



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

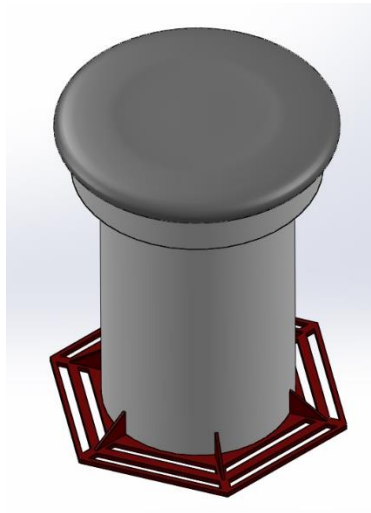
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.

Διπλωματική Εργασία

**ΕΣΩΚΛΕΙΣΤΟΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ**

ENCLOSED INERTIAL MECHANISMS FOR WAVE ENERGY CONVERSION



Γεωργούτσος Βασίλειος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ι. Αντωνιάδης

ΑΘΗΝΑ 2014

Περίληψη

Οι θαλάσσιες μάζες αποτελούν το 75% της γης και τα κύματα αυτών είναι μέχρι στιγμής η μεγαλύτερη ανεκμετάλλευτη δεξαμενή ενέργειας του πλανήτη μας. Οι ερευνητές οδηγούμενοι από την τεράστια ανάγκη για εύρεση πιο φιλικών προς το περιβάλλον τρόπων παραγωγής ενέργειας αλλά και με γνώμονα την πολύ μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας από τα κύματα, στρέφονται όλο ένα και περισσότερο στον τομέα αυτό. Η θάλασσα αυτή τη στιγμή αποτελεί ένα τεράστιο ανεξερεύνητο κομμάτι για τον τομέα της τεχνολογίας στην παραγωγή ενέργειας. Έτσι η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνεται στο πως μπορεί να γίνει η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας χρησιμοποιώντας αδρανειακές διατάξεις και προτείνει έναν νέο τρόπο για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής. Στην παράθεση των ήδη κατασκευασμένων διατάξεων θα γίνει κατανοητό το πως υπολείπεται η κάθε μια στον τομέα της και ταυτόχρονα πως έρχεται να καλύψει το κενό αυτό η πρόταση του εσώκλειστου αδρανειακού μηχανισμού απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Διευκρινίζεται πως οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από αρκετά επιμέρους τμήματα τα οποία χρήζουν βελτίωσης. Τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν αυτές τις διατάξεις είναι :

- i. ο μηχανισμός απορρόφησης της κυματικής ενέργειας και μετατροπής αυτής σε κινητική,
- ii. ο μηχανισμός μετατροπής της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική και
- iii. ο πλωτήρας (σκάφος) ο οποίος φιλοξενεί τα δύο προηγούμενα.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως κάθε επιμέρους σύστημα έχει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης ώστε να αυξηθεί τελικά ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Στο κομμάτι της διπλωματικής αυτής θα ασχοληθούμε μόνο με το πρώτο τμήμα των διατάξεων, δηλαδή με το μηχανισμό ο οποίος θα δώσει το μέγιστο δυνατό βαθμό μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε κινητική. Πρόκειται ουσιαστικά για μια αναζήτηση ενός τέτοιου μηχανισμού, που θα είναι σε θέση να παράξει σεβαστά ποσά ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα χαμηλή πολυπλοκότητα των συνεργαζόμενων μερών, μεγάλη ανθεκτικότητα και αξιοπιστία (δεδομένου ότι μιλάμε για το εχθρικό περιβάλλον της θάλασσας) αλλά και χαμηλό βάρος όσον αφορά τα μέρη του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται η παραδοχή πως ο πλωτήρας μέσα στον οποίο φιλοξενείται ο μηχανισμός αυτός μπορεί να δώσει την επιθυμητή απόκριση από τα κύματα.

