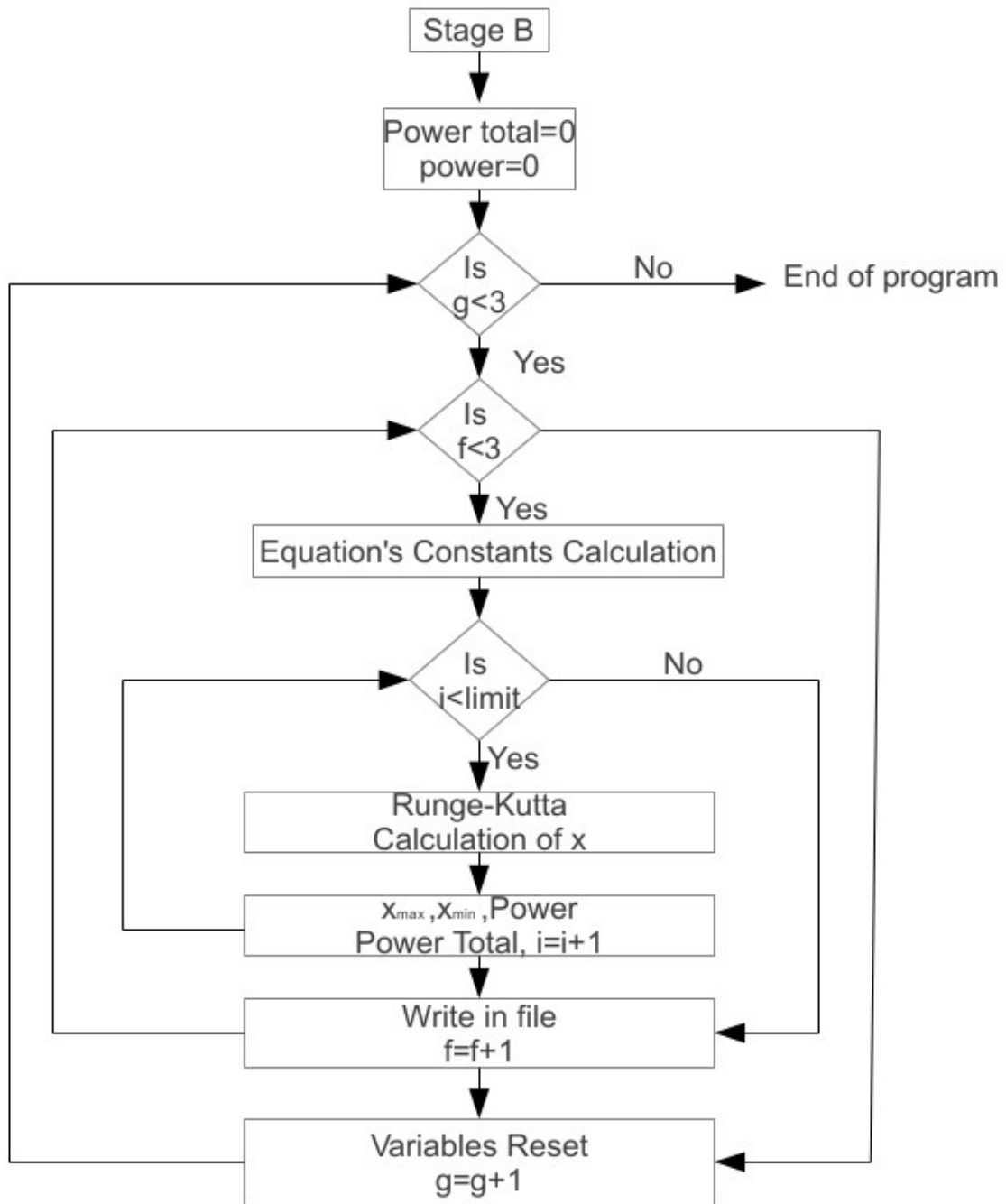
το εμβαδόν αυτού ενώ στη συνέχεια με το βύθισμα D αυτού μπορούν να υπολογιστούν οι σταθερές c όπως και η μάζα του πλωτήρα, η προστιθέμενη μάζα αυτού και τέλος η συνολική του μάζα. Έχοντας υπολογίσει το σύνολο των απαραίτητων σταθερών η εκτέλεση του κώδικα προχωρά στην εφαρμογή της μεθόδου Runge-Kutta η οποία υπολογίζει τη θέση x του πλωτήρα. Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα επειδή ο πλωτήρας στην αρχή δεν συντονίζεται με το κύμα, έχει οριστεί στο κώδικα να ελέγχει τη θέση του πλωτήρα μετά το πέρας 3 περιόδων ώστε αυτός να έχει έρθει σε μια σταθερή ταλάντωση. Επόμενο βήμα είναι η εύρεση του μέγιστου άνω και κάτω σημείου που φθάνει ο πλωτήρας κατά την ταλάντωση. Προφανώς λόγω απωλειών αυτό δεν είναι το ίδιο με το εύρος του κύματος. Μόλις ευρεθεί το μέγιστο χ και αντίστοιχα το ελάχιστο είναι εύκολο να υπολογιστεί η ισχύς που αποδίδει ο πλωτήρας για το συγκεκριμένο κύμα απλώς πολλαπλασιάζοντας την απόσταση που διανύει ο πλωτήρας με την δύναμη που του εφαρμόζει το έμβολο και διαιρώντας με το χρόνο που συμβαίνει αυτό, δηλαδή τη περίοδο του κύματος που λόγω συντονισμού είναι ίδια με την περίοδο της ταλάντωσης του πλωτήρα. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία για όλους τους πιθανούς πλωτήρες και συγκρίνοντας κάθε φορά την ισχύ που αποδίδει ο καθένας με αυτή του προηγούμενου είμαι σε θέση να βρω για κάθε διαφορετικό κύμα ποιος είναι ο πλωτήρας που αποδίδει τη μέγιστη ισχύ. Στη πρώτη φάση εκτέλεσης του κώδικα λοιπόν καταλήγω να έχω αντιστοιχήσει σε κάθε κύμα και έναν πλωτήρα που αποδίδει το μέγιστο σε αυτά τα κυματικά δεδομένα.

Είναι λογικό ο αποδοτικότερος για το πεδίο πλωτήρας να είναι ένας από αυτούς που προέκυψαν στο προηγούμενο βήμα. Έτσι στο επόμενο βήμα αυτό που θα πρέπει να κάνει ο κώδικας είναι έχοντας γνωστούς τους πιθανούς πλωτήρες να βρει ποιος από αυτούς αποδίδει το μέγιστο αθροιστικά. Για κάθε ένα κύμα λοιπόν ο κώδικας βρίσκει το πόσο αποδίδει ο πλωτήρας και το πολλαπλασιάζει με τη συχνότητα εμφάνισης του συγκεκριμένου κύματος καθώς έτσι προκύπτει η συνολική ισχύς που απορροφά ο μηχανισμός από το συγκεκριμένο είδος κύματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το ίδιο πράττει και για τα άλλα κύματα και κάθε φορά προσθέτει το αποτέλεσμα στο προηγούμενο ώστε στο τέλος να έχω για κάθε πλωτήρα το πόσο ενέργεια απορροφά από όλα τα κύματα στη διάρκεια του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Εν τέλει έχουμε την αποθήκευση των αποτελεσμάτων και την σύγκριση αυτών ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

	Βύθισμα D	Ακτίνα Βάσης πλωτήρα
Αρχική τιμή	0.01	0.1
Βήμα	0.1 X 10	0.1 X 10
Τελική τιμή	1.01	1.1

Πίνακας 1 Μεταβολή των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου για την εύρεση του βέλτιστου πλωτήρα





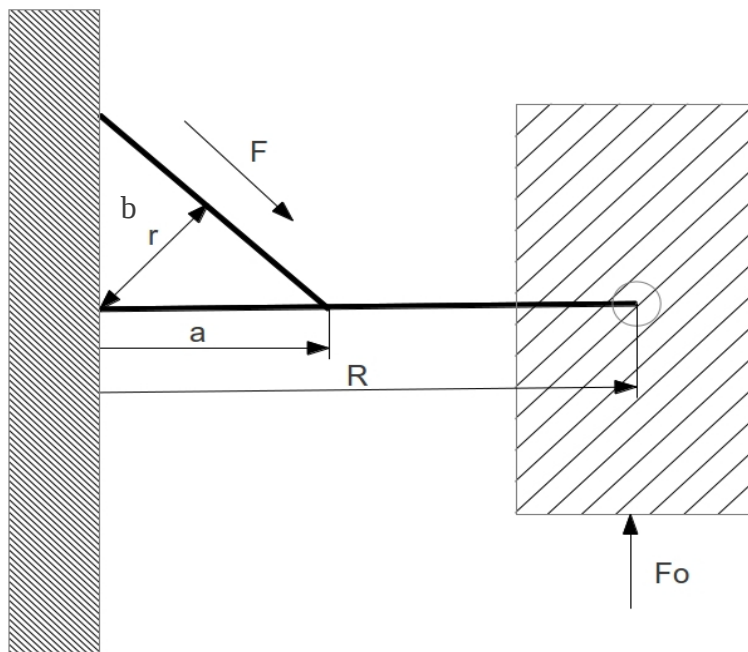
Εικόνα 19 Διάγραμμα ροής για τον κώδικα επιλογής βέλτιστου πλωτήρα όπου το έμβολο είναι τοποθετημένο πάνω στον πλωτήρα σε κάθετη διεύθυνση.

5.2 Θεώρηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του εμβόλου επάνω στον βραχίονα υπό γωνία θ .

Στο προηγούμενο βήμα θεωρήθηκε ότι η δύναμη του εμβόλου εφαρμόζεται πάνω στον πλωτήρα και σε κατακόρυφη διεύθυνση. Στο επόμενο βήμα θεωρείτε ότι το έμβολο εδράζεται πάνω στον βραχίονα και υπό γωνία θ όπως φαίνεται και στο σχήμα 20. Έτσι τώρα στην προς επίλυση εξίσωση εμφανίζεται και μια ροπή κατά την άνοδο του πλωτήρα, η οποία ισούται με :

$$M = \frac{F_{emv} \cdot r}{R}$$

όπου τα r και R φαίνονται και στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 20. Σκαρίφημα του μηχανισμού με το έμβολο υπό γωνία και στηριγμένο επάνω στον βραχίονα.

και η οποία οδηγεί σε λίγο διαφορετικά αποτελέσματα μιας και όπως βλέπουμε τώρα σημαντικό ρόλο

παίζει και το μήκος του βραχίονα όπως και η γωνία με την οποία θα τοποθετηθεί το έμβολο.

Λεπτομερέστερα λόγω της τοποθέτησης του εμβόλου υπό γωνία τώρα πλέον το άθροισμα των δυνάμεων δίνει τον παρακάτω τύπο

$$W - \rho g A (D + x - ye^{-kD}) - b(\dot{x} - ye^{-kD}) - m'(\ddot{x} - ye^{-kD}) - \frac{F \cdot \cos\theta \cdot a}{R} = m\ddot{x}$$

ο οποίος ισχύει κατά την άνοδο του πλωτήρα και όπως φαίνεται είναι παρόμοιος με τον τύπο (11) που αναφέρθηκε και προηγουμένως. Κατά την κάθοδο αυτού ισχύει ο ίδιος μόνο που στο δεξιό μέλος δεν υπάρχει ο τελευταίος όρος μιας και τώρα το έμβολο δεν παράγει έργο.

