



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

“Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη-εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα”.

“Numerical modeling and analysis of operation and energy efficiency of a non-piston pumping device for wave-energy extraction, using a buoyant floating submerged vertical pipe system”.



ΧΡΗΣΤΟΣ Θ. ΚΟΥΡΤΖΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής:
Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

“Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη-εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα”.

“Numerical modeling and analysis of operation and energy efficiency of a non-piston pumping device for wave-energy extraction, using a buoyant floating submerged vertical pipe system”.

ΧΡΗΣΤΟΣ Θ. ΚΟΥΡΤΖΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής:
Ιωάννης Αναγνωστόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2012

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1) ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	7
1.1.1) Εισαγωγικά στοιχεία	7
1.1.2) Κύματα και Θαλάσσιο Κυματικό Δυναμικό:	8
1.1.3) Κυματικό Δυναμικό στην Ελλάδα	9
1.2) ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	12
1.2.1) Ιστορικά στοιχεία	12
1.2.2) Συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.....	12
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	22
2.1) ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	22
2.1.1) Χαρακτηριστικά κύματος.....	22
2.1.2) Γραμμική θεωρία κύματος (θεωρία Airy).....	24
2.2) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ-ΣΩΜΑΤΟΣ	29
2.2.1) Δυνάμεις.....	29
2.2.2) Κατακόρυφη κίνηση κυλινδρικού πλωτήρα σε αρμονικό κύμα	35
2.2.3) Απορροφούμενη ενέργεια κύματος από πλωτήρα	37
3. ΣΥΣΚΕΥΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	38
3.1) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	38
3.1.1) Γενικά.....	38
3.1.1) Ιστορικά στοιχεία συσκευής	39
3.2) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.....	43
3.2.1) Γενικά.....	43
3.2.2) Εξίσωση κίνησης όταν η βαλβίδα είναι κλειστή.....	44
3.2.3) Κριτήριο ανοίγματος της βαλβίδας.....	45
3.2.4) Εξισώσεις κίνησης όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή.....	46
3.2.5) Κλείσιμο της βαλβίδας-Θεωρητική αποθηκευμένη ενέργεια	48
3.3) ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	49
3.3.1) Αριθμητική επίλυση	49
3.3.2) Δεδομένα εισαγωγής.....	50
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	55
4.1) ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	55
4.1.1) Μελέτη επίδρασης της πίεσης αεροκώδωνα	61
4.1.2) Μελέτη επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	64

4.1.3) Μελέτη επίδρασης των κυματικών χαρακτηριστικών	70
4.2) ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΕΣ.....	76
4.2.1) Ετήσια κατανομή κυματισμού (σημείο κυματικών δεδομένων M4)	76
4.2.2) Βέλτιστες διαστάσεις σημείου	79
4.2.3) Βέλτιστες διαστάσεις για αγωγό δεδομένων διαστάσεων.....	82
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), με την συνεργασία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Σκοπός της είναι η αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης ενός μηχανισμού αξιοποίησης της ενέργειας των θαλάσσιων κυματισμών.

Το δυναμικό της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού μπορεί να έχει αξιοσημείωτη συνεισφορά στην παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές. Παρ' ότι οι μηχανές κυματικής ενέργειας σχεδιάζονται και δοκιμάζονται εδώ και τρεις δεκαετίες, δεν έχουν φθάσει σε ώριμη εμπορική μορφή, όπως συμβαίνει με τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται άλλες μορφές ΑΠΕ. Επίσης, καμία από τις τεχνολογίες που δοκιμάζονται δεν έχει αποδειχθεί ως η επικρατούσα τεχνολογία και για τον λόγο αυτόν υπάρχει μεγάλο περιθώριο για την προώθηση νέων ιδεών.

Η συσκευή που διερευνάται και μοντελοποιείται στην παρούσα εργασία είναι μια μη-εμβολοφόρος παλινδρομική αντλία με ελάχιστα κινούμενα μέρη, για την υδροηλεκτρική αξιοποίηση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού. Σχεδιάζεται για να εκμεταλλευτεί την κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση ενός πλωτήρα, στον οποίο αυτή αναρτάται και ο οποίος επιπλέει ελεύθερα στον θαλάσσιο κυματισμό. Η αντλία αποτελείται από έναν κατακόρυφο σωλήνα ο οποίος φέρει κοντά στο επάνω άκρο του μια βαλβίδα αντεπιστροφής, ενώ το κάτω άκρο του είναι ανοιχτό. Η αρχή της άντλησης βασίζεται στην αδρανειακή συμπεριφορά της στήλης του νερού εντός του σωλήνα, η οποία αποκτά ορμή από την κίνηση του πλωτήρα.

Η συσκευή αυτή έχει απασχολήσει και στο παρελθόν ερευνητές με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ωστόσο μέχρι και σήμερα καμία συγκροτημένη μελέτη δεν έχει πραγματοποιηθεί για την πρακτική εφαρμογή της. Στην παρούσα εργασία, η μοντελοποίηση του συστήματος πλωτήρα/σωλήνα έγινε με χρήση αριθμητικών μεθόδων και η διερεύνηση λειτουργίας επικεντρώθηκε κυρίως στην εφαρμογή της συσκευής στις ελληνικές θάλασσες, όπου επιχειρήθηκε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της για μέγιστη ενεργειακή απόδοση, με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και θα μπορούσαν να αποτελέσουν την αφετηρία για περαιτέρω διερεύνηση του μηχανισμού, καθώς υπάρχουν πολλοί τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν επίσης υπ' όψιν.

Abstract

This Diploma thesis was prepared at the Laboratory of Hydraulic Turbomachines of the National Technical University of Athens (NTUA), with the cooperation of Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRESES). The purpose is the numerical modeling and analysis of operation and energy efficiency of a wave energy converter.

The wave energy potential can have significant contribution to energy production from Renewable Energy Sources. Although, wave energy converters are designed and tested for three decades, they still have not reached a mature commercial form, as other renewable energy technologies. Also, none of the leading technologies has proven to be predominant and for this reason there is considerable scope to promote new ideas.

The device which modeled in this thesis is a non-piston oscillating pump, with few moving parts, for the hydro-electrical conversion of wave energy. It is designed to exploit the heave motion of a free floating buoy in which is placed. The pump consists of a vertical pipe and a non-return valve near its upper end, while the lower end is open. The pumping is based on the inertial behavior of the water column inside the tube, which gain momentum from the movement of the buoy

This device has been studied from some researchers in the past with promising results, but until now no organized study has been carried out for its practical use. In this study, numerical methods were used for modeling the system and the analysis of operation focused primarily on the implementation on a Greek wave spectra, where attempted optimization design for maximum energy efficiency, with satisfactory results.

These satisfactory results could be a starting point for further investigation of the device, as there are many technical and economic factors to be studied extensively.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1) ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1.1) Εισαγωγικά στοιχεία

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί δραματικά μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Το γεγονός αυτό, οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερο ρυθμό εξάντλησης των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, ενώ παράλληλα αυξάνονται οι εκπομπές ρύπων που συμβάλλουν στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου. Για αυτούς τους λόγους, είναι αναγκαία μια ακόμα μεγαλύτερη στροφή επιστημόνων και ερευνητών προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όχι μόνο για την βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών αλλά και για την διερεύνηση και δημιουργία νέων.

Τα τελευταία χρόνια μπορεί να έχουν γίνει σημαντικά βήματα για την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση όλο και περισσότερων ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (ιδιαίτερα στην Ευρώπη), αλλά ακόμα τα περιθώρια αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παραμένουν τεράστια. Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό από τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Μια πηγή ενέργειας από τις ΑΠΕ με ένα από τα μεγαλύτερα δυναμικά, αλλά με μικρή χρησιμοποίηση και εμπορική ανάπτυξη μέχρι σήμερα, είναι η ενέργεια από θαλάσσια κύματα. Οι θαλάσσιες μάζες καλύπτουν το 75% της επιφάνειας του πλανήτη μας και απορροφούν καθημερινά τεράστιες ποσότητες ηλιακής και αιολικής ενέργειας, η οποία εμφανίζεται στη θάλασσα κυρίως με κύματα ή ρεύματα.

Ο θαλάσσιος κυματισμός είναι, όπως κάθε ΑΠΕ, μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ των ΑΠΕ. Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση μόλις του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μας θα μπορούσε να καλύψει 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 με 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

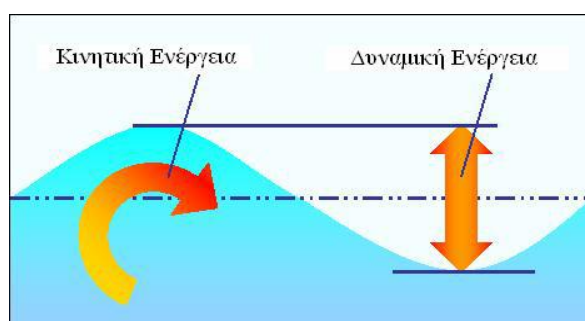
μηχανικής αντοχής, με αποτέλεσμα μεγάλο κατασκευαστικό κόστος, ενώ η μεγάλη απόσταση από την ακτή για τεχνολογίες πλωτής εγκατάστασης συνεπάγεται υψηλό κόστος διασύνδεσης και λειτουργίας.

Το υψηλό κόστος των τεχνολογιών μπορεί να αντισταθμισθεί μόνον με βέλτιστη εκμετάλλευση της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας των κυμάτων, δηλαδή με υψηλούς δείκτες απόδοσης. Προς αυτή την κατεύθυνση εξελίσσονται οι διάφορες τεχνολογίες και σήμερα τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Η συνεχιζόμενη βελτίωση των δεικτών απόδοσης των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας αναμένεται να τις καταστήσει σύντομα βιομηχανικά εκμεταλλεύσιμες.

1.1.2) Κύματα και Θαλάσσιο Κυματικό Δυναμικό:

Η επιφάνεια της θάλασσας φαίνεται να βρίσκεται συνέχεια σε κίνηση, με διαρκείς αναταράξεις. Ο άνεμος, οι μεταβολές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της πυκνότητας, ακόμα και οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις της Γης με τον Ήλιο και τη Σελήνη μεταφέρουν ενέργεια προξενώντας περιοδικές κινήσεις των μορίων του νερού. Ο ανεμογενής κυματισμός παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ενεργειακή εκμετάλλευση καθώς τα παραγμένα από αέρα κύματα έχουν την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση.

Τα ανεμογενή κύματα δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του ανέμου με τη θαλάσσια επιφάνεια. Αυτή η μεταφορά ενέργειας παρέχει ένα είδος φυσικής αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας στο νερό, η οποία έτσι μπορεί να εκδηλωθεί εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από το σημείο δημιουργίας και με ελάχιστες απώλειες ενέργειας. 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, η κινητική ενέργεια ενός γραμμικού κύματος είναι ίση με την δυναμική του ενέργεια.

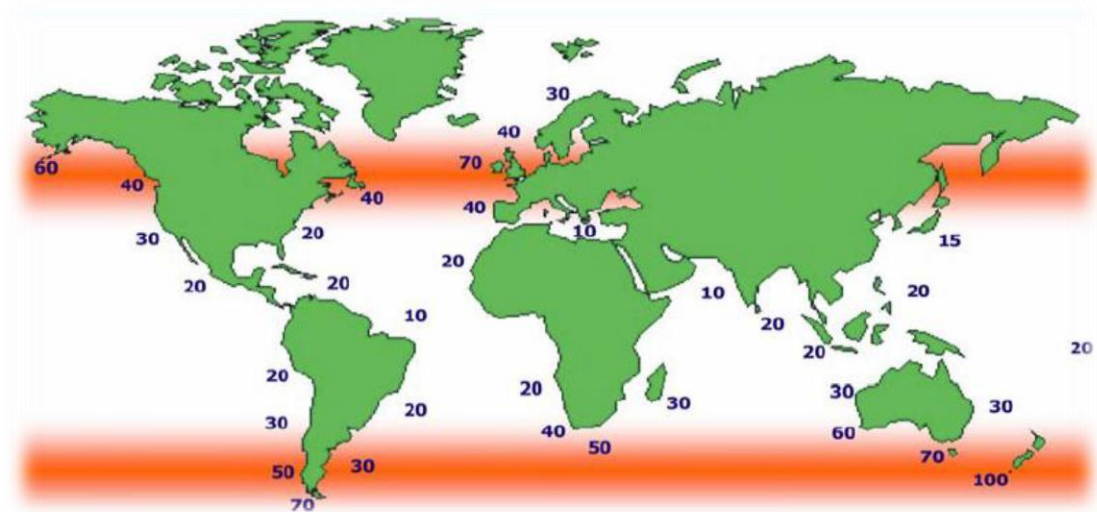


Εικόνα 1.1 Μορφές Ενέργειας Κυμάτων

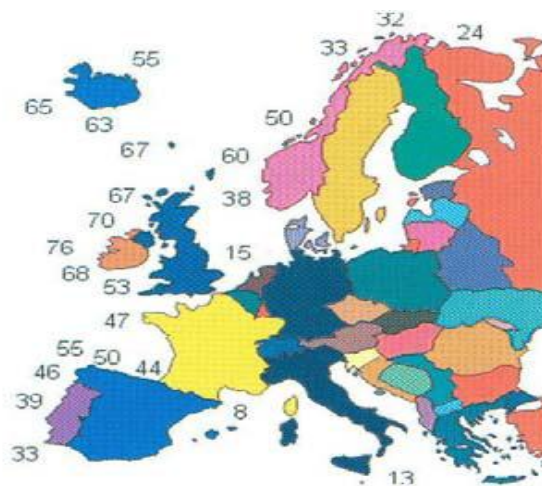
Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, όπως η ταχύτητα διάδοσης, η περίοδος και το μήκος κύματος καθώς και το διάστημα μορφοποίησής τους, προσδιορίζονται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και την διάρκεια αλληλεπίδρασης του με αυτά. Επίσης επηρεάζονται από το βάθος και τη μορφολογία του πυθμένα, που μπορεί να εστιάζει ή να διασκορπίζει τον κυματισμό αλλά και από τα θαλάσσια ρεύματα. Για τους

λόγους αυτούς, όπως συμβαίνει και με το δυναμικό κάθε ΑΠΕ, το παγκόσμιο κυματικό δυναμικό κατανέμεται διαφορετικά ανά τον κόσμο.

Το υψηλότερο δυναμικό εντοπίζεται στην εύκρατη ζώνη και συγκεκριμένα μεταξύ του 30° και 60° παραλλήλου και στα δύο ημισφαίρια, περιοχές όπου πνέουν ισχυροί δυτικοί άνεμοι. Η κυματική ενέργεια, καθώς και η ηλεκτρική που μπορεί να παραχθεί από αυτή, μετριέται σε kW ανά μέτρο μετώπου κύματος (kW/m) ή σε TWh ανά έτος. Έτσι με βάση και τα παρακάτω σχήματα βλέπουμε ότι υψηλά ποσά κυματικού δυναμικού, μέχρι και της τάξεως των $70 kW/m$, έχουν οι δυτικές ευρωπαϊκές ακτές, οι ακτές του Καναδά και των ΗΠΑ, καθώς και οι νότιες ακτές της Αυστραλίας και της Νότιας Αμερικής. Στη Μεσόγειο το δυναμικό είναι αισθητά μικρότερο. [1,2]



Εικόνα 1.2 Παγκόσμιο κυματικό δυναμικό σε kW/m



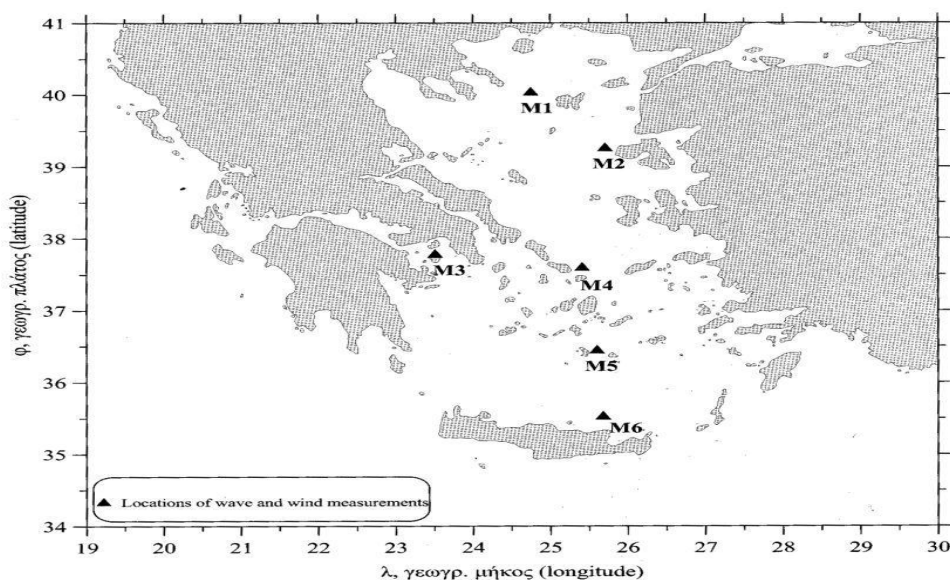
Εικόνα 1.3 Ευρωπαϊκό κυματικό δυναμικό σε kW/m

1.1.3) Κυματικό Δυναμικό στην Ελλάδα

Η Ελλάδα των πολυάριθμων νησιών, διαθέτει την μεγαλύτερη ακτογραμμή ανάμεσα στις χώρες της Ευρώπης. Το Αιγαίο Πέλαγος διαθέτει το υψηλότερο θαλάσσιο

ενεργειακό δυναμικό της Μεσογείου με μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος 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, υπολογίζεται στις 5-9 TWh ανά έτος, ποσό που αντιστοιχεί περίπου στο 10% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας (61 TWh για το έτος 2010) [2]. Το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά το ποσοστό συμμετοχής ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να συμβάλλει αποτελεσματικά στην ενεργειακή αυτονομία μεγάλου αριθμού νησιών.

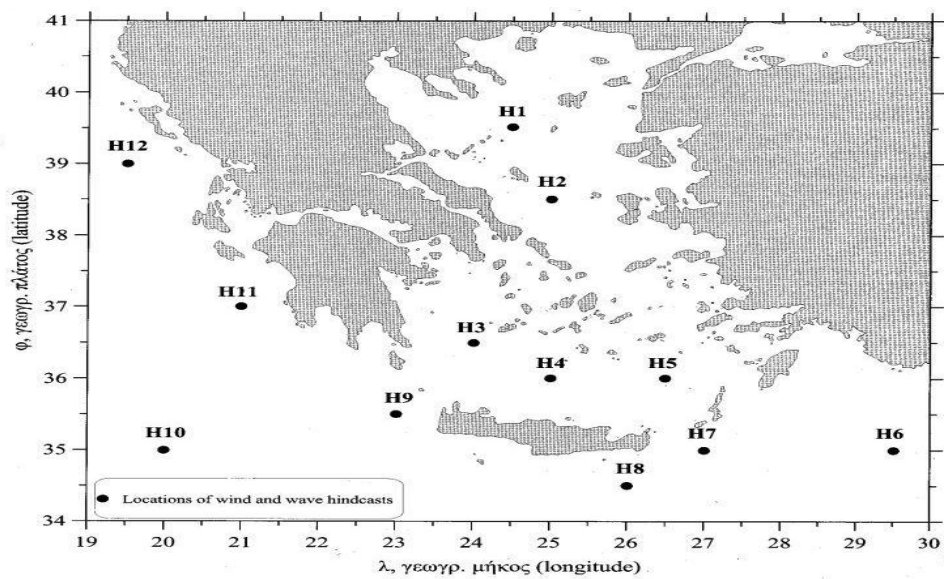
Για τις Ελληνικές θάλασσες μια πρώτη εκτίμηση του κυματικού δυναμικού μπορεί να γίνει από τα δεκαετή κυματικά δεδομένα του συστήματος Ποσειδών, που δημοσιεύονται στον *Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών* [3,4,5]. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δίκτυο πλωτήρων που συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα ανά τρεις ώρες. Με βάση αυτό το σύστημα προκύπτουν οι πίνακες 1.1,1.2 για τα αντίστοιχα σημεία του χάρτη (εικόνα 1.4,1.5). Στο τέλος δίδεται ο χάρτης της μέσης ετήσιας κατανομής σημαντικού ύψους κύματος, μέγεθος ανάλογο της ενέργειας κύματος.



Εικόνα 1.4 Σημεία Πλωτήρων

Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού (kW/m) Σημεία Πλωτήρων	
M1	3.55
M2	2.22
M3	0.25
M4	4.49
M5	2.90
M6	3.57

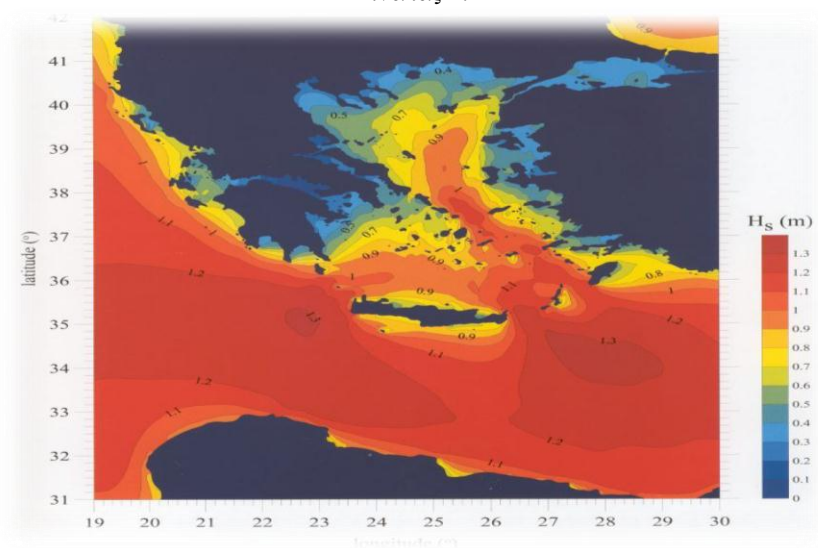
Πίνακας 1.1



Εικόνα 1.5 Σημεία Αριθμητικής Επεξεργασίας

Μέση Ετήσια Ισχύς Κυματισμού (kW/m) Σημεία Αριθμητικής Επεξεργασίας	
H1	3.08
H2	3.96
H3	3.52
H4	3.83
H5	4.59
H6	6.08
H7	6.46
H8	4.63
H9	6.92
H10	7.72
H11	5.45
H12	5.31

Πίνακας 1.2



Εικόνα 1.6 Μέση κατανομή σημαντικού ύψους κύματος.

1.2) ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.2.1) Ιστορικά στοιχεία

Η δυνατότητα μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων σε αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας έχει εμπνεύσει πλήθος ερευνητών. Η πρώτη καταγεγραμμένη προσπάθεια κατασκευής τέτοιας μηχανής, έγινε από το Γάλλο μηχανικό Pierre Girard μόλις το 1799. Χρειάστηκε να περάσουν αρκετά χρόνια από τότε ώστε να υπάρξει συντονισμένη έρευνα. Οι χώρες που πρώτες χρηματοδότησαν τέτοιες έρευνες, ήταν η Ιαπωνία, η Νορβηγία και το Ηνωμένο Βασίλειο στις αρχές της δεκαετίας του 70 και ενώ βρισκόταν σε εξέλιξη η ενεργειακή κρίση λόγω της αύξησης τις τιμής του πετρελαίου. Ο Ιάπωνας Yoshio Masuda θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης τεχνολογίας, καθώς συνέλαβε και πραγματοποίησε την ιδέα της ταλαντούμενης στήλης ύδατος (*OWC*) με αεριοστρόβιλο, της πρώτης τεχνολογίας που αναπτύχθηκε εμπορικά.[10]

Εκτός από την τεχνολογία αυτή, μέχρι το 1980 είχαν κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εκατοντάδες ακόμα. Ωστόσο, το αφιλόξενο περιβάλλον της θάλασσας σε συνδυασμό με την απαίτηση πολύπλευρης αντιμετώπισης του προβλήματος από επιστήμες όπως ωκεανογραφία, μηχανική των ρευστών, αντοχή υλικών, αποτέλεσαν τροχοπέδη για την εξέλιξη σε εμπορική μορφή. Η έρευνα περιορίστηκε σε ακαδημαϊκό χώρο για αρκετό διάστημα. Το 1991 όμως η κατάσταση άλλαξε ριζικά, με την απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης να συμπεριλάβει την κυματική ενέργεια στο πρόγραμμα ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Έκτοτε αναπτύχθηκαν πολλές τεχνολογίες, αρκετές από τις οποίες σήμερα έχουν φτάσει σε ένα στάδιο τεχνικής ωρίμανσης και μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Όμως καμία από αυτές δεν είναι ακόμα η επικρατέστερη, όπως για παράδειγμα, συμβαίνει με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα τριών πτερυγίων, και τα περιθώρια βελτίωσης και έρευνας είναι ακόμα μεγάλα.

1.2.2) Συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας

Όπως είπαμε και παραπάνω, οι υπό μελέτη τεχνολογίες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας είναι πολλές και δεν υπάρχει μια επικρατέστερη στη οποία να έχει πέσει το βάρος των ερευνών. Αυτή την στιγμή πάνω από εκατό προγράμματα κυματικής ενέργειας βρίσκονται σε διάφορα στάδια ανάπτυξης και ο αριθμός αυτός συνεχώς μεγαλώνει, καθώς όλο και περισσότερες νέες ιδέες υπερκαλύπτουν το κενό αυτών που εγκαταλείπονται.

Παρά το μεγάλο πλήθος, οι συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν κυρίως με δύο τρόπους: Είτε σύμφωνα με τη θέση και το

βάθος για το στο οποίο κατασκευάζονται για να λειτουργήσουν, είτε με την μέθοδο που εφαρμόζεται για την απόσπαση της κυματικής ενέργειας.[6,7,11]

Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης:

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι πιο γενική και περιλαμβάνει τρεις ζώνες τοποθέτησης, την χερσαία, την παράκτια και την υπεράκτια.

- 1) **Συσκευές χερσαίας ζώνης (onshore).** Οι τεχνολογίες είναι ενσωματωμένες στην ακτογραμμή με βάθος συνήθως μικρότερο των 15 μέτρων, κάτι που τους προσδίδει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Δεν απαιτούν αγκυροβολήσεις, ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά, λόγω της θέσης τους κοντά στην στεριά, χάνουν σημαντική ισχύ και η εγκατάσταση τους γενικά περιορίζεται από την γεωλογία της ακτογραμμής. Η πιο συνηθισμένη τεχνολογία σε αυτή την ζώνη είναι η τύπου ταλαντούμενης στήλης ύδατος (OWC) για την οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.
- 2) **Συσκευές παράκτιας ζώνης (nearshore).** Το βάθος δεν υπερβαίνει τα 25 μέτρα και η συσκευή βρίσκεται σχετικά κοντά στην ακτή (περίπου 500 μέτρα). Οι συσκευές αυτές έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις συσκευές χερσαίας ζώνης, ενώ ταυτόχρονα συναντούν μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό από αυτό που υπάρχει στην ακτογραμμή. Συνήθως αναπτύσσονται ειδικές δομές που εδράζονται στον πυθμένα.
- 3) **Συσκευές υπεράκτιας ζώνης (offshore).** Σε αυτή την ζώνη εγκαθίστανται πλωτά συστήματα που απαιτούν αγκύρωση. Το βάθος κυμαίνεται από 25-75 μέτρα για συσκευές μικρού βυθίσματος και πάνω από 75 μέτρα για συσκευές μεγάλου βυθίσματος. Σε αυτά τα βάθη οι απώλειες κύματος λόγω τριβής με τον βυθό είναι ελάχιστες και το κυματικό δυναμικό φτάνει τα υψηλότερα επίπεδα. Επίσης δεν υπάρχουν προβλήματα χώρου και οπτικής όχλησης. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης είναι πολύ υψηλό. Τέλος υπάρχει και ο κίνδυνος ολοκληρωτικής απώλειας της συσκευής σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι ιδιότητες της κάθε ζώνης:

Ζώνη	Υπεράκτια			
	Χερσαία	Παράκτια	Μικρού βυθίσματος / μεγάλου βυθίσματος	
Παράγοντας				
Διαθεσιμότητα θέσεων εγκατάστασης	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή	Χαμηλή
Περιπλοκότητα εγκατάστασης	Χαμηλή-Μέση	Χαμηλή-Μέση	Μέση	Μέση-Υψηλή

Κόστος λειτουργίας	Χαμηλό	Μέσο	Μέσο-Υψηλό	Μέσο-Υψηλό
Κόστος καλωδίωσης	Χαμηλό	Μέσο	Μέσο-Υψηλό	Υψηλό
Τεχνολογικός κίνδυνος	Χαμηλός- Μέσος	Μέσος-Υψηλός	Μέσος-Υψηλός	Υψηλός
Δυναμικό παραγωγής ενέργειας ανά συσκευή	Χαμηλό	Μέσο	Υψηλό	Υψηλό
Κίνδυνος βιωσιμότητας	Χαμηλός	Μέσος	Μέσο-Υψηλό	Υψηλός

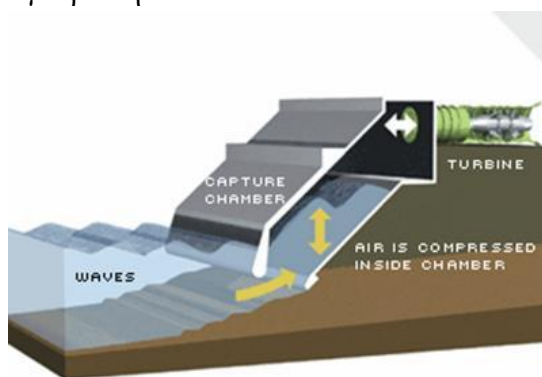
Πίνακας 1.3 Ιδιότητες παραγόντων εγκατάστασης για κάθε ζώνη [6]

Κατηγοριοποίηση με βάση την μέθοδο μετατροπής:

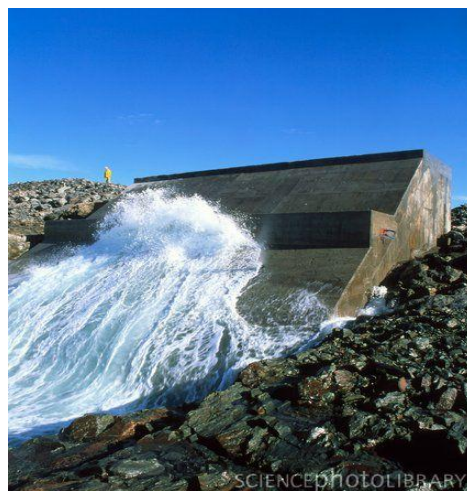
Οι συσκευές κυματικής ενέργειας μετατρέπουν την οριζόντια ή/και την κάθετη κίνηση των κυμάτων σε ηλεκτρισμό αξιοποιώντας ταλαντούμενη σχετική κίνηση σωμάτων, ή διακυμάνσεις πίεσης του αέρα, ή συσσώρευση δυναμικής ενέργειας. Η ισχύς αυτή δεσμεύεται κυρίως με τέσσερις τρόπους (*Power take-off. PTO*): Με υδροστρόβιλο, αεριοστρόβιλο, υδραυλικό κινητήρα ή με γραμμική γεννήτρια. Με βάση τους διαφόρους συνδυασμούς αυτών των βασικών αρχών μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη συσκευών.

1) Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column).

Πρόκειται για μεγάλες διατάξεις που κατασκευάζονται κυρίως στην χερσαία ζώνη. Διαθέτουν θάλαμο αέρα ημιβυθισμένο και ανοιχτό στο κάτω άκρο της θάλασσας. Η παλινδρομική κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας προκαλεί συμπίεση και αποσυμπίεση της αέριας μάζας μέσα στον θάλαμο, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση αεριοστρόβιλου. Ο αεριοστρόβιλος στρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την φορά κίνησης του αέρα και κινεί γεννήτρια. Οι συσκευές αυτές αν και αρχικά σχεδιάστηκαν για εγκατάσταση επί της ακτής σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές, στη συνέχεια δοκιμάστηκαν και σε ανοικτή θάλασσα με κατάλληλη αγκύρωση.



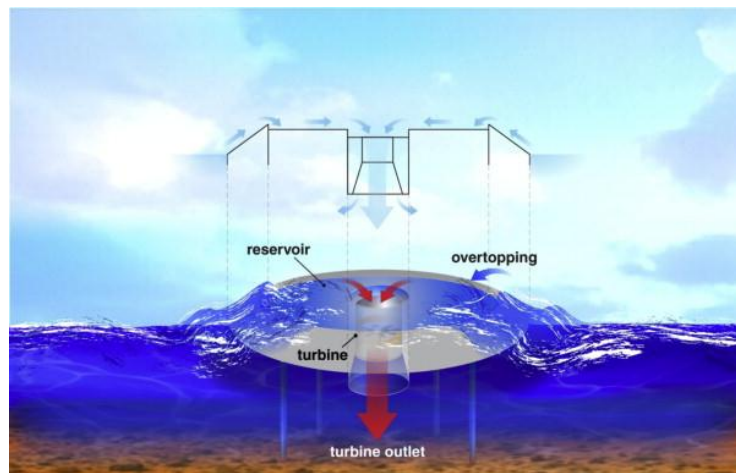
Εικόνα 1.7 Αρχή λειτουργίας OWC



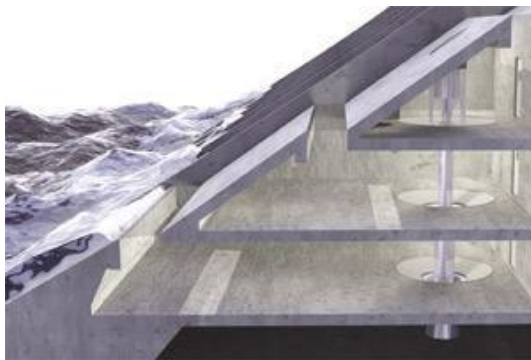
Εικόνα 1.8 LIMPET OWC. Σκωτία (130kW Ισχύς)

2) Συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device).

Πρόκειται για πλωτές ή σταθερές δεξαμενές, οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας. Η διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων χαμηλής πίεσης και το νερό καταλήγει ξανά στη θάλασσα. Ουσιαστικά η συσκευή εκμεταλλεύεται την δυναμική ενέργεια του νερού όπως γίνεται, σε μεγαλύτερη βέβαια κλίμακα, και σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό. Μπορούν να τοποθετηθούν και στην ακτογραμμή (συσκευή SSG), αλλά και στη παράκτια και υπεράκτια ζώνη (wave dragon).