Abstract

It is a fact that oceans constitute 75% of our planet and the waves being produced in them can be the biggest untapped energy resource of our world, whilst the potential for extracting energy from waves is considerable. Research in this area is driven by the need to meet renewable energy targets but also by the possibility of harvesting big amounts of energy. Ocean energy is relatively immature compared to other renewable energy technologies. This thesis is focused on how we can implement the wave energy harvesting, using inertial concepts, and suggests a novel idea for this purpose. During the thesis I am going to make a reference to the already existing WECs (Wave Energy Converter) and examine both their advantages and disadvantages. As a conclusion I will describe how can the WEC with the fully enclosed multi-axis inertial reaction mechanism veil the gaps these concepts leave behind. I clarify in advance that every concept is composed of several parts which can be optimized further. The main components of nearly every concept are the following:

- i. the mechanism that absorbs the wave energy and converts it to kinematic energy
- ii. the converter of kinematic energy to electric energy
- iii. the buoy (vessel) which accommodates both previous mechanisms

It is now clear that every subsystem of the main construction can be optimized further so that the efficiency of the construction can be finally improved. During my thesis I am going to deal only with the first subsystem. This system captures wave energy and converts it to kinetic energy of the reaction mass as effective as possible. It is basically a research for such a mechanism, which is able to produce good amounts of energy, while maintaining low complexity of the cooperating parts, durability and reliability (since we are talking about the hostile environment of the sea) and low weight of the regarding parts. At this point I suppose that the buoy used and hosts the mechanism, offers to the system the ideal response in relation to the wave movement.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλλαν είτε άμεσα είτε έμμεσα στην επίτευξη του στόχου μου αυτού.

Ιδιαίτερη ευχαριστία θα ήθελα να απευθύνω στον Καθηγητή κ Ι. Αντωνιάδη, για την απρόσκοπτη συνεργασία μας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο να ασχοληθούμε σε επίπεδο συναδελφικής συνεργασίας στην παραγωγή μιας καινοτόμου ιδέας από το μηδέν.

Ευχαριστώ θερμά τον τομέα ΜΚ&ΑΕ για την ευκαιρία που έδωσε σε εμένα και στα μέλη της ομάδας του Formula Student, να ασχοληθούμε με ένα project το οποίο ήρθε να συμπληρώσει τις γνώσεις μου στη μηχανολογία και να εφαρμόσω το μεράκι μου σε κάτι χειροπιαστό.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τα άτομα που με στήριζαν κατά την παραγωγή και συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, δεδομένης της δύσκολης περιόδου κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2013-2014 που επηρέασε ολόκληρο το ίδρυμα, αλλά και του ιδιαίτερα περιορισμένου χρόνου που διέθετα.

Γεωργούτσος Βασίλειος

Αθήνα 2014

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
Ευχαριστίες.....	3
1. Εισαγωγή	5
1.1. Βασικά στοιχεία.....	5
1.2. Προέλευση των θαλάσσιων κυμάτων.....	7
1.3. Βασικές αρχές μετατροπής της κυματικής ενέργειας	9
2. Αδρανειακοί μηχανισμοί κυματικής ενέργειας	17
2.1. PS Frog	17
2.2. SEAREV.....	20
2.3. Neptune	22
2.4. ISWEC.....	24
2.5. Wave Gyro	25
3. Η βιωσιμότητα της υπεράκτιας ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη	27
3.1. Επιλογή περιοχών στον ελληνικό χάρτη	27
3.2. Συνεισφορά της «μπλε» ενέργειας στην οικονομία	28
4. Κινηματική και δυναμική ανάλυση του μηχανισμού	30
4.1. Περιγραφή της διάταξης και βασικοί ορισμοί.....	30
4.2. Κινηματική ανάλυση	31
4.3. Δυναμικές εξισώσεις κίνησης	32
4.4. Χώρος κατάστασης αναπαράστασης εξισώσεων	34
4.5. Εξίσωση κίνησης του εσωτερικού αδρανειακού αντιδρώντος σώματος	34
5. Μέγιστη δυνατότητα μετατροπής ενέργειας	35
5.1. Γραμμικοποίηση των εξισώσεων κίνησης	35
5.2. Προτεινόμενη μορφή για τη δύναμη του PTO και νόμος ανάδρασης	36
5.3. Ανάλυση της αναμενόμενης δυναμικής συμπεριφοράς.....	37
5.4. Υπολογισμός της μέγιστης ικανότητας μετατροπής ενέργειας.....	37
6. Ενδεικτικές εφαρμογές	40
6.1. Ένας αυτόνομος μετατροπέα ενέργειας 2 MW ισχύος	40
6.2. Ιδέες συνέργειας με πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	42
7 Συμπεράσματα	45
References	46
Παράρτημα Α1.....	48
Παράρτημα Α2.....	53