Για να βρεθεί η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης του εμβόλου όπως και το καλύτερο μήκος R του βραχίονα είναι απαραίτητος και ένας δεύτερος κώδικας ο οποίος έχει ως δεδομένο το καλύτερο μέγεθος του πλωτήρα που υπολογίστηκε προηγουμένως και για αυτόν δημιουργεί ένα πλέγμα από πιθανές γωνίες θ και μήκη R. Την γωνία θ εισάγεται έμμεσα μέσα από τα μήκη α και b με την βοήθεια του συνημιτόνου. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε σαν δεδομένο ο πλωτήρας που βρέθηκε προηγουμένως είναι για λόγους σύγκρισης μεταξύ των δύο διαφορετικών διατάξεων του εμβόλου όπως θα δούμε και πιο κάτω σε συγκριτικά διαγράμματα. Η εκτέλεση του κώδικα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μήκος α θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μήκος R του βραχίονα και το μήκος b όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ώστε να έχει τη δυνατότητα το κάτω άκρο του εμβόλου να εκτελέσει τη μέγιστη διαδρομή και συνεπώς να παράξει το μέγιστο έργο. Είναι όμως λογικό πως το b έχει αρκετούς κατασκευαστικούς περιορισμούς καθώς δεν μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλο.

5.2.1 Επεξήγηση κώδικα για την βέλτιστη τοποθέτηση του εμβόλου.

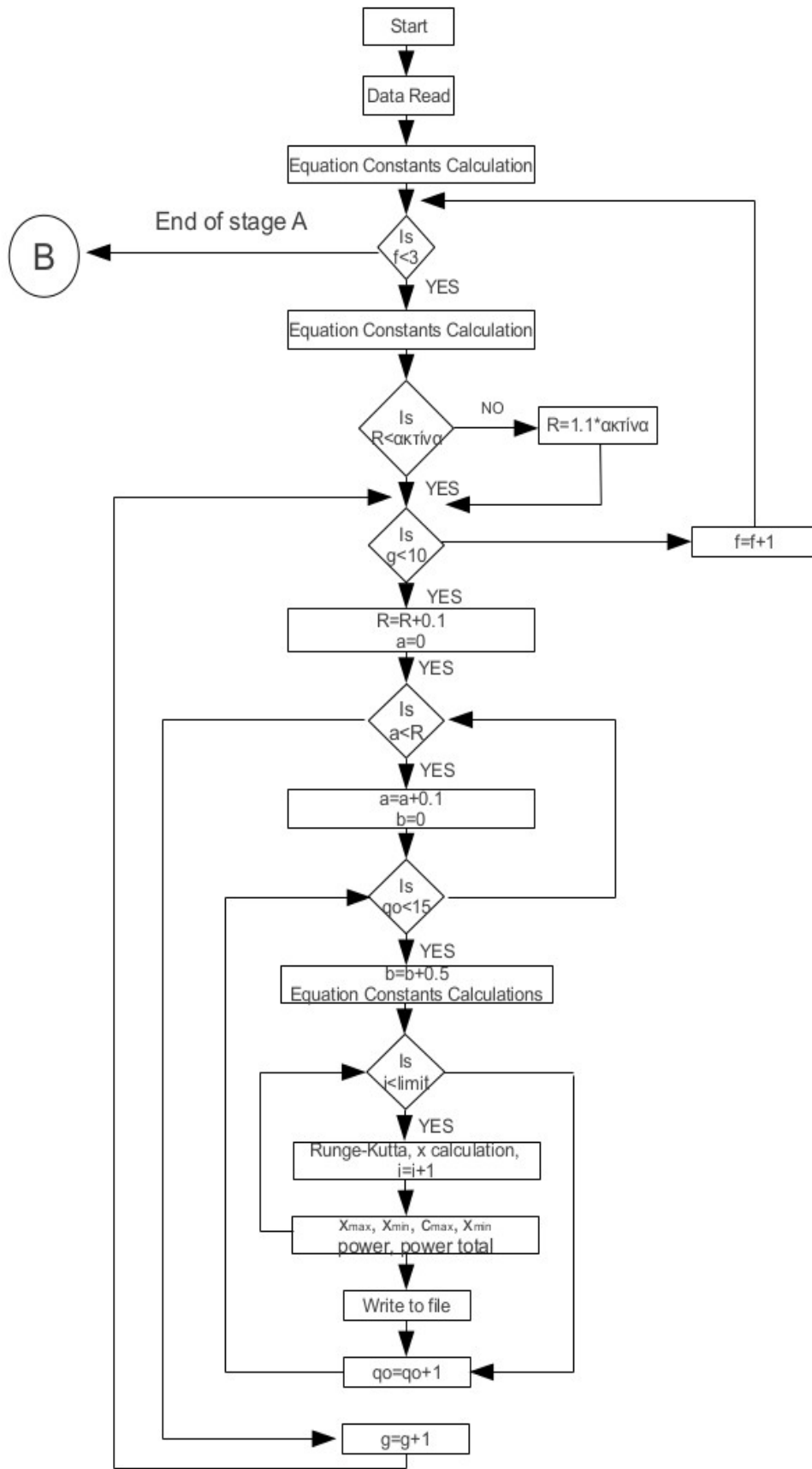
Πιο συγκεκριμένα ο αλγόριθμος κάνοντας χρήση της βελτιστοποίησης με την μέθοδο του πλέγματος (στο οποίο το b θα πρέπει να παίρνει τιμές μέχρι ένα όριο το οποίο θα θέσει ο κατασκευαστής) δημιουργεί διαφορετικούς συνδυασμούς των α, b και R και με γνωστές τις διαστάσεις του πλωτήρα υπολογίζει το ποσό της ισχύος που παράγεται. Σε αυτό το βήμα πρέπει να δοθεί στον κώδικα ο περιορισμός ότι το μήκος του βραχίονα πρέπει να είναι υποχρεωτικά μεγαλύτερο από την ακτίνα του πλωτήρα, ώστε να μπορεί να κινείται ελεύθερα ο μηχανισμός. Επίσης, το α δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μήκος του βραχίονα για προφανείς λόγους. Μετά τον υπολογισμό των

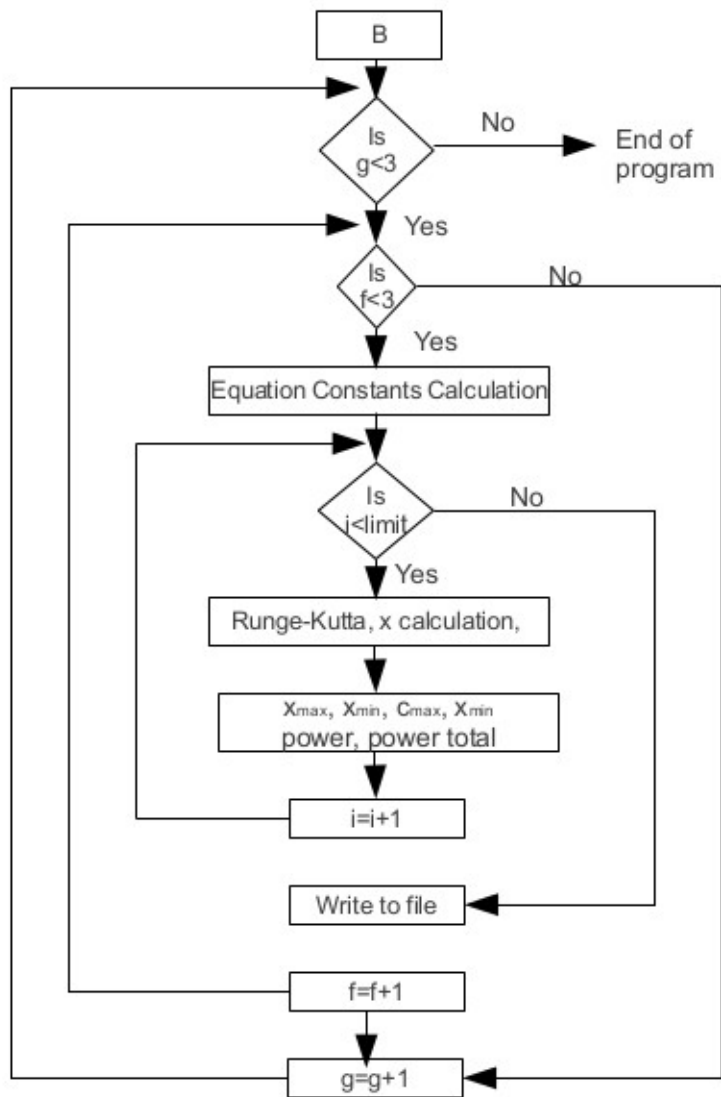
βέλτιστων συνδυασμών για το κάθε κύμα, πρέπει να υπολογισθεί η ισχύς που αποδίδει ο καθένας στο δοθέν κυματικό πεδίο. Εδώ έπρεπε να δοθεί προσοχή στο ότι ένας συνδυασμός με μικρό βραχίονα δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί σχεδόν καθόλου τα μεγάλα κύματα. Στην πραγματικότητα ίσως να πρέπει ένας τέτοιος μηχανισμός να ακινητοποιηθεί για να μην σπάσει. Μπορεί όμως να θεωρηθεί ότι αντί να σταματήσει μπορεί να παράγει το μέγιστό δυνατό, που είναι η ισχύς που παράγει στο κύμα για το οποίο έχει σχεδιασθεί. Δηλαδή αν ο βέλτιστος συνδυασμός για το μικρό κύμα παράγει 4 kW στο μικρό κύμα, τόσο θα παράγει και στο μεσαίο και στο μεγάλο.

Οι μεταβλητές για τον παραπάνω αλγόριθμο και η μεταβολή τους φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Σε αυτόν δεν υπάρχει η αρχική τιμή τόσο για το μήκος του βραχίονα όσο και η τελική τιμή αυτού καθώς δεν την γνωρίζουμε εξ αρχής μιας και εξαρτάται από τον υπό εξέταση πλωτήρα όπως επεξηγήθηκε και πιο πάνω.

	Μήκος βραχίονα R	Απόσταση b	Απόσταση α
Αρχική τιμή	-	0.1	0.1
Βήμα	0.1 X 10	0.5 X 15	0.1
Τελική τιμή	-	7.6	R

Πίνακας 2 Μεταβολής των μεταβλητών κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου για την εύρεση του βέλτιστου πλωτήρα





Εικόνα 21 Διάγραμμα ροής για τον κώδικα επιλογής βέλτιστου τοποθέτησης του εμβόλου επάνω στον βραχίονα.

6. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν ξεχωριστά για την επιλογή του πλωτήρα και για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού α , β και R . Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον κώδικα για την επιλογή του πλωτήρα.

6.1 Αποτελέσματα με εφαρμογή της δύναμης του εμβόλου επάνω στον πλωτήρα στο κατακόρυφο επίπεδο

Τα κυματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψουν τα παρακάτω αποτελέσματα προέρχονται από το πεδίο το οποίο βρίσκεται στις συντεταγμένες 37.51°N, 25.46°E στο πέλαγος του Αιγαίου. Δεν χρησιμοποιήθηκαν και τα 361 διαφορετικά κύματα καθώς αυτό θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρο στην εκτέλεση του κώδικα, αλλά μόνο τα κύματα που έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης από τα “συγγενικά” τους. Έτσι “φιλτράροντας” τα δεδομένα έμειναν τα 3 επικρατέστερα κύματα των οποίων τα δεδομένα φαίνονται παρακάτω.

<u>Εύρος (m)</u>	<u>Περίοδος (sec)</u>	<u>Συχνότητα εμφάνισης (ανά 1000 κύματα)</u>
0.375	2.2	64
1.625	5.8	29
3.75	8.5	2

ενώ υποτίθεται ότι η δύναμη που ασκεί το έμβολο στον πλωτήρα είναι 502.4 Newton καθώς υποτίθεται πως η παροχή έχει πίεση 2 bar και το έμβολο έχει ακτίνα 2.5cm. Τα αποτελέσματα του κώδικα φαίνονται στους δύο παρακάτω πίνακες.