Εικόνα 1.9 Αρχή λειτουργίας Overtopping device



Εικόνα 1.10 Προτεινόμενη τεχνολογία SSG για onshore εκμετάλλευση

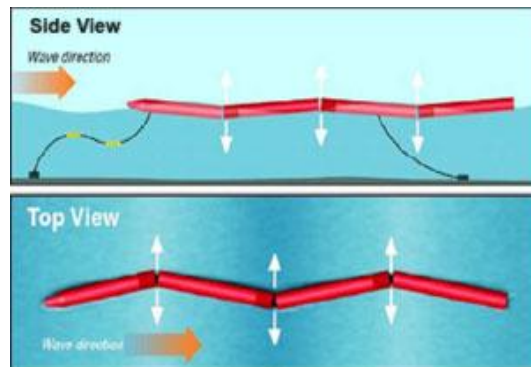


Εικόνα 1.11 Wave Dragon. Δανία. 4-12MW ονομαστική ισχύς

3) Συσκευές μακρόστενης μορφής- γραμμικοί αποσβεστήρες (attenuator).

Είναι πλωτές, αρθρωτές κατασκευές οι οποίες τοποθετούνται κάθετα προς τα επερχόμενα κύματα, παράλληλα με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ενέργεια δεσμεύεται κατά τη διέλευση των κυμάτων κατά μήκος όλου του συστήματος μέσω υδραυλικών κινητήρων που υπάρχουν στις αρθρώσεις. Θεωρητικά, αυτό οδηγεί σε

μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης απ' ό,τι στα συστήματα μικρού μήκους ή στα αξονοσυμμετρικά συστήματα. Άλλο ένα θετικό αυτής της τεχνολογίας είναι οι μικρές σχετικά καταπονήσεις λόγω της μικρής μετωπικής επιφάνειας. Κύριος εκπρόσωπος αυτού του είδους είναι η συσκευή Pelamis. Προορίζεται για υπεράκτια εφαρμογή και έχει υποβληθεί σε δοκιμές πλήρους κλίμακας στις Πορτογαλικές θάλασσες. Στόχος είναι η κατασκευή πάρκου 20MW.



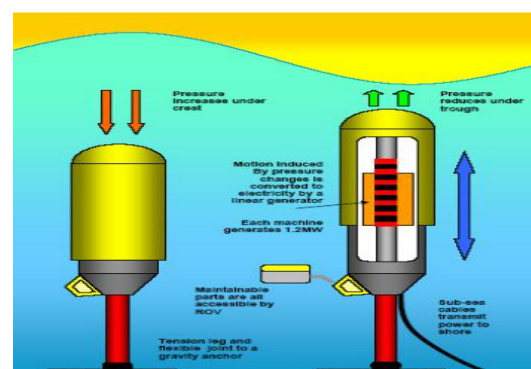
Εικόνα 1.12 Αρχή λειτουργίας attenuator



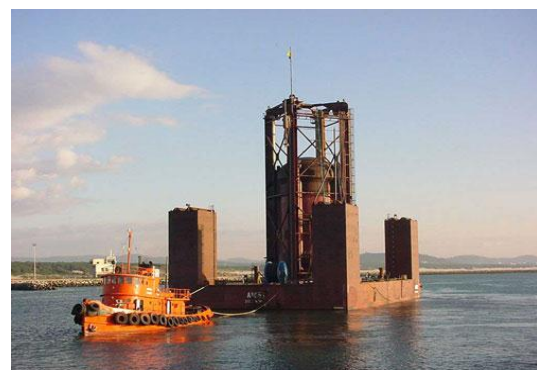
Εικόνα 1.13 Συσκευή Pelamis. 750 kW

4) Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged pressure differential).

Οι συσκευές αυτές τυπικά βρίσκονται κοντά στην ακτή και στηρίζονται στο βυθό. Χρησιμοποιούν τη διαφορά πίεσης των διαδοχικών κορυφών και κοίλων του κύματος ώστε να προκαλέσουν την άνοδο και την κάθοδο ενός πλωτού σώματος. Η κίνηση αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια συνήθως μέσω μιας γραμμικής γεννήτριας. Κατασκευή αυτού του τύπου αποτελεί το Archimedes Wave Swing (AWS) που είναι εγκατεστημένο από το 2005 ανοιχτά των ακτών της Πορτογαλίας.



Εικόνα 1.14 Αρχή λειτουργίας συσκευής διαφοράς πίεσης

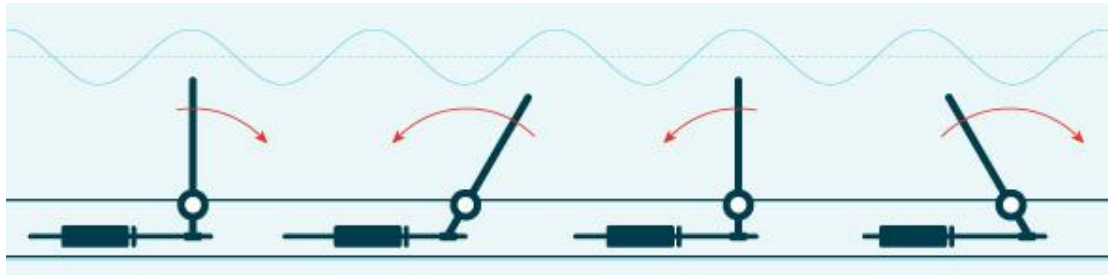


Εικόνα 1.15 Συσκευή AWS. 2 MW

5) Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (Oscillating Wave Surge Converter).

Οι συσκευές αυτές τις περισσότερες φορές στηρίζονται στο βυθό αλλά ενδέχεται να είναι και ημιβυθισμένες. Προσλαμβάνουν την ενέργεια από την οριζόντια κίνηση των στοιχείων του νερού, μέσω ενός βραχίονα που παλινδρομεί σαν εκκρεμές

στηριγμένος σε περιστρεφόμενη άτρακτο, κάθετη στην κίνηση τόσο του νερού όσο και του βραχίονα. Χρησιμοποιούν εμβολοφόρο αντλία. Παράδειγμα αυτού του είδους είναι το σύστημα Oyster το οποίο εδράζεται στον πυθμένα και χρησιμοποιεί μια διάταξη τύπου πτερυγίου. Η παλινδρομική κίνηση του πτερυγίου θέτει σε κίνηση ένα έμβολο που αντλεί το νερό από τη θάλασσα στην ξηρά. Στη συνέχεια, το υψηλής πίεσης νερό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω ενός στροβίλου τύπου Pelton.



Εικόνα 1.16 Αρχή λειτουργίας OWSC



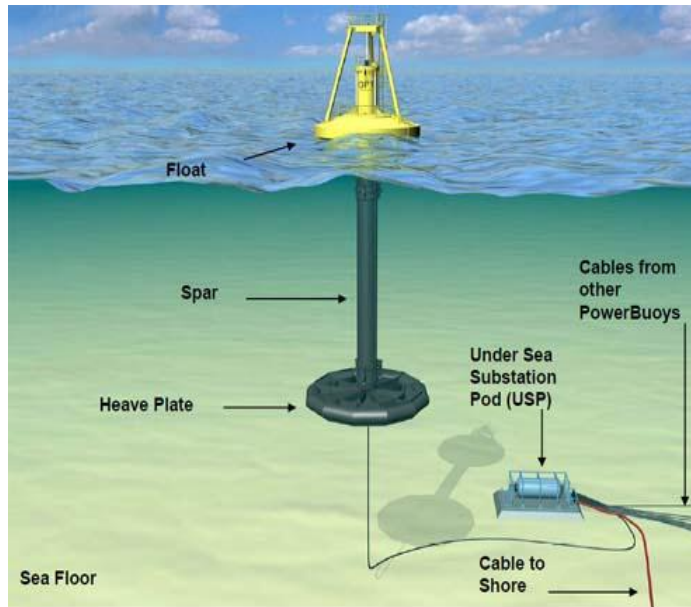
Εικόνα 1.17-1.18 Συσκευή Oyster 300 kW.

6) Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorbers).

Είναι συνήθως αξονοσυμμετρικά, πλωτά συστήματα με διαστάσεις μικρότερες του ενός τρίτου του μέσου μήκους κύματος. Το γεγονός ότι πρόκειται για αξονοσυμμετρικά συστήματα, σημαίνει ότι είναι λιγότερο ευπαθή στην κατεύθυνση προσέγγισης του μετώπου κύματος και σε ακραίες φορτίσεις. Μπορεί να είναι είτε πλωτές αγκυροβολημένες μονάδες είτε να εδράζονται στον πυθμένα. Τις περισσότερες φορές εκμεταλλεύονται κυρίως την παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα κατά την κατακόρυφη διέγερση του, μετατρέποντας την μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική ή γραμμική κίνηση για την λειτουργία γεννήτριας. Το σχετικά μικρό μέγεθος τους, κάνει πιο εύκολη την λειτουργία περισσότερων συστημάτων υπό κοινό υποθαλάσσιο καλώδιο για δημιουργία πάρκου επιθυμητής ονομαστικής ισχύος. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως και το σύστημα που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία αποτελεί σημειακό απορροφητή.

Παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι:

OPT powerbuoy [12]: Παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της σχετικής κίνησης ενός πλωτήρα στην επιφάνεια της θάλασσας και ενός άλλου ημιβυθισμένου, χρησιμοποιώντας υδραυλικό σύστημα ανάκτησης (Εικόνα 1.19-1.20). Σκοπός του ημιβυθισμένου πλωτήρα είναι η αύξηση την δύναμη αδράνειας. Τα δύο σώματα ταλαντώνονται με διαφορετική φάση και η σχετική αυτή κίνηση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδραυλικού συστήματος που βρίσκεται στον αγωγό που τα συνδέει.



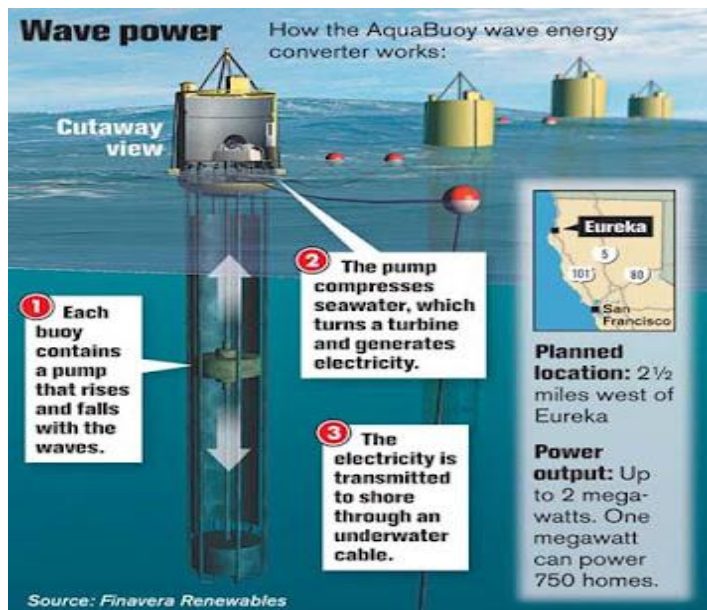
Εικόνα 1.19 Αρχή λειτουργίας OPT powerbuoy



Εικόνα 1.20 OPT powerbuoy ονομαστικής ισχύς 40 kW

AquaBuOY [13]: Παράγει ενέργεια μέσω νερού υψηλής πίεσης, που δημιουργείται από την σχετικής κίνησης ενός πλωτήρα και ενός εμβόλου, μέσω υδροστροβίλου. Το σύστημα αποτελείται από τον πλωτήρα, τον άκαμπτο καθοδικό αγωγό επιτάχυνσης, το έμβολο, τις αντλίες εύκαμπτου σωλήνα (*hose pump*) και τον υδροστρόβιλο.

Το έμβολο επιταχύνεται μέσα στον μακρόστενο άκαμπτο αγωγού λόγω της κατακόρυφης δύναμης του κύματος. Ο αγωγός στηρίζεται στον πλωτήρα και είναι ανοιχτός και στα δύο άκρα ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του θαλασσινού νερού. Το έμβολο είναι ένας ημιβυθισμένος πλωτήρας σε σχήμα δίσκου και βρίσκεται στην μέση του αγωγού σε κατάσταση ηρεμίας. Διαμέσου του εμβόλου εισέρχεται ο εύκαμπτος αγωγός της αντλίας από τον οποίο το νερό, αποκτώντας πίεση λόγω μεταβολής όγκου του σωλήνα, οδηγείται από το κάτω άκρο στο επάνω όπου και φέρει υδροστρόβιλο για την ενεργειακή αξιοποίηση. (Εικόνα 1.21-1.22)



Εικόνα 1.21 Αρχή λειτουργίας AquaBuOY.



Εικόνα 1.22 AquaBuOY ονομαστικής ισχύος 2MW

7) Άλλες συσκευές.

Πρόκειται κυρίως για πιο σύγχρονες τεχνολογίες οι οποίες δεν κατατάσσονται σε κάποια κατηγορία λόγω αρκετά διαφορετικής σχεδίασης, όπως για παράδειγμα κάποια συστήματα περιστρεφόμενων μαζών ή εύκαμπτες κατασκευές που αλλάζουν σχήμα και όγκο και που αποτελούν τμήμα του συστήματος μετατροπής της ενέργειας.



Εικόνα 1.23 Τεχνολογία Anaconda. Μακρόστενος εύκαμπτος σωλήνας που εκμεταλλεύεται τις παλινδρομικές διογκώσεις

Μειονεκτήματα και μελλοντικός στόχος

Παρά την μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών, οι δυσκολίες που πρέπει να υπερβούν οι συσκευές κυματικής ενέργειας ώστε να συναγωνιστούν με αξιώσεις τις άλλες ΑΠΕ,

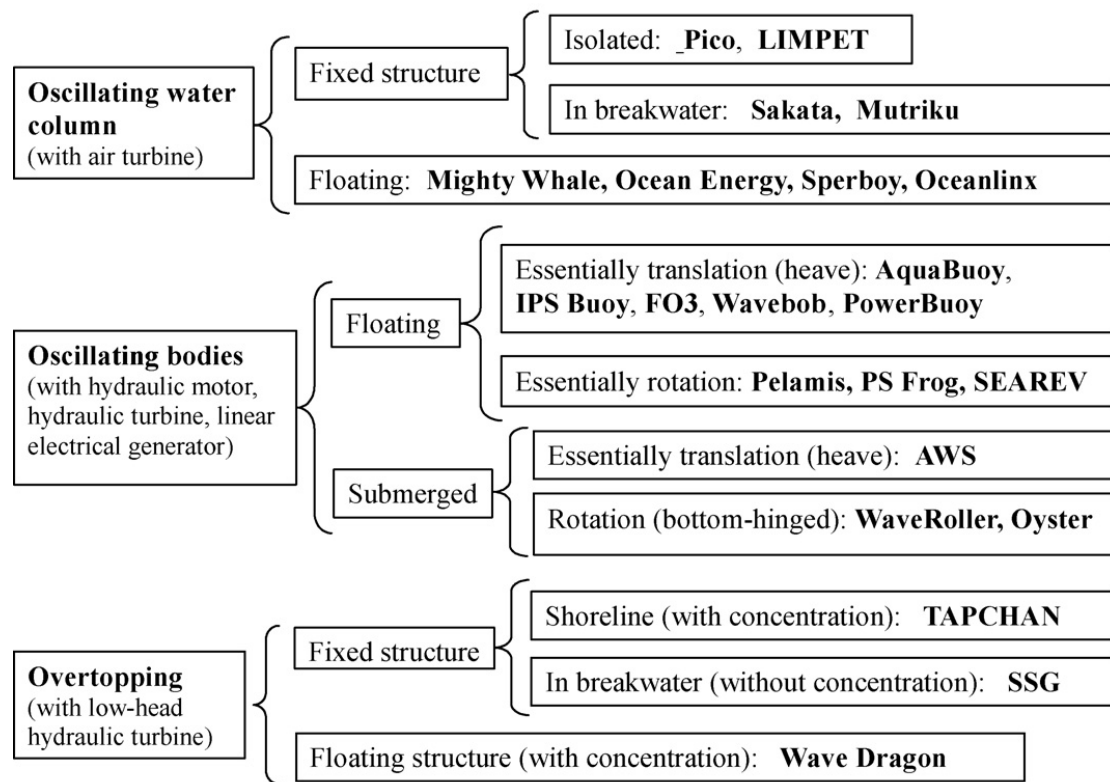
είναι κοινές και έχουν να κάνουν κυρίως με την αξιοπιστία τους και το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος. Η έλλειψη σταθερότητας στο πλάτος, τη φάση και την κατεύθυνση των θαλάσσιων κυμάτων δυσχεραίνει την επίτευξη υψηλής απόδοσης σε ολόκληρο το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης. Παράλληλα, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων συνεπάγεται μεγάλες καταπονήσεις στην περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, οι οποίες μπορούν να υπερβούν ακόμα και εκατό φορές τις μέσες καταπονήσεις. Αυτό, σε συνδυασμό και με τις γενικότερες τεχνικές δυσκολίες που προκαλεί το θαλασσινό νερό, απαιτεί υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με αποτέλεσμα μεγάλο κατασκευαστικό κόστος. Επιπλέον, η δυσπροσιτότητα υπεράκτιων ή υποβρύχιων εγκαταστάσεων δυσχεραίνει τον έλεγχο, την συντήρηση ή την επισκευή τους και αυξάνει το λειτουργικό κόστος.

Ωστόσο, αν οι προσπάθειες για βελτίωση των συστημάτων κυματικής ενέργειας συνεχιστούν με τον ίδιο ρυθμό, είναι σχεδόν σίγουρο πως κάποιες τεχνολογίες θα τελειοποιηθούν και θα καθιερωθούν. Οι τεχνολογίες αυτές θα συνδυάζουν μέγιστη απόδοση στο δυνατό εύρος λειτουργίας μιας περιοχής, υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και φυσικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1.4) δίδονται οι επικρατέστερες τεχνολογίες μέχρι σήμερα σύμφωνα με βάση τα στοιχεία της Wave Energy Planning and Marketing (waveplam).

Χώρα	Εταιρεία	Συσκευή	Ισχύς πρωτότυπου
Μ. Βρετανία	Aquamarine	Oyster	500 kW
Φιλανδία	AW Energy Oy	Waveroller	5*15 kW
Νορβηγία	Fred Olsen	FOBOX3	2,5 MW
Ιρλανδία	Ocean Energy	OE Buoy	2 MW
Αυστραλία	Oceanlinx	Oceanlinx	2 MW
ΗΠΑ	OPT	Powerbuoy	150 kW
Μ. Βρετανία	Pelamis Wave	Pelamis	750 kW
Αυστραλία	Seapower Pacific	CETO	180 kW
Δανία	Wave Dragon	Wave Dragon	7 MW
Ιρλανδία	Wavebob	Wavebob	2 MW
Μ. Βρετανία	Wanegen	Limpet	500 kW
Νορβηγία	WAVEnergy	SSG	150 kW
Δανία	Wavestar	Wavestar	5 MW

Πίνακας 1.4 Επικρατέστερες τεχνολογίες σήμερα σύμφωνα με την waveplam.[6]

Τέλος στο διάγραμμα 1.24 δίδεται ένας πιο πρόσφατος διαχωρισμός των τεχνολογιών με τις επικρατέστερες κάθε κατηγορίας σύμφωνα με τον A.Falcao [11]. Οι τρεις αυτές μεγάλες κατηγορίες είναι η Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column), τα ταλαντούμενα σώματα (oscillating bodies) και οι συσκευές υπερπήδησης του νερού (Overtopping device).



Εικόνα 1.24 Διαχωρισμός τεχνολογιών (σύμφωνα με τον A.Falcao) [11]

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί μια συσκευή κυματικής ενέργειας που σχεδιάζεται να εκμεταλλευτεί την σχετική κατακόρυφη κίνηση ενός κυλινδρικού πλωτήρα και της στήλης νερού που εμπεριέχεται σε αγωγό, αναρτημένο στον πλωτήρα. Ο αγωγός φέρει κοντά στο επάνω άκρο του μια βαλβίδα αντεπιστροφής, ενώ το κάτω άκρο του είναι ανοιχτό. Πρόκειται για έναν σημειακό απορροφητή που προορίζεται να λειτουργήσει στην υπεράκτια ζώνη. Η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται με χρήση υδροστροβίλου κατά το άνοιγμα της βαλβίδας.

Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο για την μελέτη τέτοιων συσκευών. Δίδονται οι εξισώσεις της γραμμικής θεωρίας κύματος (θεωρία Airy), που περιγράφουν αρμονικό κύμα, και οι σχέσεις της αλληλεπίδρασης κύματος-σώματος, με έμφαση στην κατακόρυφη κίνηση κυλινδρικού πλωτήρα.

Στο τρίτο Κεφάλαιο διερευνάται και μοντελοποιείται αριθμητικά η συγκεκριμένη συσκευή. Πρόκειται για σύνθετη μοντελοποίηση λόγω των σχετικών κινήσεων συσκευής-κύματος και στήλης νερού-συσκευής, στις δύο φάσεις λειτουργίας της βαλβίδας (ανοιχτή/κλειστή). Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε μία αρχική συσκευή αναφοράς και στη συνέχεια πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των λειτουργικών της διαστάσεων για ελληνικό θαλάσσιο δυναμικό.

Τέλος, στο πέμπτο Κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα της μελέτης και παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για πιο διεξοδική διερεύνηση και τελειοποίηση του μηχανισμού.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1) ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

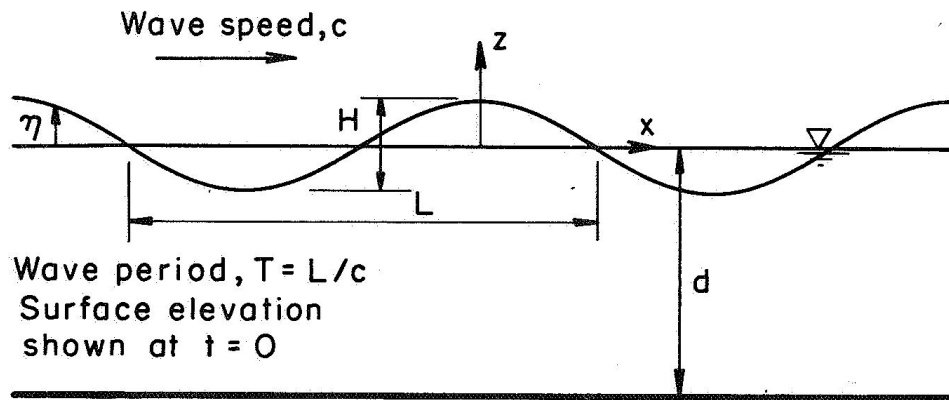
Η επιφάνεια της θάλασσας βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση με διαρκείς αναταράξεις, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η κύρια αιτία για την κίνηση αυτή, που μας ενδιαφέρει και περισσότερο για παράγωγη ενέργειας είναι ο άνεμος. Κατά την έναρξη του ανέμου, στην επιφάνεια ήρεμου ύδατος δημιουργούνται ‘ρυτίδες’ ακανόνιστου σχήματος, οι οποίες μετατρέπονται αρχικά, υπό την συνεχή επίδραση του ανέμου, σε ακανόνιστα κύματα. Τα κύματα αυτά στην συνέχεια, αφού διανύσουν κάποια απόσταση, μετατρέπονται σε πιο ομοιόμορφα κύματα με διακριτό ύψος και περίοδο.

Ουσιαστικά τα κύματα είναι περιοδικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού με τις οποίες μεταφέρεται η ενέργεια που αποκτήθηκε από τον άνεμο. Η ενέργεια αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάρκεια αλληλεπίδρασης άνεμου-θάλασσας καθώς και από το μήκος αλληλεπίδρασης. Κατά την μεταφορά οι απώλειες ενέργειας ιδιαίτερα στα βαθιά νερά είναι μικρές, γι’ αυτό και η εκτόνωση της ισχύος των κυμάτων γίνεται κυρίως με την θραύση τους στην ακτή.

Επειδή ο άνεμος είναι ένα μεταβλητό φαινόμενο από περιοχή σε περιοχή είναι φανερό πως η μορφή των κυμάτων είναι αποτέλεσμα σύνθεσης κυμάτων με διαφορετικό ύψος, μήκος και περίοδο. Η μαθηματική περιγραφή αυτών των πραγματικών κυμάτων είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα στατιστικής. Ο πιο εύκολος τρόπος να περιγράψουμε ένα κύμα είναι μέσω μια απλής ημιτονοειδούς συνάρτησης. Με τον τρόπο αυτό η ανάλυση για την επίδραση κύματος-σώματος γίνεται αρκετά πιο εύκολη και τα αποτελέσματα της μπορούν να αναχθούν και σε πραγματικά κύματα, καθώς αυτά παριστάνονται με επαλληλία διάφορων αρμονικών κυμάτων.

2.1.1) Χαρακτηριστικά κύματος

Με βάση και το παρακάτω σχήμα οι ιδιότητες του κύματος είναι:



Σχήμα 2.1. Ιδιότητες κύματος

Το μήκος κύματος (L): Είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο κορυφών (ή δύο κοίλων). Στην παρούσα εργασία θα το συμβολίζουμε με το μικρό ελληνικό γράμμα λ .

Η περίοδος κύματος (T): Είναι ο χρόνος που αντιστοιχεί για το πέρασμα δυο κορυφών από το ίδιο σημείο

Βάθος νερού (d): Η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον βυθό.

Το ύψος κύματος (H): Η κάθετη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και ενός κοίλου.

Αν το κύμα θεωρηθεί δισδιάστατο και αρμονικό τα τέσσερα παραπάνω μεγέθη αρκούν για να το περιγράψουν. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια άλλα σημαντικά μεγέθη που θα μας χρειαστούν αργότερα και προκύπτουν από τα παραπάνω. Όπως:

Αριθμός κύματος (k):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Πλάτος κύματος (A):

$$A = \frac{H}{2}$$

Συχνότητα κύματος (f):

$$f = \frac{1}{T}$$

Κυκλική συχνότητα κύματος (ω):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Ταχύτητα κύματος (c):

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$

2.1.2) Γραμμική θεωρία κύματος (θεωρία Airy)

Η επίλυση των εξισώσεων ρευστομηχανικής που διέπουν ένα κύμα είναι γενικά ένα πολύπλοκο πρόβλημα για το οποίο έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες. Η πιο απλή και δημοφιλής λύση, που βρίσκεται και σε πολλά συγγράμματα [14 έως 18], είναι η γραμμική θεωρία κύματος, η οποία απλοποιεί το πρόβλημα με βάση τις παρακάτω παραδοχές:

- Το κύμα μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατο (δε διαφοροποιείται κατά την διεύθυνση y)
- Ιδανικό ρευστό. Δηλαδή χωρίς εσωτερικές τριβές μεταξύ των μορίων τους.
- Ασυμπίεστο ρευστό. Δηλαδή σταθερή πυκνότητα
- Αστρόβιλο πεδίο ροής. Δηλαδή τα στοιχεία του ρευστού δεν περιστρέφονται.
- Ως στάθμη μηδενικής πίεσης θεωρείται η επιφάνεια του υγρού.
- Το πλάτος κύματος είναι μικρό συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και το βάθος. ($H \ll \lambda, d$)
- Οι επιφανειακές τάσεις αμελούνται.

Με τις παραδοχές της ασυμπίεστης και αστρόβιλης ροής, η εξίσωση συνέχειας, εισάγοντας το δυναμικό ταχύτητας $\Phi(x, z, t)$, παίρνει την μορφή της εξίσωσης Laplace:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Και αντίστοιχα η εξίσωση Bernoulli για ασυμπίεστη, μη μόνιμη, δυναμική ροή γίνεται:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.2)$$

Οι **οριακές συνθήκες** που χρειαζόμαστε για την λύση της Laplace είναι:

1) Ο Βυθός αποτελεί αδιαπέραστο στερεό τοίχωμα. (συνθήκη μη εισχώρησης.)

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad , \quad z = -h \quad (2.3)$$

2) Συνθήκη σταθερής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια. (χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρούμε $p=0$)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = 0 \quad , \quad z = \eta(x, t) \quad (2.4)$$

Όπου η σταθερά $f(t)$ έχει ενταχθεί στο $\partial\Phi/\partial t$. Η ελεύθερη επιφάνεια είναι $z = \eta(x, t)$

3) Ικανοποίηση της κινηματικής συνθήκης ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι μια υλική επιφάνεια, δηλαδή αποτελείται από τα ίδια σωματίδια. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως:

$$\frac{D(z - \eta(x, t))}{Dt} = 0 \quad (2.5)$$

Το οποίο με πράξεις οδηγεί στο

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial\eta}{\partial x}, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.6)$$

Παρατηρούμε (εξισώσεις 2.2, 2.6) ότι το πρόβλημα δεν ακόμα γραμμικό. Όμως με την παραδοχή του μικρού ύψους κύματος σε σύγκριση με το βάθος και το μήκος ($H \ll \lambda, d$) οι μη γραμμικοί όροι μπορούν να αμεληθούν και έτσι με τις εξισώσεις

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + g\eta = 0, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{\partial\eta}{\partial t}, \quad z = \eta(x, t) \quad (2.8)$$

$$w = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0, \quad z = -h \quad (2.9)$$

Και την Laplace, χρησιμοποιώντας μέθοδο χωρισμού μεταβλητών [18] βρίσκουμε το δυναμικό της ταχύτητας και μέσω αυτού κάθε κίνηση. Η κίνηση της επιφάνειας περιγράφεται από την σχέση:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

Ενώ η κατακόρυφη μετατόπιση κάθε σωματιδίου περιγράφεται από την σχέση:

$$\xi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{\sinh k(z + d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

Η οποία για βαθιά νερά $d/\lambda > \frac{1}{2}$ παίρνει την μορφή:

$$\xi(x, z, t) = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξίσωση:

$$\lambda = T^2 \frac{g}{2\pi} \tanh kd \quad (2.13)$$

Όπου αν έχουμε βαθιά νερά τότε το $\tanh kd$ τείνει στο 1, και $\lambda = T^2 g / 2\pi$, που σημαίνει πως το βάθος δεν επηρεάζει το μήκος κύματος (άρα και την ταχύτητα) ενώ σε ρηχά ισχύει $\lambda = T\sqrt{gd}$ και το μήκος κύματος επηρεάζεται από το βάθος.

Τέλος σημαντική και για την παρούσα εργασία είναι και η εξίσωση πίεσης:

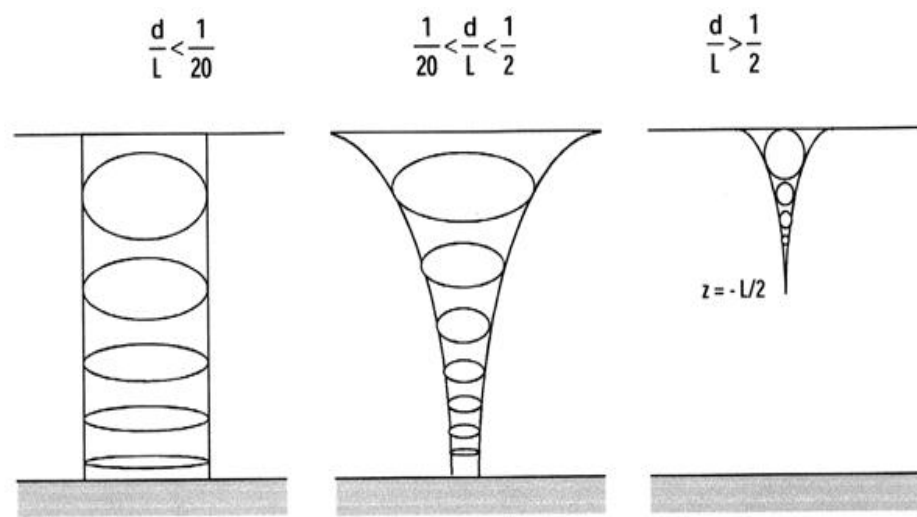
$$\frac{P}{\rho g} = \frac{H \cosh k(z+d)}{2 \sinh kd} \cos(kx - \omega t) - z \quad (2.14)$$

Η οποία για βαθιά νερά $d/\lambda > \frac{1}{2}$ παίρνει την μορφή:

$$\frac{P}{\rho g} = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) - z \quad (2.15)$$

Στον πίνακα 2.1 συνοψίζονται όλες οι εξισώσεις της γραμμικής κυματικής θεωρίας.

Παρακάτω στην εικόνα 2.1 φαίνεται η διαφορά των τροχιών των σωματιδίων του νερού σε σχέση με το σχετικό βάθος (d/λ). Βλέπουμε πως σε βαθιά νερά ($d/\lambda > \frac{1}{2}$) η κίνηση είναι κυκλική με φθίνουσα ακτίνα όσο προχωράμε προς τον βυθό. Μετά από κάποιο βάθος της τάξεως $\lambda/2$ η ακτίνα γίνεται τόσο μικρή που πρακτικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως τα στοιχεία είναι πλέον ακίνητα. Αντίθετα, στα ρηχά νερά ($d/\lambda < \frac{1}{2}$) όλα τα στοιχεία βρίσκονται σε κίνηση σχηματίζοντας ελλειπτικές τροχιές με τον οριζόντιο άξονα σχεδόν σταθερό ενώ τον κατακόρυφο να φθίνει. Στον πυθμένα η κίνηση είναι σχεδόν οριζόντια. Τέλος στα ενδιάμεσα ύδατα εμφανίζεται μια μέση κατάσταση.



Εικόνα 2.1 Τροχιές σωματιδίων με σχετικό βάθος [17]

Πίνακας 2.1. εξισώσεις της γραμμικής κυματικής θεωρίας:

Σχετικό Βάθος Σχετικό Μήκος Κύματος	Ρηχά Νερά – Μακρά Κύματα $\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	Γενικές Εξισώσεις	Βαθιά Νερά – Βραχέα Κύματα $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
Στάθμη Επιφάνειας	$\eta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$ $\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$ $k=2\pi/L$ $\omega=2\pi/T$		
Μήκος κύματος	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)$	$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$
Ταχύτητα Κύματος	$c = \sqrt{gd}$	$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd)$	$c = \frac{gT}{2\pi}$
Φασική ταχύτητα ομάδας	$c_g = c = \sqrt{gd}$	$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$	$c_g = \frac{1}{2} c = \frac{gT}{4\pi}$
Οριζόντια μετατόπιση σωματιδίου	$\varsigma = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin(kx - \omega t)$	$\varsigma = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$	$\varsigma = -\frac{H}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη μετατόπιση σωματιδίου	$\xi = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$	$\xi = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$	$\xi = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Οριζόντια ταχύτητα σωματιδίου	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη ταχύτητα σωματιδίου	$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \sin(kx - \omega t)$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t)$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$
Οριζόντια επιτάχυνση σωματιδίου	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin(kx - \omega t)$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \left[\frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kh} \right] \sin(kx - \omega t)$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \sin(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη επιτάχυνση σωματιδίου	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$	$a_z = -\frac{g\pi}{L} \frac{H}{L} \left[\frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kh} \right] \cos(kx - \omega t)$	$a_x = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Πίεση	$\frac{P}{\rho g} = \eta - z$	$\frac{P}{\rho g} = \eta \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} - z$	$\frac{P}{\rho g} = \eta e^{kz} - z$

2.1.3) Ενέργεια κύματος:

Η μέση ενέργεια του κύματος είναι το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας λόγω της κατακόρυφης ταλάντωσης και της κινητικής λόγω της κυκλικής κίνησης των στοιχείων του νερού.