1. Εισαγωγή

1.1. Βασικά στοιχεία

Είναι πλέον γνωστό σε όλο τον κόσμο πως οι συμβατικές μορφές ενέργειας όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αρχίζουν να εκλείπουν έντονα. Εκτός βέβαια από αυτό, όλοι οι επιβαρυντικοί για την ατμόσφαιρα παράγοντες όπως οι εκπομπές CO₂ και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ωθούν έντονα την επιστημονική κοινότητα στην εύρεση εναλλακτικών μορφών ενέργειας [9]. Παρόλα ταύτα η διαδικασία εύρεσης πράσινων μορφών ενέργειας αποτελεί κάθε άλλο παρά μια εύκολη διαδικασία.

Δύο από τα βασικά προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης όσον αφορά την κυματική ενέργεια είναι η μικρή ενεργειακή πυκνότητα των μέχρι σήμερα κατασκευασμένων μηχανισμών και η συνεχής διακύμανση στο ποσό ενέργειας που μπορούν αυτοί να απορροφήσουν. Αυτά τα δύο προβλήματα έχουν σαν αποτέλεσμα να δυσχεραίνουν την εύρεση μιας κατασκευαστικά οικονομικής λύσης, αλλά ταυτόχρονα δημιουργείται και η ανάγκη ανάπτυξης ενός μεγάλου δικτύου ταυτόχρονης απορρόφησης ώστε να εξαλείφονται οι διακυμάνσεις αυτές.

Τη μεγαλύτερη και ανεξερεύνητη μέχρι σήμερα πηγή ενέργειας αποτελεί η θάλασσα. Εκτιμάται πως το διαθέσιμο ποσό ενέργειας στα κύματα της θάλασσας ανά τον κόσμο είναι περί τα 2 TW, ποσό ανάλογο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν γίνεται αντιληπτό πως η κατεύθυνση αυτή προκαλεί τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον [7].

Τα πλεονεκτήματα που παρέχει η κυματική ενέργεια σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές πηγές ενέργειας μπορούν εύκολα να αριθμηθούν στα εξής :

- i. Τα κύματα της θάλασσας αποτελούν την πηγή με τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με κάθε άλλη πράσινη εναλλακτική επιλογή.
- ii. Το ενεργειακό αποτύπωμα μιας διάταξης εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας είναι μηδαμινό όσον αφορά την εκπομπή διοξειδίων του άνθρακα αλλά και την εκπομπή θερμότητας.
- iii. Οι διακυμάνσεις στην ένταση της κυματικής ενέργειας ανάλογα την εποχή συμβαδίζει με τις ανάγκες για αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση σε περιοχές με εύκρατο κλίμα.
- iv. Τα κύματα μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς μεγάλες απώλειες ενέργειας. Πράγμα που σημαίνει πως ένα έντονο καιρικό φαινόμενο που έρχεται από βόρεια και θα εξασθενήσει στο βόρειο Αιγαίο μπορεί κάλλιστα να είναι εκμεταλλεύσιμο από μια εγκατάσταση στις Κυκλάδες για παράδειγμα.

Για τη σωστή εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής υπάρχουν αρκετές προκλήσεις προς αντιμετώπιση. Η μεγαλύτερη πρόκληση στις διατάξεις απορρόφησης κυματικής

ενέργειας είναι η εύρεση μιας ιδέας που να είναι εμπορικά ανταγωνιστική και ελκυστική για τις κατασκευάστριες εταιρίες.