<u>Εύρος Κύματος (m)</u>	<u>Περίοδος Κύματος (sec)</u>	<u>Βύθισμα Πλωτήρα (m)</u>	<u>Ακτίνα Πλωτήρα (m)</u>	<u>Ενέργεια (J)</u>
0.375	2.25	0.11	1.1	161.56
1.625	5.8	1.01	0.4	1115.39
3.75	8.5	1.01	0.3	2484.12

Στο παραπάνω αρχείο φαίνεται ο πλωτήρας που έχει επιλέξει για κάθε ένα κύμα ο κώδικας. Συγκεκριμένα, φαίνεται σε κάθε σειρά από τα αριστερά προς τα δεξιά το εύρος του κύματος, η περίοδος του, το βύθισμα του πλωτήρα, η ακτίνα του και τέλος η ενέργεια που απορροφά σε μια περίοδο του κύματος. Αυτός ο πίνακας προκύπτει από το πρώτο στάδιο του προγράμματος. Σε δεύτερο στάδιο το πρόγραμμα μας δίνει τον επόμενο πίνακα

Εύρος Κύματος (m)	Περίοδος Κύματος (sec)	Βύθισμα Πλωτήρα (m)	Ακτίνα Πλωτήρα (m)	Ενέργεια (J)
0.3750000	2.2500000	0.1100000	1.1000001	10339.61
1.6250000	5.8000002	0.1100000	1.1000001	38669.79
3.7500000	8.5000000	0.1100000	1.1000001	<u>43180.46</u>
0.3750000	2.2500000	1.0100001	0.4000001	0.0000000
1.6250000	5.8000002	1.0100001	0.4000001	32346.41
3.7500000	8.5000000	1.0100001	0.4000001	<u>37230.18</u>
0.3750000	2.2500000	1.0100001	0.3000001	0.0000000
1.6250000	5.8000002	1.0100001	0.3000001	32334.55
3.7500000	8.5000000	1.0100001	0.3000001	<u>37302.79</u>

Με πιο έντονη γραμματοσειρά είναι η συνολική ενέργεια που απορροφά ο κάθε πλωτήρας για τα συγκεκριμένα κυματικά δεδομένα. Φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω ότι αποδοτικότερος είναι ο πλωτήρας με βύθισμα 0.11 και ακτίνα 1.1 m. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μεγαλύτεροι πλωτήρες αδυνατούν να εκμεταλλευθούν όλο το φάσμα κυμάτων και έτσι για μεγάλο χρονικό διάστημα παραμένουν ακίνητοι.

6.2 Η επίδραση της δύναμης στο μέγεθος του πλωτήρα

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στα οποία φαίνεται το πώς επιδρά στο μέγεθος του πλωτήρα η μεταβολή της δύναμης εμβόλου. Ελέγχθηκε η μεταβολή του πλωτήρα που επιλέγει ο αλγόριθμος για 3 διαφορετικές δυνάμεις, 500N, 2000N και 4000N. Αρχικά θα δούμε τα αποτελέσματα για τα 500N.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.6	79.2
1.625	5.8	2.5	0.2	268.5
3.75	8.5	2.25	0.2	326.6

Το τρέξιμο του αλγορίθμου για να βρει τον καλύτερο από αυτούς αποδίδει τον παρακάτω πίνακα.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.6	5068.7
1.625	5.8	0.06	2.6	9868.5
3.75	8.5	0.06	2.6	10393.9
0.375	2.25	2.5	0.2	0
1.625	5.8	2.5	0.2	7786.3
3.75	8.5	2.5	0.2	8432.1
0.375	2.25	2.25	0.2	0
1.625	5.8	2.25	0.2	7307.4
3.75	8.5	2.25	0.2	7960.6

Από τον τελευταίο πίνακα είναι εμφανές ότι ο βέλτιστος πλωτήρας έχει βύθισμα 0.06m και ακτίνα 2.6 m είναι δηλαδή αυτός που εκμεταλλεύεται πλήρως το “μικρό” κύμα. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του κώδικα για δύναμη 2000N.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.6	708.58
1.625	5.8	2.51	0.4	6239.17
3.75	8.5	2.41	0.45	11107.99

Και όπως και πριν ο αλγόριθμος υπολογίζει και την ενέργεια που απορροφά σε ένα έτος κάθε ένα από τους παραπάνω πλωτήρες για όλο το κυματικό πεδίο με τα αποτελέσματα να φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.6	45349.32
1.625	5.8	0.06	2.6	157252.39
3.75	8.5	0.06	2.6	175151.52
0.375	2.25	2.51	0.4	0
1.625	5.8	2.51	0.4	180935.92
3.75	8.5	2.51	0.4	202892.1
0.375	2.25	2.41	0.45	0
1.625	5.8	2.41	0.45	171757.98
3.75	8.5	2.41	0.45	193973.97

όπως φαίνεται στον τελευταίο πίνακα καλύτερος πλωτήρας είναι αυτός που έχει σχεδιασθεί για το μεσαίο κύμα. Οι επόμενοι δύο πίνακες έχουν τα αποτελέσματα για δύναμη που έχει μέτρο 4000N.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.5	1398.55
1.625	5.8	2.51	0.55	12396.48
3.75	8.5	2.36	0.6	22244.17

Και τέλος όπως και για τις προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε την επιλογή του καλύτερου πλωτήρα συνολικά για το κυματικό πεδίο.

Πλάτος κύματος	Περίοδος κύματος	Βύθισμα πλωτήρα	Ακτίνα πλωτήρα	Ενέργεια (J)
0.375	2.25	0.06	2.5	89506.98
1.625	5.8	0.06	2.5	314735.88
3.75	8.5	0.06	2.5	350631.75
0.375	2.25	2.51	0.55	0
1.625	5.8	2.51	0.55	359497.81
3.75	8.5	2.51	0.55	403834.19
0.375	2.25	2.36	0.6	0
1.625	5.8	2.36	0.6	346459
3.75	8.5	2.36	0.6	390947.34

Σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανές ότι καλύτερος πλωτήρας για το συνολικό κυματικό πεδίο είναι και πάλι αυτός που εκμεταλλεύεται καλύτερα το μεσαίο κύμα.

Αυτό που είναι εμφανές σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είναι πως όσο αυξάνει η δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο πάνω στον πλωτήρα τόσο αυξάνουν και οι διαστάσεις του πλωτήρα που επιλέγει ο αλγόριθμος για κάθε ένα κύμα ξεχωριστά. Αυτό συμβαίνει καθώς με την αύξηση της δύναμης θα πρέπει να αυξηθούν και οι διαστάσεις του πλωτήρα για να αυξηθεί και η άνωση που εφαρμόζεται στον πλωτήρα και έτσι να μην βυθιστεί. Επίσης από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι ο κώδικας επιλέγει τον πλωτήρα που εκμεταλλεύεται καλύτερα το μεσαίο κύμα το οποίο έχει αρκετά μεγάλη συχνότητα εμφάνισης αλλά και αρκετά μεγάλη ενέργεια ανά κύμα. Τέλος φαίνεται πως για τα μικρά κύματα το βύθισμα πρέπει να είναι μικρό και η ακτίνα μεγάλη ενώ για τα κύματα με μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης ισχύει το αντίθετο.

6.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης βραχίονα και τοποθέτησης εμβόλου.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από το “τρέξιμο” του κώδικα για την εύρεση των καλύτερων λοιπών διαστάσεων του μηχανισμού και συγκεκριμένα αυτών του βραχίονα και τα σημεία πάνω στον βραχίονα στα οποία θα στερεωθεί το έμβολο.

Το πλέγμα που δημιούργησε ο κώδικας αποτελούταν από το R το οποίο αυξανόταν κατά 10 cm σε κάθε επανάληψη, το a το οποίο αυξανόταν και αυτό 10 cm κάθε φορά και τέλος από το b το οποίο σε αντίθεση με τα προηγούμενα 2 αυξανόταν κατά 50 cm. Τα κύματα που εισήγαγα στον κώδικα ήταν τα ίδια με πριν, δηλαδή

<u>Εύρος</u>	<u>Περίοδος</u>	<u>Συχνότητα εμφάνισης κύματος ανά 1000</u>
0.375	2.2	64
1.625	5.8	29
3.75	8.5	2

και τα αποτελέσματα που προέκυψαν εγγράφηκαν σε 2 διαφορετικά αρχεία.

Το πρώτο αρχείο όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω περιείχε τους βέλτιστους συνδυασμούς για κάθε ένα κύμα χωριστά

<u>Εύρος Κύματος (m)</u>	<u>Περίοδος Κύματος (sec)</u>	<u>Βύθισμα Πλωτήρα (m)</u>	<u>Ακτίνα Πλωτήρα (m)</u>	<u>Ενέργεια (J)</u>	<u>a (m)</u>	<u>b (m)</u>	<u>R (m)</u>
0.375	2.25	0.11	1.1	171.23	1.3	7.5	1.225
1.625	5.8	0.11	1.1	817.28	5	7.5	5
3.75	8.5	0.11	1.1	1249.59	11.4	7.5	11.4

ενώ το δεύτερο αρχείο έχει σαν δεδομένα τα παρακάτω

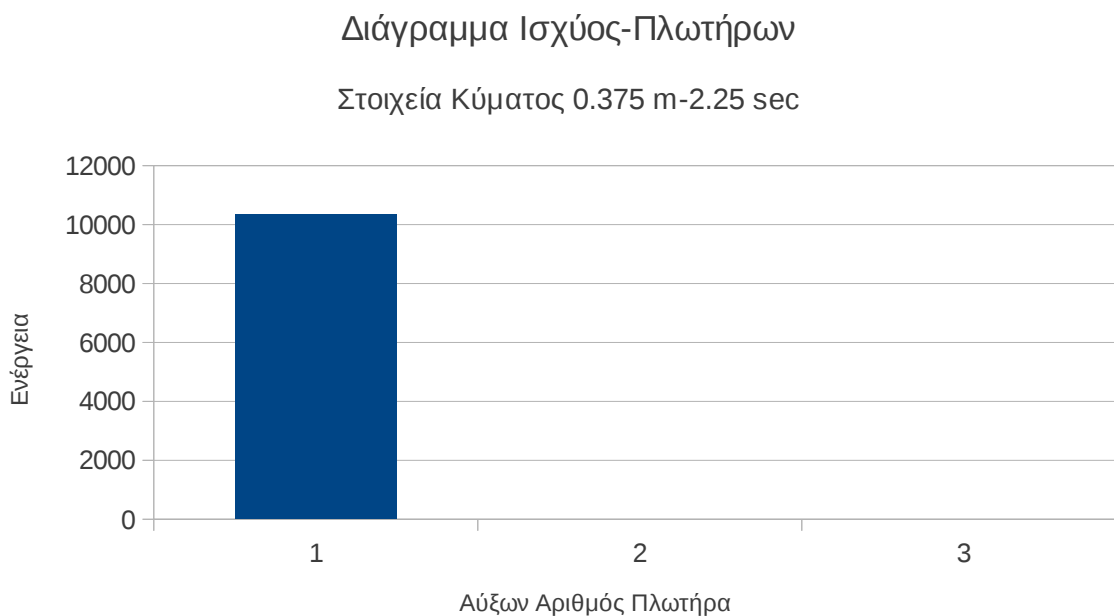
<u>Εύρος Κύματος (m)</u>	<u>Περίοδος Κύματος (sec)</u>	<u>a (m)</u>	<u>b (m)</u>	<u>R (m)</u>	<u>Ενέργεια (J)</u>
0.37500000	2.2500000	1.3	7.5	1.3	10896.95
1.6250000	5.8000002	1.3	7.5	1.3	15757.07
3.7500000	8.5000000	1.3	7.5	1.3	<u>16092.25</u>
0.37500000	2.2500000	5	7.5	5	8770.9
1.6250000	5.8000002	5	7.5	5	33147.05
3.7500000	8.5000000	5	7.5	5	<u>37042.94</u>
0.37500000	2.2500000	11.4	7.5	11.4	6816.33
1.6250000	5.8000002	11.4	7.5	11.4	23039.73
3.7500000	8.5000000	11.4	7.5	11.4	<u>25583.46</u>

στο δεύτερο βλέπουμε ξεκάθαρα ότι καλύτερος συνδυασμός είναι αυτός που εκμεταλλεύεται καλύτερα το δεύτερο κύμα, δηλαδή οι διαστάσεις $a=5$ m, $b=7.5$ m, $R=5$ m.