Η μέση δυναμική ενέργεια ανά οριζόντια επιφάνεια κύματος υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την σχέση $d(E_p) = \rho g \bar{\xi} dV$ όπου $\bar{\xi} = \frac{1}{2}\xi$ είναι το κέντρο βάρους του στοιχειώδους όγκου και $dV = \xi dx$. Έτσι θεωρώντας ημιτονοειδές κύμα προκύπτει:

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g A^2 \quad (J/m^2) \quad (2.16)$$

Η δυναμική ενέργεια ανά οριζόντια επιφάνεια κύματος υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την σχέση $d(E_K) = \frac{1}{2}(u^2 + w^2)\rho dx dz$ όπου u, w είναι η ταχύτητα κατά την οριζόντια και κάθετη διεύθυνση αντίστοιχα. Προκύπτει:

$$E_K = \frac{1}{4} \rho g A^2 \quad (J/m^2) \quad (2.17)$$

Παρατηρούμε δηλαδή πως στην περίπτωση ημιτονοειδούς κύματος η δυναμική και η κινητική ενέργεια είναι ίσες. Η συνολική ενέργεια είναι το άθροισμα τους:

$$E = E_p + E_K = \frac{1}{2} \rho g A^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.18)$$

Από την ενέργεια μπορούμε να υπολογίσουμε και την ροή ενέργειας J . Αυτή μετριέται σε kW ανά μέτρο μετώπου κύματος και δίνεται από τη σχέση:

$$J = E c_g \quad (2.19)$$

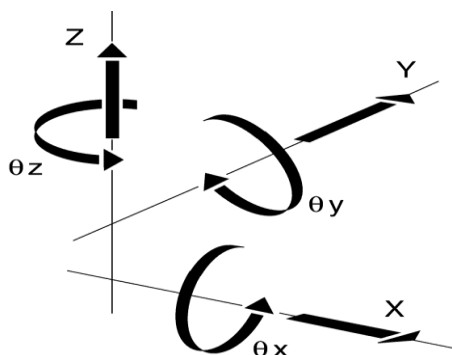
Όπου c_g ορίζεται η φασική ταχύτητα ομάδας (ταχύτητα πολλαπλών κυμάτων) που παριστάνει την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ενέργεια. Για βάθια νερά σύμφωνα και με τον πίνακα 2.1 ισούται με $c_g = \frac{1}{2}c = \frac{gT}{4\pi}$ άρα τελικά

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} T H^2 \quad (2.20)$$

2.2) ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ-ΣΩΜΑΤΟΣ

2.2.1) Δυνάμεις

Όλα τα σώματα που βρίσκονται στη θαλάσσια επιφάνεια και είτε επιπλέουν ελεύθερα σε αυτήν, είτε είναι προσδεμένα στο βυθό, δέχονται δυνάμεις από τα κύματα, οι οποίες καθορίζουν την κίνηση τους. Η κίνηση τους είναι μια σύνθετη κίνηση αποτελούμενη από έξι επιμέρους παλινδρομικές κινήσεις στον τρισδιάστατο χώρο. Αυτές είναι οι τρεις γραμμικές κατά τους άξονες x,y,z (surge,sway,heave αντίστοιχα) και οι τρεις περιστροφικές $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ (roll,pitch,yaw) όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα. Μια συσκευή κυματικής ενέργειας μπορεί να κατασκευαστεί έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται μία από αυτές τις κινήσεις ή συνδυασμό τους. Η κίνηση που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία είναι η κατακόρυφη κατά τον άξονα z (heave).



Σχήμα 2.2 Δυνατές κινήσεις σώματος

Ανωστική Δύναμη πλωτήρα (buoyancy force) F_b :

Η ανωστική δύναμη που δέχεται ένας πλωτήρας όταν εκτοπιστεί από το σημείο ισορροπίας του ισούται με

$$dF = \rho g dV \quad (2.21)$$

Η οποία για κατακόρυφη ταλάντωση κυλινδρικού πλωτήρα με ολοκλήρωση γίνεται:

$$F_b = -\rho g S_w z \quad (2.22)$$

Όπου S_w η επιφάνεια του πλωτήρα.

Δύναμη Ακτινοβολίας (Radiation force) F_r :

Η δύναμη ακτινοβολίας γίνεται κατανοητή αν θεωρήσουμε ένα πλωτήρα που ταλαντώνεται με γωνιακή συχνότητα ω στην ελεύθερη επιφάνεια χωρίς την ύπαρξη κυματισμού. Ο πλωτήρας θα παράγει κύματα και η ταλάντωση του θα αποσβίνει μέχρι να σταματήσει τελείως. Μαθηματικά η δύναμη αυτή υπολογίζεται με χρήση του δυναμικού της ακτινοβολούμενης ταχύτητας Φ_r [15]

$$F_{r,j} = i\omega\rho \iint_S (\hat{\Phi}_r \eta_j) dS = -Z_{j,j} \hat{v}_j \quad (2.23)$$

Όπου Z_{ji} είναι η αντίσταση ακτινοβολίας και $\hat{v}_j$ η ταχύτητα του πλωτήρα. Για την περίπτωση της κατακόρυφης μετατόπισης z , η δύναμη ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου γράφεται:

$$F_r = -m_a \ddot{z} - b \dot{z} \quad (2.24)$$

Όπου m_a είναι η πρόσθετη μάζα και b ο συντελεστής απόσβεσης

Πρόσθετη μάζα:

Για να επιταχυνθεί ένα σώμα που βρίσκεται βυθισμένο στο νερό απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη από ότι στο κενό. Αυτό συμβαίνει γιατί μαζί με το σώμα, επιταχύνεται και μάζα νερού m_a , γύρω από το σώμα. Έτσι προκύπτει:

$$F' = (m + m_a)a > F = ma$$

Για την πρόσθετη μάζα ισχύει:

$$m_a = C_A m = C_A \rho V \quad (2.25)$$

Όπου C_A είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας και V ο βυθισμένος όγκος του πλωτήρα. Το C_A είναι συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας ω και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλωτήρα. Η εύρεση του είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα. Ωστόσο, για απλές γεωμετρίες όπως κύλινδροι και σφαίρες και για βαθιά νερά υπάρχουν προσεγγιστικές λύσεις ανεξάρτητες του ω , όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.2.

Συντελεστής απόσβεσης b :

Ο συντελεστής απόσβεσης της συσκευής είναι και αυτός συνάρτηση του ω . Είναι πολύ σημαντικό μέγεθος γιατί μέσω αυτού υπολογίζουμε την μέγιστη ισχύ όπως θα δούμε παρακάτω. Σε αξονοσυμμετρικά σώματα που ταλαντώνονται κατά των άξονα z δίδεται από τη σχέση:

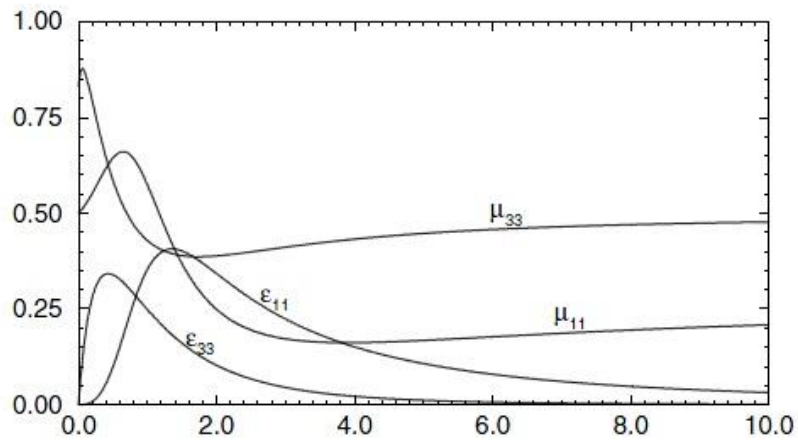
$$b = \epsilon_3 \omega \alpha^3 2\pi/3 \quad (2.26)$$

Όπου ϵ_3 συντελεστής και α η ακτίνα του σώματος στην επιφάνεια της θάλασσας.

Μια άλλη σημαντική σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή για αξονοσυμμετρικά σώματα είναι αυτή που τον συνδέει με την δύναμη διέγερσης F_e , που θα αναλύσουμε παρακάτω:

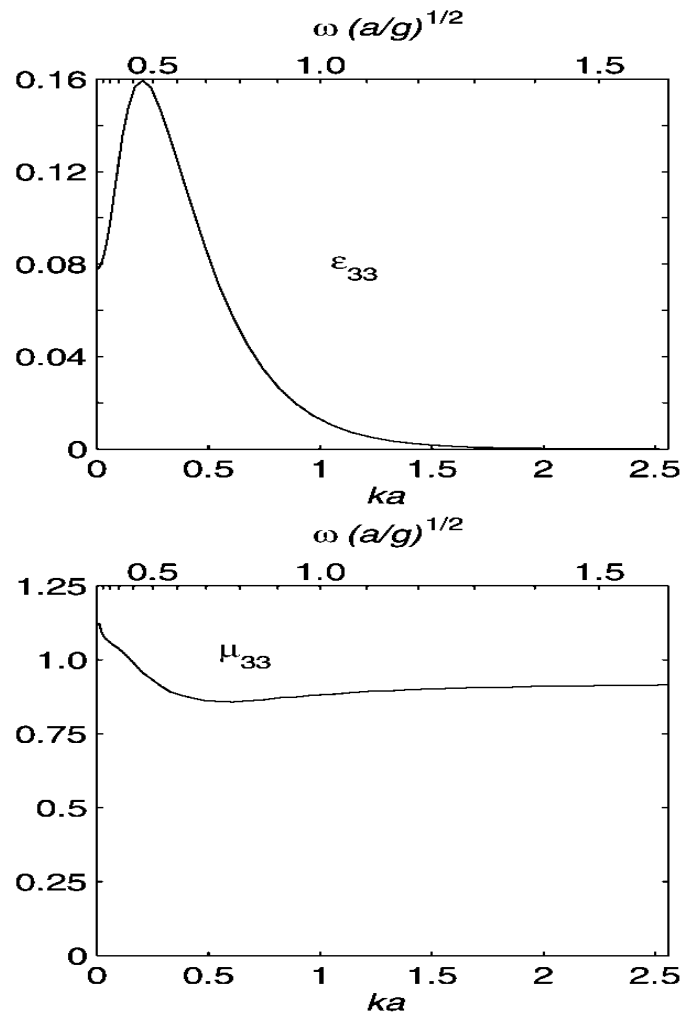
$$b = \left(\frac{k}{8J}\right) F_e^2 = \left(\frac{\omega k}{2\rho g^2}\right) \frac{F_e^2}{A^2} \quad (2.27)$$

Στο σχήμα 2.3 φαίνονται για την κατακόρυφη και οριζόντια κίνηση οι σταθερές C_A (μ_{33}, μ_{11}) και $\epsilon_{33}, \epsilon_{11}$ για ημιβυθισμένη σφαίρα ακτίνας a συναρτήσει του $ka = (\omega^2/g)a$



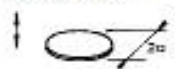
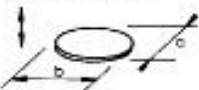
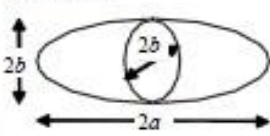
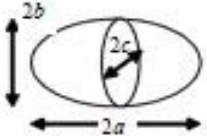
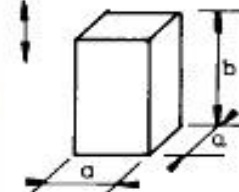
Σχήμα 2.3. Υδροδυναμικές σταθερές σφαίρας.[15]

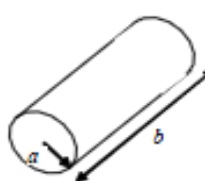
Στο σχήμα 2.4 φαίνονται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση κυλίνδρου ακτίνας a και βυθίσματος $b=1,88a$ σε βάθος $h=15a$.



Σχήμα 2.4. Παράδειγμα υδροδυναμικών σταθερών κυλίνδρου.

Table A-2 Analytical added mass coefficient for three-dimensional bodies in infinite fluid (far from boundaries). Added mass is $A_{ij} = \rho C_A V_R$ [kg] where V_R [m³] is reference volume

Body shape		Direction of motion	C_A				V_R
Flat plates	Circular disc 	Vertical	$2/\pi$				$\frac{4}{3} \pi a^3$
	Elliptical disc 	Vertical	b/a	C_A	b/a	C_A	$\frac{\pi}{6} a^2 b$
			∞	1.000	5.0	0.952	
			14.3	0.991	4.0	0.933	
			12.8	0.989	3.0	0.900	
			10.0	0.984	2.0	0.826	
			7.0	0.972	1.5	0.758	
			6.0	0.964	1.0	0.637	
	Rectangular plates 	Vertical	b/a	C_A	b/a	C_A	$\frac{\pi}{4} a^2 b$
			1.00	0.579	3.17	0.840	
			1.25	0.642	4.00	0.872	
			1.50	0.690	5.00	0.897	
			1.59	0.704	6.25	0.917	
			2.00	0.757	8.00	0.934	
			2.50	0.801	10.00	0.947	
			3.00	0.830	∞	1.000	
	Triangular plates 	Vertical	$\frac{1}{\pi} (\tan \theta)^{3/2}$				$\frac{a^3}{3}$
Bodies of revolution	Spheres 	Any direction	$1/2$				$\frac{4}{3} \pi a^3$
	Spheroids 	Lateral or axial	a/b	C_A			$\frac{4}{3} \pi b^2 a$
				Axial	Lateral		
			1.0	0.500	0.500		
			1.5	0.304	0.622		
			2.0	0.210	0.704		
			2.5	0.156	0.762		
			4.0	0.082	0.860		
			5.0	0.059	0.894		
			6.0	0.045	0.917		
			7.0	0.036	0.933		
			8.0	0.029	0.945		
Ellipsoid	 Axis $a > b > c$	Axial	$C_A = \frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0}$ where $\alpha_0 = \varepsilon \delta \int_0^{\pi/2} (1+u)^{-1/2} (\varepsilon^2 + u)^{-1/2} (\delta^2 + u)^{-1/2} du$ $\varepsilon = b/a$ $\delta = c/a$				$\frac{4}{3} \pi abc$
Square prisms		Vertical	b/a	C_A			$a^2 b$
			1.0	0.68			
			2.0	0.36			
			3.0	0.24			
			4.0	0.19			
			5.0	0.15			
			6.0	0.13			
			7.0	0.11			
			10.0	0.08			

Body shape		Direction of motion	C_A		V_R
Right circular cylinder		Vertical	$b/2a$	C_A	$\pi a^2 b$
			1.2	0.62	
			2.5	0.78	
			5.0	0.90	
			9.0	0.96	
			∞	1.00	

Πινάκας 2.2. Συντελεστής πρόσθετης μάζας απλών γεωμετριών.[19]

Δύναμη διέγερσης (excitation force) F_e :

Η δύναμη διέγερσης είναι η δύναμη που ασκείται στον πλωτήρα από το προσπίπτον κύμα, όταν αυτός κρατείται σε σταθερό βύθισμα χωρίς να ταλαντώνεται. Μαθηματικά αυτό ορίζεται ως εξής:

$$F_{e,j} = i\omega\rho \iint_S (\hat{\phi}_0 + \hat{\phi}_a) \eta_j dS \quad (2.28)$$

Όπου το $\hat{\phi}_0$ αντιπροσωπεύει το δυναμικό του ανενόχλητου κύματος και το $\hat{\phi}_a$ το κύμα από περίθλαση (diffraction). Με τον όρο περίθλαση εννοούμε το ανακλώμενο κύμα που προκύπτει λόγω του σώματος-εμποδίου. Η δύναμη μπορεί να χωριστεί έτσι σε:

$$F_e = F_{FK} + F_D \quad (2.29)$$

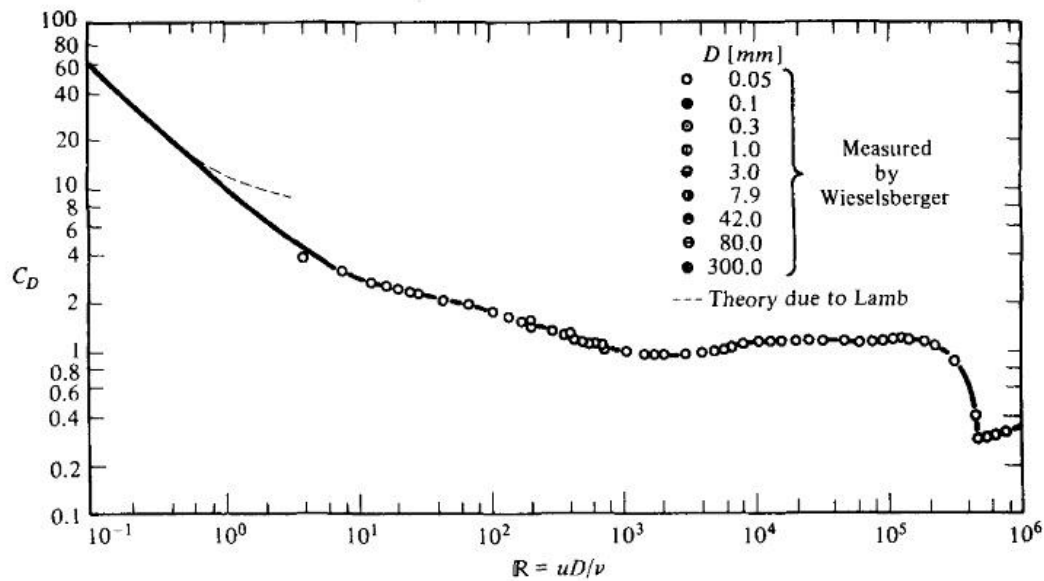
Η F_{FK} ονομάζεται δύναμη Froude-Krylov και υπερτερεί της δύναμης περίθλασης F_D όταν το πλωτό σώμα είναι μικρών διαστάσεων, της τάξεως $\pi D/\lambda < 0,5$ (όπου D η σημαντική διάσταση). Αντίθετα, στα μεγάλα σώματα επικρατούν κυρίως φαινόμενα περίθλασης. Η εύρεση της F_e είναι και αυτό ένα δύσκολο πρόβλημα για σύνθετες γεωμετρίες. Ωστόσο σε μικρά αξονοσυμμετρικά σώματα μπορεί να υπάρξει αναλυτική λύση, όπως θα δούμε παρακάτω.

Δύναμη αντίστασης (Drag force) F_v :

Παρ' όλο που για τη διατύπωση της γραμμικής θεωρίας κύματος θεωρήσαμε μη-συνεκτικό ρευστό, κάποιες φορές είναι απαραίτητο να εισάγουμε και την γνωστή από τη μηχανική των ρευστών δύναμη αντίστασης, λόγω της κίνησης του σώματος σε ρευστό, η οποία εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας:

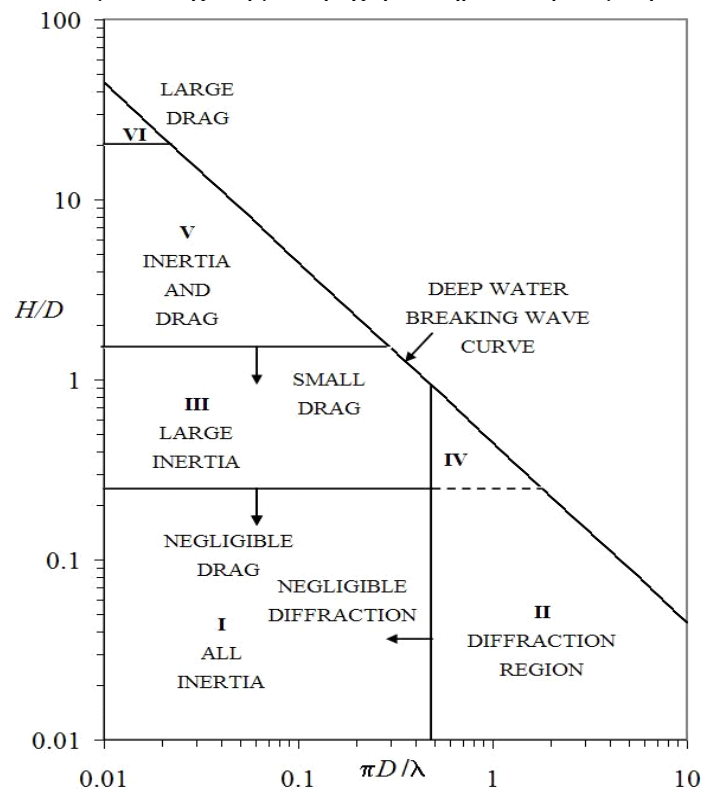
$$F_v = -\frac{1}{2} \rho C_d S_w |v|v \quad (2.30)$$

Όπου C_d είναι ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης και προκύπτει από ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Στο παρακάτω σχήμα δίδονται διάφορες τιμές του συντελεστή συναρτήσει του αριθμού Reynolds για λείο κύλινδρο μεγάλου μήκους σε σχέση με την διάμετρο.



Σχήμα 2.5 Συντελεστής C_d για κύλινδρο[17]

Προηγουμένως είδαμε πως η δύναμη περίθλασης έχει μεγαλύτερη συνεισφορά στις μεγάλες κατασκευές. Η δύναμη αντίστασης από την άλλη πλευρά είναι πιο δραστική στα πολύ μικρά σώματα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την επίδραση που έχουν οι δυνάμεις που αναλύσαμε σε σχέση με την χαρακτηριστική διάμετρο τους D .

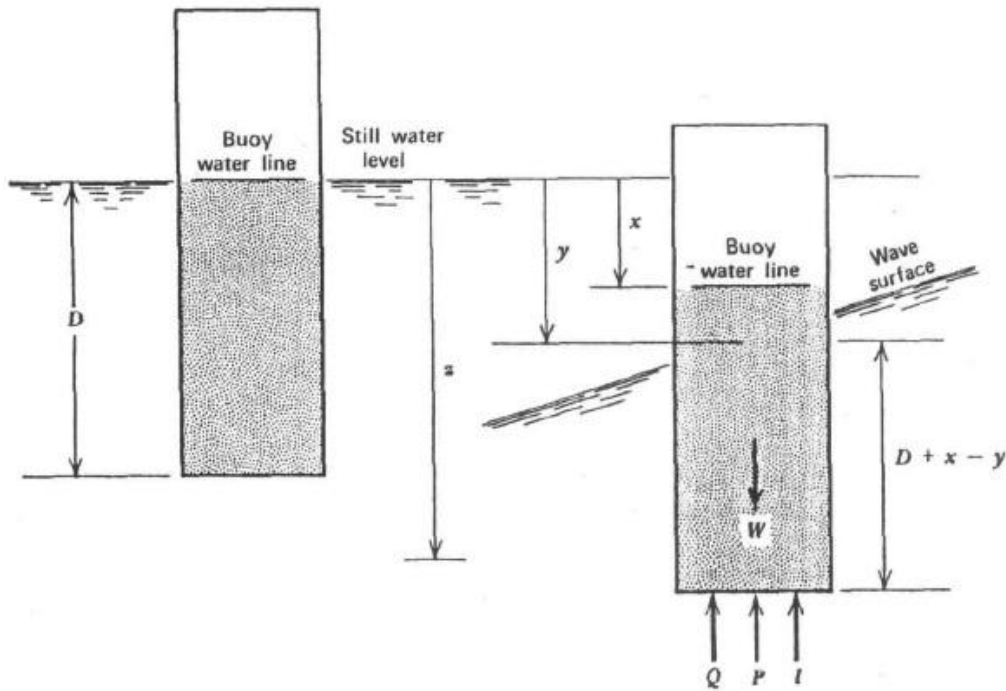


Σχήμα 2.6. Κύριες δυνάμεις σε σχέση με το $\pi D/\lambda$ [19]

2.2.2) Κατακόρυφη κίνηση κυλινδρικού πλωτήρα σε αρμονικό κύμα

Για το πρόβλημα της κατακόρυφης κίνησης κυλινδρικού πλωτήρα που δέχεται απλά αρμονικά κύματα μπορεί να υπάρξει αναλυτική λύση [18]:

Με βάση το παρακάτω σχήμα διακρίνουμε:



Σχήμα 2.7

- x , η κατακόρυφη απόσταση από το σημείο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέχρι το σημείο της επιφάνειας του πλωτήρα σε ηρεμία.
- y , η μετατόπιση του κύματος που στην περίπτωση αρμονικού κυματισμού είναι $y = A \cos \omega t$.
- z , η απόσταση από την επιφάνεια μέχρι οποιοδήποτε σημείο του νερού. Θετική φορά προς τα κάτω.

Η εξίσωση κίνησης με βάση τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα είναι:

$$m\ddot{x} = W - P - Q - I \quad (2.31)$$

Και οι δυνάμεις αναλύονται σε:

Βάρος του σώματος W , που ισούται με το βάρος του νερού που εκτοπίζει ο πλωτήρας

$$W = \rho g S_w D \quad (2.32)$$

Το D είναι το βύθισμα και το S_w το εμβαδόν.

Πίεση P στο κάτω μέρος του πλωτήρα. Με βάση την γραμμική θεωρία κύματος και τον πίνακα 2.1 η πίεση για βαθιά νερά δίδεται από την σχέση:

$$P = \rho g S_w (z - y e^{-kz}) = \rho g S_w (x + D - y e^{-kz}) \quad (2.33)$$

Και επειδή το z είναι σχεδόν ίσο με το D προκύπτει

$$P = \rho g S_w D + \rho g S_w x - \rho g S_w y e^{-kD} \quad (2.34)$$

Δύναμη απόσβεσης Q , που είναι ανάλογη στη σχετική ταχύτητα πλωτήρα-νερού

$$Q = b(\dot{x} - \dot{y} e^{-kD}) \quad (2.35)$$

Αδρανειακή δύναμη I , που είναι ανάλογη στη σχετική επιτάχυνση πλωτήρα-νερού

$$I = m_\alpha(\ddot{x} - \ddot{y} e^{-kD}) \quad (2.36)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.31 ως 2.36 καταλήγουμε στη

$$(m + m_\alpha)\ddot{x} + b\dot{x} + \rho g S_w x = (m_\alpha\ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y) e^{-kD} \quad (2.37)$$

Όμως λόγω απλού αρμονικού κύματος ισχύει $y = A \cos \omega t$, $\dot{y} = -\omega A \sin \omega t$, $\ddot{y} = -\omega^2 A \cos \omega t$. Και η 2.29 γίνεται

$$(m_\alpha\ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y) e^{-kD} = F_e \quad (2.38)$$

ή

$$(m_\alpha\ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y) e^{-kD} = F_E \cos(\omega t + \sigma) \quad (2.39)$$

Με

$$F_E = A e^{-kD} \sqrt{(\rho g S_w - m_\alpha \omega^2)^2 + b^2 \omega^2} \quad (2.40)$$

Η F_e είναι η δύναμη διέγερσης που περιγράψαμε παραπάνω και έχει διαφορά φάσης

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{-b\omega}{\rho g S_w - m_\alpha \omega^2} \quad (2.41)$$

σε σχέση με το κύμα. Πρακτικά για μικρές τιμές συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν το σ τείνει στο μηδέν.

Η εξίσωση 2.39 έχει αναλυτική λύση, απαλλαγμένη από τις αρχικές συνθήκες καθώς το φαινόμενο είναι περιοδικό, και μπορεί να βρεθεί σε διάφορα συγγράμματα [18]. Στην παρούσα εργασία λόγω και των δυνάμεων του μηχανισμού παραγωγής ενέργειας η τελική εξίσωση παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και λύνεται μόνο με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Ωστόσο από τα παραπάνω είναι χρήσιμη για την συνέχεια η εξίσωση 2.40 που μας δίνει με καλή προσέγγιση την δύναμη διέγερσης σε κύλινδρο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

2.2.3) Απορροφούμενη ενέργεια κύματος από πλωτήρα

Καθώς το κύμα συναντά τον πλωτήρα ένα μέρος της ενέργειας του μεταφέρεται σε αυτόν. Γενικά ισχύει ο κανόνας πως ένα καλός απορροφητής ενέργειας πρέπει να είναι ταυτόχρονα και καλός δημιουργός κυμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο απορροφητής ουσιαστικά πρέπει να λειτουργήσει καταστροφικά προς το κύμα και να μετατοπίσει το νερό με κατάλληλη διαφορά φάσης, ώστε να απορροφήσει την μέγιστη ενέργεια. Αυτό γίνεται αντιληπτό, όταν για παράδειγμα ένα ταλαντούμενο σώμα δημιουργεί κύματα αντίθετης φάσης του μετωπικού.

Για συμμετρικό πλωτήρα που κινείται μόνο σε μια διεύθυνση, έστω την κατακόρυφη, αποδεικνύεται πως μόνο το 50% της ενέργειας του κύματος μπορεί θεωρητικά να απορροφηθεί [15]. Στην ιδανική περίπτωση μέγιστης απορρόφησης τα κύματα που ακτινοβολούνται δεξιά και αριστερά του σημειακού απορροφητή, έχουν πλάτος ίσο με το μισό του προσπίπτοντος κύματος με αποτέλεσμα να μοιράζονται το υπόλοιπο 50% της ισχύος.

Για αρμονικό κύμα η μέγιστη αυτή απορρόφηση επιτυγχάνεται στην κατάσταση συντονισμού, όταν δηλαδή η ταχύτητα ταλάντωσης είναι σε φάση με τη διεγείρουσα δύναμη. Τότε η συχνότητα συντονισμού δίδεται από τη σχέση:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S_w}{m + m_a}} \quad (2.42)$$

Το γινόμενο $\rho g S_w$ λέγεται αλλιώς και υδροδυναμική ακαμψία.

Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη απορροφούμενη ισχύς από τον πλωτήρα είναι:

$$P_{max} = \frac{|F_e|^2}{8b} \quad (2.43)$$

Από την μέγιστη απορροφούμενη ισχύ και τις σχέσεις 2.20 και 2.27 προκύπτει το θεωρητικό πλάτος μέγιστης απορρόφησης L_{max} για συμμετρικό σώμα κατά τον κατακόρυφο άξονα της ταλάντωσης. Το μέγεθος αυτό είναι θεωρητικό και εκφράζει το μέτωπο κύματος σε m το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με το κυματικό δυναμικό (kW/m) θα απέδιδε την ίδια ισχύ με το συμμετρικό σώμα.

$$L_{max} = \frac{P_{max}}{J} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.44)$$

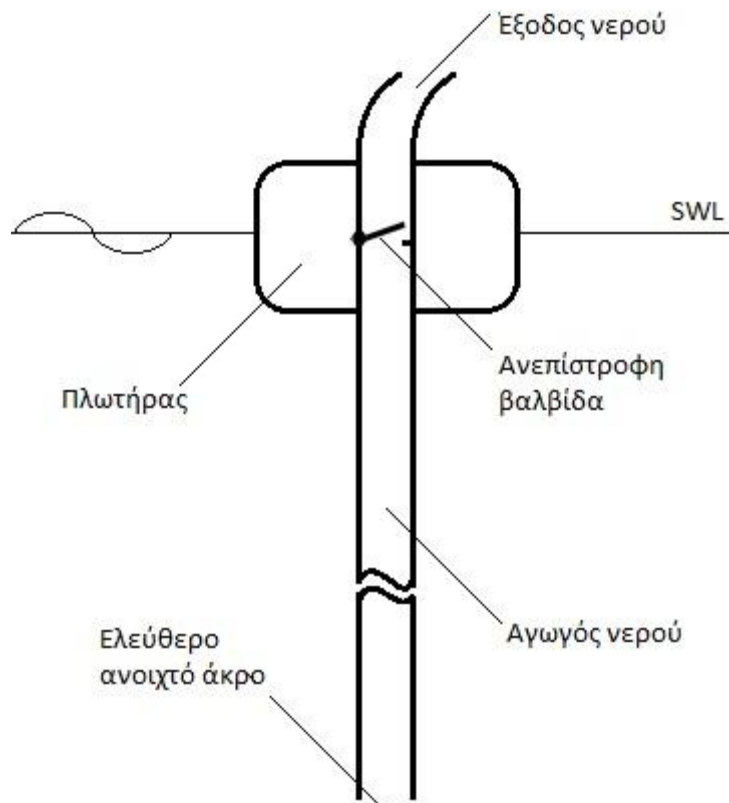
Στη πράξη, οι καταστάσεις συντονισμού αντιστοιχούν σε μικρό εύρος συχνοτήτων. Έτσι λόγω των συχνών μεταβολών των κυμάτων μιας περιοχής, οι συσκευές λειτουργούν την μεγαλύτερη περίοδο εκτός συντονισμού. Τα κυματικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής βέβαια, είναι ένα σημαντικό δείγμα για το εύρος λειτουργίας και άρα για τις λειτουργικές διαστάσεις. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται διάφορες τεχνολογίες ελέγχου, όπως για παράδειγμα η κατάλληλη συγκράτηση του σώματος κατά την διάρκεια της κίνησης του, η προσθήκη ή αφαίρεση απόσβεσης για επίτευξη συντονισμού κ.α.

3. ΣΥΣΚΕΥΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

3.1.1) Γενικά

Η συσκευή που θα μοντελοποιηθεί είναι μια μη-εμβολοφόρος παλινδρομική αντλία που εκμεταλλεύεται την κατακόρυφη κίνηση πλωτήρα, ο οποίος επιπλέει ελεύθερα στον θαλάσσιο κυματισμό. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, η αντλία αποτελείται από έναν κατακόρυφο μακρύ σωλήνα που προσδένεται στον πλωτήρα και που στο επάνω άκρο του, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, φέρει ανεπίστροφη βαλβίδα, ενώ το κάτω παραμένει ανοιχτό ώστε να διέρχεται ελεύθερα μέσα του το νερό.