Ιδιαίτερο πρόβλημα στην προσπάθεια αυτή είναι το εύρος συχνοτήτων των θαλάσσιων κυμάτων καθώς και η ένταση αυτών που έχει σαν αποτέλεσμα να μη μπορεί ποτέ να παραχθεί ρεύμα σταθερής συχνότητας. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολο μια διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα να μπορέσει να συνδεθεί απευθείας στο δίκτυο. Έτσι είναι συχνά απαραίτητη η αποθήκευση της ενέργειας και η μετατροπή της σε ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας.

Επιπλέον, ολόκληρο το εγχείρημα αποτελεί πρόκληση για το μηχανολόγο κατασκευής, μιας και η διάταξη που θα σχεδιαστεί θα κληθεί να αντιμετωπίσει το αφιλόξενο περιβάλλον της θάλασσας. Κάθε τι πάνω στη διάταξη αυτή, πρέπει να έχει μελετηθεί πολύ καλά εκ των προτέρων, καθώς οι βλάβες και οι επισκευές σε τέτοιες υπεράκτιες εγκαταστάσεις καθίστανται από δύσκολες ως και αδύνατες. Είναι λοιπόν αναγκαίο να λαμβάνονται υψηλοί συντελεστές ασφάλειας, τόσο για τα υλικά που απαρτίζουν τη διάταξη όσο και για τον τρόπο πρόσδεσης της στο βυθό. Εδώ εμπλέκονται και πάλι οι οικονομικοί περιορισμοί, επομένως ο μηχανικός καλείται να φτάσει στα όρια του και να βρει τη χρυσή τομή αξιοπιστίας, κατασκευασιμότητας και κόστους. Σαφώς γίνεται κατανοητό πως δε μπορεί να σχεδιαστεί τίποτα το οποίο είναι αδύνατο να μεταφερθεί στο σημείο τελικής εγκατάστασης της διάταξης, που είναι η θάλασσα.

Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες στην κατεύθυνση αυτή, που παρά την πρωτοτυπία των ιδεών, γίνεται άμεσα αντιληπτό το πόσο δύσκολο εγχείρημα είναι όχι μόνο να βρεθεί αλλά και να επαληθευθεί στην πραγματικότητα μια διάταξη που θα μπορεί να φέρει την επανάσταση στην κυματική ενέργεια.

1.2. Προέλευση των θαλάσσιων κυμάτων

Η ενέργεια του θαλάσσιου κυματισμού είναι, όπως άλλωστε και αυτή από οποιοδήποτε ανανεώσιμες πηγές, ανεξάντλητη. Για να γίνει ευκολότερα κατανοητό το μέγεθος της διαθέσιμης ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα παγκοσμίως, αρκεί να αναφερθεί ότι η αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μπορεί να υπερκαλύψει την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση.

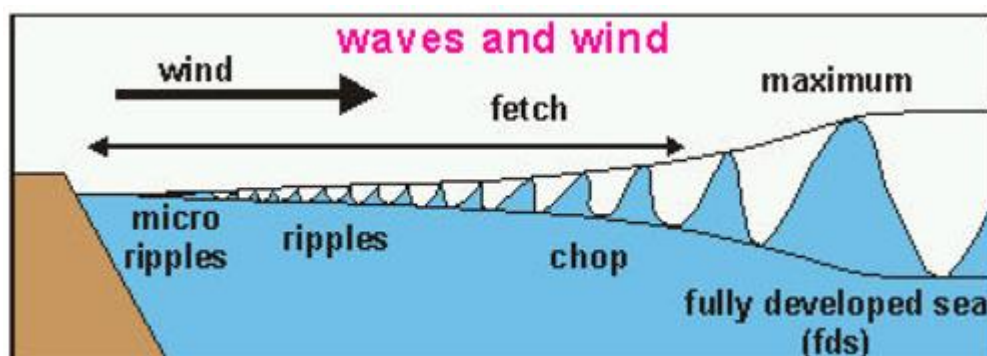
Η πιο ενδιαφέρουσα μορφή κυματισμού, από άποψη δυνατότητας εκμετάλλευσης, είναι ο ανεμογενής κυματισμός. Τα ανεμογενή κύματα προέρχονται από μια αλυσίδα γεγονότων. Η διαφορά θερμοκρασίας που προκαλεί η κατά τόπους ηλιοφάνεια σε περιοχές, δημιουργεί διαφορά πίεσης των αέριων μαζών και τελικά ανάπτυξη ανέμων. Οι άνεμοι αυτοί με τη σειρά τους αλληλοεπιδρούν με την επιφάνεια της θάλασσας με αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στη θάλασσα.