Έτσι λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι ο μηχανισμός μας για να απορροφά το μέγιστο δυνατό θα πρέπει να έχει ακτίνα 1.1 μέτρων, βύθισμα 11 εκατοστών, βραχίονα μήκους 5 μέτρων, το έμβολο να “δένει” σε απόσταση 5 μέτρων στον οριζόντιο και 7.5 μέτρων στον κάθετο άξονα

7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

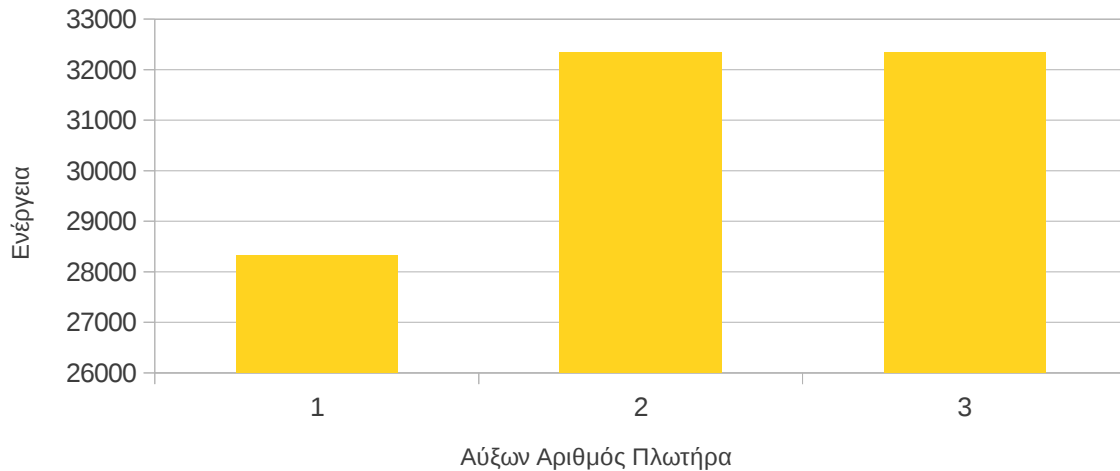
Στη συνέχεια θα γίνει μια ερμηνεία, μέσω γραφικών, των παραπάνω αποτελεσμάτων. Στα πρώτα 3 διαγράμματα απεικονίζεται το πόσο ενέργεια απορροφά ο κάθε πλωτήρας για κάθε συγκεκριμένο κύμα.



Όπως βλέπουμε σε αυτό το διάγραμμα η απορρόφηση ενέργειας στους μεγαλύτερους πλωτήρες για το μικρό κύμα είναι μηδενική καθώς λόγω της μεγάλης τους μάζας αδυνατούν να κινηθούν σε τόσο μικρό εύρος κυματισμού.

Διάγραμμα Ισχύος-Πλωτήρων

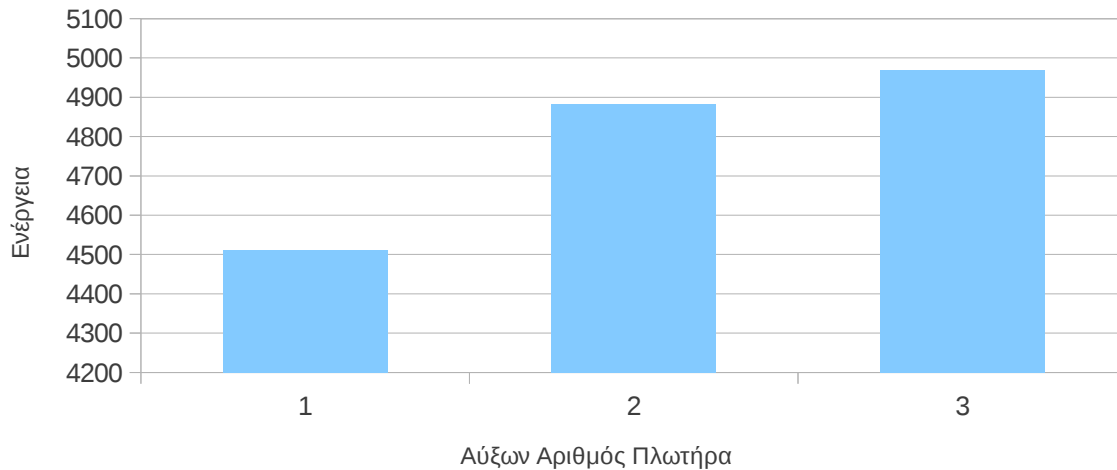
Στοιχεία Κύματος 1.625 m-5.8 sec



Στο διάγραμμα του μεσαίου κύματος φαίνεται η αδυναμία του μικρού πλωτήρα να εκμεταλλευθεί το ίδιο με τους μεγαλύτερους την ενέργεια του κύματος. Ο λόγος είναι ότι ο μικρός πλωτήρας ακολουθεί το κύμα επακριβώς σε αντίθεση με τους μεγαλύτερους οι οποίοι στο άνω σημείο της ταλάντωσης βγαίνουν λίγο έξω από το νερό ενώ κατά την κάθοδό τους βυθίζονται περισσότερο από ότι στο σημείο ηρεμίας και έτσι “κερδίζουν” ένα μεγαλύτερο εύρος ταλάντωσης. Το πιο πάνω φαινόμενο συμβαίνει γιατί οι μεγάλοι πλωτήρες έχουν μεγαλύτερη αδράνεια από τον μικρότερο.

Διάγραμμα Ισχύος-Πλωτήρων

Στοιχεία Κύματος 3.75 m-8.5 sec

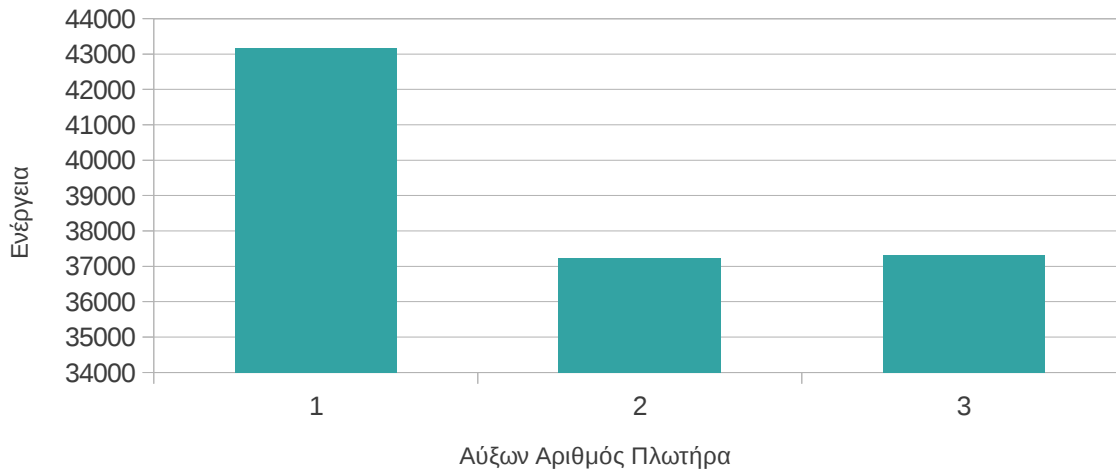


Όπως φάνηκε και στο προηγούμενο διάγραμμα ο μικρός πλωτήρας αδυνατεί να εκμεταλλευθεί πλήρως την ενέργεια του μεγάλου κύματος σε αντίθεση με τους μεγαλύτερους πλωτήρες. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η ίδια με την προηγούμενη.

Και στα τρία παραπάνω διαγράμματα αυτό που φαίνεται ξεκάθαρα είναι ότι ο κάθε πλωτήρας είναι πράγματι βελτιστοποιημένος ώστε να παράγει το μέγιστο για το κύμα του. Αυτό συμβαίνει σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό σε όλα τα διαγράμματα.

Διάγραμμα Ισχύος-Πλωτήρων

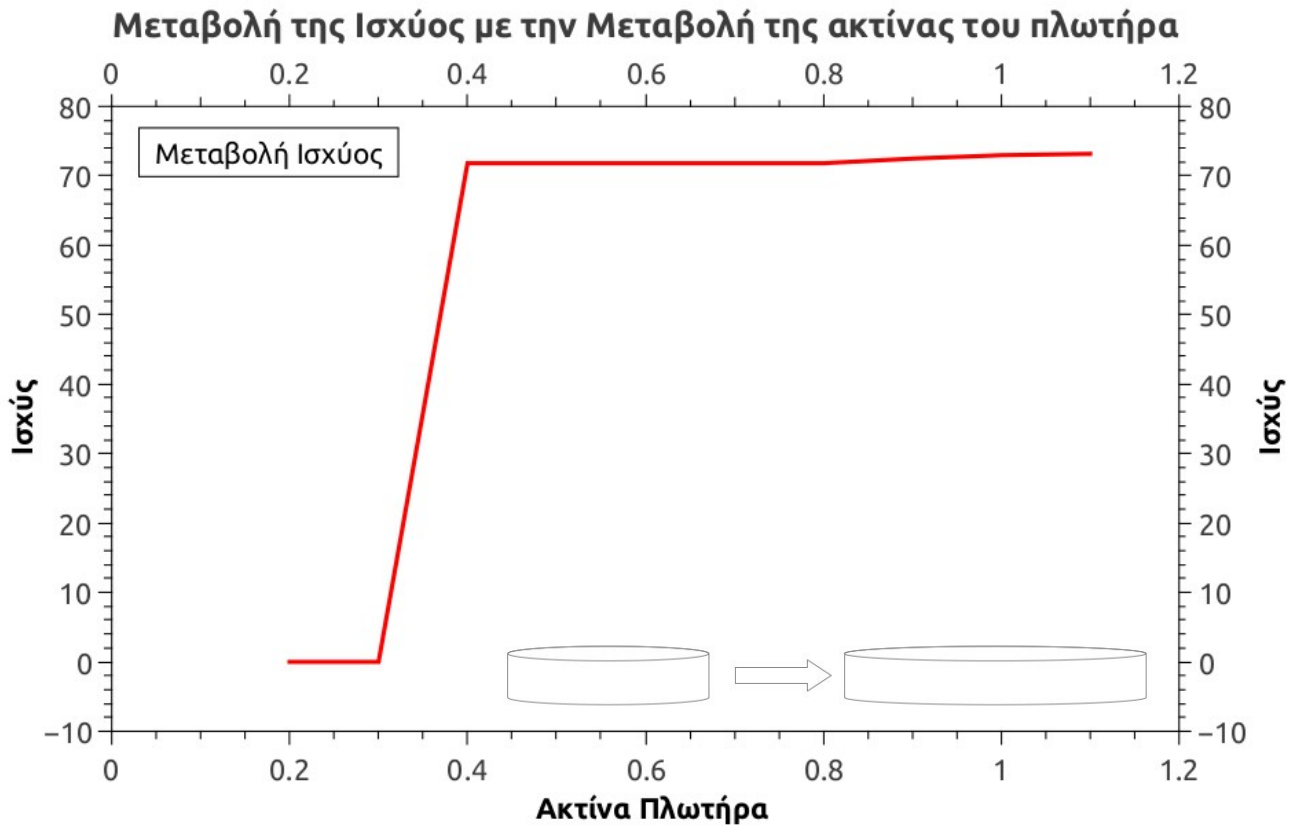
Συνολικό Κυματικό Πεδίο



Σε αυτό το τελευταίο διάγραμμα είναι εμφανές ότι η αδυναμία των μεγάλων πλωτήρων να εκμεταλλευθούν τα μικρά αλλά πολύ πιο συχνά κύματα οδηγεί συνολικά σε μικρότερο παραγόμενο έργο στο υπό μελέτη χρονικό διάστημα παρότι εκμεταλλεύονται τα μεγάλα και κατά πολύ πιο δυναμικά κύματα.