Σχήμα 3.1. Σχηματική διάταξη της συσκευής

Η λειτουργία του βασίζεται στο γεγονός πως καθώς ο πλωτήρας επιταχύνεται σε ανοδική πορεία από το κατώτατο σημείο της ταλάντωσής του, προσδίδει επιτάχυνση και στην στήλη νερού που εμπεριέχεται στο σωλήνα. Κάποια στιγμή, όταν ο πλωτήρας θα έχει περάσει το σημείο ισορροπίας της ταλάντωσης του και θα έχει

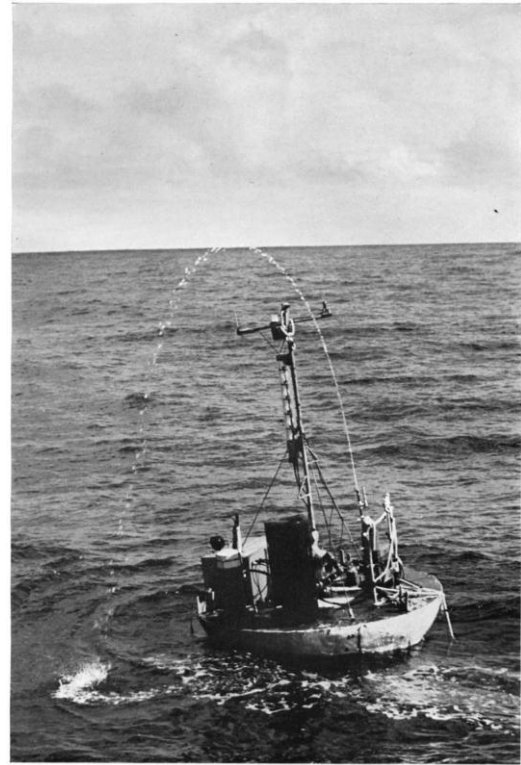
αρχίσει να επιβραδύνεται, η βαλβίδα θα ανοίξει λόγω της μεγάλης αδρανειακής δύναμης της στήλης που τείνει να διατηρήσει την ορμή της. Το νερό αυτό θα τροφοδοτήσει αεροκώδωνα ορισμένης πίεσης και αυτός με την σειρά του υδροστροβίλο συνδεδεμένο με γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τροφοδοσία θα σταματήσει όταν ξανακλείσει η βαλβίδα, την χρονική στιγμή που η σχετική ταχύτητα στήλης νερού-πλωτήρα γίνει πάλι ίση, περίπου κοντά στο κατώτατο σημείο της ταλάντωσης.

Πρόκειται δηλαδή για έναν σημειακό απορροφητή που εκμεταλλεύεται την σχετική κίνηση πλωτήρα-νερού και που προορίζεται να λειτουργήσει στην υπεράκτια ζώνη, λόγω των ευνοϊκότερων κυματικών φαινομένων αλλά και του μεγάλου μήκους αγωγού. Το πλεονέκτημα της προτεινόμενης συσκευής είναι πώς το μόνο κινούμενο μέρος, πέρα από τον σύστημα υδροστροβίλου-γεννήτριας, το οποίο εξάλλου θα μπορούσε να είναι κοινό για συνδυασμό πολλών συσκευών, είναι η βαλβίδα αντεπιστροφής. Αυτό μειώνει αρκετά το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος.

3.1.1) Ιστορικά στοιχεία συσκευής

Η βασική λειτουργία της συσκευής που περιγράψαμε παραπάνω, έχει απασχολήσει στο παρελθόν κάποιους ερευνητές. Ο πρώτος που φαίνεται να συνέλαβε την ιδέα μια τέτοιας αντλίας είναι ο αμερικανός ερευνητής, μηχανικός και καθηγητής ωκεανογραφίας *John Dove Isaacs*. Ο *Isaacs* και οι συνεργάτες του ασχολήθηκαν με την μοντελοποίηση και την κατασκευή μιας τέτοιας αντλίας από τις αρχές της δεκαετίας του 70' έως το 1977. Οι δοκιμές που έγιναν σε τρεις διαφορετικές τέτοιες αντλίες επιβεβαίωσαν σε ικανοποιητικό βαθμό τα θεωρητικά αποτελέσματα [20].

Συγκεκριμένα το 1972 δοκιμάστηκε μια αντλία διαμέτρου 0,2 m και μήκους 61 m, η οποία παρόλο που δεν λειτούργησε στα αναμενόμενα κύματα είχε την θεωρητική απόδοση των κυμάτων λειτουργίας της. Το 1975 μια άλλη αντλία διαμέτρου 0,05 m και μήκους 92 m, αν και λειτούργησε και αυτή σε σχετικά ήρεμα νερά, είχε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα λόγω του καλύτερα κατασκευασμένου πλωτήρα. Τέλος το 1976-1977 μια βελτιωμένη έκδοση του προηγούμενου μοντέλου αποτελούμενη από συνδυασμό τριών αγωγών διαμέτρου 3,6x2 cm και 5 cm, κατάφερε και αυτή να αποδώσει την θεωρητική ισχύ μεταξύ 100 W και 300 W παρά τα πολλά τεχνικά προβλήματα που προέκυψαν όπως αστοχία γεννήτριας, σχοιनिών αγκύρωσης κ.α. (εικόνα 3.1-3.2).[21]



Εικόνα 3.1-3.2. Η αντλία του Isaacs ανοιχτά του νησιού Οάχου της Χαβάης. Νοέμβριος 1976-Μάρτιος 1977.

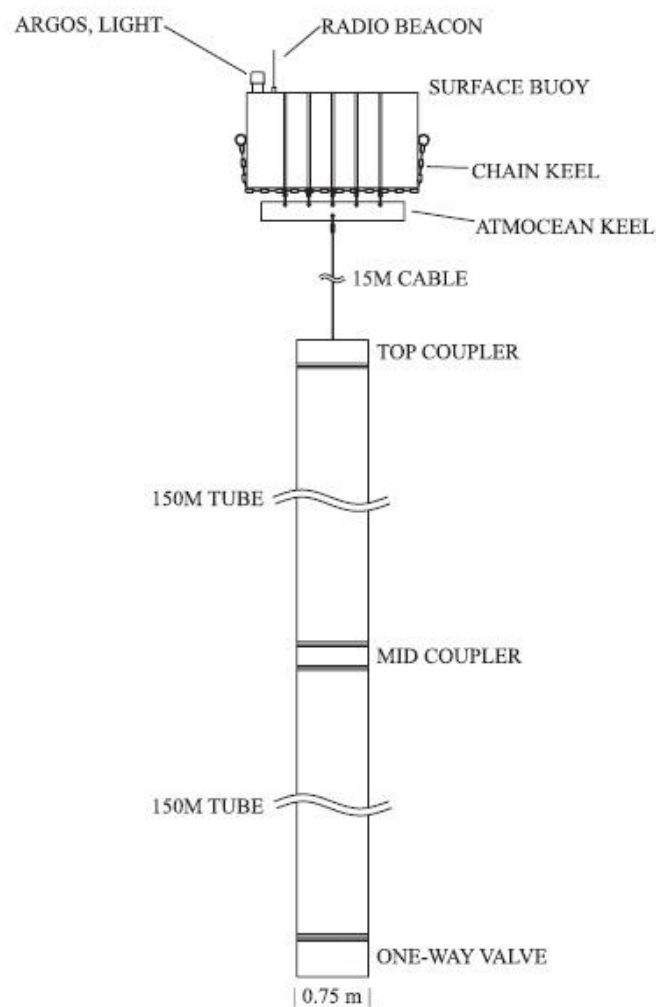
Ο Isaacs μετά από αυτές τις δοκιμές πρότεινε ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρικό σταθμό αποτελούμενο από πολλές τέτοιες συσκευές που θα λειτουργούσαν με κοινό υδροστρόβιλο. Η κάθε μία θα είχε μήκος 153 m και διάμετρο $0,92\text{ m}$ και σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς θα απέδιδε 50 kW . Η πρόταση υποβλήθηκε στην κυβέρνηση των ΗΠΑ αλλά καμία δραστηριότητα δεν εκδηλώθηκε και ο Isaacs δεν ασχολήθηκε ποτέ ξανά με την συσκευή μέχρι τον θάνατο του το 1980 [22,23].

Έκτοτε, η συσκευή δεν φαίνεται να έχει απασχολήσει ερευνητές για παραγωγή ενέργειας, αλλά για άντληση θαλασσινού νερού από μεγάλα βάθη, το οποίο είναι καθαρό και πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, γεγονός που το κάνει κατάλληλο για την χρησιμοποίησή του σε ιχθυοκαλλιέργειες.

Σημαντικότερη δραστηριότητα σε αυτό υπήρξε στο πανεπιστήμιο της Χαβάης το 1992-1994 από τους Clark Liu και Qiao Jin [24], που μοντελοποίησαν μια τέτοια συσκευή και πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές σε εργαστήριο του πανεπιστημίου. Οι ερευνητές όχι μόνο επιβεβαίωσαν τα θεωρητικά αποτελέσματα πειραματικά, αλλά ισχυρίστηκαν πως οι προηγούμενοι ερευνητές είχαν υποτιμήσει την δυνατότητα της συσκευής, και πως αυτή λειτουργεί ακόμα καλύτερα σε αληθινά κύματα από ότι στην απλοποιημένη μοντελοποίηση σε απλά ημιτονοειδή. Συγκεκριμένα υπολόγισαν πως μια θεωρητική συσκευή μήκους 300 m και διαμέτρου

1,2 m θα απέδιδε 0,45 m³/s σε κανονικά κύματα και 0,95 m³/s στα τυχαία κύματα της Χαβάης.

Η πιο πρόσφατη αναφορά σε αντλία καθοδηγούμενη από τα κύματα εντοπίζεται το 2010 [25]. Η αντλία αυτή, που δοκιμάστηκε και αυτή ανοιχτά της Χαβάης το 2008, χρησιμοποιήθηκε για την άντληση θαλασσινού νερού από βάθος 300 m. Η λειτουργία της είναι παρόμοια με την προτεινόμενη, αλλά όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3, σχεδιαστικά διαφέρει στο ότι η αντλία-αγωγός δεν συνδέεται με τον πλωτήρα απευθείας αλλά μέσω ενός καλωδίου. Επίσης η βαλβίδα αντεπιστροφής βρίσκεται στο κάτω μέρος του αγωγού. Η αντλία κατάφερε να αποδώσει κατά μέσο όρο 45 m³/h, αλλά καταστράφηκε λόγω των ισχυρών τάσεων που επικρατούν στο ωκεανό.



Εικόνα 3.3. Σχηματική αναπαράσταση αντλίας που χρησιμοποιήθηκε για ανάβλυση το 2008

Οι παραπάνω προσπάθειες μπορούν να χαρακτηριστούν ενθαρρυντικές για την λειτουργία της συσκευής καθώς σε καμία περίπτωση τα θεωρητικά αποτελέσματα δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα πειραματικά παρά τις αναγκαίες παραδοχές που γίνονται. Τα προβλήματα που εμφανίστηκαν στο παρελθόν ήταν κυρίως τεχνολογικής φύσεως και αν αναλογιστούμε πως η συσκευή που εξετάζεται εδώ μοιάζει κυρίως με την συσκευή του Isaacs, είναι σχεδόν σίγουρο πως κάποια από αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με μεγαλύτερη ευκολία σήμερα από ότι πριν τρεις δεκαετίες.

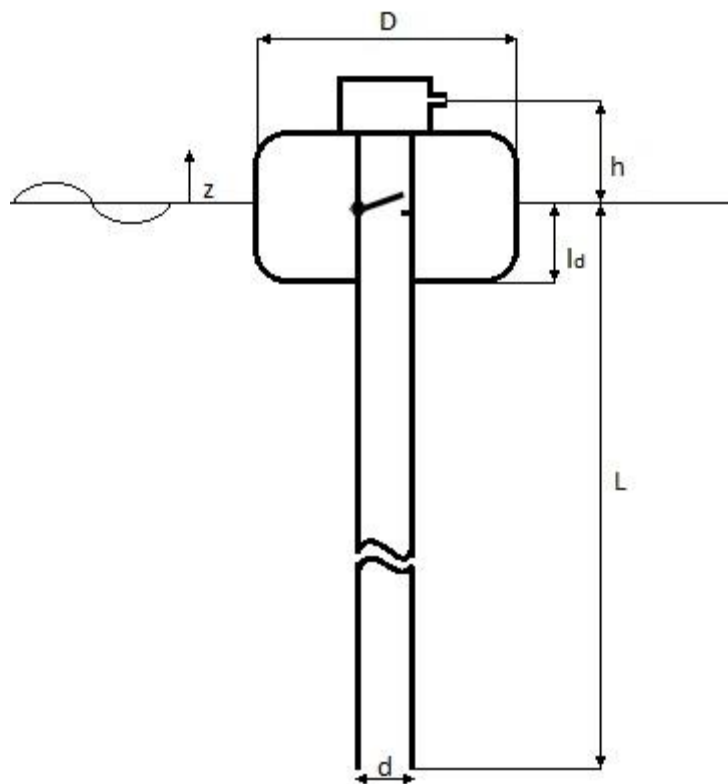
Η μοντελοποίηση της συσκευής που θα γίνει παρακάτω, βασίζεται σε συνδυασμό των εξισώσεων των Isaacs και Clark Liu- Qiao Jin. Ο Isaacs χρησιμοποιεί απλούστερες εξισώσεις, ενώ οι Clark Liu και Qiao Jin περιγράφουν την ελεύθερη κίνηση πίδακα νερού στο περιβάλλον χωρίς την μεσολάβηση συστήματος παραγωγής ενέργειας.

3.2) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

3.2.1) Γενικά

Η μοντελοποίηση θα γίνει θεωρώντας το κύμα κανονικό, δηλαδή $y = A \cos \omega t$ και το βάθος πολύ μεγάλο. Ο πλωτήρας έχει σχήμα κυλινδρικό και ο αγωγός αρκετά μεγάλο μήκος ώστε να θεωρήσουμε ότι δεν αναπτύσσονται ασυνέχειες της ροής στην στήλη, ούτε διαταραχές της στο κάτω άκρο. Στον αεροκώδωνα που τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο έχουμε σταθερή πίεση ίση με P_{ac} .

Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα ορίζουμε τις διαστάσεις της συσκευής:



Σχήμα 3.2 Διαστάσεις της συσκευής

- **D:** Διάμετρος κυλινδρικού πλωτήρα.
- **d:** Εσωτερική διάμετρος αγωγού.
- **L:** Μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το ελεύθερο κάτω άκρο.
- **h:** Μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι την έξοδο του νερού.
- **l_d :** Βύθισμα του κυλινδρικού πλωτήρα.

Η κατακόρυφη μετατόπιση της συσκευής από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού συμβολίζεται με z και είναι θετική προς τα πάνω, ενώ η μετατόπιση της στήλης του νερού με φ και είναι και αυτή θετική προς τα πάνω.

3.2.2) Εξίσωση κίνησης όταν η βαλβίδα είναι κλειστή

Όταν η βαλβίδα είναι κλειστή η σχετική κίνηση πλωτήρα-στήλης νερού είναι μηδενική:

$$\dot{\varphi} - \dot{z} = 0 \quad (3.1)$$

Το σύστημα πλωτήρα-στήλης νερού συμπεριφέρεται τότε σαν ένα ταλαντούμενο σώμα κοινής μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης, με συνολική μάζα το άθροισμα των μαζών του πλωτήρα και της στήλης. Η εξίσωση κίνησής του κατά την κατακόρυφη διεύθυνση περιγράφεται τότε, με βάση των δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, από την γενική εξίσωση σημειακού απορροφητή ενέργειας:

$$(m + m_w)\ddot{z} = F_e + F_r + F_b + F_v + F_f + F_u \quad (3.2)$$

Όπου:

$m + m_w$: Το άθροισμα της μάζας της συσκευής (m) και της μάζα του νερού που περικλείεται μέσα στον αγωγό (m_w). Η μάζα της συσκευής ισούται με τον όγκο του νερού που εκτοπίζει επί την πυκνότητα του.

F_e : Δύναμη διέγερσης (excitation force). Η δύναμη αυτή, που ευθύνεται για την κίνηση του πλωτήρα, περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1. Για κυλινδρικό πλωτήρα μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις 2.39 έως 2.41.

F_r : Δύναμη Ακτινοβολίας (Radiation force). Η δύναμη αυτή, που ουσιαστικά δείχνει την δυνατότητα ενός ταλαντούμενου σώματος να παράγει κύματα, περιγράφεται στην ενότητα 2.1.1 και δίνεται από την εξίσωση 2.24:

$$F_r = -m_a\ddot{z} - b\dot{z}$$

Όπου m_a είναι η πρόσθετη μάζα και b ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος

F_b : Η ανωστική δύναμη (buoyancy force) που δέχεται ένας πλωτήρας όταν εκτοπιστεί από το σημείο ισορροπίας του. Στην περίπτωση κυλίνδρου αυτή δίδεται από την εξίσωση 2.22:

$$F_b = -\rho g S_w z$$

Όπου S_w η κάτω βρεχόμενη επιφάνεια του πλωτήρα.

F_v : Η δύναμη αντίστασης (Drag force) λόγω κίνησης σε ρευστό. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.1.1, η δύναμη αυτή αν και θα μπορούσε να αμεληθεί λόγω θεωρήσης ιδανικού ρευστού, λαμβάνεται υπ' όψιν για μεγαλύτερη ακρίβεια. Δίδεται από τη σχέση 2.30

$$F_v = -\frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z}$$

Όπου C_d είναι ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης

F_f : Δυνάμεις τριβής (friction forces) λόγω του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Στην περίπτωση μας στα τοιχώματα του αγωγού λόγω της σχετικής κίνησης του νερού. Στην κλειστή βαλβίδα δεν έχουμε σχετική κίνηση του νερού και άρα:

$$F_f = 0$$

Η τριβή στα εξωτερικά τοιχώματα του αγωγού μπορεί να ενταχθεί στην εξίσωση 2.30 θεωρώντας μεγαλύτερο συντελεστή C_d

F_u : Άλλα φορτία που προκύπτουν από τον μηχανισμό παραγωγής ενέργειας ή από την αγκύρωση. Στην περίπτωση κλειστής βαλβίδας δεν έχουμε κάποιο φορτίο λόγω παραγωγής ενέργειας. Επίσης θα θεωρήσουμε ότι οι δυνάμεις αγκύρωσης δεν επηρεάζουν την κατακόρυφη κίνηση. Αυτή η προσέγγιση δεν προσθέτει μεγάλο σφάλμα στην ανάλυση, καθώς οι τεχνικές αγκύρωσης συστημάτων κυματικής ενέργειας έχουν βελτιωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια, ώστε να προσφέρουν σχεδόν ελεύθερη κίνηση στην επιθυμητή διεύθυνση. Οπότε:

$$F_u = 0$$

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση 3.2 τελικά γίνεται:

$$(m + m_w + m_a)\ddot{z} = -b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z} - \rho g S_w z + F_e \quad (3.3)$$

ή

$$(m + m_w + m_a)\ddot{z} + b\dot{z} + \beta|\dot{z}| \dot{z} + cz = F_e \quad (3.4)$$

Όπου θέσαμε $\beta = \frac{1}{2}\rho C_d S_w$ και $c = \rho g S_w$

3.2.3) Κριτήριο ανοίγματος της βαλβίδας

Με βάση το σχήμα 3.1 και τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα η επιτάχυνση της στήλης του νερού $\ddot{\phi}$ περιγράφεται από την σχέση:

$$(L + h)\rho A_{in}\ddot{\phi} = -(h + z)\rho A_{in}g - (P_{ac} - P_{am})A_{in} \quad (3.5)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, A_{in} η επιφάνεια του αγωγού, P_{ac} η σταθερή πίεση αεροκώδωνα και P_{am} η ατμοσφαιρική πίεση. Ο όρος $(L + h)\rho A_{in}$ είναι όλη η μάζα του νερού που επιταχύνεται από το κάτω άκρο του αγωγού μέχρι το σημείο εξόδου και ο όρος $(h + z)\rho A_{in}$ η μάζα του νερού που δυσκολεύει την κίνηση λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, δηλαδή η μάζα του νερού που βρίσκεται πάνω από την στάθμη μηδενικής βαρύτητας της ήρεμης επιφάνειας. Η δύναμη $(P_{ac} - P_{am})A_{in}$ δείχνει τη δυσκολία που αντιμετωπίζει η κίνηση λόγω του αεροκώδωνα σταθερής πίεσης. Αν θέσουμε $P_a = P_{ac} - P_{am}$ η 3.5 μπορεί να γραφτεί:

$$\ddot{\phi} = -\frac{(h + z)}{(L + h)}g - \frac{P_a}{(L + h)\rho} \quad (3.6)$$

Όταν το σύστημα πλωτήρα-στήλης νερού κινείται ανοδικά από το κάτω άκρο της ταλάντωσης προς το σημείο ισορροπίας, επιταχύνεται με κοινή επιτάχυνση $\ddot{z}$, η οποία δίδεται από την σχέση 3.4. Μετά όμως από το σημείο ισορροπίας όπου έχει αποκτήσει και την μέγιστη ταχύτητα του, το σύστημα αρχίζει να επιβραδύνεται (αρνητική επιτάχυνση). Η επιβράδυνση του πλωτήρα κάποια χρονική στιγμή θα γίνει μεγαλύτερη από αυτήν της στήλης του νερού που περιγράφεται στην εξίσωση 3.6 και άρα λόγω αδρανειακών δυνάμεων η βαλβίδα θα ανοίξει. Δηλαδή η βαλβίδα ανοίγει όταν

$$\ddot{z} \leq \ddot{\phi} \quad (3.7)$$

(Η $\ddot{\phi}$ είναι μικρότερη κατά μέτρο από την $\ddot{z}$, αλλά μεγαλύτερη αλγεβρικά επειδή θέσαμε την κατακόρυφη μετατόπιση της συσκευής θετική προς τα πάνω και έτσι έχουμε αρνητικές επιταχύνσεις)

3.2.4) Εξισώσεις κίνησης όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή

Όταν η βαλβίδα ανοίξει θα έχουμε σχετική κίνηση στήλης νερού-πλωτήρα με αποτέλεσμα παραγωγή ενέργειας. Η κίνηση πλέον του πλωτήρα και της στήλης περιγράφεται από διαφορετικές εξισώσεις.

Στήλη νερού:

Η εξίσωση της στήλης νερού είναι παρόμοια με την 3.5 με μόνη διαφορά τον όρο της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται λόγω της σχετικής κίνησης του ρευστού στο αγωγό:

$$(L + h)\rho A_{in}\ddot{\phi} = -(h + z)\rho A_{in}g - (P_{ac} - P_{am})A_{in} - \frac{1}{2}\lambda_f \frac{(L + h)}{d}\rho A_{in}(\dot{\phi} - \dot{z})^2 \quad (3.8)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το λ_f είναι συντελεστής τριβής που εξαρτάται από τον γνωστό αριθμό Reynolds ($Re = \frac{VD_h}{\nu}$). Η υπόθεση που γίνεται εδώ είναι ότι η τριβή για μη σταθερή ροή συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με αυτή της σταθερής ταχύτητας.

Σύστημα πλωτήρα-αγωγού:

Η εξίσωση κίνησης του συστήματος διαφέρει αρκετά από την 3.4 της κλειστής βαλβίδας καθώς πλέον, εκτός του ότι ταλαντώνεται μόνο η μάζα του συστήματος χωρίς αυτή του εμπεριεχόμενου νερού, υπάρχουν και φορτία που προκύπτουν από το σύστημα παραγωγής ενέργειας (αεροκώδωνα). Η γενική εξίσωση είναι:

$$m\ddot{z} = F_e + F_r + F_b + F_v + F_f + F_u \quad (3.9)$$

Όπου:

m : Η μάζα της συσκευής. Θεωρούμε ότι για όσο διάστημα είναι ανοιχτή η βαλβίδα, όση ποσότητα νερού εισέρχεται στον αεροκώδωνα τόση εξέρχεται από αυτόν και οδηγείται στο σύστημα παραγωγής ενέργειας.

F_e : Δύναμη διέγερσης (excitation force). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η δύναμη αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις 2.39 έως 2.41.

F_r : Δύναμη Ακτινοβολίας (Radiation force).

$$F_r = -m_a\ddot{z} - b\dot{z}$$

Όπου m_a είναι η πρόσθετη μάζα και b ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος

F_b : Η ανωστική δύναμη (buoyancy force).

$$F_b = -\rho g S_w z$$

F_v : Η δύναμη αντίστασης (Drag force). Και πάλι:

$$F_v = -\frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z}$$

F_f : Δυνάμεις τριβής (friction forces) λόγω του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας προκύπτει από την σχετική κίνηση του συστήματος και της στήλης νερού. Λόγω δράσης-αντίδρασης η δύναμη αυτή ισούται με τον τελευταίο όρο της εξίσωσης 3.8 της στήλης του νερού και έχει φορά αντίθετη (προς τα θετικά του z)

$$F_f = \frac{1}{2}\lambda_f \frac{(L+h)}{d} \rho A_{in} (\dot{\phi} - \dot{z})^2$$

F_u : Άλλα φορτία από τον μηχανισμό παραγωγής ενέργειας. Στην περίπτωση ανοιχτής βαλβίδας και πάλι λόγω δράσης-αντίδρασης, έχουμε την δύναμη που προκαλεί η σταθερή πίεση του αεροκώδωνα και έχει και αυτή φορά προς τα θετικά:

$$F_u = (P_{ac} - P_{am})A_{in} = P_a A_{in}$$

Ουσιαστικά η θετική φορά των δυνάμεων F_f, F_u δείχνει την δυσκολία που αντιμετωπίζει το σύστημα κατά την κυρίως καθοδική κίνηση του, όταν είναι ανοιχτή η βαλβίδα, λόγω της ύπαρξης συστήματος παραγωγής ενέργειας.

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση 3.9 τελικά γίνεται:

$$(m + m_a)\ddot{z} = -b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z} + \frac{1}{2}\lambda \frac{(L+h)}{d} \rho A_{in} (\dot{\phi} - \dot{z})^2 - \rho g S_w z + F_e + P_a A_{in}$$

ή

$$(m + m_a)\ddot{z} + b\dot{z} + \beta|\dot{z}|\dot{z} + cz = F_e + \beta' V^2 + P_a A_{in} \quad (3.10)$$

Όπου θέσαμε (εκτός από $\beta = \frac{1}{2}\rho C_d S_w$ και $c = \rho g S_w z$ όπως προηγουμένως), $\beta' = \frac{1}{2}\lambda \frac{(L+h)}{d} \rho A_{in}$ και $V = \dot{\phi} - \dot{z}$.

3.2.5) Κλείσιμο της βαλβίδας-Θεωρητική αποθηκευμένη ενέργεια

Κάποια στιγμή, κοντά στο κάτω άκρο της ταλάντωσης του συστήματος, η ταχύτητα της στήλης του νερού $\dot{\phi}$ που προκύπτει από την εξίσωση 3.8 θα γίνει ίση με την ταχύτητα του συστήματος $\dot{z}$ της εξίσωσης 3.10. Τότε η σχετική ταχύτητα V θα γίνει μηδενική και η βαλβίδα θα κλείσει. Το σύστημα πλωτήρα-αγωγού-εμπεριεχομένου νερού θα είναι ξανά έτοιμο να επιταχυνθεί ανοδικά με βάση την εξίσωση 3.4.

Το φαινόμενο αυτό είναι περιοδικό. Η θεωρητική ενέργεια μιας περιόδου που αποθηκεύεται στον αεροκώδωνα και επομένως η υδραυλική ισχύς που θα τροφοδοτήσει το κύκλωμα υδροστροβίλου είναι:

$$N = (P_{ac} - P_{am})\bar{Q} = P_a \bar{Q} \quad (3.11)$$

Όπου το $\bar{Q}$ είναι η μέση παροχή στο διάστημα μιας περιόδου και προκύπτει όπως θα δούμε παρακάτω από την ολοκλήρωση του γραφήματος της σχετικής ταχύτητας πολλαπλασιασμένης με την διατομή εισόδου A_{in} .

3.3) ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

3.3.1) Αριθμητική επίλυση

Με βάση τα προηγούμενα το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθεί είναι:

$$(m + m_w + m_a)\ddot{z} = F_E \cos(\omega t + \sigma) - cz - b\dot{z} - \beta|\dot{z}| \dot{z} \quad (3.12)$$

όταν η βαλβίδα είναι κλειστή και

$$(m + m_a)\ddot{z} = F_E \cos(\omega t + \sigma) - cz - b\dot{z} - \beta|\dot{z}| \dot{z} + \beta' V^2 + P_a A_{in} \quad (3.13)$$

και

$$(L + h)\rho A_{in} \ddot{\phi} = -(h + z)\rho A_{in} g - P_a A_{in} - \beta' V^2 \quad (3.14)$$

όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή, με κριτήριο ανοίγματος της βαλβίδας $\dot{z} \leq \dot{\phi}$ και κριτήριο διατήρησης ανοιχτής βαλβίδας όσο $\dot{\phi} > \dot{z}$.

Το σύστημα αυτό των διαφορικών εξισώσεων δεν λύνεται αναλυτικά. Γι αυτό χρησιμοποιούμε αριθμητική μέθοδο *Runge-Kutta* τέταρτης τάξης [26]. Οι εξισώσεις 3.12-3.13-3.14 γράφονται αντίστοιχα στη μορφή:

$$\ddot{z} = f(\dot{z}, z, t) \quad (3.15)$$

Με $\ddot{\phi} = \ddot{z}$ και $\dot{\phi} = \dot{z}$ όταν η βαλβίδα είναι κλειστή και

$$\ddot{z} = g(\dot{z}, \phi, z, t) \quad (3.16)$$

$$\ddot{\phi} = h(\dot{z}, \phi, z) \quad (3.17)$$

όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή.

Τότε για έναν αριθμό σημείων i από 1 έως n ($1:n$) προχωρώντας με βήμα Δt και θέτοντας τις αρχικές συνθήκες $t(1) = 0$, $\dot{z}(1) = x_1$, $z(1) = x_2$, $\dot{\phi}(1) = x_3$, όπου x_1, x_2, x_3 οποιοιδήποτε αριθμοί, καθώς το φαινόμενο είναι περιοδικό και απαλλαγμένο από τις αρχικές συνθήκες, μετά από κάποιο χρόνο, μπορούμε να υπολογίσουμε κάθε $\dot{z}(i)$, $z(i)$, $\dot{\phi}(i)$, σύμφωνα με την μέθοδο Runge-Kutta. Όσο μικρότερο είναι το διάστημα Δt τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχουμε στους υπολογισμούς.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού *fortran*. Στο πρόγραμμα αυτό υπολογίζεται αριθμητικά και η θεωρητική ισχύς του αεροκώδωνα με τον εξής τρόπο:

Για τα δεδομένα $\dot{z}(i), \dot{\phi}(i)$ που έχουμε στο διάστημα μιας περιόδου υπολογίζουμε την σχετική ταχύτητα $V(i) = \dot{\phi}(i) - \dot{z}(i)$ η οποία έχει μη μηδενική τιμή μόνο όταν η βαλβίδα είναι ανοιχτή. Η ταχύτητα $V(i)$ μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για το μικρό διάστημα Δt . Έτσι ο όγκος νερού που εισέρχεται στο αεροκώδωνα σε μια περίοδο T είναι:

$$V_w = \sum_{i=n-\frac{T}{\Delta t}}^n V(i) A_{in} \Delta t \quad (3.18)$$

Όπου η άθροιση γίνεται για τα σημεία που αντιστοιχούν σε μια περίοδο. $(n - \frac{T}{\Delta t}$ έως n). Τότε η μέση παροχή μιας περιόδου ισούται με

$$\bar{Q} = \frac{V_w}{T} \quad (3.19)$$

και τελικά η θεωρητική ισχύς δίνεται από την εξίσωση 3.11

3.3.2) Δεδομένα εισαγωγής

Για την αριθμητική επίλυση πρέπει να εισάγουμε κάποια ανεξάρτητα δεδομένα για την εύρεση των συντελεστών των $\dot{z}$, z , $\dot{\phi}$, t των εξισώσεων 3.12-3.13-3.14. Τα δεδομένα αυτά είναι είτε κατασκευαστικά είτε κυματικά-υδροδυναμικά.

Κατασκευαστικά δεδομένα:

Στα κατασκευαστικά δεδομένα εμπεριέχονται οι γεωμετρικές διαστάσεις της συσκευής και η σταθερή πίεση που ρυθμίζουμε στον αεροκώδωνα. Η συσκευή μας αποτελείται, όπως έχει ειπωθεί, από κυλινδρικό πλωτήρα και μακρύ αγωγό. Οι διαστάσεις φαίνονται στο σχήμα 3.2. Σε αυτές θα προσθέσουμε και την εξωτερική διάμετρο d' του αγωγού, η οποία κατά προσέγγιση είναι μεγαλύτερη από την d κατά μια χάρη της τάξεως του 5% ($d'=1,05d$).

Από τις διαστάσεις υπολογίζονται τα εξής χρήσιμα δεδομένα:

- Επιφάνεια πλωτήρα και εμβαδόν διατομής αγωγού:

$$S_w = \frac{\pi D^2}{4}, \quad A_{in} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.20)$$

- Όγκος πλωτήρα και εμπεριεχόμενου νερού:

$$V_f = S_w l_d, \quad V_w = A_{in}(L + h) \quad (3.21)$$

- Μάζα πλωτήρα-συστήματος και μάζα εμπεριεχόμενου νερού:

Για το πλωτήρα-αγωγό η μάζα του ισούται με την μάζα του όγκου νερού που εκτοπίζει δηλαδή

$$m = \rho[V_f + \frac{\pi(d'^2 - d^2)}{4}(L - l_d)] \quad (3.22)$$

Όπου η πυκνότητα ρ είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού και ισούται με $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ στους 20°C .

Η μάζα του εμπεριεχόμενου νερού είναι:

$$m_w = \rho V_w \quad (3.23)$$

Αν θεωρήσουμε πως η βαλβίδα μπορεί να τοποθετηθεί και σε κατώτερο σημείο μέσα στον αγωγό (η θέση της δεν επηρεάζει τις εξισώσεις 3.12-3.13-3.14), ώστε να αποφύγουμε φαινόμενα σπηλαίωσης λόγω υποπίεσης, για την συσκευή μας δεν υπάρχουν κάποια άλλα αυστηρά κατασκευαστικά όρια πέρα από αυτά που έχουν να κάνουν με την αντοχή υλικών και το κόστος. Βέβαια επειδή η συσκευή είναι ένας σημειακός απορροφητής ενέργειας, συνήθως οι διαστάσεις είναι μικρότερες από το ένα τρίτο του μήκους κύματος. Άλλωστε όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6 μεγάλες διαστάσεις σε σχέση πάντα με το μήκος κύματος, οδηγούν έξω από τα όρια εφαρμογής της γραμμικής κυματικής θεωρίας που χρησιμοποιούμε στην ανάλυση μας.