Εικόνα 1

Ο ανεμογενής κυματισμός

Η ήρεμη επιφάνεια της θάλασσας αλληλοεπιδρά με τον άνεμο και σχηματίζονται ρυτίδες οι οποίες στη συνέχεια εξελίσσονται σε κανονικά κύματα όπως φαίνεται στη συνέχεια.



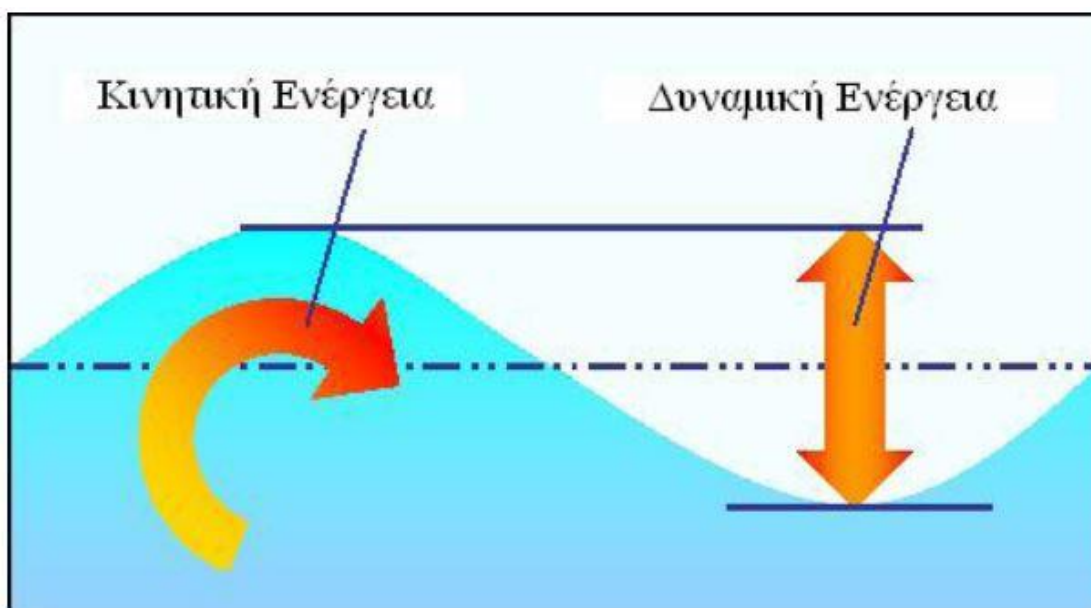
Εικόνα 2

Ανάπτυξη κυμάτων

Καθώς τα κύματα πλησιάζουν τη στεριά, η ένταση της ενέργειας αυτής μειώνεται εξαιτίας της αλληλοεπίδρασής τους με τον πυθμένα. Η απώλεια αυτή κοντά στην

ακτή αντισταθμίζεται από τα φαινόμενα της διάθλασης και της ανάκλασης, οδηγώντας έτσι στη συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας.

Η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων προέρχεται από την κατακόρυφη και την οριζόντια κίνηση της επιφάνειας της θάλασσας. Η κατακόρυφη κίνηση προσδίδει στο κύμα το ύψος του, ενώ η οριζόντια προσδίδει την ταχύτητα με την οποία κινείται. Αυτές οι δύο κινήσεις αντιστοιχούν στη δυναμική και την κινητική ενέργεια του κύματος.