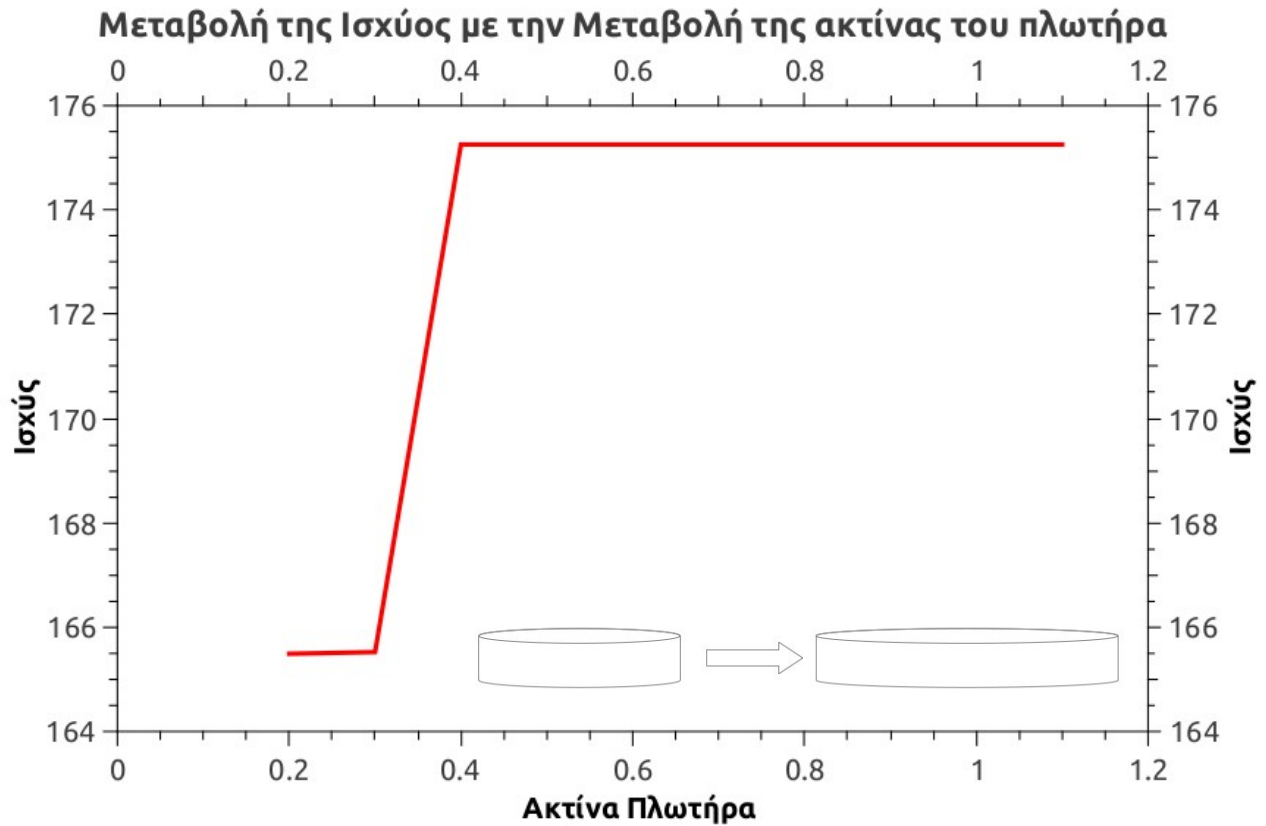
Στα επόμενα διαγράμματα αυτό που θα δούμε είναι η μεταβολή της ισχύος για τρία κύματα όταν κρατάμε σταθερή την ακτίνα και μεταβάλλουμε το βύθισμα όπως και στην περίπτωση που κρατάμε σταθερό το βύθισμα και μεταβάλλουμε την ακτίνα. Ξεκινάμε με την δεύτερη περίπτωση, όπου δηλαδή έχουμε σταθερό το βύθισμα και μεταβάλλουμε την ακτίνα. Το βύθισμα παραμένει σταθερό στα 0.1 m.

Κύμα με χαρακτηριστικά $R=0.375m$, $T=2.25sec$



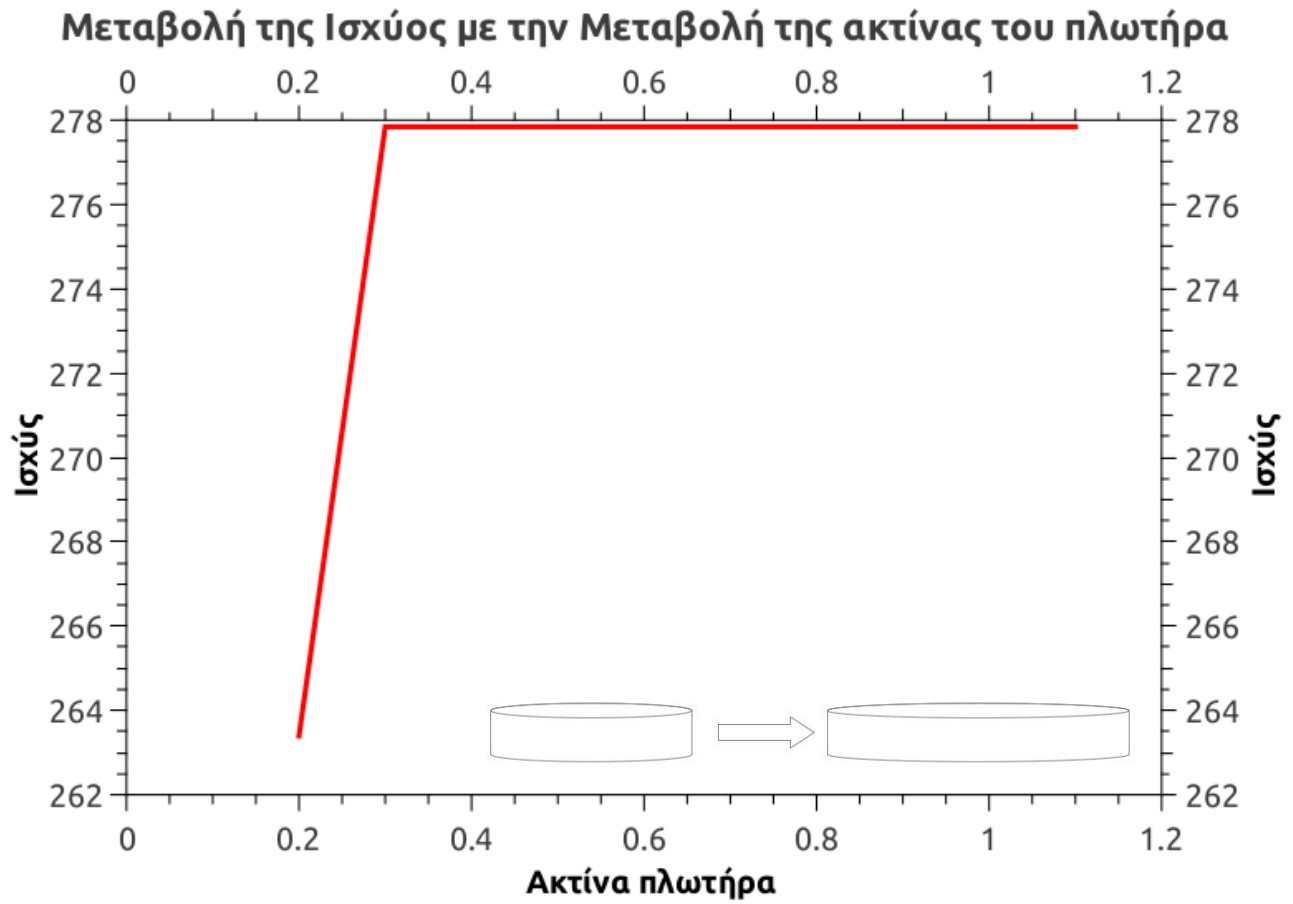
στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η ισχύς για μικρή ακτίνα είναι μηδενική και αυτό γίνεται καθώς η άνωση δεν είναι αρκετή, σε σχέση με την δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο, για να ανυψώσει τον πλωτήρα. Επίσης φαίνεται ότι μέχρι ένα σημείο όσο αυξάνουμε την διάμετρο του πλωτήρα τόσο αυξάνει και η παραγόμενη ισχύς καθώς έτσι ο πλωτήρας μπορεί να “ακολουθήσει” καλύτερα το κύμα. Προφανώς μετά από κάποιο σημείο η παραγόμενη ισχύς φθάνει σε ένα μέγιστο καθώς ο πλωτήρας δεν μπορεί να παράξει ενέργεια περισσότερη από αυτή που μπορεί να δώσει το κύμα.

Κύμα με χαρακτηριστικά $R=1.625m$, $T=5.8sec$



και σε αυτό το σχήμα φαίνεται ότι όσο μεγαλώνει η ακτίνα και μεγαλώνει η άνωση τόσο πιο μεγάλη ισχύ απορροφούμε. Αυτό συμβαίνει πάντα μέχρι ένα σημείο και αυτό είναι μέχρι τότε που ο πλωτήρας φθάνει να ακολουθεί επακριβώς το κύμα.