Όρια επίσης δεν υπάρχουν και για την ρύθμιση της σταθερής πίεσης P_{ac} στον αεροκώδωνα. Ωστόσο, όπως θα φανεί παρακάτω η βαλβίδα δεν μπορεί να ανοίξει για τιμές μεγαλύτερες της τάξεως των 4-5 bar. Αυτό σημαίνει ότι γενικά θα χρησιμοποιηθεί υδροστροβίλος μικρού αντίστοιχου ύψους λειτουργίας.

Κυματικά-υδροδυναμικά δεδομένα:

Έχοντας θεωρήσει απλό αρμονικό κύμα και άπειρο βάθος (υπεράκτια συσκευή), το κύμα μπορεί πλέον να περιγραφεί μόνο από δύο δεδομένα:

Την περίοδο του **T** και το ύψος του **H**. Από αυτά με βάση και τον πίνακα 2.1 της γραμμικής θεωρίας κύματος προκύπτουν τα χρήσιμα δεδομένα:

- Συχνότητα κύματος ω :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.24)$$

- Μήκος κύματος λ :

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.25)$$

- Αριθμός κύματος k :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} \quad (3.26)$$

- Πλάτος ταλάντωσης A :

$$A = \frac{H}{2} \quad (3.27)$$

Η περίοδος και το ύψος κύματος ποικίλει από περιοχή σε περιοχή και δίδεται από τους διάφορους κυματικούς χάρτες της εκάστοτε περιοχής. Γενικά τα ανεμογεννή κύματα καλύπτουν ένα εύρος περιόδων από 0,5 έως 20-25 sec. Τα ύψη είναι συνήθως ανάλογα με την περίοδο, δηλαδή μεγαλύτερα ύψη παρατηρούνται σε μεγαλύτερες περιόδους. Για την Ελλάδα και γενικότερα για την Μεσόγειο οι περίοδοι των κυμάτων κυμαίνονται μεταξύ 2 και 10 sec, ενώ το μεγαλύτερο κύμα έχει καταγραφεί μέχρι στιγμής στα στενά ανάμεσα στην Κάρπαθο και τη Ρόδο, με ύψος 15 m.

Έχοντας προσδιορίσει τις ιδιότητες του κύματος μένει να υπολογίσουμε τα υδροδυναμικά δεδομένα λόγω της αλληλεπίδρασης κύματος-σώματος. Τα δεδομένα αυτά είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας C_A από τον οποίο προκύπτει η πρόσθετη μάζα (σχέση 2.25), ο συντελεστής απόσβεσης b , η δύναμη διέγερσης F_e και ο συντελεστής αντίδρασης C_d .

Τα δεδομένα C_A, b, F_E είναι συναρτήσεις της γωνιακής συχνότητας ω του κύματος και εξαρτώνται από την γεωμετρία του σώματος. Ο υπολογισμός τους είναι αρκετά πολύπλοκος για σύνθετες γεωμετρίες στις 6 δυνατές κινήσεις του σώματος (σχήμα 2.2) και γίνεται με μέθοδο συντοκικών στοιχείων. Υπάρχουν κάποια εμπορικά υπολογιστικά προγράμματα που λύνουν τα προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας όπως το WAMIT [27].

Στην ανάλυση μας όμως μας ενδιαφέρει μόνο η κατακόρυφη κίνηση και η γεωμετρία μας είναι ένα απλός κύλινδρος. Ο αγωγός, από την στιγμή που είναι ανοιχτός, δεν επηρεάζει σημαντικά τα υδροδυναμικά δεδομένα του πλωτήρα δεδομένου ότι η μάζα του (ή αλλιώς η μάζα του νερού που εκτοπίζει) εισάγεται στη συνολική μάζα του συστήματος. Άλλωστε σε μεγάλο βάθος (μεγαλύτερο του $\lambda/2$ -εικόνα 2.1) οι ταχύτητες των σωματιδίων του νερού είναι μηδενικές.

Οι εξισώσεις 2.25-2.27-2.40 που δίνουν αντίστοιχα τα m_a, b, F_E για την κατακόρυφη πάντα κίνηση, ξαναγράφονται συγκεντρωτικά παρακάτω:

$$m_a = C_A m \quad (3.28)$$

$$b = \left(\frac{\omega k}{2\rho g^2} \right) \frac{F_e^2}{A^2} \quad (3.29)$$

$$F_E = A e^{-kl_d} \sqrt{(\rho g S_w - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2} \quad (3.30)$$

Από αυτές φαίνεται ότι αρκεί ένα μέγεθος εκ των C_A, b, F_E για τον υπολογισμό των άλλων δύο.

Το μέγεθος που μπορούμε να προσεγγίσουμε με μικρό σφάλμα είναι αυτό της πρόσθετης μάζας. Ο συντελεστής πρόσθετης μάζας δεν έχει έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με την γωνιακή συχνότητα ω , όπως τα άλλα δύο μεγέθη και ακόμα στην

περίπτωση σταθερού λόγου D/l_d μπορεί πρακτικά να θεωρηθεί σταθερός όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.2. Από τον ίδιο πίνακα αλλά και από το σχήμα 2.4 φαίνεται ότι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας για κύλινδρο κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1.10. Ειδικά στην περίπτωση ανοιχτής και βαθιάς θάλασσας ο συντελεστής είναι συνήθως μικρότερος από την μονάδα για τις γωνιακές συχνότητες που επιθυμούμε. Ωστόσο για να αποφύγουμε αρνητικά σφάλματα θα επιλέξουμε συντελεστή πρόσθετης μάζας $C_A = 1$ (δοκιμές του προγράμματος δείχνουν καλύτερη απόδοση σε μικρότερο συντελεστή). Σύμφωνα και με τον Newman [14] αυτή είναι μια καλή προσέγγιση για κυλινδρικά σώματα.

Γνωρίζοντας τώρα την πρόσθετη μάζα από την εξίσωση 3.28 μπορούμε να υπολογίσουμε τα b, F_E από τις εξισώσεις 3.29-3.30. Εισάγουμε το b από την 3.29 στην 3.30 και έτσι προκύπτει μια δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς το F_E^2 . Απορρίπτοντας τις αρνητικές και την θετική που ξεφεύγει από το πάνω όριο $\rho g S_w A$ βρίσκουμε τελικά την F_E και μέσω αυτής το b .

Ο συντελεστής αντίδρασης C_d είναι, όπως είδαμε και στην ενότητα 2.2 αδιάστατος αριθμός που προκύπτει από ανάλυση πειραματικών δεδομένων. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η εξάρτηση του από τον αριθμό Reynolds ($Re = \frac{\dot{z}D}{\nu}$) για κίνηση κυλίνδρου σε ρευστό. Η κινηματική συνεκτικότητα του θαλασσινού νερού στους 20 °C είναι $\nu = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Οι μέσες ταχύτητες $\dot{z}$ είναι συνήθως της τάξεως των 2 m/s και οι διάμετροι πλωτήρα D που θα μας απασχολήσουν μεγαλύτεροι του 1 m. Έτσι οι αριθμοί Reynolds κυμαίνονται στο κοντά στο 10^6 . Με βάση και το σχήμα 2.5 επιλέγουμε $C_d = 0,5$.

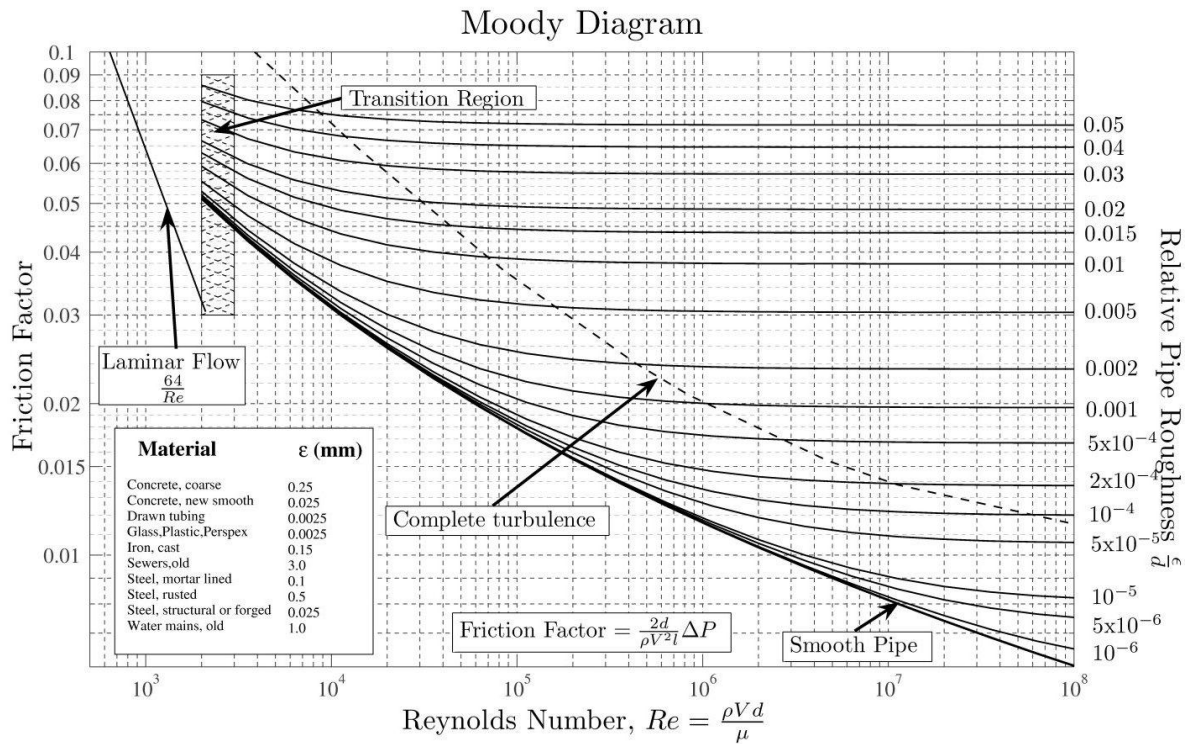
Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως ο πλωτήρας θα μπορούσε να έχει σχήμα ελλειπτικό η σφαιροειδές και όχι καθαρά κυλινδρικό. Με ένα τέτοιο σχήμα θα επιτυγχανάμε καλύτερους για το σύστημα μας συντελεστές C_A, C_d , αλλά βέβαια οι δυνάμεις διέγερσης και άνωσης και ο συντελεστής απόσβεσης θα άλλαζαν, με ίσως και αρνητικές επιπτώσεις.

Συντελεστής λ_f :

Το τελευταίο μέγεθος που πρέπει να προσδιοριστεί για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων είναι ο συντελεστής τριβής λόγω της κίνησης του ρευστού σε αγωγό, λ_f . Ο συντελεστής εξαρτάται και αυτός από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος αυτή την φορά δίδεται από τη σχέση $Re = \frac{(\varphi - \dot{z})d}{\nu}$ λόγω της σχετικής ταχύτητας στήλης νερού-πλωτήρα. Με γνωστό αριθμό Reynolds το λ_f μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση των Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda_f}} + \frac{\varepsilon/d}{3.71} \right) \quad (3.31)$$

όπου το ε είναι η απόλυτη τραχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας του αγωγού. Για λείους πλαστικούς αγωγούς το ε φτάνει έως 0,0015 mm. Από την γραφική απεικόνιση της σχέσης 3.31 (διάγραμμα Moody-σχήμα 3.3) για αριθμούς Reynolds από 10^5 έως 10^6 και σχετικές τραχύτητες από 0,001 έως 0,005 όπως στην περίπτωση μας (θα επιλέξουμε λείο αγωγό) μπορούμε να θεωρήσουμε μια σταθερή μέση τιμή ίση με $\lambda_f = 0,025$.



Σχήμα 3.3. Διάγραμμα Moody

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων 3.12-3.13-3.14. Αρχικά επιλύεται ένα προτεινόμενο σύστημα αναφοράς γνωστών διαστάσεων, συγκεκριμένου κύματος και παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης. Αργότερα μελετείται η επίδραση στην αποδιδόμενη ισχύ όταν μεταβάλλεται μόνο μία εκ των βασικών διαστάσεων καθώς και όταν μεταβάλλονται τα κυματικά χαρακτηριστικά. Τέλος στην δεύτερη ενότητα γίνεται βελτιστοποίηση των λειτουργικών διαστάσεων της συσκευής με βάση τα κυματικά δεδομένα μιας περιοχής των ελληνικών θαλασσών.

4.1) ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

Με βάση τα παραπάνω το πρόγραμμα μπορεί πλέον να εκτελεστεί για τα διάφορα δεδομένα εισαγωγής. Αρχικά θα διερευνήσουμε ένα προτεινόμενο σύστημα με τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

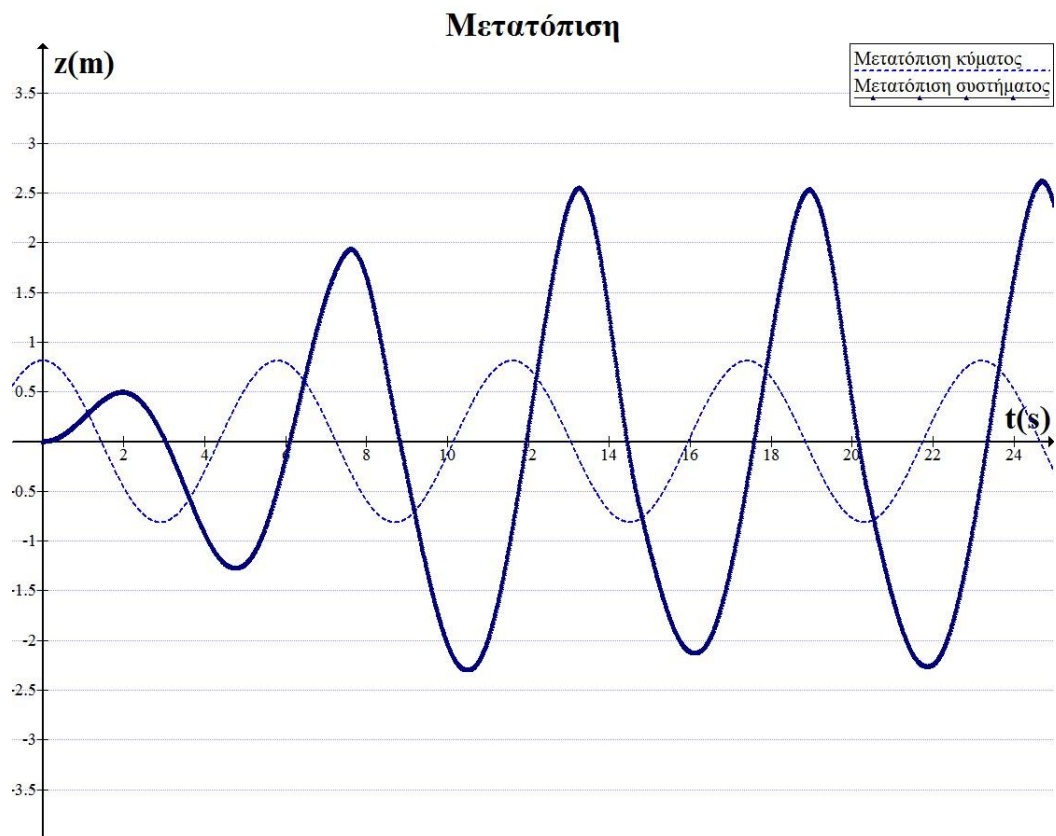
- Εσωτερική διάμετρος αγωγού $d=0,5\text{ m}$,
- Μήκος αγωγού $L=65\text{ m}$,
- Αρμονικό κύμα περιόδου $T=5,8\text{ sec}$ και ύψους $H=1,625\text{ m}$.

Σε αυτά προσθέτουμε:

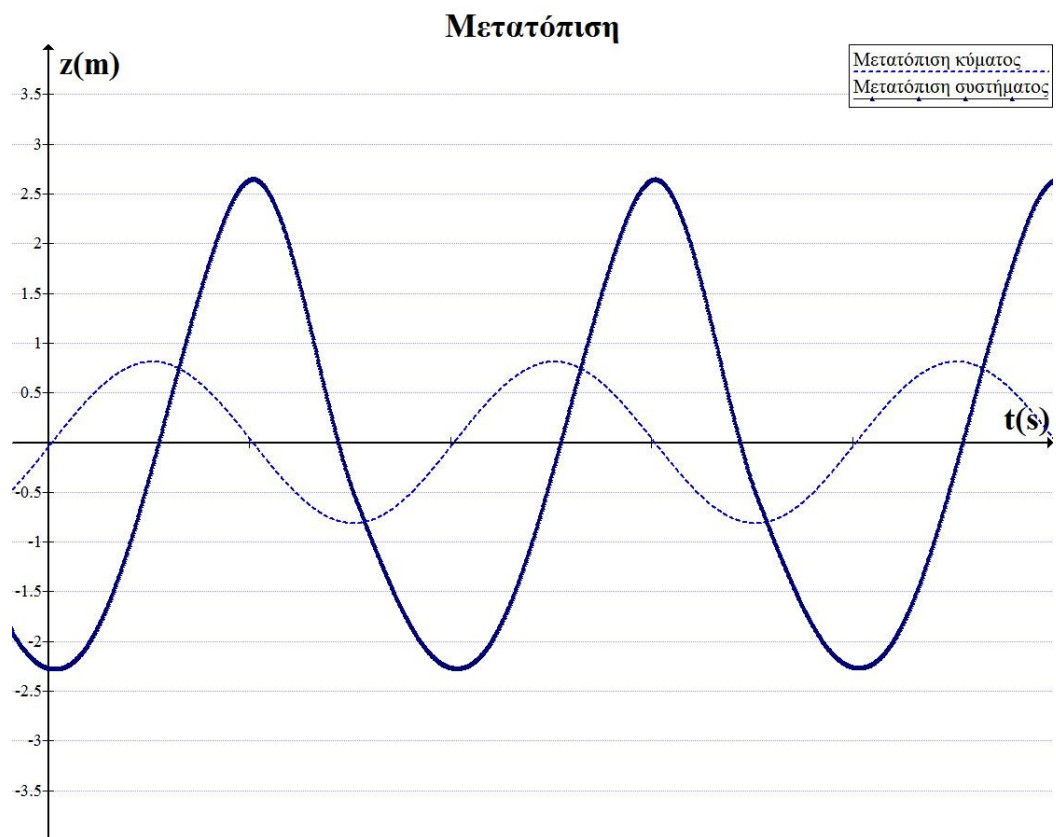
- Διάμετρος κυλινδρικού πλωτήρα $D=1,5\text{ m}$,
- Βύθισμα πλωτήρα $l_d=D/2$,
- Μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι την έξοδο του νερού $h=1\text{ m}$
- Σταθερή πίεση αεροκώδωνα $P_{ac}=2\text{ bar}=200000\text{ Pa}$. Άρα και $P_a = P_{ac} - P_{am} = 1\text{ bar}$

Ενώ τα δεδομένα d' , C_A , C_d , λ_f , επιλέγονται σύμφωνα με την ενότητα 3.3.2. Εκτελούμε το πρόγραμμα επιλέγοντας βήμα $\Delta t=0,01\text{ sec}$ και προκύπτουν τα διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης για την συσκευή και για την στήλη νερού:

Μετατόπιση:



Διάγραμμα 4.1. Μετατόπιση συστήματος-κύματος

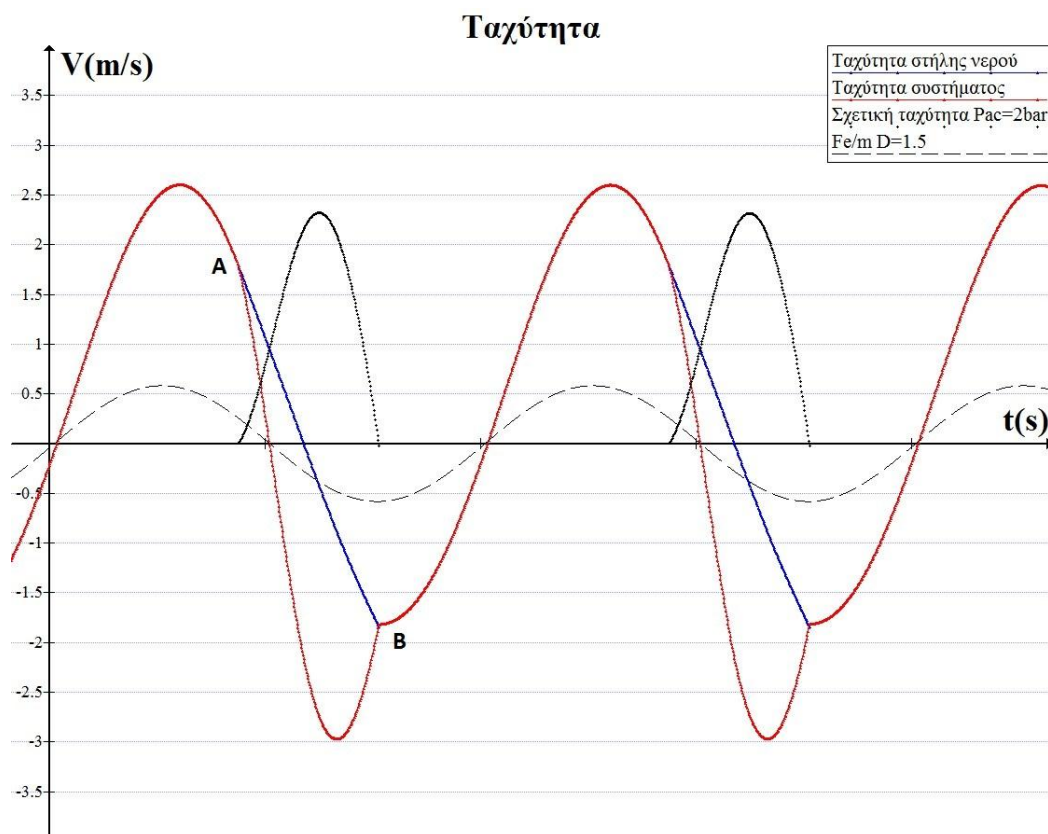


Διάγραμμα 4.2. Μόνιμη κατάσταση μετατόπισης συστήματος

Στα διαγράμματα 4.1-4.2 διακρίνουμε την μετατόπιση του παραπάνω συστήματος σε σχέση και με το κύμα. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η μετάβαση στην μόνιμη κατάσταση από αρχικές μηδενικές συνθήκες, ενώ στο δεύτερο έχουμε πλέον μεταβεί πλήρως στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μετάβαση αυτή στο συγκεκριμένο παράδειγμα συμβαίνει σε περίπου 5 με 6 περιόδους, δηλαδή μετά από περίπου 30s.

Ένα άλλο που παρατηρούμε έντονα στα διαγράμματα είναι και η διαφορά φάσης των δύο ταλαντώσεων που είναι περίπου $\pi/2$ στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Αυτή η διαφορά φάσης είναι η ιδανική καθώς τότε η ταχύτητα ταλάντωσης είναι σε φάση με τη διεγείρουσα δύναμη και έχουμε το φαινόμενο του συντονισμού. Ένδειξη της αποδοτικής λειτουργίας του μηχανισμού είναι και το αρκετά μεγαλύτερο πλάτος της ταλάντωσης του συστήματος από αυτό του κύματος.

Ταχύτητα:



Διάγραμμα 4.3. Ταχύτητα συστήματος-στήλης νερού και σχετική και δύναμη διέγερσης.

Από το διάγραμμα αυτό διακρίνουμε την χρονική στιγμή που η βαλβίδα ανοίγει και κλείνει. Συγκεκριμένα για τα δεδομένα που θέσαμε η βαλβίδα ανοίγει στην θέση A, 0,8 sec μετά από την θέση ισορροπίας της ταλάντωσης του συστήματος (αντίστοιχα θέση και μέγιστης ταχύτητας) και κλείνει στη θέση B, 1,89 sec μετά από το άνοιγμα

της. Δηλαδή για την περίοδο των 5,8 sec, η βαλβίδα είναι ανοιχτή για 0,326T. Διαφορετικά δεδομένα οδηγούν σε διαφορετικούς χρόνους ανοίγματος-κλεισίματος.

Στο ίδιο διάγραμμα δίδεται με διακεκομμένη γραμμή και η καμπύλη της δύναμης διέγερσης F_e (διαιρούμενη με την μάζα του συστήματος συν του νερού που περιέχεται στον αγωγό, για εποπτικούς λόγους). Παρατηρούμε πως η καμπύλη αυτή βρίσκεται σχεδόν σε φάση με την καμπύλη της ταχύτητας του συστήματος και αυτό δείχνει, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, πως η συσκευή εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο την ενέργεια του κύματος.

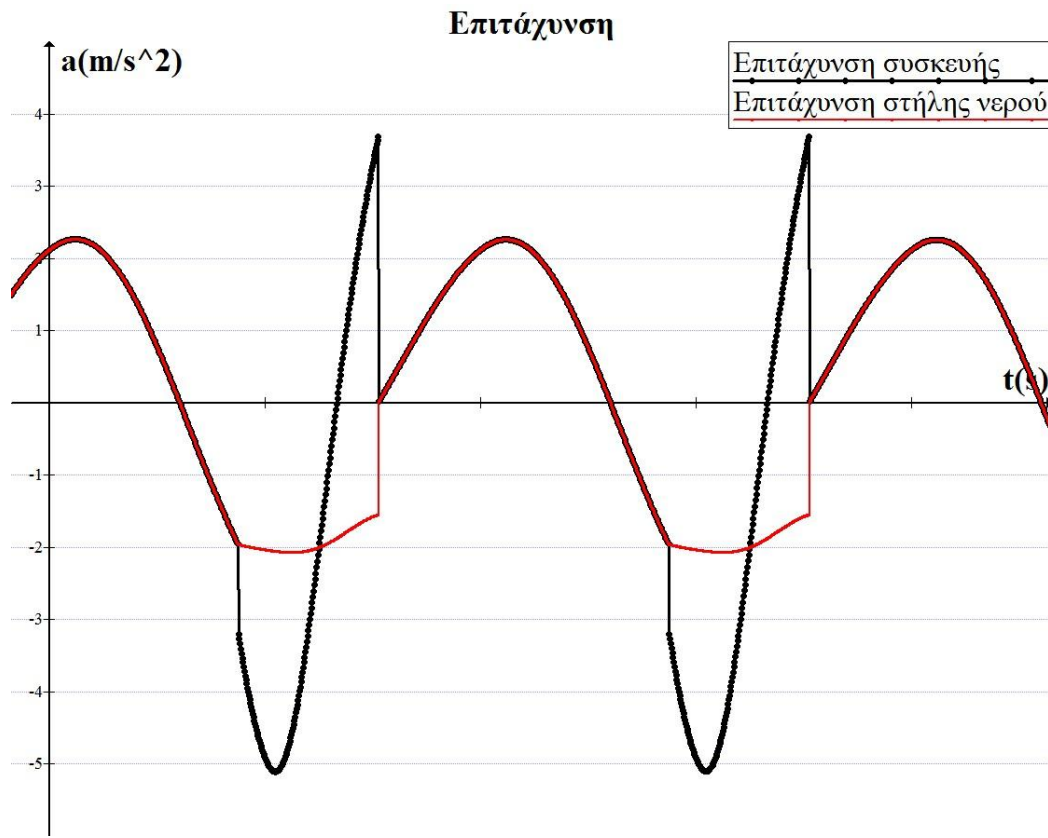
Η καμπύλη της σχετικής ταχύτητας είναι η πιο σημαντική καθώς από αυτήν υπολογίζουμε την μέση παροχή και από αυτήν την θεωρητική ισχύ όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.1. Έτσι προκύπτουν τα έξης αποτελέσματα για τον όγκο νερού V_w που διέρχεται στον αεροκώδωνα, την μέση παροχή $\bar{Q}$ και τελικά την θεωρητικά αποθηκευμένη ισχύ N . Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μέγεθος	Τιμή
V_w	0.51 m^3
$\bar{Q}$	$0.088 \text{ m}^3/\text{s}$
N	8.77 kW

Πίνακας 4.1

Το φαινόμενο είναι περιοδικό και η παροχή διακοπτόμενη όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της σχετικής ταχύτητας. Η παραγόμενη ισχύς δεν είναι συνεχής, αλλά με πολλά παράλληλα συστήματα που θα λειτουργούν σε διαφορετική φάση θα μπορούσε να επιτευχθεί μια επιθυμητή σταθερότητα.

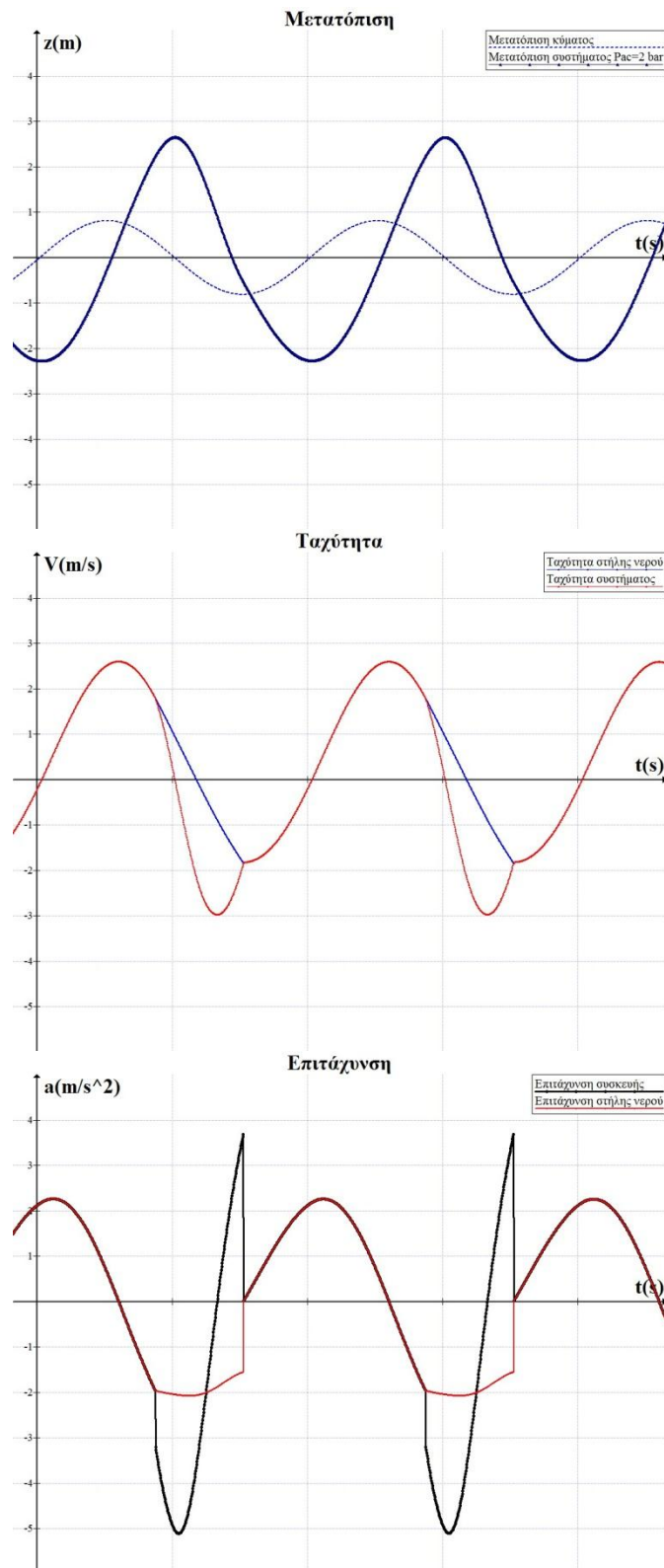
Επιτάχυνση:



Διάγραμμα 4.4. Επιτάχυνση συστήματος-στήλης νερού και σχετική.

Στο παραπάνω διάγραμμα της επιτάχυνσης φαίνονται και τα σημεία ανοίγματος κλεισίματος της βαλβίδας A-B. Παρατηρούμε ότι πριν και μετά από αυτά τα σημεία οι επιταχύνσεις παρουσιάζουν ασυνέχεια και έντονη μεταβολή που μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα κρουστικά φορτία (υδραυλικό πλήγμα) και άρα καταστροφή της συσκευής. Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί αν για παράδειγμα η βαλβίδα άνοιγε και έκλεινε αντίστοιχα πιο ομαλά με κατάλληλο μηχανισμό.

Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της συσκευής είναι η υποπίεση κάτω από την βαλβίδα όταν αυτή είναι κλειστή. Στο παράδειγμα μας η επιτάχυνση της στήλης του νερού μπορεί να φτάσει σε τιμές έως και 2 m/s^2 όταν η βαλβίδα είναι κλειστή. Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα $L\rho\ddot{\phi}$ (που μπορεί να παρουσιάσει την μέγιστη υποπίεση) μπορεί να ξεπεράσει τιμές ασφαλείας της τάξης των $0.9\text{-}1 \text{ bar}$, για αγωγούς μεγαλύτερους από 40-50 m. Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί με τοποθέτηση της βαλβίδας πιο χαμηλά ή ακόμα και πιο κοντά στο κάτω μέρος του αγωγού. Άλλωστε στην διατύπωση των εξισώσεων δεν παίζει ρόλο η θέση της. Οι μεγαλύτερες δυσκολίες της τοποθέτησης της στο κάτω άκρο του αγωγού είναι κυρίως λειτουργικές (συντήρηση, αλλαγή κ.α).



Συγκεντρωτικά διαγράμματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης συστήματος-στήλης νερού.

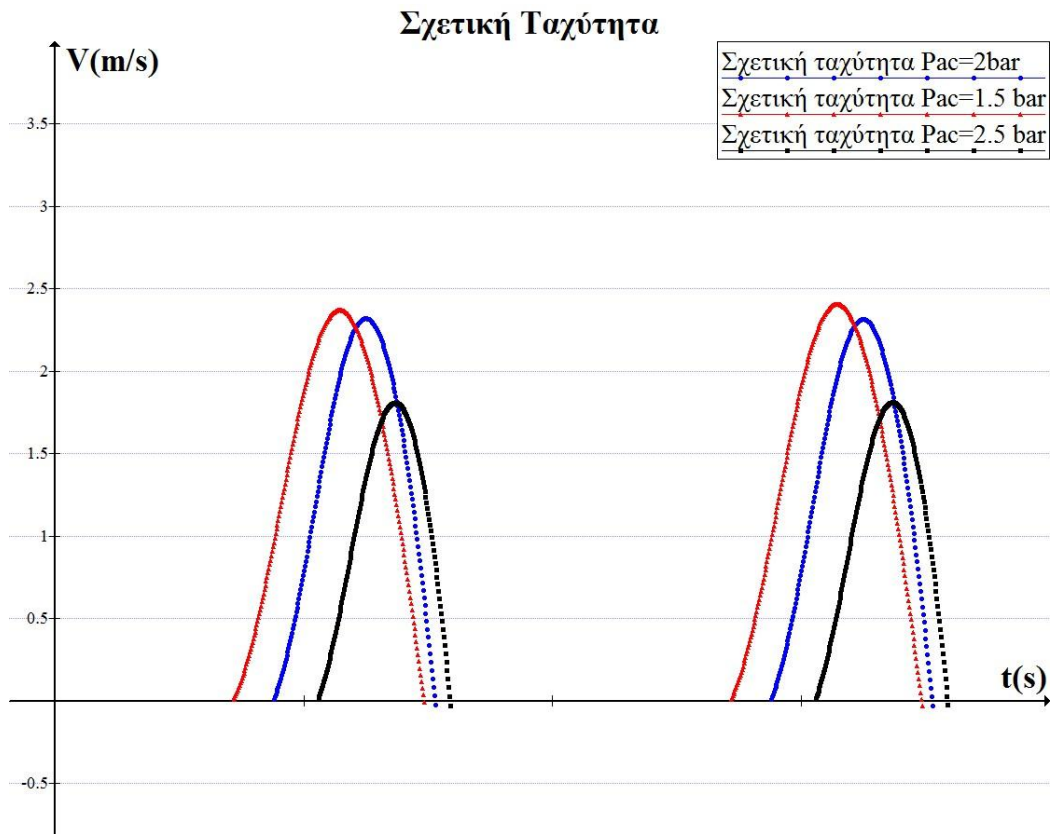
4.1.1) Μελέτη επίδρασης της πίεσης αεροκώδωνα

Στο παραπάνω παράδειγμα επιλέξαμε πίεση αεροκώδωνα $P_{ac}=2 \text{ bar}$. Κρατώντας όλα τα άλλα δεδομένα σταθερά δοκιμάζουμε τώρα διαφορετικές πιέσεις μέχρι εκείνη την πίεση που η βαλβίδα δεν ανοίγει. Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

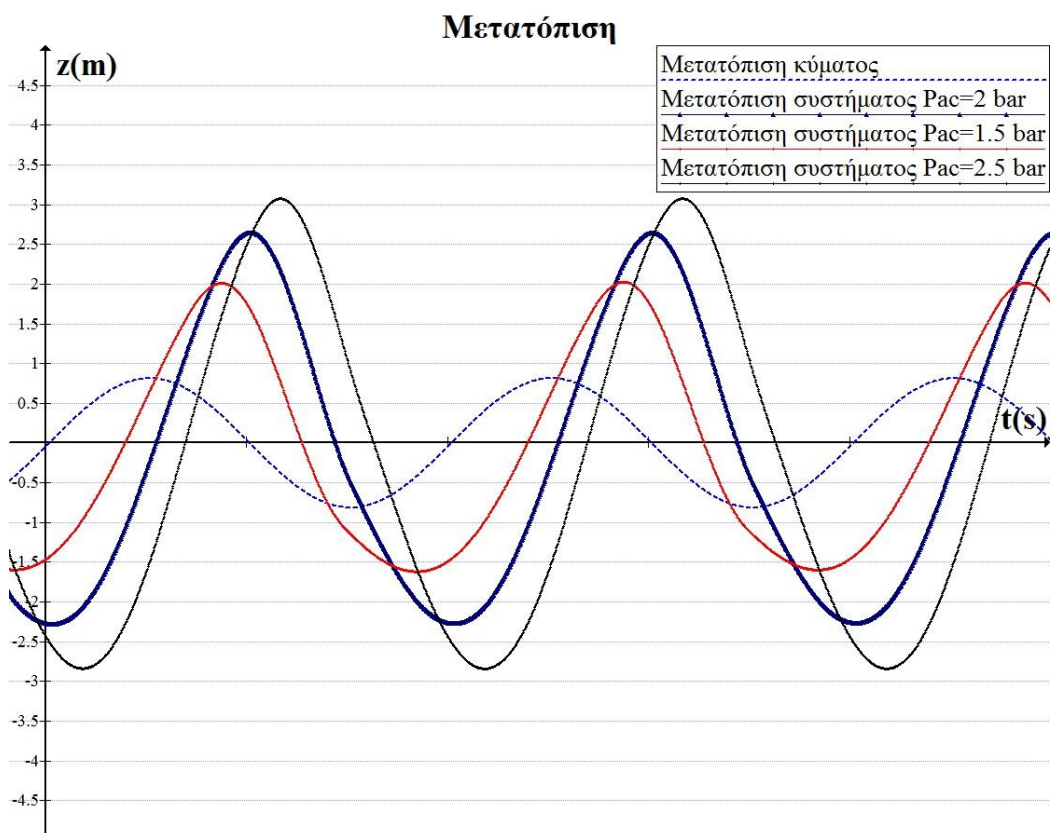
Pac (bar)	Q (m ³ /s)	N (kW)	Pac (bar)	Q (m ³ /s)	N (kW)
1.10	0.115	1.15	2.10	0.082	8.99
1.15	0.113	1.70	2.15	0.080	9.15
1.20	0.113	2.26	2.20	0.077	9.18
1.25	0.112	2.81	2.25	0.074	9.22
1.30	0.111	3.32	2.30	0.071	9.28
1.35	0.110	3.84	2.35	0.068	9.18
1.40	0.109	4.37	2.40	0.065	9.04
1.45	0.107	4.82	2.45	0.061	8.86
1.50	0.107	5.33	2.50	0.057	8.58
1.55	0.105	5.76	2.55	0.053	8.27
1.60	0.103	6.18	2.60	0.048	7.70
1.65	0.102	6.64	2.65	0.044	7.26
1.70	0.100	7.02	2.70	0.040	6.74
1.75	0.098	7.36	2.75	0.034	6.03
1.80	0.097	7.76	2.80	0.029	5.16
1.85	0.094	8.02	2.85	0.021	3.85
1.90	0.092	8.32	2.90	0.012	2.21
1.95	0.090	8.56	2.95	0.000	0.00
2.00	0.088	8.77	3.00	0.000	0.00

Πίνακας 4.2. Επίδραση πίεσης

Στα διαγράμματα 4.5-4.6 φαίνεται η επίδραση της πίεσης αεροκώδωνα στην σχετική ταχύτητα, που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ενέργειας, και την μετατόπιση του συστήματος για τρεις χαρακτηριστικές τιμές $P_{ac}=1.5, 2, 2.5 \text{ bar}$. Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η πίεση ο χρόνος που η βαλβίδα μένει ανοιχτή μικραίνει (μικραίνει και το εμβαδόν της καμπύλης της σχετικής ταχύτητας-διάγραμμα 4.5) ενώ η διαφορά φάσης της ταλάντωσης σε σχέση με το κύμα μεγαλώνει (διάγραμμα 4.6).

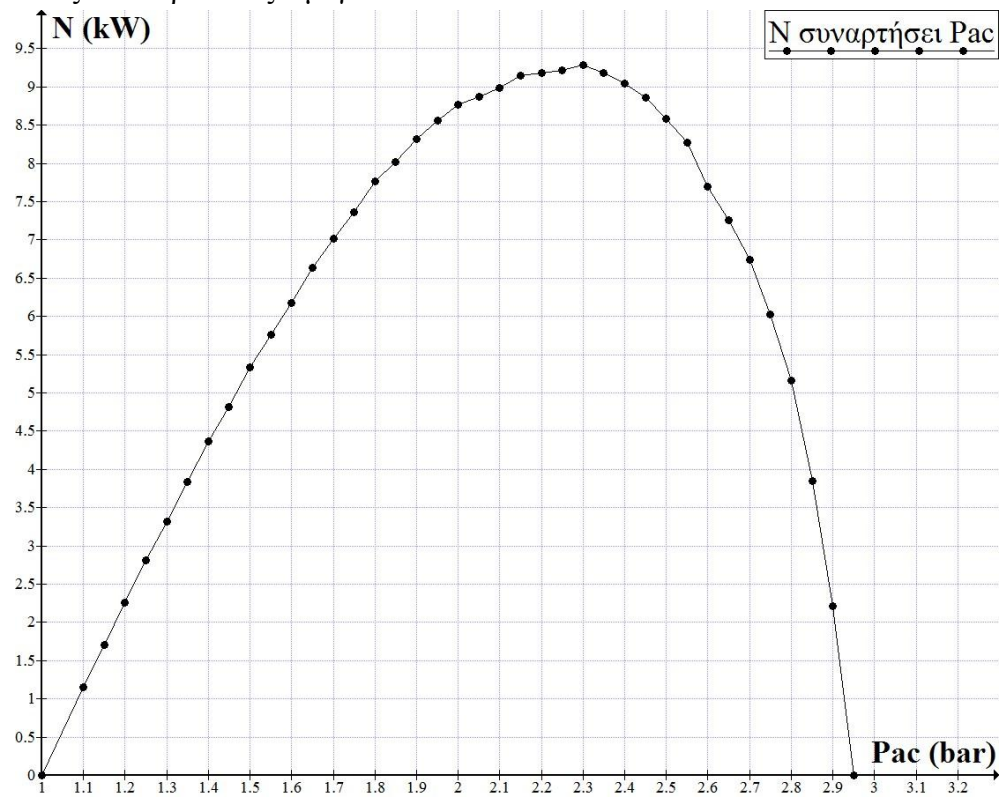


Διάγραμμα 4.5. Σχετική ταχύτητα για διαφορετικές πιέσεις.

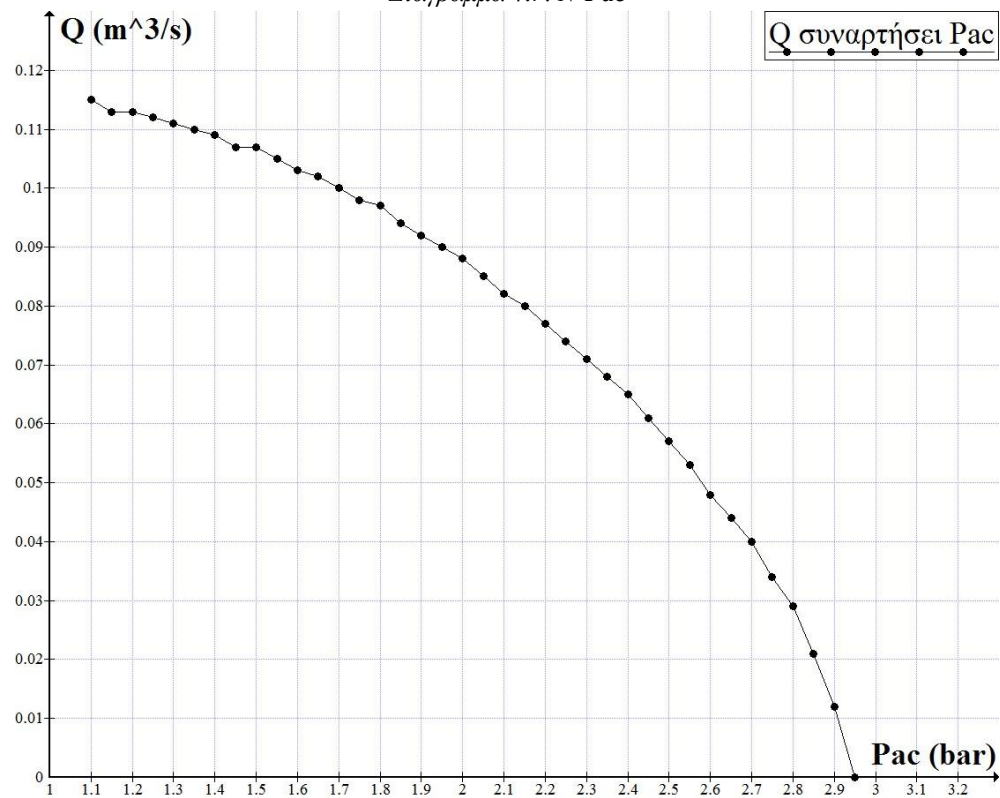


Διάγραμμα 4.6. Μετατόπιση συστήματος για διαφορετικές πιέσεις.

Τέλος στα διαγράμματα 4.7-4.8, απεικονίζεται ο παραπάνω πίνακας και φαίνεται πως η παροχή είναι φθίνουσα συνάρτηση της αυξανόμενης πίεσης, ενώ η ισχύς έχει σχήμα καμπάνας και παρουσιάζει μέγιστο.



Διάγραμμα 4.7. $N-P_{ac}$



Διάγραμμα 4.8. $Q-P_{ac}$

4.1.2) Μελέτη επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συσκευής φαίνονται στο σχήμα 3.1. Καθένα από αυτά επηρεάζει διαφορετικά την απόδοση του συστήματος μας. Οι συνδυασμοί τους είναι πολυάριθμοι και για αυτό, προς διευκόλυνση της μελέτης μας, θα κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- Η διάμετρος του κυλινδρικού πλωτήρα D , συνδέεται με το βύθισμα του l_d μέσω της σχέσης $l_d=D/2$. Η εκτέλεση του προγράμματος για διαφορετικά βυθίσματα δείχνει ότι όσο μικραίνει το βύθισμα τόσο καλύτερη απόδοση έχουμε. Ωστόσο και για κατασκευαστικούς λόγους το βύθισμα δεν μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές σε σχέση με την διάμετρο του. Άλλωστε, ο σταθερός λόγος D/l_d δίνει μεγαλύτερη ισχύ στην προσέγγιση που έγινε για σταθερό συντελεστή πρόσθετης μάζας
- Το μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι την έξοδο του νερού h , είναι σταθερό και ίσο με $h=1\text{ m}$. Το μέγεθος αυτό δεν επηρεάζει αρκετά το σύστημα αν έχει τιμές της τάξεως του l_d . Στην ιδανική περίπτωση θα θέλαμε μηδενικό h αλλά αυτό δεν γίνεται για κατασκευαστικούς λόγους.
- Η εξωτερική διάμετρος του αγωγού d' του αγωγού, είναι κατά προσέγγιση μεγαλύτερη από την d κατά μια χάρη της τάξεως του 5% ($d'=1,05d$)

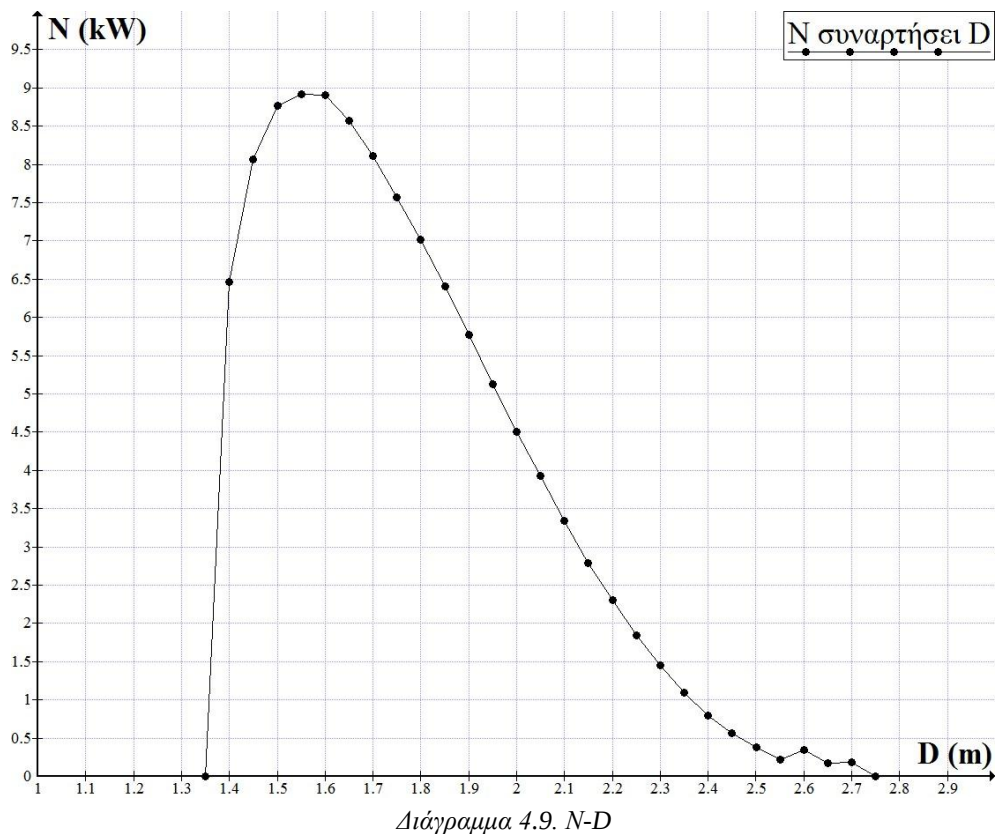
Έτσι τα μεγέθη που ουσιαστικά μεταβάλλονται πλέον είναι η διάμετρος του κυλινδρικού πλωτήρα D , η εσωτερική διάμετρος του αγωγού d και το μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το ελεύθερο κάτω άκρο L .

Διάμετρος πλωτήρα D :

Με σταθερά όλα τα άλλα δεδομένα, όπως στο αρχικό παράδειγμα, μεταβάλλουμε την διάμετρο πλωτήρα D με βήμα $0,05\text{ m}$, και μαζί το βύθισμα σύμφωνα με την σχέση $l_d=D/2$. Προκύπτει ο παρακάτω πίνακας και το αντίστοιχο διάγραμμα:

D(m)	N (kW)	D(m)	N (kW)	D(m)	N (kW)
1.35	0.00	1.85	6.40	2.35	1.10
1.40	6.46	1.90	5.77	2.40	0.80
1.45	8.06	1.95	5.13	2.45	0.56
1.50	8.77	2.00	4.51	2.50	0.38
1.55	8.92	2.05	3.93	2.55	0.22
1.60	8.90	2.10	3.34	2.60	0.35
1.65	8.57	2.15	2.79	2.65	0.17
1.70	8.11	2.20	2.30	2.70	0.19
1.75	7.57	2.25	1.84	2.75	0.00
1.80	7.02	2.30	1.45	2.80	0.00

Πίνακας 4.3. Επίδραση διαμέτρου πλωτήρα

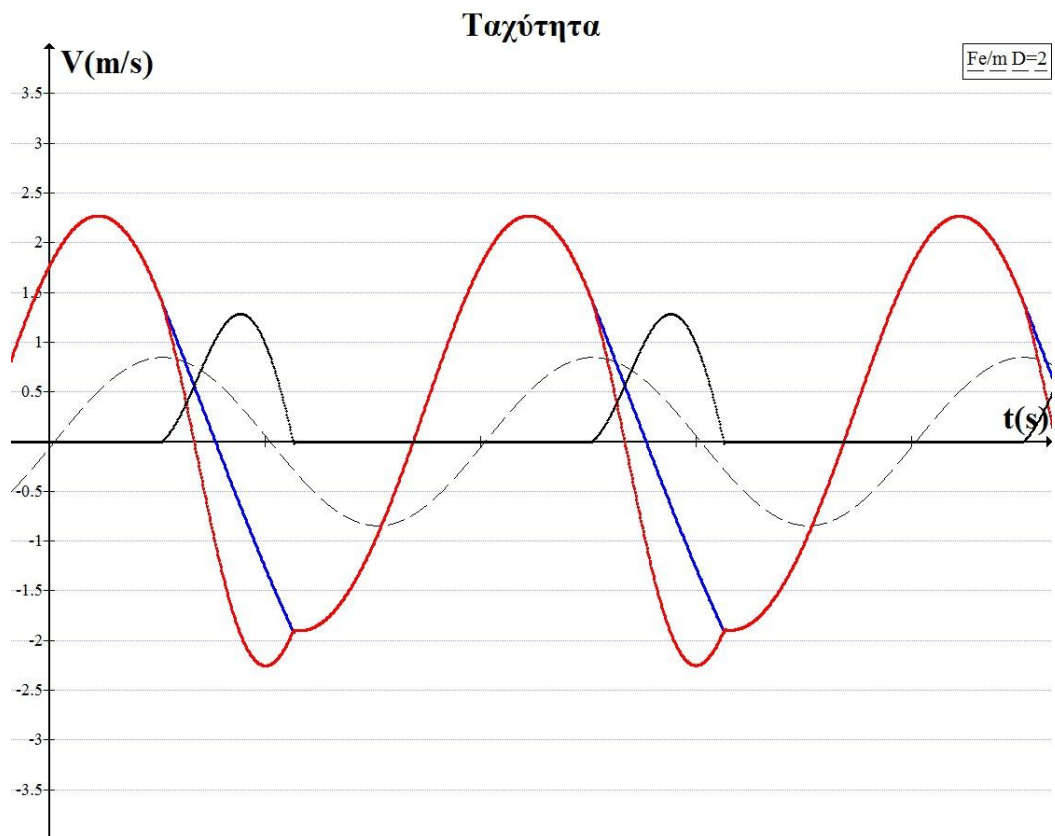


Από το διάγραμμα 4.9 φαίνεται ότι η ισχύς παρουσιάζει μέγιστο για κάποια τιμή της διαμέτρου D όταν όλα τα άλλα μεγέθη είναι σταθερά. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το μέγιστο παρουσιάζεται όταν $D=1.55$ m, πολύ κοντά στην αρχική διάμετρο. Για τιμές κάτω του $D=1.35$ m και πάνω του $D=2.75$ m η βαλβίδα δεν ανοίγει και δεν έχουμε παραγωγή ισχύος.

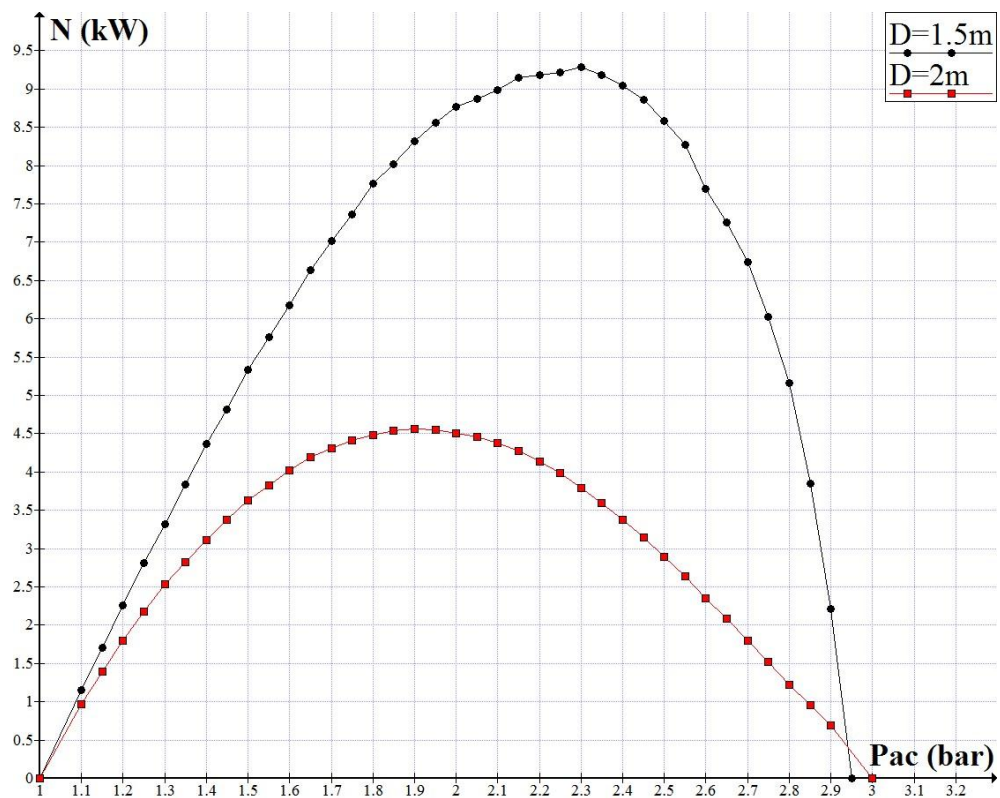
Επειδή η αρχική διάμετρος είναι αρκετά μικρή μπορεί να προκύψουν διάφορα τεχνικά ζητήματα που να απαιτούν μεγαλύτερη διάμετρο έστω $D=2$ m. Για σύγκριση δίδονται τα διαγράμματα ταχύτητας-δύναμης διέγερσης και μεταβαλλόμενης πίεσης αεροκώδωνα-ισχύος (N-Pac) όταν τα άλλα μεγέθη παραμένουν σταθερά (διάγραμμα 4.10-4.11).

Παρατηρούμε στο διάγραμμα 4.10 πως πλέον για $D=2$ m η δύναμη διέγερσης δεν βρίσκεται σε φάση με την ταχύτητα του συστήματος και έτσι το σύστημα δεν εκμεταλλεύεται σε μέγιστο βαθμό την ενέργεια του συγκεκριμένου κύματος, για αυτό και η θεωρητική ισχύς που παράγει είναι αρκετά μικρότερη. Αυτό μπορεί να φανεί εποπτικά και από το εμβαδόν που περικλείουν οι δύο καμπύλες σχετικής ταχύτητας των σχημάτων 4.3-4.10, το οποίο είναι μέγεθος ανάλογο της παραγόμενης ισχύος όταν η πίεση αεροκώδωνα είναι σταθερή.

Το διάγραμμα 4.11 μεταβαλλόμενης πίεσης έχει την ίδια μορφή όπως για $D=1.5$ m αλλά παρουσιάζει μέγιστο σε διαφορετική πίεση.



Διάγραμμα 4.10. Ταχύτητα συστήματος-στήλης νερού και σχετική και δύναμη διέγερσης για $D=2$ και όλα τα άλλα μεγέθη σύμφωνα με το αρχικό παράδειγμα.



Διάγραμμα 4.11. $N-Pac$ για δύο διαμέτρους.

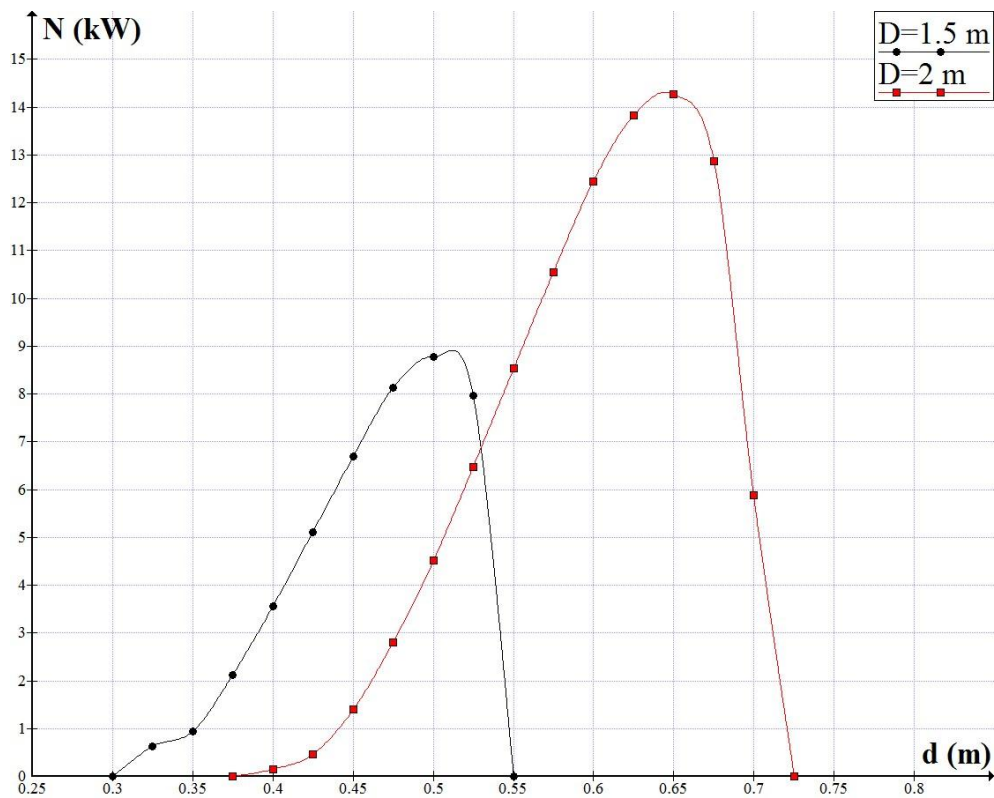
Διάμετρος αγωγού d :

Μέχρι τώρα θεωρήσαμε σταθερή διάμετρο αγωγού $d=0,5\text{ m}$. Ωστόσο η διάμετρος αυτή μπορεί να αλλάξει. Στον παρακάτω πίνακα δίδεται η θεωρητική ισχύς αεροκώδωνα, που είναι ανάλογη της παροχής για σταθερή πίεση, για διαφορετικά d . Τα υπόλοιπα δεδομένα είναι ίδια με το αρχικό παράδειγμα.

d	N (kW)
0.300	0.00
0.325	0.62
0.350	0.94
0.375	2.12
0.400	3.56
0.425	5.10
0.450	6.70
0.475	8.13
0.500	8.77
0.525	7.97
0.550	0.00

Πίνακας 4.4. Επίδραση διαμέτρου αγωγού

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η σχέση της διαμέτρου d με την ισχύ N με τα άλλα δεδομένα σταθερά όπως στο αρχικό παράδειγμα. Για σύγκριση δίνεται και η σχέση d - N για $D=2\text{ m}$. Και εδώ τα διαγράμματα έχουν παρόμοια μορφή και παρουσιάζουν μέγιστα. Παρατηρούμε πως αν κατασκευαστικά μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη διατομή αγωγού, με το ίδιο πάντα μήκος αγωγού και πίεση αεροκώδωνα, είναι προτιμότερο να έχουμε μεγαλύτερο πλωτήρα για να επιτύχουμε μεγαλύτερη απόδοση.



Διάγραμμα 4.12. $N-d$ για δύο διαμέτρους.

Μήκος αγωγού L :

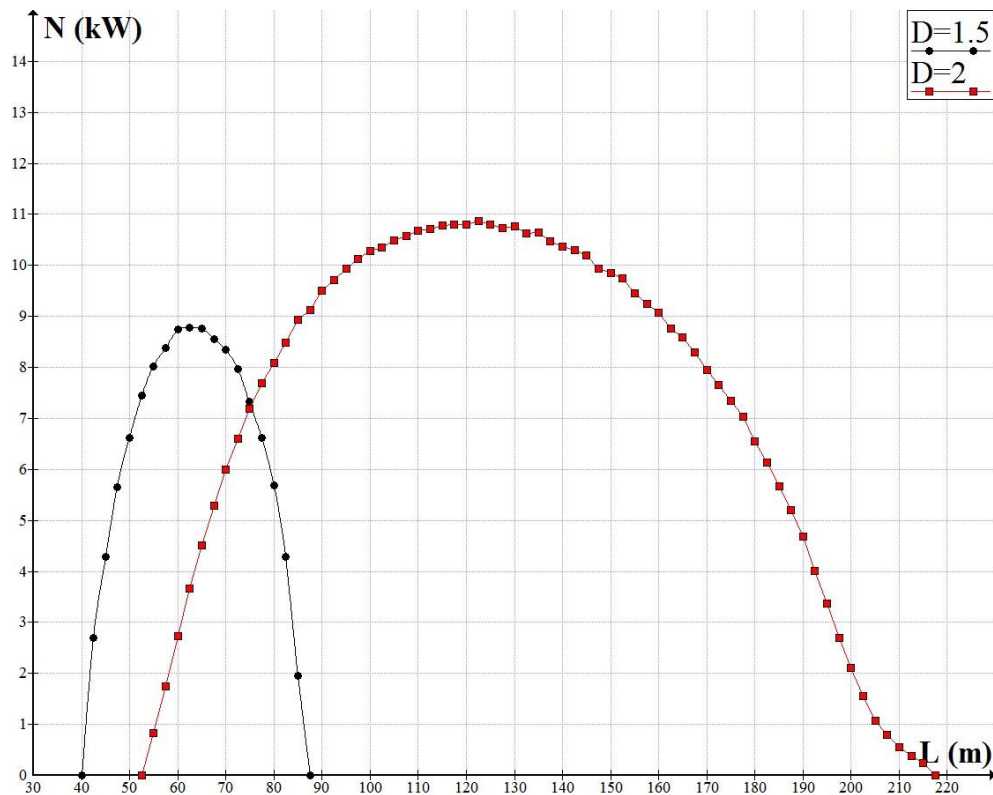
Στις προηγούμενες αναλύσεις το μήκος του αγωγού ήταν σταθερό και ίσο με $L=65\text{ m}$. Το μήκος αυτό επηρεάζει αρκετά το σύστημα μας. Ξεκινώντας από $L=40\text{ m}$ με βήμα 2.5 m δοκιμάζουμε διάφορα μήκη με σταθερά όλα τα άλλα μεγέθη όπως στο αρχικό παράδειγμα. Καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα:

$L(\text{m})$	$N(\text{kW})$	$L(\text{m})$	$N(\text{kW})$
40	0.00	65	8.77
42.5	2.70	67.5	8.56
45	4.29	70	8.35
47.5	5.65	72.5	7.96
50	6.62	75	7.33
52.5	7.45	77.5	6.62
55	8.01	80	5.69
57.5	8.38	82.5	4.29
60	8.75	85	1.95
62.5	8.78	87.5	0.00

Πίνακας 4.5. Επίδραση μήκους αγωγού

Τα σημεία αυτά απεικονίζονται και στο διάγραμμα 4.12. Και σε αυτό το διάγραμμα βλέπουμε πως υπάρχει σημείο στο οποίο η ισχύς γίνεται μέγιστη. Για σύγκριση

δίνονται και τα αντίστοιχα σημεία για $D=2\text{ m}$. Η καμπύλη αυτή έχει και πάλι παρόμοια μορφή με αυτή της $D=1.5\text{ m}$, αλλά είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά και καλύπτει μεγαλύτερο εύρος μήκων αγωγού.



Διάγραμμα 4.13. $N-L$ για δύο διαμέτρους

Μετά από ένα σημείο το μήκος είναι αρκετά μεγάλο και τεχνικά πολύ δύσκολο να λειτουργήσει. Γι αυτό και στην βελτιστοποίηση που θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο θα τεθεί κάποιο όριο. Ένας σημαντικός παράγοντας που εξαρτάται από το μήκος του αγωγού και μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της συσκευής είναι η υποπίεση κάτω από την βαλβίδα όταν αυτή είναι κλειστή όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Αυτή συνήθως δεν πρέπει να ξεπερνά τιμές των 0.9 έως 1 bar .