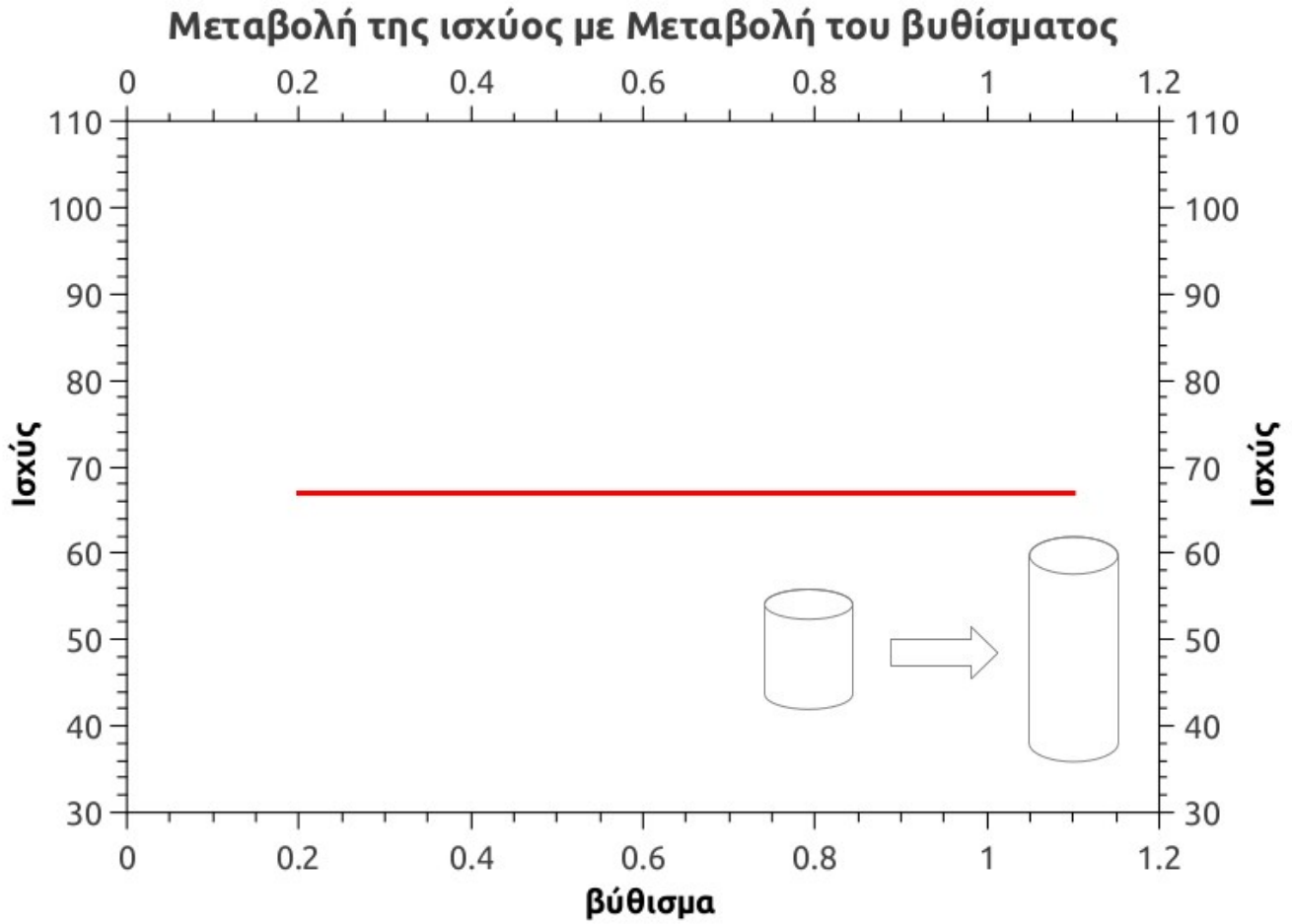
Κύμα με χαρακτηριστικά $R=3.75m$, $T=8.5sec$



Το ίδιο συμβαίνει και στο διάγραμμα του μεγάλου κύματος.

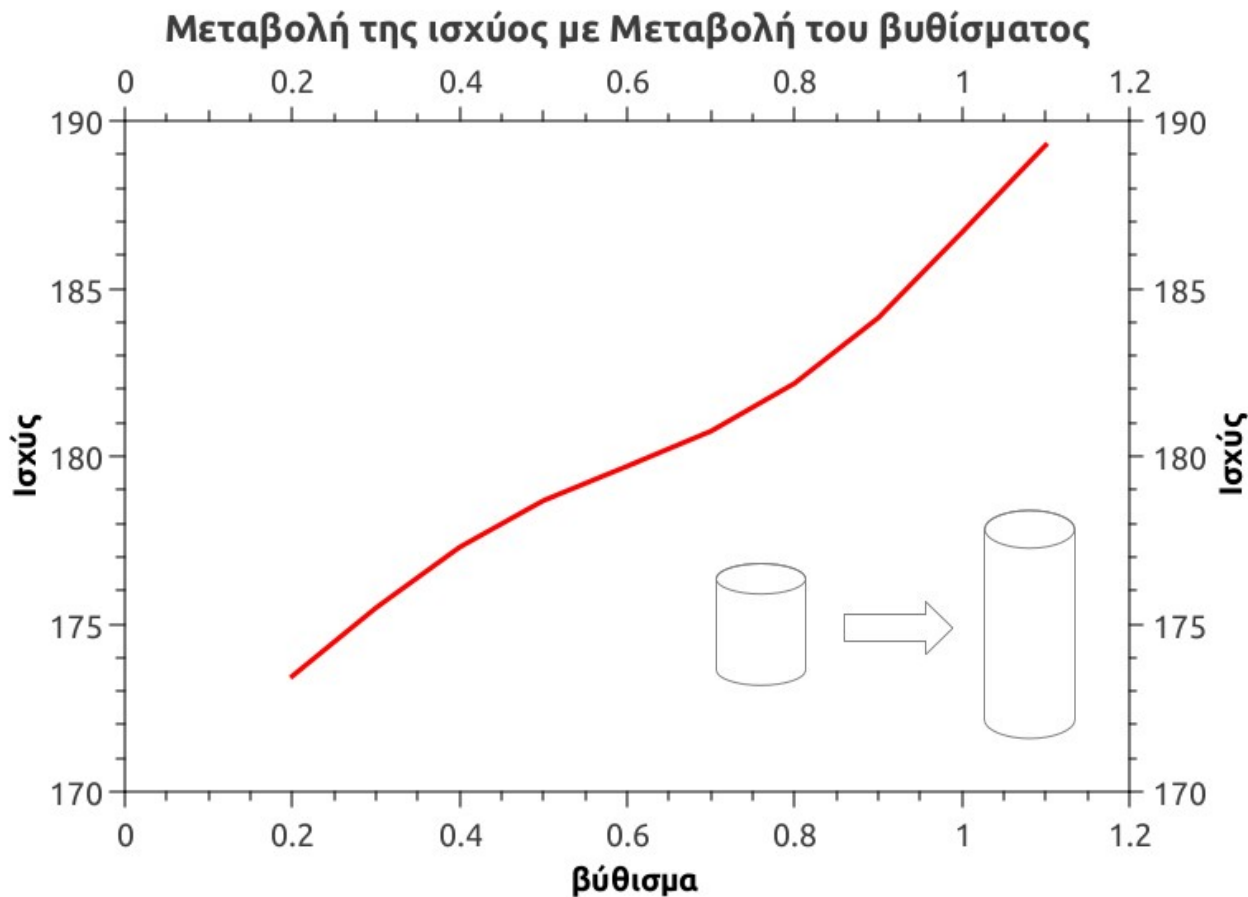
Στα επόμενα 3 διαγράμματα παραμένει σταθερή η ακτίνα του πλωτήρα και αυτό που μεταβάλλεται είναι το βύθισμα του. Συγκεκριμένα η ακτίνα θα παραμείνει σταθερή στο 0.5 m.

Κύμα με χαρακτηριστικά $R=0.375m$, $T=2.25sec$



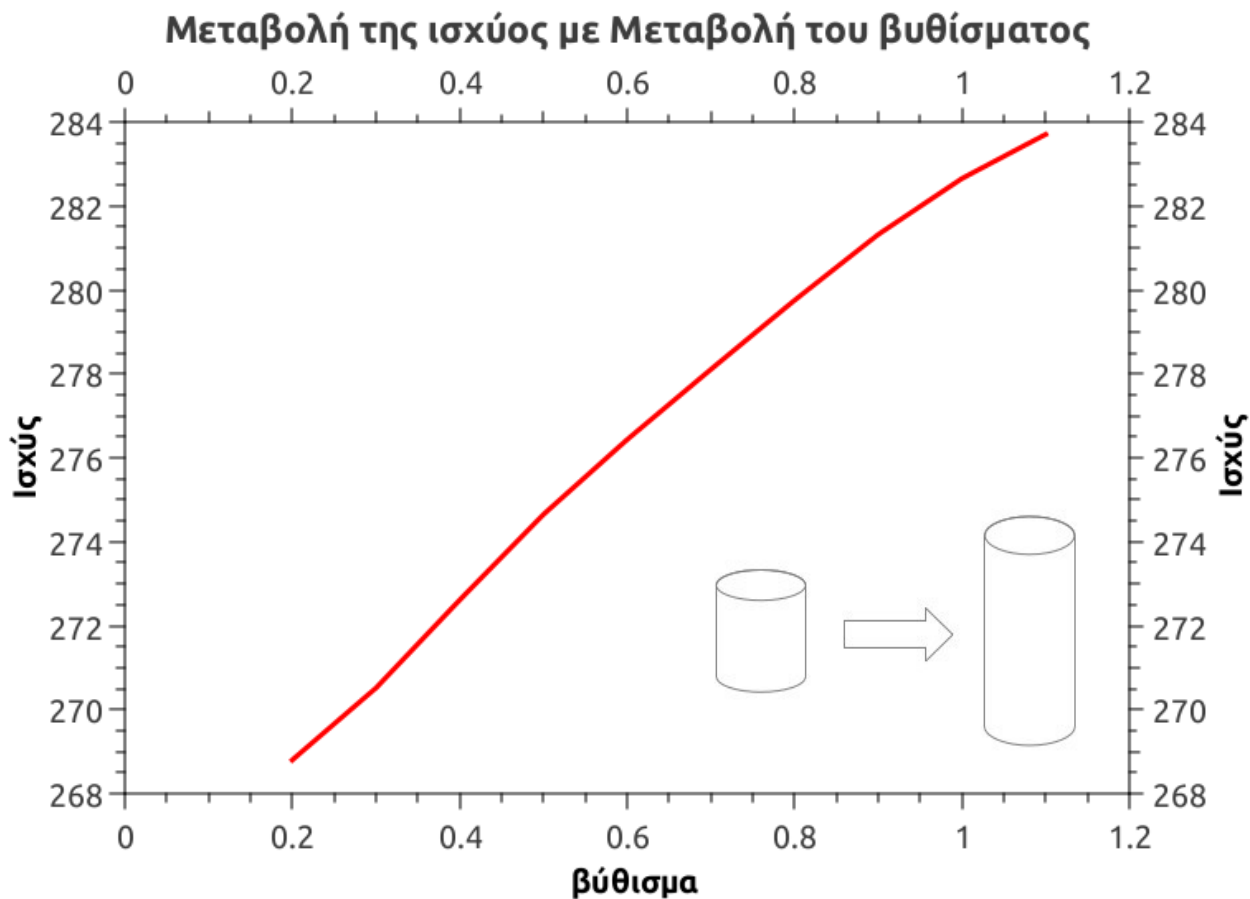
Για μικρό εύρος κυματισμού η μεταβολή του βυθίσματος δεν μεταβάλλει την ισχύ και φαίνεται να εκμεταλλεύεται το κύμα το μέγιστο δυνατό.

Κύμα με χαρακτηριστικά $R=1.625m$, $T=5.8sec$



για το μεσαίο κύμα βλέπουμε πως η μεταβολή του βυθίσματος του πλωτήρα παίζει σημαντικό ρόλο και μάλιστα οδηγεί σε σχεδόν γραμμική αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Επίσης σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα που αυξάναμε την ακτίνα με σταθερό το βύθισμα βλέπουμε ότι τώρα η ισχύς αυξάνει περισσότερο. Αυτό συμβαίνει όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο σημείο γιατί με την αύξηση του βυθίσματος αυξάνει και η μάζα άρα και η αδράνεια του πλωτήρα άρα στο άνω σημείο της ταλάντωσης του βγαίνει έξω από το νερό περισσότερο από ότι στην θέση ηρεμίας του και αντίστοιχα στο κάτω σημείο βυθίζεται περισσότερο από ότι όταν βρίσκεται σε ηρεμία.