Στον πίνακα 4.6 δίδονται για την παραπάνω συσκευή το μέγεθος $L\rho\ddot{\varphi}$ (υποπίεση) σε bar , όπου η $\ddot{\varphi}$ είναι η μέγιστη επιτάχυνση του συστήματος όταν η βαλβίδα είναι κλειστή και τοποθετημένη στην επιφάνεια της θάλασσας. Παρατηρούμε ότι το μέγεθος αυτό είναι μεγαλύτερο από την παραπάνω τιμή και άρα υπάρχει κίνδυνος. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τοποθέτηση της βαλβίδας πιο χαμηλά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Γι αυτό στον πίνακα δίδεται και η τοποθέτηση της βαλβίδας (βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας) που εξασφαλίζει πιο ομαλή λειτουργία.

L(m)	$L\rho\ddot{\phi}$ (bar)	$L_{\text{valve}}(\text{m})$	L(m)	$L\rho\ddot{\phi}$ (bar)	$L_{\text{valve}}(\text{m})$
40	1.29	10.6	65	1.51	24.0
42.5	1.35	12.6	67.5	1.50	24.6
45	1.39	14.2	70	1.49	25.5
47.5	1.43	15.9	72.5	1.48	26.0
50	1.45	17.2	75	1.46	26.3
52.5	1.47	18.5	77.5	1.46	27.2
55	1.48	19.8	80	1.43	26.9
57.5	1.49	20.8	82.5	1.39	26.0
60	1.51	22.2	85	1.29	22.3
62.5	1.50	23.0	87.5	1.00	4.3

Πίνακας 4.6. μήκους αγωγού-υποπίεση και βάθος βαλβίδας.

Η παραπάνω ανάλυση που έγινε για τις τρεις βασικές διαστάσεις, μας δείχνει ότι υπάρχει βέλτιστος συνδυασμός γεωμετρικών διαστάσεων στην επιθυμητή πίεση και συχνότητα κύματος λειτουργίας της συσκευής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί οικονομικοί και κατασκευαστικοί παράγοντες (πχ αντοχή υλικών) μπορεί να θέσουν κάποιο όριο στην γεωμετρία είτε του πλωτήρα είτε του αγωγού. Γενικότερα, όπως θα φανεί και παρακάτω, μεγιστοποίηση της ισχύος εμφανίζεται όταν η ιδιοσυχνότητα της συσκευής, μέγεθος που εξαρτάται από της γεωμετρικές της διαστάσεις, προσεγγίζει την συχνότητα του κύματος.

4.1.3) Μελέτη επίδρασης των κυματικών χαρακτηριστικών

Περίοδος-γωνιακή συχνότητα κύματος:

Τα πραγματικά κύματα στα οποία προορίζεται να λειτουργήσει η συσκευή όχι μόνο δεν είναι αρμονικά, αλλά έχουν και διαφορετικά χαρακτηριστικά που εναλλάσσονται συνεχώς. Βέβαια μπορούμε να υποθέσουμε πως τα κύματα αυτά είναι μια επαλληλία αρμονικών κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες και ύψη. Προηγουμένως μελετήσαμε την συσκευή ως προς την γεωμετρία, θεωρώντας σταθερό κύμα περιόδου $T=5,8 \text{ sec}$ και ύψους $H=1,625 \text{ m}$. Η ανάλυση όμως της γεωμετρίας δεν μπορεί να γίνει μόνο για ένα συγκεκριμένο κύμα αλλά για το συγκεκριμένο κυματικό δυναμικό της περιοχής που προορίζεται να λειτουργήσει.

Η συσκευή θα πρέπει να έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά που να επιτρέπουν αποδοτική λειτουργία σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων μιας περιοχής. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.2.3, μια συσκευή λειτουργεί στην μέγιστη απόδοση της όταν η φυσική συχνότητα της (ιδιοσυχνότητα), είναι ίση ή περίπου ίση με την

συχνότητα του αρμονικού κύματος. Τότε η συχνότητα συντονισμού για κυλινδρικό πλωτήρα δίδεται από τη σχέση:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S_w}{m + m_a}} \quad (3.31)$$

Ωστόσο, για το σύστημα, μας όταν η βαλβίδα είναι κλειστή, στην κίνηση της συσκευής συμμετέχει και η μάζα του νερού m_w και τότε η συχνότητα συντονισμού γίνεται:

$$\omega_n' = \sqrt{\frac{\rho g S_w}{m + m_a + m_w}} \quad (3.32)$$

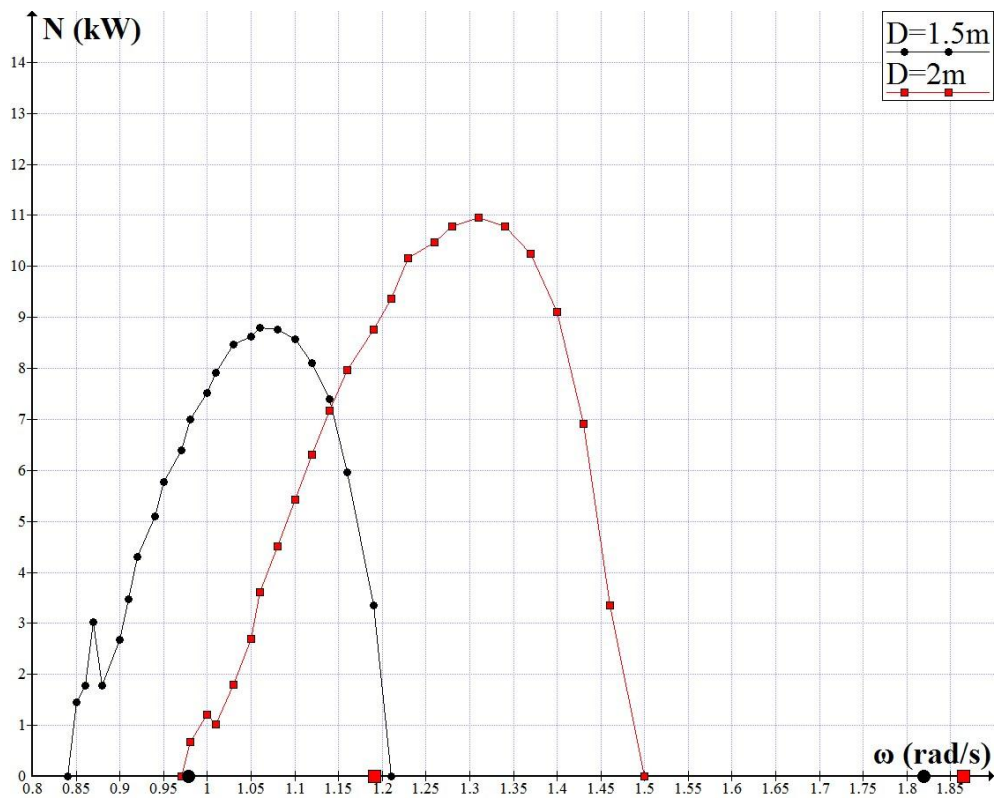
Έτσι φαίνεται πως η βέλτιστη λειτουργία βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο συχνότητες και μάλιστα όσο περισσότερο χρόνο είναι ανοιχτή η βαλβίδα τόσο περισσότερο πιο κοντά στην ω_n είναι και αντίστροφα.

Όπως θα δούμε και στην επόμενη ενότητα το ύψος κύματος είναι ανάλογο της περιόδου-συχνότητας του, δηλαδή υψηλά κύματα εμφανίζονται σε μεγάλες περιόδους και αντίστροφα. Για τον λόγο ένα κύμα ύψους $H=1,625 \text{ m}$ είναι σχεδόν αδύνατο να εμφανιστεί σε περιόδους μικρότερες των 4 sec ή μεγαλύτερες των 9 sec . Εφαρμόζοντας αυτό το εύρος στο αρχικό σύστημά μας, με σταθερό ύψος κύματος προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

T (s)	ω (rad/s)	N (kW)	T (s)	ω (rad/s)	N (kW)
7.50	0.84	0.00	6.30	1.00	7.52
7.40	0.85	1.45	6.20	1.01	7.92
7.30	0.86	1.78	6.10	1.03	8.46
7.20	0.87	3.02	6.00	1.05	8.62
7.10	0.88	1.78	5.90	1.06	8.80
7.00	0.90	2.68	5.80	1.08	8.77
6.90	0.91	3.48	5.70	1.10	8.57
6.80	0.92	4.31	5.60	1.12	8.10
6.70	0.94	5.09	5.50	1.14	7.39
6.60	0.95	5.77	5.40	1.16	5.97
6.50	0.97	6.40	5.30	1.19	3.36
6.40	0.98	7.00	5.20	1.21	0.00

Πίνακας 4.7. Επίδραση περιόδου κύματος

Και το αντίστοιχο διάγραμμα όπου διακρίνονται και οι συχνότητες $\omega_n = 1.82 \text{ rad/s}$, $\omega_n' = 0.98 \text{ rad/s}$ που υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.31-3.32. Για σύγκριση δίδεται και το διάγραμμα συχνοτήτων για $D=2 \text{ m}$ και οι αντίστοιχες ω_n, ω_n' .

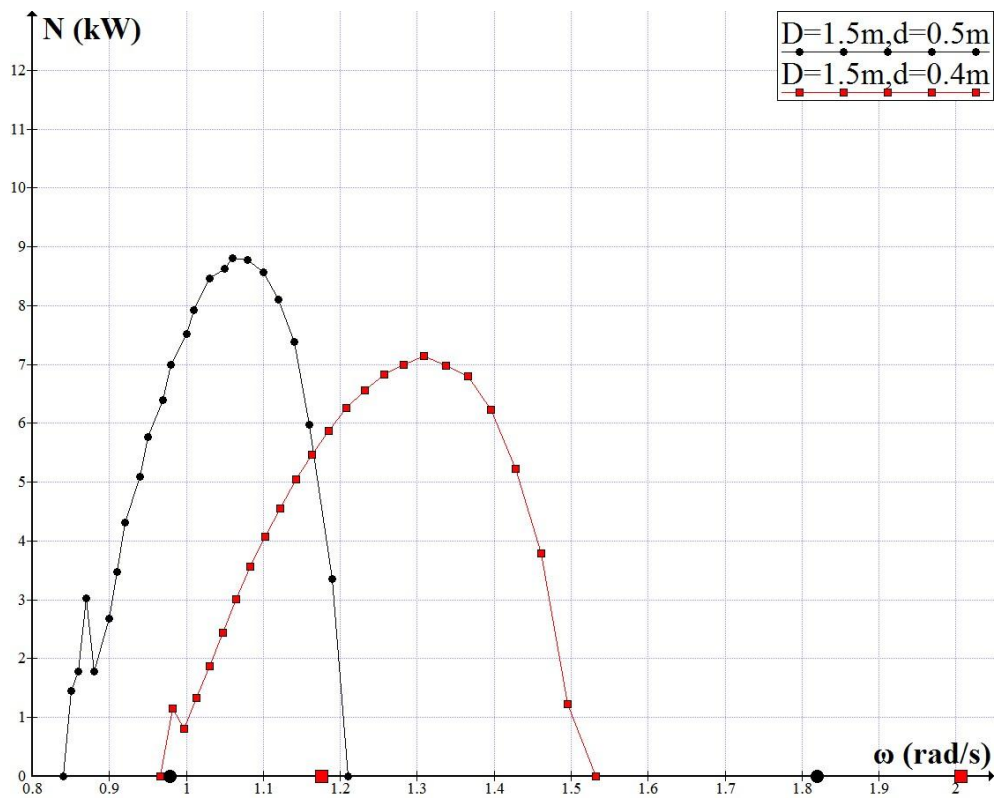


Διάγραμμα 4.14. N - ω για δύο διαμέτρους

Παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες συχνότητες βρίσκονται μεταξύ των δύο ιδιοσυχνοτήτων της συσκευής, αλλά σαφώς πιο κοντά στις συχνότητες ω_n' , που έχουν τα συστήματα αν υπολογίσουμε και την μάζα του νερού στον αγωγό, λόγω του μικρού χρόνου ανοίγματος της βαλβίδας. Για την συσκευή με $D=2$ m το εύρος λειτουργίας είναι μεγαλύτερο όταν οι άλλες διαστάσεις είναι σταθερές.

Ανάλογα με τα κυματικά δεδομένα μιας περιοχής βλέπουμε πως μπορούμε να επιλέξουμε τις διαστάσεις μιας συσκευής έτσι ώστε να καλύπτει μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Για παράδειγμα αν θέλαμε να μεγαλώσουμε το εύρος συχνοτήτων της συσκευής με $D=1.5$, με σκοπό να λειτουργεί και σε μικρότερες συχνότητες από $T=5.2$ s (αντίστοιχα $\omega=1.21$ rad/s στο διάγραμμα) θα μπορούσαμε να μικρύνουμε το μήκος αγωγού L ή την διάμετρο του d έτσι ώστε να μικρύνει η μάζα m_w (περισσότερο από ότι η $m + m_a$) και μέσω της σχέσης 3.32 να μεγαλώσει η ω_n' (αντίστοιχα να μικρύνει η T'). Βέβαια αυτό θα είχε και επίδραση στην μέγιστη ισχύ.

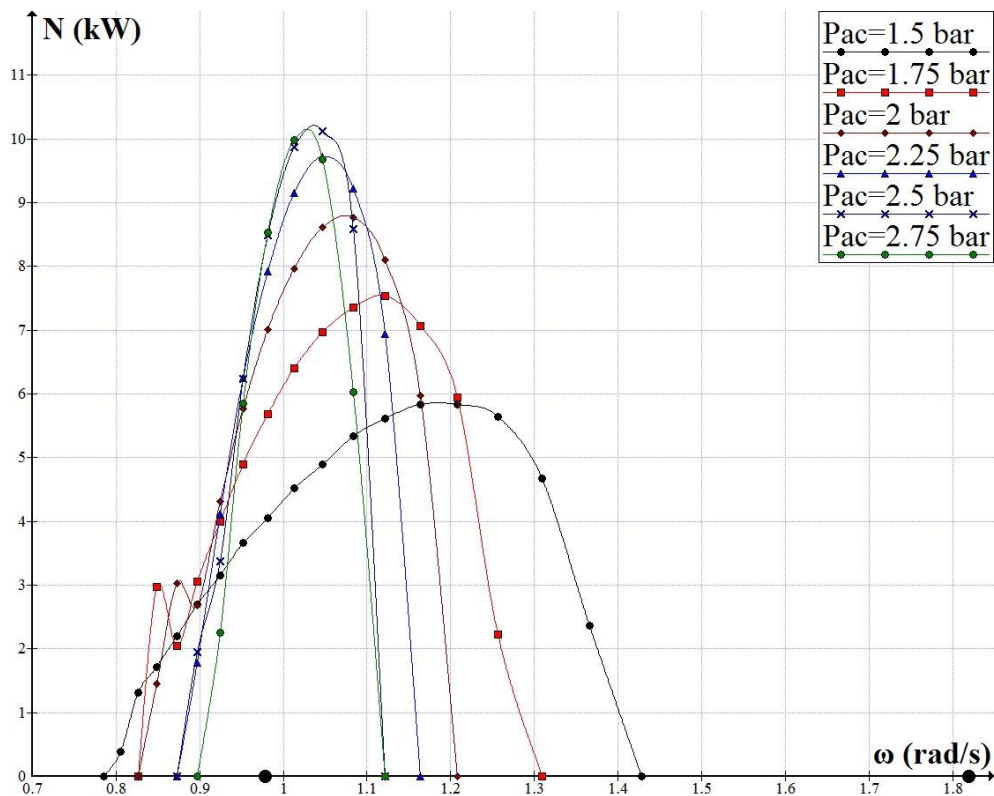
Στο παρακάτω διάγραμμα εφαρμόζουμε την πιο πάνω διατύπωση και συγκρίνουμε την απόκριση της συσκευής με μια άλλη διαμέτρου αγωγού $d=0,4$ m στις διάφορες συχνότητες. Όλα τα άλλα δεδομένα παραμένουν σταθερά.



Διάγραμμα 4.15 N - ω για δύο διαμέτρους αγωγού

Παρατηρούμε ότι η συσκευή με την μικρότερη διάμετρο αγωγού d , έχει καλύτερη συμπεριφορά σε μικρότερης περιόδου κύματα (αντίστοιχα μεγάλης γωνιακής συχνότητας). Έτσι αν για παράδειγμα θέλουμε η συσκευή να λειτουργήσει σε μέρη όπου υπάρχουν συχνά κύματα μικρών περιόδων της τάξεως των 4 έως 5 sec θα προτιμήσουμε συσκευή με μικρότερη διάμετρο αγωγού d ή με μικρότερο μήκος αγωγού L για την ίδια διάμετρο πλωτήρα. Από την άλλη αν η συσκευή λειτουργήσει σε μέρη με κύματα μεγάλων περιόδων, όπως για παράδειγμα στον ωκεανό όπου τα κύματα έχουν αρκετά συχνά περιόδους της τάξεως των 8 έως 10 sec, θα προτιμήσουμε συσκευή με μεγάλη διάμετρο αγωγού d ή με μεγάλο μήκος αγωγού L .

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε τις διάφορες συχνότητες-περιόδους για διαφορετικές πιέσεις αεροκώδωνα, στην αρχική συσκευή διαμέτρου πλωτήρα $D=1.5$ m και προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



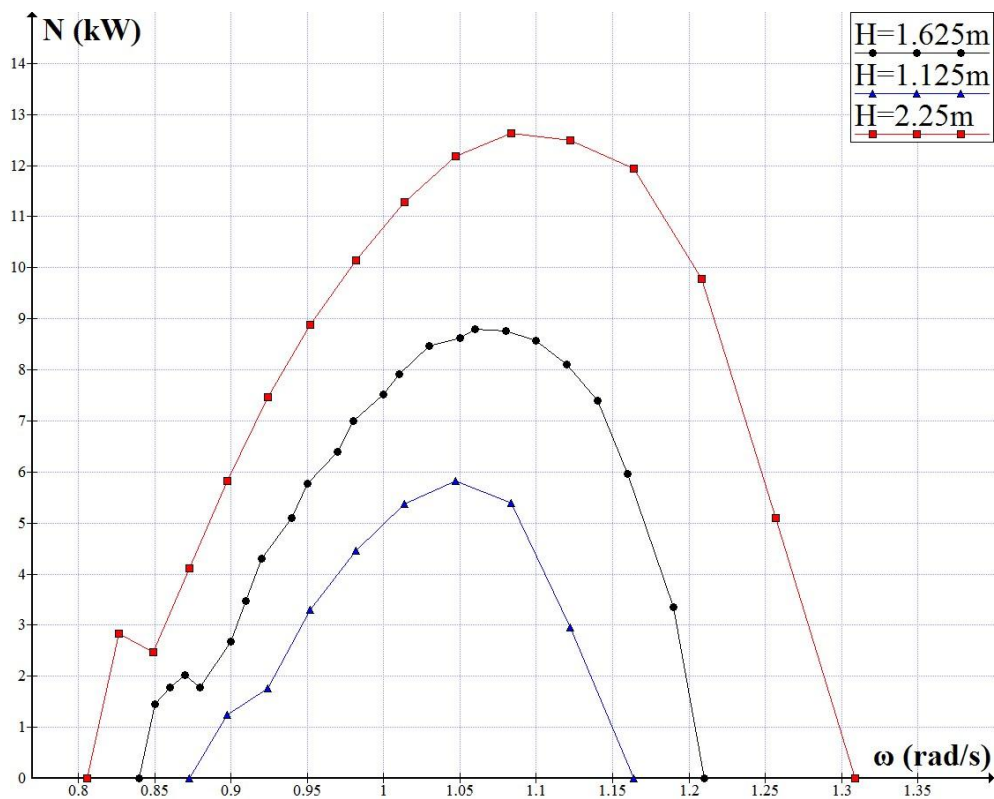
Διάγραμμα 4.16 $N-\omega$ για διαφορετικές πιέσεις αεροκώδωνα

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την πίεση του αεροκώδωνα τόσο η βέλτιστη συχνότητα λειτουργίας μετατοπίζεται προς την ιδιοσυχνότητα ω_n' που έχει η συσκευή όταν η βαλβίδα είναι κλειστή. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι μεγάλες πιέσεις δεν αφήνουν την βαλβίδα να μείνει ανοιχτή για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Από το ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε ότι το εύρος λειτουργίας μικραίνει όσο μεγαλώνει η σταθερή πίεση αεροκώδωνα. Έτσι για παράδειγμα αν επιλέξουμε πίεση $P_{ac}=2.75$ bar μπορούμε να επιτύχουμε μέχρι και θεωρητική ισχύ κοντά στα 10 kW, αλλά η συσκευή λειτουργεί μόνο για περιόδους από 5,8 έως 6,8 sec. Το ιδανικό θα ήταν να μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε όλα τα σημεία λειτουργίας των καμπυλών του διαγράμματος 4.16. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με κατάλληλο έλεγχο πίεσης του αεροκώδωνα ώστε κάθε στιγμή η συσκευή να αποδίδει το μέγιστο δυνατό.

Ύψος κύματος:

Μέχρι τώρα θεωρούσαμε σταθερό το ύψος και ίσο με $H=1.625$ m. Ωστόσο το ύψος του κύματος αλλάζει συνεχώς και συχνά είναι ανάλογο με την περίοδο του κύματος. Δηλαδή υψηλότερα κύματα εμφανίζονται σε μεγαλύτερες περιόδους. Για την αρχική συσκευή επιλέγουμε τώρα ένα πιο ήπιο κύμα με $H=1.125$ m και ένα μεγαλύτερο με $H=2.25$ m. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την απόκριση της συσκευής στις διάφορες συχνότητες για αυτά τα ύψη. Για σύγκριση δίδεται και το διάγραμμα για

$H=1.625\text{ m}$. Παρατηρούμε πως οι καμπύλες είναι όμοιες με αυτές των μικρότερων σε ύψος κυμάτων να περικλείονται από αυτές των μεγαλύτερων με την ισχύ και το εύρος λειτουργίας να μειώνονται αισθητά.



Διάγραμμα 4.17. N - ω για τρία ύψη κύματος.

Γενικά αν έχουμε μεγάλα σε ύψος κύματα έχουμε και μεγαλύτερη ισχύ. Βέβαια τα μεγάλα κύματα όπως είπαμε προηγουμένως, συναντιούνται κυρίως σε μεγάλες περιόδους γι' αυτό η επιλογή π.χ. ενός ύψους $H=3\text{ m}$ σε περίοδο $T=4\text{ sec}$ είναι μη ρεαλιστική. Ένα κύμα τέτοιου ύψους θα έχει περίοδο συνήθως μεγαλύτερη από 7-8 sec και άρα θα ήταν έξω από τα όρια λειτουργίας του παραπάνω συστήματος με αποτέλεσμα να έφευγε ανεκμετάλλευτη όλη η ισχύς του.

Αν ήταν γνωστό πως σε μια περιοχή εμφανίζονται συχνά τέτοιου είδους κύματα θα ήταν επιθυμητή μια συσκευή με κατάλληλες διαστάσεις ώστε να επιτευχθεί μικρότερη ιδιοσυχνότητα του συστήματος και άρα μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Φαίνεται ξεκάθαρα πως τα κυματικά δεδομένα μιας περιοχής αποτελούν τη βάση για την επιλογή της γεωμετρίας.

4.2) ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΕΣ

Το ελληνικό θαλάσσιο δυναμικό μπορεί να είναι αρκετά μικρότερο από αυτό των δυτικών ακτών της Ευρώπης, αλλά έχει ένα χαρακτηριστικό που το κάνει αρκετά ευνοϊκό για την συγκεκριμένη συσκευή. Αυτό είναι οι η σχετικά χαμηλή περίοδος που χαρακτηρίζει τα ελληνικά κύματα. Η περίοδος αυτή κατά 99% κυμαίνεται από 2 έως 10 sec με τις περιόδους των 9 και 8 sec να είναι αρκετά σπάνιες. Έτσι το σύστημα, όπως φάνηκε και προηγουμένως, δεν χρειάζεται να έχει μεγάλες διαστάσεις αγωγού (μήκος και διάμετρος) σε σχέση με τον πλωτήρα για να λειτουργήσει αποδοτικά στο παραπάνω φάσμα συχνοτήτων.

Αντίθετα αν η συσκευή επρόκειτο να τοποθετηθεί σε ωκεανό, όπου τα κύματα εμφανίζονται συχνότερα σε περιόδους άνω των 6-7 sec, τότε για αποδοτική λειτουργία στο αντίστοιχο φάσμα θα θέλαμε μεγάλες διαστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση για παρόμοια απόδοση με την μικρότερη συσκευή των ελληνικών θαλασσών, θα είχαμε σίγουρα αρκετά μεγαλύτερη απορρόφηση ισχύος λόγω μεγαλύτερης ενέργειας κυμάτων, αλλά τόσο το αρχικό και λειτουργικό κόστους όσο και οι καταπονήσεις που θα δεχόταν η συσκευή θα ήταν αρκετά μεγαλύτερα. Σε κάθε περίπτωση το πρόβλημα είναι τεχνοοικονομικής φύσεως.

4.2.1) Ετήσια κατανομή κυματισμού (σημείο κυματικών δεδομένων M4)

Για την Ελλάδα όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2.3, η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού γίνεται από τα δεκαετή κυματικά δεδομένα του συστήματος Ποσειδών, που δημοσιεύονται στον 'Ατλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών'. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δίκτυο πλωτήρων τοποθετημένων σε διάφορα σημεία που συλλέγουν και επεξεργάζονται δεδομένα. Τα σημεία αυτά φαίνονται στην εικόνα 1.4. Για κάθε σημείο υπάρχει ένας πίνακας που δείχνει την κατανομή των κυμάτων κατά περίοδο και ύψος στα περίπου χίλια κύματα. Παρακάτω δίδεται ο αντίστοιχος πίνακας για το σημείο M4 ($37,51^{\circ}N, 25.46^{\circ}E$) το οποίο βρίσκεται στην ανοιχτή θάλασσα ανατολικά της Τήνου και όπως φαίνεται από τον πίνακα 1.1 έχει το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό από τα άλλα σημεία των πλωτήρων.

T(s)	H(m)														Total
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00		
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.9-2.6	43	64	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	117	
2.6-3.1	14	19	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	
3.1-3.8	23	42	30	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	106	
3.8-4.6	17	36	50	45	19	3	0	0	0	0	0	0	0	170	
4.6-5.0	6	11	13	22	25	13	2	0	0	0	0	0	0	92	
5.0-5.5	7	8	11	18	23	25	14	3	1	0	0	0	0	110	
5.5-6.1	10	5	7	12	17	24	29	22	11	1	0	0	0	138	
6.1-6.7	5	4	3	3	5	8	12	21	28	5	0	0	0	94	
6.7-7.4	2	1	2	2	2	2	4	7	23	13	2	0	0	60	
7.4-8.1	2	1	1	1	2	1	1	2	8	10	4	1	0	34	
8.1-8.9	2	1	0	0	0	1	1	1	2	4	3	2	1	18	
8.9-9.8	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	7	
9.8-10.8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Total	134	192	140	115	94	77	63	56	74	34	10	4	2	995	

Πίνακας 4.8 Κυματικά Δεδομένα Σημείου M4

Στον πίνακα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα μεγαλύτερα ύψη κύματος εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες. Επίσης βλέπουμε πως κύματα με συχνότητες άνω των 9 sec και ύψη άνω των 3,5 m είναι σχεδόν μηδαμινά. Με βάση αυτόν τον πίνακα θα γίνει μια ανάλυση για τις βέλτιστες διαστάσεις της συσκευής, δηλαδή τις διαστάσεις που αποδίδουν καλύτερα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων και υψών. Επειδή τα δεδομένα είναι πολλά επιλέγουμε τα ύψη κύματος που εμφανίζονται περισσότερο για την εκάστοτε συχνότητα. Έτσι δημιουργούμε τον παρακάτω απλούστερο πίνακα:

a/a	T(s)	H(m)
1	2.25	0.375
2	2.85	0.375
3	3.45	0.5
4	4.2	0.625
5	4.8	1.125
6	5.25	1.375
7	5.8	1.625
8	6.4	2.25
9	7.05	2.25
10	7.75	2.75
11	8.5	3

Πίνακας 4.9. Απλοποιημένος M4

Όπου για τις συχνότητες και τα ύψη πήραμε τις μέσες τιμές των διαστημάτων του αναλυτικού πίνακα.

Για κάθε ζευγάρι $T-H$ του πίνακα μπορούν να προκύψουν οι αντίστοιχες γεωμετρικές διαστάσεις καθώς και η σταθερή πίεση αεροκώδωνα που αποδίδουν την μέγιστη ισχύ. Οι υπό μελέτη διαστάσεις για βελτιστοποίηση είναι η διάμετρος κυλινδρικού πλωτήρα D , η εσωτερική διάμετρος του αγωγού d , το μήκος του αγωγού L και η σταθερή πίεση αεροκώδωνα P_{ac} ενώ για τις υπόλοιπες διαστάσεις ισχύει ότι και στις

προηγούμενες ενότητες, δηλαδή, βύθισμα πλωτήρα $ld=D/2$, μήκος αγωγού από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι την έξοδο του νερού $h=1m$, εξωτερική διάμετρος αγωγού $d'=1,05d$.

Για τις σημαντικές αυτές διαστάσεις εισάγουμε μια αρχική τιμή $x(i)$ και προχωρώντας με το επιθυμητό βήμα για κάθε μία φτάνουμε μέχρι ένα άνω όριο που έχουμε θέσει. Συγκεκριμένα:

- Για την διάμετρο πλωτήρα D , ξεκινάμε από $D=1m$ και με βήμα $0,5m$ καταλήγουμε σε άνω όριο $D=4m$.
- Για την εσωτερική διάμετρο d , ξεκινάμε με $d=0.1m$ και με βήμα $0,05m$ καταλήγουμε σε άνω όριο $d=1m$.
- Για το μήκος του αγωγού L , ξεκινάμε από $L=20m$ και με βήμα $10m$ καταλήγουμε σε άνω όριο $L=100m$.
- Για την σταθερή πίεση αεροκώδωνα P_{ac} , ξεκινάμε από $P_{ac}=1,25$ bar και με βήμα $0,25$ bar καταλήγουμε σε άνω όριο $P_{ac}=4$ bar.

Τα άνω όρια προκύπτουν με το σκεπτικό πως περαιτέρω αύξηση τους προκαλεί ελάχιστη αύξηση στην ισχύ ενώ αντίθετα οι καταπονήσεις και το κόστος της συσκευής αυξάνονται σημαντικά. Όλες αυτές οι τιμές συνδυάζονται μεταξύ τους και εμφανίζουν μια ισχύ. Η μεγαλύτερη ισχύς αντιστοιχεί στο βέλτιστο συνδυασμό. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

α/α	$T(s)$	$H(m)$	$D(m)$	$L(m)$	$d(m)$	$P_{ac}(bar)$	$N(kW)$
1	2.25	0.375	1	40	0.1	1.5	0.1
2	2.85	0.375	1.5	70	0.15	1.5	0.28
3	3.45	0.5	2	100	0.2	2.25	0.91
4	4.2	0.625	3	100	0.4	1.75	2.84
5	4.8	1.125	4	100	0.6	2	11.80
6	5.25	1.375	4	100	0.7	2.5	21.22
7	5.8	1.625	4	100	0.85	2.5	35.41
8	6.4	2.25	4	100	1	2.75	69.9
9	7.05	2.25	3.5	100	1	3.25	67.46
10	7.75	2.75	3	100	1	3.25	81.74
11	8.5	3	2.5	100	0.95	3.25	74.21

Πίνακας 4.10. Βέλτιστες διαστάσεις σημείων

Παρατηρούμε πως το μέγεθος που εμφανίζει μια σταθερότητα στο εύρος συχνοτήτων είναι το μήκος του αγωγού L , το οποίο μάλιστα παίρνει και την μέγιστη δυνατή τιμή. Γενικά θέλουμε ο αγωγός να είναι μεγάλος, ειδικά στην περίπτωση κυμάτων υψηλής περιόδου και μεγάλου ύψους για να έχουμε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Το άνω όριο των 100 m που θέσαμε έγκειται στο γεγονός ότι μεγαλύτερος αγωγός εκτός από μεγαλύτερο κόστος θα προκαλούσε και περισσότερα κατασκευαστικά και λειτουργικά προβλήματα. Εξάλλου δοκιμές του προγράμματος έδειξαν ότι η αύξηση

της ισχύος είναι μικρή και εμφανίζεται το πολύ μέχρι τα 130-150 m αγωγού (για τα δεδομένα όρια των άλλων διαστάσεων).

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η υποπίεση κάτω από την βαλβίδα ώστε να μην υπερβαίνει τα 0.9 με 1 bar. Αυτό μεταφράζεται λόγω των επιταχύνσεων που έχουμε σε ασφαλές μήκος αγωγού κάτω από την βαλβίδα, της τάξεως των 40-50 m. Επειδή αυτά τα μήκη αγωγού αποδίδουν πολύ λιγότερο αν η βαλβίδα τοποθετηθεί κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι προτιμότερο να τοποθετήσουμε την βαλβίδα χαμηλότερα μέσα στον αγωγό για μεγαλύτερη ασφάλεια και απόδοση.

Σε κάθε περίπτωση το μήκος L είναι ίσως η σημαντικότερη διάσταση από την οποία πρέπει να ξεκινήσουμε την κατασκευή της συσκευής. Δηλαδή όταν διάφοροι τεchnοοικονομικοί παράγοντες θέσουν ανώτατο επιτρεπτό όριο στο μήκος, το όριο αυτό μπορεί να αποτελέσει την αφετηρία για την περαιτέρω γεωμετρική διερεύνηση.

4.2.2) Βέλτιστες διαστάσεις σημείου

Για να βρούμε ποιος συνδυασμός διαστάσεων του πίνακα 4.10 αποδίδει περισσότερο για το σημείο M4 εργαζόμαστε ως εξής:

Καταρχάς τροποποιούμε τον αρχικό πίνακα του σημείου M4 (πίνακας 4.8), έτσι ώστε να εμφανίζει το ποσοστό κάθε ζευγαριού $T-H$. Αυτό γίνεται με απλή διαίρεση του κάθε αριθμού κυμάτων με το σύνολο των κυμάτων (στην περίπτωση μας 995) και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 4.11

T(s)	H(m)														Total
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
1.9-2.6	4.32	6.43	1.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.76
2.6-3.1	1.41	1.91	1.31	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.82
3.1-3.8	2.31	4.22	3.02	1.01	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.65
3.8-4.6	1.71	3.62	5.03	4.52	1.91	0.30	0	0	0	0	0	0	0	0	17.09
4.6-5.0	0.60	1.11	1.31	2.21	2.51	1.31	0.20	0	0	0	0	0	0	0	9.25
5.0-5.5	0.70	0.80	1.11	1.81	2.31	2.51	1.41	0.30	0.10	0	0	0	0	0	11.06
5.5-6.1	1.01	0.50	0.70	1.21	1.71	2.41	2.91	2.21	1.11	0.10	0	0	0	0	13.87
6.1-6.7	0.50	0.40	0.30	0.30	0.50	0.80	1.21	2.11	2.81	0.50	0	0	0	0	9.45
6.7-7.4	0.20	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.40	0.70	2.31	1.31	0.20	0	0	0	6.03
7.4-8.1	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.20	0.80	1.01	0.40	0.10	0	0	3.42
8.1-8.9	0.20	0.10	0	0	0	0.10	0.10	0.10	0.20	0.40	0.30	0.20	0.10	0	1.81
8.9-9.8	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0	0.70
9.8-10.8	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.10
Total	13.47	19.30	14.07	11.56	9.45	7.74	6.33	5.63	7.44	3.42	1.01	0.40	0.20	0	100.00

Πίνακας 4.11. Ποσοστιαίος πίνακας σημείου M4

Τα ποσοστά αυτά μπορούμε να πούμε πως αντιπροσωπεύουν και την ετήσια κατανομή των κυμάτων για το εξεταζόμενο σημείο.

Στη συνέχεια για τους έντεκα συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 4.10 δημιουργούμε τον πίνακα της ισχύος σε kW που αποδίδει κάθε ζευγάρι T-H του αρχικού πίνακα (χρησιμοποιούμε τις μέσες τιμές των διαστημάτων). Παρακάτω εμφανίζονται δύο τέτοιοι χαρακτηριστικοί πίνακες. Ο πρώτος αφορά τις διαστάσεις $D=3m$, $L=100m$, $d=0.4m$, $P_{ac}=1.75\text{ bar}$ και αντιστοιχεί στο βέλτιστο συνδυασμό του σημείου $T=4.2s$, $H=0.625m$ και ο δεύτερος τις διαστάσεις $D=4m$, $L=100m$, $d=0.85m$, $P_{ac}=2.5\text{ bar}$ και αντιστοιχεί στο βέλτιστο συνδυασμό του σημείου $T=5.8s$, $H=1.625m$.

T(s)	H(m)													
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.00
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00	
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.9-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.6-3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1-3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.8-4.6	0	0.69	2.84	4.63	6.33	7.89	0	0	0	0	0	0	0	
4.6-5.0	0	0.45	1.47	2.55	3.66	4.76	5.94	0	0	0	0	0	0	
5.0-5.5	0	0	0.17	0.94	1.82	2.74	3.68	4.63	6.11	0	0	0	0	
5.5-6.1	0	0	0	0	0.38	1.06	1.81	2.58	3.78	5.41	0	0	0	
6.1-6.7	0	0	0	0	0	0.24	0.47	1.06	2.05	3.43	0	0	0	
6.7-7.4	0	0	0	0	0	0	0	0.10	0.71	1.90	3.20	0	0	
7.4-8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.66	1.84	3.15	0	
8.1-8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.49	0.95	1.87	
8.9-9.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.8-10.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Πίνακας 4.12-Ισχύς για στις διαστάσεις $D=3m$, $L=100m$, $d=0.4m$, $P_{ac}=1.75$

T(s)	H(m)													
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.00
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00	
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.9-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6-3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1-3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.8-4.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.6-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	1.86	20.2	0	0	0	0	0
5.5-6.1	0	0	0	9.82	19.03	27.39	35.42	43.22	54.44	69.44	0	0	0	0
6.1-6.7	0	0	0.83	5.27	10.66	16.30	22.11	28.01	36.94	49.26	0	0	0	0
6.7-7.4	0	0	0	0	0	0	1.22	3.29	10.12	20.59	31.4	0	0	0
7.4-8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.84	13.02	0	0
8.1-8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.49	0
8.9-9.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.8-10.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.13- Ισχύς για στις διαστάσεις $D=4m$, $L=100m$, $d=0.85m$, $P_{ac}=2.5$

Από τους πίνακες αυτούς φαίνεται σε ποια σημεία μπορούμε να έχουμε παραγωγή ενέργειας. Δηλαδή, σε ποια κύματα του αρχικού πίνακα 4.8, μπορεί η βαλβίδα να ανοίξει και να έχουμε παραγωγή ενέργειας. Στο πρώτο πίνακα μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων κύματος αλλά η ισχύς είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή του δεύτερου πίνακα.

Για να δούμε ποιος συνδυασμός διαστάσεων είναι πιο αποδοτικός μένει να πολλαπλασιάσουμε την ισχύ των πινάκων $N(kW)$ επί το γινόμενο του εκάστοτε ποσοστού εμφάνισης του κύματος p επί το σύνολο των ωρών ενός έτους. Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε την συνολική αποδιδόμενη ενέργεια σε kWh για ένα έτος.

$$E = N * p * 8760 \quad (4.1)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση στους παραπάνω πίνακες προκύπτουν οι αντίστοιχοι πίνακες 4.14-4.15 όπου φαίνεται και η συνολική ενέργεια:

T(s)	H(m)														Total
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00		
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.9-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.6-3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1-3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.8-4.6	0	219	1250	1834	1059	208	0	0	0	0	0	0	0	4570	
4.6-5.0	0	44	168	494	806	545	105	0	0	0	0	0	0	2161	
5.0-5.5	0	0	16	149	369	603	454	122	54	0	0	0	0	1767	
5.5-6.1	0	0	0	0	57	224	462	500	366	48	0	0	0	1656	
6.1-6.7	0	0	0	0	0	17	50	196	505	151	0	0	0	919	
6.7-7.4	0	0	0	0	0	0	0	6	144	217	56	0	0	424	
7.4-8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	65	28	0	151	
8.1-8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	13	17	16	48	
8.9-9.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.8-10.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	0	262	1435	2477	2290	1597	1070	824	1069	476	134	44	16	11696	

Πίνακας 4.14- Σύνολο Ενέργειας για διαστάσεις $D=3m$, $L=100m$, $d=0.4m$, $P_{ac}=1.75$

T(s)	H(m)														Total
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00		
0.0-1.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.9-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.6-3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1-3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.8-4.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.6-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	49	178	0	0	0	0	227	
5.5-6.1	0	0	0	1037	2848	5787	9043	8371	5272	611	0	0	0	32971	
6.1-6.7	0	0	22	139	469	1148	2336	5179	9106	2168	0	0	0	20568	
6.7-7.4	0	0	0	0	0	0	43	203	2049	2357	553	0	0	5204	
7.4-8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	170	115	0	285	
8.1-8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	31	
8.9-9.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.8-10.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	0	0	22	1177	3317	6935	11422	13802	16605	5136	723	115	31	59286	

Πίνακας 4.15- Σύνολο Ενέργειας για διαστάσεις $D=4m$, $L=100m$, $d=0.85m$, $P_{ac}=2.5$

Σε αυτούς τους πίνακες φαίνεται μια αρκετά μεγάλη διαφορά στο σύνολο της ενέργειας για αυτούς τους δυο συνδυασμούς διαστάσεων. Εφαρμόζουμε τα παραπάνω και σε άλλους σημαντικούς συνδυασμούς διαστάσεων του πίνακα 4.10.(συνδυασμοί 4 έως 10). Σημαντικοί συνδυασμοί δεν θεωρούνται αυτοί που προέκυψαν από μικρά κύματα γιατί αποδίδουν ελάχιστα, καθώς και αυτοί των πολύ ακραίων κυμάτων, που αν και αποδίδουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, εμφανίζονται σπάνια. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω

a/a	D(m)	L(m)	d(m)	P _{ac} (bar)	E (kWh)
4	3	100	0.4	1.75	11696
5	4	100	0.6	2	25626
6	4	100	0.7	2.5	34745
7	4	100	0.85	2.5	59286
8	4	100	1	2.75	63153
9	3.5	100	1	3.25	46070
10	3	100	1	3.25	24324

Πίνακας 4.16 Απόδοση σε kWh βέλτιστων διαστάσεων

Από τον πίνακα 4.16 φαίνεται ότι οι βέλτιστες διαστάσεις είναι οι $D=4m$, $L=100m$, $d=1m$, $P_{ac}=2.75$ bar και αποδίδουν ετήσια ενέργεια 63153 kWh. Ουσιαστικά τα μεγέθη D , L , d δίδουν μέγιστη ενέργεια στις οριακές τιμές που θέσαμε. Αυτό δεν σημαίνει πως όσο αυτές αυξάνονται τα όρια θα αυξάνεται και η ενέργεια. Μετά από μήκος αγωγού άνω των 150m και διαμέτρου πλωτήρα άνω των 7m δεν παρατηρείται λειτουργία της συσκευής για το συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων (σύμφωνα και με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 4.1.3). Άλλωστε τα μεγέθη αυτά εκτός του ότι παρουσιάζουν τεχνικές δυσκολίες μπορεί να ξεφύγουν από τα όρια που θέτει η κυματική θεωρία που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

4.2.3) Βέλτιστες διαστάσεις για αγωγό δεδομένων διαστάσεων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η γνώση των διαστάσεων του αγωγού που μπορεί να προκύψει από τεχνοοικονομική μελέτη αποτελεί μια καλή αφετηρία για την περαιτέρω διερεύνηση των υπόλοιπων διαστάσεων.

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν οι βέλτιστες διαστάσεις και η απόδοση τους για έναν συγκεκριμένο αγωγό. Έστω λοιπόν ότι θέλουμε να κατασκευαστεί μια συσκευή με αγωγό μήκους $L=65m$. Χρησιμοποιούμε τα ίδια όρια για τις υπόλοιπες διαστάσεις και εφαρμόζουμε ότι και παραπάνω. Προκύπτει ο πίνακας 4.17 που απεικονίζει τις βέλτιστες διαστάσεις των ζευγαριών T-H του πίνακα 4.9 καθώς και την μέγιστη ισχύ τους, και ο πίνακας 4.18 που απεικονίζει την αντίστοιχη ενέργεια των σημαντικότερων αυτών διαστάσεων σύμφωνα και με τα παραπάνω

α/α	T(s)	H(m)	D(m)	d(m)	$P_{ac}(\text{bar})$	N (kW)
1	2.25	0.375	1	0.1	1.5	0.05
2	2.85	0.375	1.5	0.15	1.5	0.27
3	3.45	0.5	2	0.25	1.75	0.9
4	4.2	0.625	3	0.5	1.5	2.68
5	4.8	1.125	4	0.7	1.75	11.16
6	5.25	1.375	4	0.9	1.75	20.55
7	5.8	1.625	4	1	2.25	31.35
8	6.4	2.25	3	1	2.5	48.54
9	7.05	2.25	2.5	0.95	2.5	42.41
10	7.75	2.75	2.5	1	2.75	46.65
11	8.5	3	2	1	2.25	51.72

Πίνακας 4.17. Βέλτιστες διαστάσεις σημείων απλοποιημένου πίνακα M4 όταν $L=65m$

α/α	D(m)	d(m)	$P_{ac}(\text{bar})$	E (kWh)
4	3	0.5	1.5	10237
5	4	0.7	1.75	16962
6	4	0.9	1.75	36637
7	4	1	2.25	40151
8	3	1	2.5	35731
9	2.5	0.95	2.5	25990

Πίνακας 4.18. Ενέργεια όταν $L=65m$

Από τον τελευταίο πίνακα προκύπτει ότι οι βέλτιστες διαστάσεις για $L=65m$ είναι $D=4m$, $d=1m$, $P_{ac}=2.25 \text{ bar}$ και αποδίδουν 40151 kWh . Αυτό αποτελεί μια μείωση της τάξεως του 36% από τις 63153 kWh του αγωγού με $L=100m$ όσο περίπου δηλαδή και η μείωση του μήκους του αγωγού σε $L=65m$. Εδώ φαίνεται η σημασία της διατήρησης όσο δυνατόν μεγαλύτερου αγωγού.

Αν τώρα εκτός από συγκεκριμένο μήκος θέλουμε και συγκεκριμένη διάμετρο d για κατασκευαστικούς και μηχανολογικούς λόγους θα προκύψουν πάλι σημαντικές αλλαγές. Έστω λοιπόν πως εκτός από $L=65m$ επιβάλλεται και διάμετρος αγωγού $d=0.5m$. Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

α/α	T(s)	H(m)	D(m)	$P_{ac}(\text{bar})$	N (kW)
1	4.2	0.625	3	1.5	2.68
2	4.8	1.125	2	2	6.65
3	5.25	1.375	2	2.75	8.73
4	5.8	1.625	1.5	2.25	9.21
5	6.4	2.25	1.5	3	13.69
6	7.05	2.25	1.5	2	5.43
7	7.75	2.75	1	2	8.81
8	8.5	3	1	2.75	14.14

Πίνακας 4.19. Βέλτιστες διαστάσεις σημείων απλοποιημένου πίνακα M4 όταν $L=65m$, $d=0.5m$

α/α	D(m)	$P_{ac}(\text{bar})$	E (kWh)
1	3	1.5	10237
2	2	2	14227
3	2	2.75	8469
4	1.5	2.25	17424
5	1.5	3	11386
6	1.5	2	17619

Πίνακας 4.20. Ενέργεια όταν $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$

Οι βέλτιστες διαστάσεις για γνωστό αγωγό με $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$ είναι $D=1.5\text{m}$, $P_{ac}=2\text{ bar}$ και αποδίδουν 17619 kWh . Η ενέργεια αυτή αποτελεί περίπου το 28% των 63153 kWh που βρέθηκε παραπάνω. Ωστόσο μια συσκευή με γεωμετρικές διαστάσεις $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$ και $D=1.5\text{m}$ είναι σαφώς αρκετά πιο οικονομική (κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος) από εκείνη των $L=100\text{m}$, $d=1\text{m}$ και $D=4\text{m}$.

Σε αυτές τις περιπτώσεις θα μπορούσε να γίνει μελέτη για το κατά πόσο συμφέρει η εγκατάσταση πολλών μικρότερων συσκευών αντί μιας μεγαλύτερης. Για παράδειγμα τρεις με τέσσερις συσκευές διαστάσεων $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$ και $D=1.5\text{m}$ θα μπορούσαν να αποδώσουν το ίδιο ικανοποιητικά με μια διαστάσεων $L=100\text{m}$, $d=1\text{m}$ και $D=4\text{m}$.

Ένας αρχικός δείκτης οικονομικότερης απόδοσης του συστήματος θα μπορούσε να είναι η ετήσια ενέργεια διαιρούμενη με το άθροισμα του βυθισμένου όγκου του πλωτήρα συν τον όγκο του εμπεριεχομένου νερού στον αγωγό. Ο συνολικός αυτός όγκος είναι μέγεθος ανάλογο του κόστους κατασκευής της συσκευής. Έτσι λοιπόν η συσκευή με $L=100\text{m}$, $d=1\text{m}$ και $D=4\text{m}$ των 63153 kWh έχει τιμή δείκτη 609 kWh/m^3 ενώ η μικρότερη με $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$ και $D=1.5\text{m}$ των 17619 kWh έχει τιμή 1251 kWh/m^3 . Άρα είναι μάλλον οικονομικότερη η χρησιμοποίηση της δεύτερης συσκευής.

D(m)	L(m)	d(m)	$P_{ac}(\text{bar})$	E (kWh)	$E/V_o (\text{kWh/m}^3)$
4	100	1	2.75	63153	609
4	65	1	2.25	40151	527
1.5	65	0.5	2.00	17619	1251

Πίνακας 4.21 Δείκτης οικονομικής απόδοσης για τις τρεις παραπάνω βέλτιστες συσκευές.

Τέλος ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν είναι ο χρόνος που παραμένει σε λειτουργία η συσκευή. Για παράδειγμα η συσκευή διαστάσεων $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$, $D=3\text{m}$ και $P_{ac}=1.5\text{ bar}$ που αποδίδει 10237 kWh λειτουργεί στο 55% του έτους ενώ η συσκευή των $L=65\text{m}$, $d=0.5\text{m}$, $D=1.5\text{m}$, $P_{ac}=2\text{ bar}$ μπορεί να αποδίδει 17619 kWh αλλά λειτουργεί μόλις στο 28% του συνολικού χρόνου ενός έτους. Μια τέτοια μελέτη έχει να κάνει με την γενικότερη σύνδεση της συσκευής στο δίκτυο, την ύπαρξη ή όχι άλλων συμβατικών ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και με την ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συγκεκριμένου τόπου.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης της προτεινομένης συσκευής κυματικής ενέργειας με ελάχιστα κινούμενα μέρη. Η μοντελοποίηση ήταν σύνθετη λόγω των σχετικών κινήσεων συσκευής-κύματος και στήλης νερού-συσκευής, στις δύο φάσεις λειτουργίας της βαλβίδας (ανοιχτή/κλειστή). Αφού διατυπώθηκαν οι εξισώσεις κίνησης της συσκευής, πραγματοποιήθηκε η επίλυση τους με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Η μοντελοποίηση κατέστησε δυνατή την μελέτη της επίδρασης των κατασκευαστικών και κυματικών παραγόντων στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Όπως συμβαίνει και με τις περισσότερες συσκευές κυματικής ενέργειας, το κυματικό δυναμικό της εκάστοτε περιοχής φάνηκε πως αποτελεί τη βάση για τη διερεύνηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της συσκευής που προσδίδουν αποδοτικότερη λειτουργία. Για δεδομένο κυματισμό, η απόδοση μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα του κύματος βρίσκεται ανάμεσα στις δύο ιδιοσυχνότητες ω_n και ω_n' της συσκευής (ανοιχτής-κλειστής βαλβίδας αντίστοιχα) και μάλιστα πλησιάζει πιο κοντά στη δεύτερη όσο μεγαλώνει η πίεση του αεροκώδωνα και η βαλβίδα μένει περισσότερη ώρα κλειστή.

Η μελέτη ως προς τις τρεις βασικές γεωμετρικές διαστάσεις, δηλαδή το μήκος αγωγού L , την διάμετρο αγωγού d και την διάμετρο πλωτήρα D , έδειξε πως για ένα συγκεκριμένο κύμα, υπάρχει πάντα μια βέλτιστη τιμή για την οποία επιτυγχάνεται αποδοτικότερη λειτουργία σε συγκεκριμένη πίεση αεροκώδωνα. Η αποδοτικότερη αυτή λειτουργία επιτυγχάνεται πάντα όταν η ταχύτητα του συστήματος βρίσκεται σε φάση με την διεγείρουσα δύναμη του κύματος και έχουμε το φαινόμενο του συντονισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω των μεγάλων μεταβολών της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του συστήματος, εμφανίζεται και η μεγαλύτερη υποπίεση κάτω από την βαλβίδα, για συγκεκριμένο μήκος αγωγού, η οποία μπορεί να είναι επικίνδυνη για την ομαλή λειτουργία. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τοποθέτηση της βαλβίδας χαμηλότερα στον αγωγό.

Μια αρχική συσκευή αναφοράς μήκους αγωγού $L=65m$ διαμέτρου $d=0.5m$ και διαμέτρου κυλινδρικού πλωτήρα $D=1.5m$, που μελετήθηκε σε ένα τυπικό ελληνικό κύμα ($T=5.8$ s, $H=1.625$ s) απέδωσε υδραυλική ισχύ περίπου 9 kW, μέγεθος αξιοσημείωτο για το σχετικά μικρό μέγεθος της και την απλή κατασκευή της με μοναδικό κινούμενο μέρος της, την βαλβίδα αντεπιστροφής. Βέβαια η παροχή, είναι κυμαινόμενη καθώς το φαινόμενο είναι περιοδικό, αλλά αυτό μπορεί να εξομαλυνθεί με χρήση περισσότερων συσκευών στο ίδιο υδραυλικό κύκλωμα.

Τέλος επιχειρήθηκε βελτιστοποίηση της συσκευής για ελληνικό θαλάσσιο δυναμικό και συγκεκριμένα στη περιοχή κυματικών δεδομένων M4, που βρίσκεται στο Αιγαίο

ανατολικά της Τήνου. Βρέθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός των γεωμετρικών διαστάσεων, μέσα από κάποια αρχικά κατασκευαστικά όρια που τέθηκαν, που αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ στα συχνότερα κύματα του σημείου. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ετήσια ενέργεια που αποδίδει ο κάθε βέλτιστος συνδυασμός.

Έτσι ένας αγωγός που θα μπορούσε τεχνικά να κατασκευαστεί με διαστάσεις $L=100m$, $d=1m$ και $D=4m$ θα απέδιδε ετήσια ενέργεια περίπου $63000 kWh$. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός νοικοκυριού στην Ελλάδα είναι γύρω στις $3000 kWh$. Άρα ένα πάρκο δώδεκα περίπου τέτοιων συσκευών θα μπορούσε να καλύψει την ετήσια ζήτηση 250 νοικοκυριών, δηλαδή ενός μικρού νησιού. Παρ' όλα αυτά, η βιωσιμότητα ενός τέτοιου πάρκου εξαρτάται από το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, καθώς και από την αντιμετώπιση των τεχνικών προβλημάτων σε όλο το σύστημα (συσκευών-υδραυλικού κυκλώματος υδροστροβίλου-γεννήτριας).

Προτάσεις

Στην εργασία αυτή έγινε η προσπάθεια όσο το δυνατόν πληρέστερης μοντελοποίησης και διερεύνησης λειτουργίας της συγκεκριμένης συσκευής κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, η μελέτη μιας συσκευής κυματικής ενέργειας είναι ένα πολύπλευρο πρόβλημα που απαιτεί συνδυασμό πολλών επιστημών, όπως ωκεανογραφία, αντοχή υλικών, μηχανική, οικονομικών κλπ. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι αρκετά ενθαρρυντικά για συνέχιση των ερευνών, γι αυτό παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για πιο διεξοδική διερεύνηση και τελειοποίηση του μηχανισμού.

Κύμα και υδροδυναμικά δεδομένα:

Η μοντελοποίηση που έγινε στην παρούσα εργασία αφορά απλό αρμονικό κύμα, ενώ για ορισμένα υδροδυναμικά δεδομένα, λόγω της αλληλεπίδρασης σώματος-κύματος που περιγράφονται στην ενότητα 2.2, χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές τιμές. Ορισμένα μεγέθη μάλιστα, όπως ο συντελεστής πρόσθετης μάζας C_a και ο συντελεστής τριβής λ_f , θεωρήθηκαν σταθερά παρ' όλο που μεταβάλλονται σε σχέση με την γωνιακή συχνότητα κύματος και με την ταχύτητα ροής στον αγωγό αντιστοίχως. Βέβαια, οι τιμές που επιλέχθηκαν είχαν σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των όρων αυτών.

Έτσι προτείνεται κατ' αρχήν ο αναλυτικότερος υπολογισμός των υδροδυναμικών δεδομένων με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων που λύνουν προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας [27], και κατά δεύτερον η χρησιμοποίηση μαθηματικής περιγραφής σύνθετου κύματος αντί για απλού. Το κυματικό φάσμα (*wave spectra*) μιας περιοχής μπορεί να εκφραστεί σαν σύνθεση πολλών αρμονικών και να αναζητηθεί λύση στα κυματικά προβλήματα με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης. Μια τέτοια προσπάθεια κάνει και ο Liu [24] για την υπό μελέτη συσκευή αντήλησης (χωρίς

την μεσολάβηση μηχανισμού παραγωγής ενέργειας), και οδηγείται στο συμπέρασμα πως η συσκευή λειτουργεί αποδοτικότερα στα τυχαία κύματα επειδή είναι συχνότερο το φαινόμενο του συντονισμού.

Τέλος, το σημαντικότερο κομμάτι από όλα για την επιβεβαίωση των θεωρητικών υπολογισμών θα ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων σε κατάλληλο μοντέλο. Με το πείραμα μπορεί επίσης να γίνει έλεγχος της βέλτιστης γεωμετρίας ή της αντοχής υλικών, παράγοντες που θα αναφερθούν και παρακάτω. Πάντως, τα παλαιότερα πειράματα της συσκευής τόσο του *Isaacs* όσο και του *Liu* και των συνεργατών τους επιβεβαίωσαν σε μεγάλο βαθμό τα θεωρητικά αποτελέσματα, παρά την χρησιμοποίηση προσεγγιστικών εξισώσεων.

Βέλτιστος σχεδιασμός συσκευής:

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικός πλωτήρας, η βαλβίδα ήταν μία και τοποθετήθηκε κοντά ή σχετικά κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, και ο αεροκώδωνας είχε σταθερή πίεση, ενώ υπολογίστηκε μόνο η θεωρητική ισχύς του. Κάθε ένας από τους τρεις αυτούς παράγοντες μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω μελέτης.

Το σχήμα του πλωτήρα, ειδικότερα, είναι ίσως ένα από τα σημαντικότερα θέματα που πρέπει να μελετηθούν. Αν η γεωμετρία αλλάξει, αλλάζουν όλα τα υδροδυναμικά δεδομένα, οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα, οι ιδιοσυχνότητες και μέσω αυτών και η παραγόμενη ισχύς με απρόβλεπτο κάθε φορά τρόπο. Έτσι, για παράδειγμα, μπορεί ένας σφαιρικός ή ένας κωνικός πλωτήρας να είχαν καλύτερη απόδοση για συγκεκριμένες συχνότητες κύματος, ή ένα συνδυαστικό πολύπλοκο σχήμα (πχ κύλινδρος με σφαιρικές άκρες) να ήταν ακόμα πιο αποδοτικός. Έρευνες πάντως που έχουν γίνει για το σχήμα πλωτήρα σημειακού απορροφητή έχουν δείξει ότι ο κύλινδρος, που χρησιμοποιήθηκε και εδώ, έχει πολύ καλή συμπεριφορά. Και σε αυτήν την περίπτωση η διεξαγωγή πειραμάτων θα βοηθούσε πολύ.

Η βαλβίδα ήταν μια απλή βαλβίδα αντεπιστροφής και σχεδιάζεται να τοποθετηθεί κοντά στο επάνω μέρος του αγωγού. Ωστόσο, τέθηκε και το θέμα της υποπίεσης και πιθανής προώθησης σπηλαίωσης πίσω από την βαλβίδα, και γι αυτό θα πρέπει να μελετηθεί εκτενώς αν θα ήταν προτιμότερο να τοποθετηθεί προς το κάτω μέρος του αγωγού, όπως προτείνει και ο Brian Kirke [28]. Η θέση της δεν διαφοροποιεί τις εξισώσεις κίνησης του μηχανισμού αλλά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αντοχής της συσκευής. Επίσης αρκετά σημαντικό είναι και το ομαλό άνοιγμα της βαλβίδας με κατάλληλο σχεδιασμό ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο πρόκλησης υδραυλικού πλήγματος.

Ο αεροκώδωνας σχεδιάζεται να έχει σταθερή πίεση, η οποία όπως είδαμε δεν μπορεί να υπερβεί τα 4-5 bar, καθώς τότε η βαλβίδα δεν ανοίγει. Άρα θα πρέπει να

τοποθετηθεί υδροστροβίλος αντίστοιχα χαμηλού ύψους. Στις πιο μεγάλες πιέσεις το σύστημα λειτουργεί σε μικρό εύρος συχνοτήτων αλλά παράγει μεγάλη ισχύ ενώ στις μικρές ισχύει το αντίθετο. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.16. Θα μπορούσε να μελετηθεί κάποιος έλεγχος της πίεσης του αεροκώδωνα στα επιτρεπτά όρια του υδροστροβίλου, ώστε να μεγαλώνει το εύρος αποδοτικής λειτουργίας της συσκευής.

Τεχνική και οικονομική διερεύνηση:

Το τεχνικό μέρος περιλαμβάνει την έρευνα όλων εκείνων των προβλημάτων που ενδέχεται να εμφανιστούν κατά την κατασκευή και λειτουργία της συσκευής. Τα κυριότερα προβλήματα που πρόέκυψαν κατά την πειραματική εφαρμογή της συσκευής [21,25] ήταν κυρίως προβλήματα αντοχής υλικών. Το αφιλόξενο περιβάλλον της θάλασσας κατέστρεψε τις συσκευές λόγω των πολύ δυνατών φορτίων.

Τα φορτία αυτά δεν είναι μόνο αυτά που δέχεται η συσκευή κατά την ομαλή λειτουργία της, αλλά και διάφορα άλλα λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα τα φορτία λόγω θαλάσσιων ρευμάτων ή οι δυνάμεις που ασκούνται σε όλες τις υπόλοιπες δυνατές κινήσεις του σώματος πλην της κατακόρυφης. Η χρήση μεγάλου μήκους αγωγού, που πρέπει να είναι συνεχώς όσο το δυνατόν πιο κατακόρυφος, δυσχεραίνει τις καταπονήσεις. Για αυτό θα πρέπει να μελετηθούν οι τεχνικές αγκύρωσης για καλύτερη απόσβεση των δυνάμεων των άλλων κινήσεων, αλλά και τα υλικά κατασκευής του αγωγού και των συνδέσμων τους με την βαλβίδα και τον πλωτήρα. Για παράδειγμα, ένας πιο ελαστικός και εύκαμπτος αγωγός μπορεί είναι προτιμότερος.

Αφού έχουν μελετηθεί όλα τα παραπάνω θα πρέπει να γίνει ένας ολοκληρωμένος έλεγχος οικονομοτεχνικής βιωσιμότητας της συσκευής. Θα πρέπει να μελετηθεί το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος όχι μόνο μίας συσκευής πλωτήρα-αγωγού, αλλά συνδυασμού πολλών μαζί. Με μεγάλο αριθμό συσκευών τα οφέλη θα είναι περισσότερα καθώς εξομαλύνεται η παραγωγή ισχύος και από περιοδική γίνεται συνεχής. Επίσης το κόστος θα μειώνεται γιατί θα μπορούν πολλές τέτοιες συσκευές να δουλεύουν σε έναν κοινό υδροστροβίλο. Το σύστημα υδροστροβίλου-γεννήτριας, πρέπει να είναι και αυτό αντικείμενο μελέτης, καθώς αποτελεί σημαντικό στοιχείο της όλης εγκατάστασης. Η κατάλληλη επιλογή του (π.χ. υδροστροβίλος μεταβλητών στρόφων) συμβάλλει ουσιαστικά στη συνολική ετήσια ενεργειακή απόδοση.

Τέλος, σημαντική είναι και η μελέτη του τρόπου σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και των χρόνων λειτουργίας της εγκατάστασης. Θα πρέπει να μελετηθεί η παραγωγή ανάλογα με την ζήτηση και να προβλεφθούν εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας στις περιόδους ήρεμης θάλασσας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. (<http://www.cres.gr>)
- [2] Centre for Renewable Energy Sources (CRES) (2002). Wave energy Utilization in Europe: Current Status and Perspectives. European Thematic Network on Wave Energy
- [3] Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών. (<http://www.hcmr.gr>)
- [4] Σύστημα Ποσειδών παρακολούθησης, πρόγνωσης και πληροφόρησης για την κατάσταση των ελληνικών θαλασσών. (<http://www.poseidon.hcmr.gr>)
- [5] C. Soukissian TH, Chronis GTh, Nittis K. POSEIDON: Operational marine monitoring system for greek seas. Sea Technology 1999;40(7).
- [6] Wave Energy Planning and Marketing. (<http://www.waveplam.eu>)
- [7] The European Marine Energy Centre (EMEC). (<http://www.emec.org.uk>)
- [8] Michael E. McCormick, 2007 “Ocean Wave Energy Conversion”, (Dover Publications, ISBN-10: 0486462455, ISBN-13: 978-0486462455)
- [9] Joao Cruz, 2008 “Ocean Wave Energy: Current Status and Future Prepectives”, (Springer Series in Green Energy and Technology, ISBN 978-3-540-74894-6)
- [10] Masuda Y. Wave-activated generator. Int. Colloq Exposition Oceans. France: Bordeaux; 1971.
- [11] Falcão AF de O. Wave energy utilization: a review of the technologies. Renew Sust Energy Rev 2010;14:899e918.
- [12] Ocean Power Technologies (OPT) PowerBuoy
(<http://www.oceanpowertechnologies.com/technology.htm>)
- [13] AquaBuoy, (<http://peswiki.com/index.php/Directory:AquaBuOY>)
- [14] Newman, J.N., Marine Hydrodynamics, MIT Press 1977.
- [15] Falnes, J., Ocean Waves and Oscillating Systems, Linear interactions including wave-energy extraction, Cambridge University Press 2002.

- [16] O. M. Faltinsen. Sea Loads on Ships and Offshore Structures. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [17] Robert George Dean, Robert A. Dalrymple, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific, Singapore 1991.
- [18] Henri O. Berteaux, Buoy engineering, Wiley, New York, 1976.
- [19] Det Norske Veritas (DNV), Modelling and Analysis of marine operations, april 2011, (<http://www.dnv.com>)
- [20] Isaacs J.D., Castel D. and Wick G.L. 1976. Utilization of the energy in ocean waves. Ocean Engng 3,175-187.
- [21] Wick G.L., Castel D. 1978. The Isaacs wave-energy pump: Field tests off the coast of Kaneohe Bay, Hawaii. Ocean Engng 5,pp. 235-242
- [22] Willare Bascom. John Dove Isaacs III 1913-1980, A Biographical Memoir. National Academy of Sciences, Washington D.C., 1987.
- [23] Behrman, D. (1992): John Isaacs and His Oceans. ICSU Press, American Geophysical Union, Washington, D.C., p. 172–174.
- [24] Liu, C. C. K., and Jin, Q. (1995). “Artificial upwelling in regular and random waves.” J. Oc. Engrg., 22(4), 337–350.
- [25] White A. et al. "An open ocean trial of controlled upwelling using wave pump technology". Journal of atmospheric and oceanic technology, volume 27,2010.
- [26] Γιαννάκογλου Κ.Χ, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές. “Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα 2003.
- [27] WAMIT, (<http://www.wamit.com>).
- [28] Brian Kirke, Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling. Ocean & Coastal Management 46 (2003) 901–915.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ι. Αναγνωστόπουλο για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, ευχαριστήσω τον κ. Μ. Παναγιωτόπουλο από το ΚΑΠΕ για την παρουσίαση των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας και το πολύτιμο υλικό, καθώς και τον κ. Β. Ροδίτη για την αρχική παρουσίαση του μηχανισμού.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου. Δυστυχώς τον έχασα νωρίς, αλλά η πίστη που είχε στο πρόσωπό μου και η στήριξή του σε κάθε επιλογή μου, θα είναι πάντα το μεγαλύτερο κίνητρο για την επίτευξη οποιουδήποτε στόχου.

Αφιερωμένο στη μνήμη του..