Κύμα με χαρακτηριστικά $R=3.75m$, $T=8.5sec$



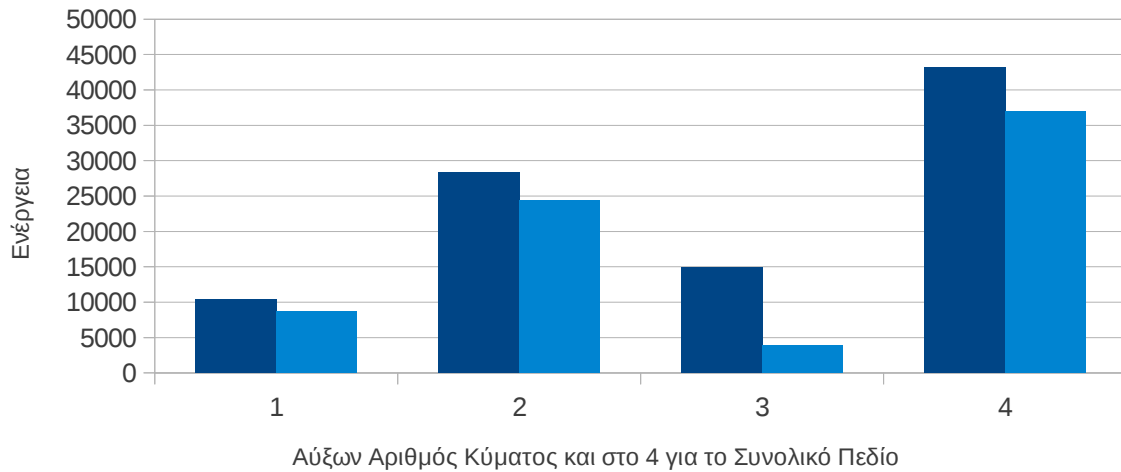
και στο “μεγάλο” κύμα βλέπουμε να συμβαίνει το ίδιο με προηγουμένως και συγκεκριμένα την γραμμική σχέση εξάρτησης της αύξησης ισχύος με την αύξηση του βυθίσματος.

Γενικά, το συμπέρασμα που θα μπορούσαμε να εξάγουμε από τα παραπάνω είναι ότι για μικρό εύρος κύματος η αύξηση της ακτίνας παίζει σημαντικότερο ρόλο από την αύξηση του βυθίσματος και αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση του βυθίσματος συνεπάγεται και αύξηση της μικτής μάζας άρα και της αδράνειας του πλωτήρα με αποτέλεσμα στα μικρά κύματα η δύναμη που εφαρμόζει το κύμα να μην είναι δυνατόν να την υπερνικήσει για να κινήσει τον μηχανισμό.

Στη συνέχεια θα παρατεθούν μερικά διαγράμματα για τα αποτελέσματα της τοποθέτησης του εμβόλου.

Διάγραμμα Ενέργειας

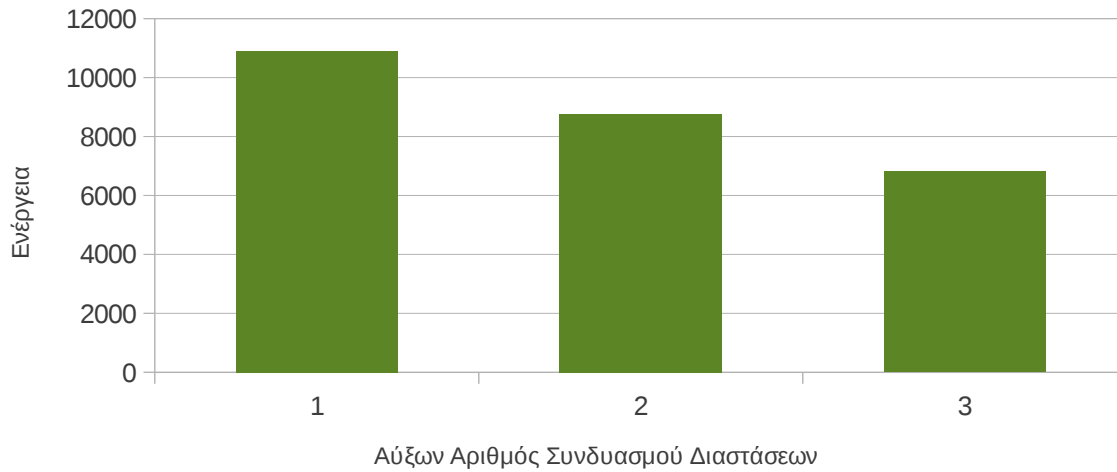
Διαφορά Ενέργειας για Κατακόρυφη και Πλάγια τοποθέτηση Εμβόλου



Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται αυτό που αναφέρθηκε και παραπάνω ότι δηλαδή το μέγιστο που απορροφά το σύστημα με τον καλύτερο πλωτήρα αν έχουμε το έμβολο σε κατακόρυφη θέση (σκούρο μπλε) είναι πάντα μεγαλύτερο από αυτό που απορροφά αν το έμβολο τοποθετηθεί σε πλάγια θέση (γαλάζιο). Αυτό συμβαίνει και στα τρία κύματα και προφανώς και συνολικά στο πεδίο.

Διάγραμμα Ενέργειας

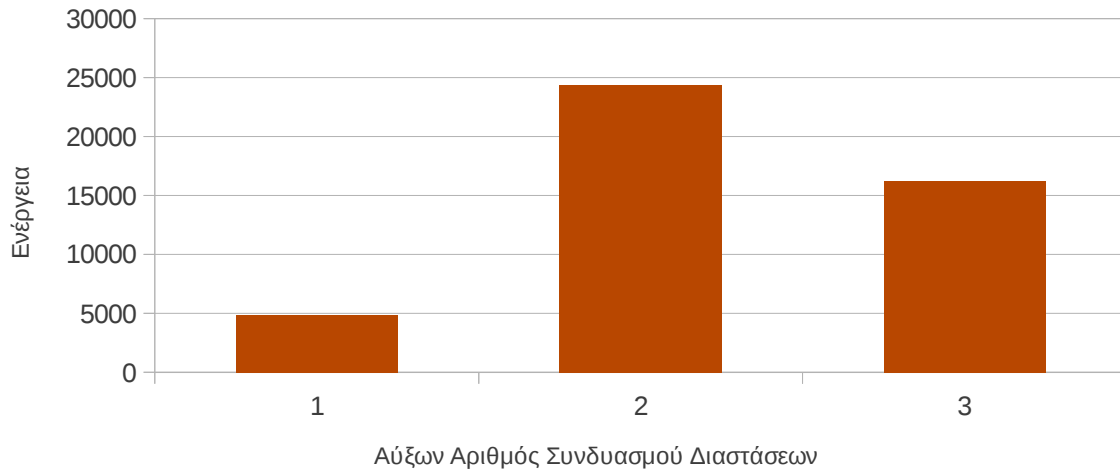
Στοιχεία κύματος 0.375m-2.25sec



σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται πως ο κάθε συνδυασμός θα αποδίδει καλύτερα εκεί που είναι σχεδιασμένος. Δεν μπορεί δηλαδή ο συνδυασμός για το μεγάλο ή το μεσαίο κύμα να αποδώσει στο μικρό το ίδιο με αυτόν που είναι ειδικά σχεδιασμένος για το μικρό κύμα. Παρόμοια διαγράμματα ακολουθούν και για τα άλλα δυο κύματα.

Διάγραμμα Ενέργειας

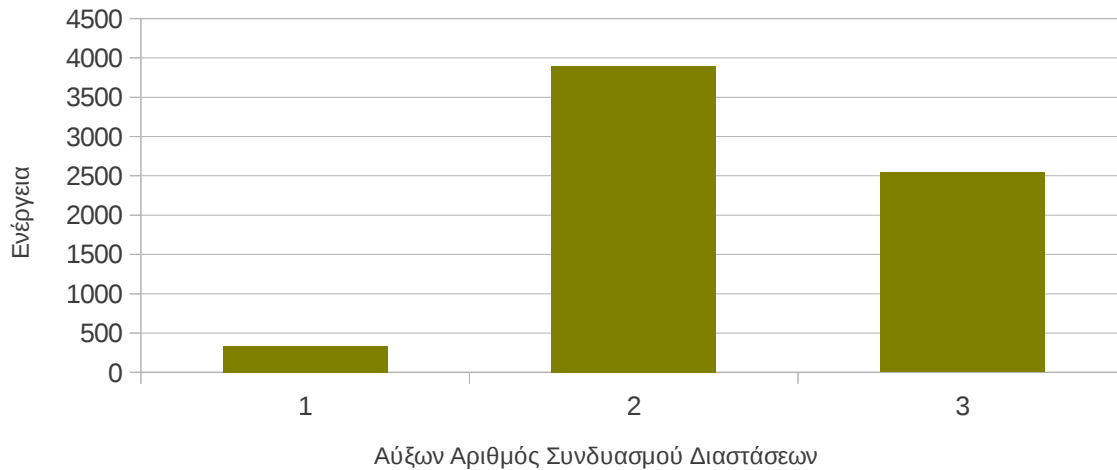
Στοιχεία κύματος 1.625-5.8sec



Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο διάγραμμα είναι εμφανής η αποδοτικότερη λειτουργία του δεύτερου συνδυασμού για το μεσαίο κύμα.

Διάγραμμα Ενέργειας

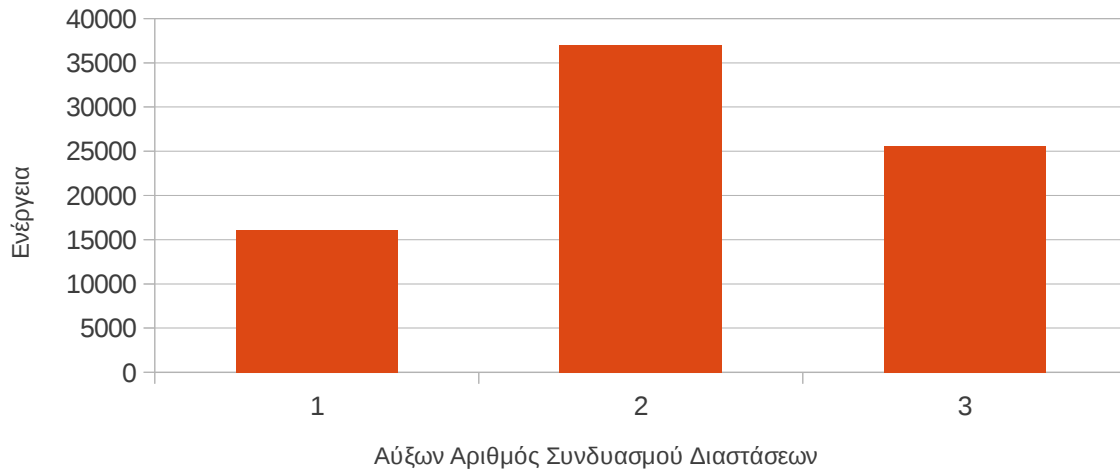
Στοιχεία κύματος 3.75-8.5sec



Στο τελευταίο διάγραμμα είναι εμφανές ότι ο τρίτος συνδυασμός δεν αποδίδει το μεγαλύτερο από τους τρεις. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, κατασκευαστικούς περιορισμούς για την κάθετη απόσταση b . Αν μπορούσαμε να την κάνουμε μεγαλύτερη θα βλέπαμε ότι ο τρίτος συνδυασμός θα απέδιδε όπως θα έπρεπε το μέγιστο. Τέλος έχουμε την σύγκριση των συνδυασμών όσων αφορά την συνολική ισχύ που απορροφούν.

Διάγραμμα Ενέργειας

Συνολικά για το κυματικό πεδίο



Αυτό το διάγραμμα δείχνει ότι ο δεύτερος συνδυασμός είναι ο καλύτερος, όπως φάνηκε και από τους πίνακες παραπάνω. Αυτό συμβαίνει καθώς ο μικρός σε διαστάσεις μηχανισμός-συνδυασμός δεν δύναται να εκμεταλλευθεί σχεδόν καθόλου τα μεγαλύτερα κύματα μιας και το ύψος των κυμάτων είναι μεγαλύτερο από το μήκος του βραχίονα του. Ο τρίτος συνδυασμός λόγω κατασκευαστικών περιορισμών που τέθηκαν κατά την εκτέλεση του κώδικα, όπως φάνηκε και από προηγούμενο διάγραμμα δεν είναι σε θέση να εκμεταλλευθεί βέλτιστα ούτε το “δικό” του κύμα και έτσι να αποκτήσει “πλεονέκτημα” έναντι των άλλων δύο.

8.Συμπεράσματα - Προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη και μοντελοποίηση ενός μηχανισμού που βασίστηκε σε σχέδια του ΚΑΠΕ και ο οποίος σχεδιάστηκε για να μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε μορφή εύκολα εκμεταλλεύσιμη. Για να γίνει η μοντελοποίηση χρειάστηκε να μελετηθούν οι δυνάμεις που εφαρμόζονται πάνω στον πλωτήρα αλλά και στα λοιπά τμήματα που μηχανισμού. Μετά την μοντελοποίηση ακολούθησε η ανάπτυξη κατάλληλου προγράμματος σε γλώσσα προγραμματισμού fortran77, σκοπός του οποίου ήταν η βελτιστοποίηση με την μέθοδο του πλέγματος τόσο των διαστάσεων του πλωτήρα, για ένα δοθέν κυματικό δυναμικό, όσο και της διάστασης του βραχίονα και της τοποθέτησης του εμβόλου. Τέλος, διαδοχικές εκτελέσεις του προγράμματος έδωσαν ένα σύνολο αποτελεσμάτων για τα οποία έγινε παρουσίαση και ερμηνεία.

Η εφαρμογή του μοντέλου κατέληξε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για κυματικό δυναμικό που αποτελείται κατά βάσει από μεγάλα κύματα ο βέλτιστος πλωτήρας έχει μεγάλο βύθισμα.
- Για κυματικό δυναμικό που αποτελείται από μικρούς κυματισμούς ο βέλτιστος πλωτήρας έχει μεγάλη ακτίνα και μικρό βύθισμα.
- Όταν αυξάνουμε την δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο στον πλωτήρα ο μηχανισμός εκμεταλλεύεται καλύτερα το κυματικό δυναμικό εάν σχεδιασθεί για τα μεσαία και μεγάλα κύματα.
- Η τοποθέτηση του εμβόλου σε κάθετη θέση είναι καλύτερη από την τοποθέτηση σε πλάγια θέση.

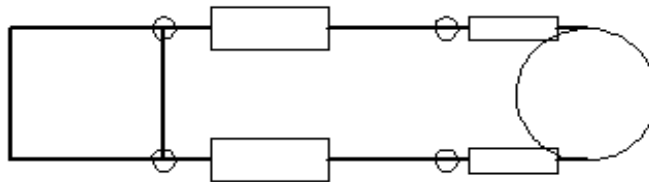
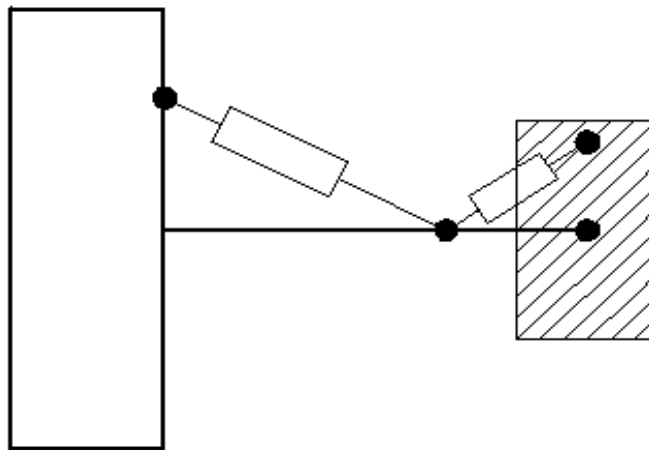
8.2 Προτάσεις-Μελλοντικές Προεκτάσεις

Το πεδίο έρευνας της παρούσας διπλωματικής θα μπορούσε να επεκταθεί και στα παρακάτω:

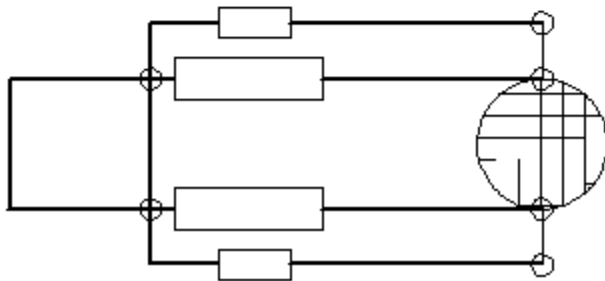
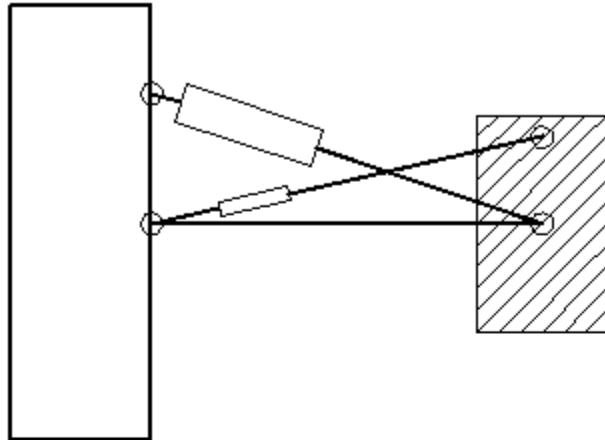
- Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το κύμα έχει δύο είδη ενέργειας, την δυναμική στην οποία οφείλεται η κάθετη ταλάντωση του πλωτήρα και την κινητική η οποία οδηγεί τον πλωτήρα σε μια ταλάντωση γύρω από το άξονα στον οποίο είναι συνδεδεμένος με τον βραχίονα. Θα μπορούσε λοιπόν να μελετηθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας αυτής της ταλάντωσης.
- Στη παρούσα διπλωματική η βελτιστοποίηση έγινε αρχικά για τον πλωτήρα και στη συνέχεια για τις διαστάσεις των άλλων μερών του μηχανισμού. Θα μπορούσε να γίνει λοιπόν βελτιστοποίηση έχοντας όλες της παραμέτρους συγχρόνως ελεύθερες.
- Με τον συνδυασμό και των δύο παραπάνω θα μπορούσε να γίνει μια μελέτη για το αν τελικά είναι καλύτερο να εκμεταλλευόμαστε πλήρως μόνο την κάθετη ταλάντωση ή μερικώς τόσο την κάθετη ταλάντωση όσο και την γωνιακή που αναφέρθηκε παραπάνω.
- Ο όλος μηχανισμός εκτός από τα μηχανικά μέρη που μελετήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική αποτελείται και από ένα υδραυλικό σύστημα για το οποίο θα μπορούσε να γίνει αρχικά η μοντελοποίηση του και στη συνέχεια να μελετηθεί η επιρροή του στη λειτουργία όλου του μηχανισμού αλλά και η δυνατότητα βελτιστοποίησής του.
- Εκτός της υλικοτεχνικής μελέτης που έγινε και των προεκτάσεων αυτής που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι απαραίτητο να γίνει και μια οικονομοτεχνική η οποία θα καταδείξει κατά πόσο μια επένδυση σε αυτή την τεχνολογία είναι οικονομική βιώσιμη.

Όσον αφορά την σχεδίαση του μηχανισμού υπάρχουν κάποιες πιθανές βελτιώσεις που αναφέρονται παρακάτω.

- Στη μοντελοποίηση που έγινε σε αυτή τη διπλωματική έγινε η υπόθεση πως το σχήμα του πλωτήρα είναι κυλινδρικό. Προφανώς όμως αυτό δεν είναι και το καλύτερο δυνατό σχήμα από άποψη υδροδυναμικής και έτσι θα μπορούσε να γίνει και διερεύνηση όσον αφορά και το βέλτιστο σχήμα του πλωτήρα.
- Η ολοκληρωμένη μορφή του μηχανισμού φαίνεται στο παρακάτω σχέδιο



όπως είναι εμφανές στο σχέδιο αυτό το έμβολο που απορροφά την ενέργεια από την κατακόρυφη κίνηση δεν βρίσκεται στην βέλτιστη γωνία του και προφανώς το αντίστοιχο ισχύει και για το έμβολο που απορροφά την περιστροφική κίνηση του πλωτήρα. Έτσι θα έχουμε κάποιες απώλειες οι οποίες είναι εύκολο να αποφευχθούν εφόσον αλλάξουμε το επίπεδο στο οποίο “δένουν” τα έμβολα όπως φαίνεται στο επόμενο σχέδιο.



Σε αυτό το σχέδιο φαίνεται πώς και τα δύο διαφορετικά είδη εμβόλων στηρίζονται σε διαφορετικά επίπεδα με αποτέλεσμα να μην υποχρεώνει το ένα το άλλο σε μικρότερη εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού.

- Η μάζα του πλωτήρα όπως και το μήκος του βραχίονα θα μπορούσαν να είναι μεταβλητά ώστε να μπορεί ο μηχανισμός να τροποποιείται για να εκμεταλλεύεται βέλτιστα μεγαλύτερο εύρος κυματισμών.
- Εκτός των παραπάνω μεταβλητή θα μπορούσε να είναι και η δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο στον πλωτήρα.

Βιβλιογραφία

- [1] Clément et al. (2002). "Wave energy in Europe: current status and perspectives". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (5): 405–431.
- [2] Morris-Thomas et al.; Irvin, Rohan J.; Thiagarajan, Krish P. (2007). "An Investigation Into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 129 (4): 273–278.
- [3] "Wave Energy Research and Development at JAMSTEC"
- [4] Farley, F. J. M. and Rainey, R. C. T. (2006). "Radical design options for wave-profiling wave energy converters"
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power
- [6] "Edinburgh Wave Energy Project" (PDF). University of Edinburgh
- [7] Παναγιωτόπουλος Μιχαήλ, (ΚΑΠΕ), "Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας, Προώθηση της εισαγωγής ενέργειας από θαλάσσιο κυματισμό στην Ευρωπαϊκή αγορά ΑΠΕ", Waveplam
- [8] G. Lemonis, et al., "Wave Power in Europe— Current Status and Perspectives", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, accepted for publ., 2002
- [9] Wave Energy Utilization in Europe, Ενημερωτικό φυλλάδιο ΚΑΠΕ με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. 2002.
- [10] Ενημερωτικό Έντυπο, 'Θαλάσσια Ενεργειακά συστήματα Α.Ε. www.offshoresystems.gr
- [11] Falnes Johannes-Ocean Waves and Oscillating Systems
- [12] J.N.Newman-Marine Hydrodynamics
- [13] Robert G. Dean/Robert A. Dalrymple-Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists
- [14] Pontes, M. T. et. al. , "The European Wave Energy Resource", 3rd EWEC, Patras, Greece, September 1998.
- [15] S. Petroncini, "Introducing Wave Energy into the Renewable Energy Market", Msc Thesis, Univ. of Edinburgh, 2002.
- [16] Oceans of Energy, European Ocean Energy Roadmap 2010-2050. Strategy International Communications. www.strategy.be
- [17] Δικτυακός Τόπος : European Marine Energy Center (EMEC).
- [18] Dambaru D. Bhatta-Computation of Added Mass and Damping Coefficient due to a heaving cylinder
- [19] Buoy Engineering
- [20] Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας,ΕΛΚΕΘΕ-Δίκτυο ΠΟΣΕΙΔΩΝ

[21] Εταιρικός διαδικτυακός χώρος www.bp.com