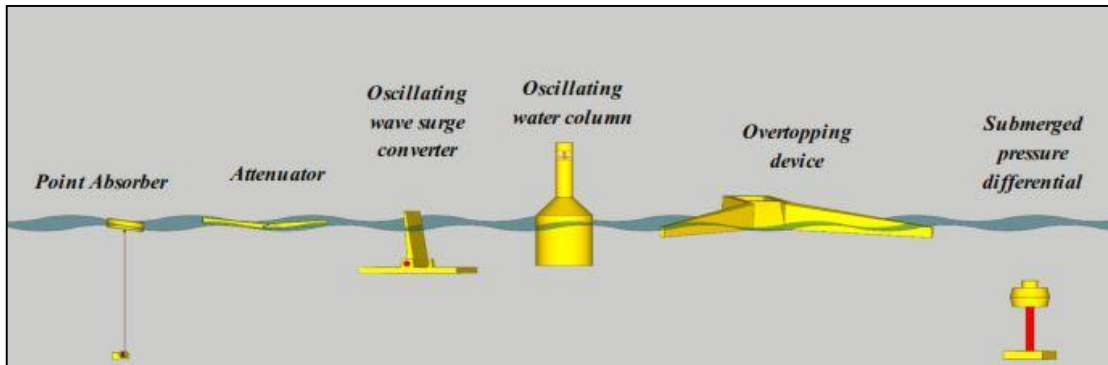
Εικόνα 3

Η ενέργεια των κυμάτων

Σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία των κυμάτων η μέση ενέργεια των κυμάτων είναι ίση με το άθροισμα της μέσης δυναμικής και μέσης κινητικής ενέργειας, δηλαδή ίση με το διπλάσιο της κινητικής, καθώς κινητική και δυναμική ενέργεια εναλλάσσονται.

1.3. Βασικές αρχές μετατροπής της κυματικής ενέργειας

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετές ιδέες για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους αρκετά. Στην υποενότητα αυτή θα γίνει μια πολύ σύντομη αναφορά στα διάφορα αυτά ήδη και θα γίνει μια στοιχειώδης ταξινόμησή τους, σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καθενός [6-7].

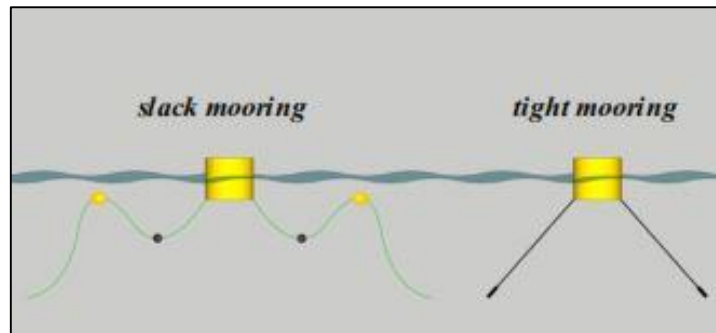


Εικόνα 4

Κατηγοριοποίηση των μετατροπέων κυματικής ενέργειας σύμφωνα με το European Marine Energy Center

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 η ερευνητική κοινότητα έχει συγκλίνει στην κατηγοριοποίηση των μετατροπέων κυματικής ενέργειας σύμφωνα με την προηγούμενη ταξινόμηση. Όπως ήδη γίνεται εμφανές οι διατάξεις αυτές έχουν δύο κύριους προσανατολισμούς. Έτσι μπορούμε κάλλιστα να ισχυριστούμε πως ένα μέρος αυτών προσανατολίζεται στην παράκτια ενέργεια, ενώ το άλλο, στην υπεράκτια. Στην πρώτη λοιπόν αυτή κατηγορία ανήκουν οι διατάξεις που δε δύναται να αναπτυχθούν σε μεγάλα βάθη, καθώς το απαγορεύει η φύση τους. Τέτοιες για παράδειγμα είναι οι μηχανές της κατηγορίας “Oscillating wave surge converter” οι οποίες απαιτούν επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας. Εν αντιθέσει με της προηγούμενες, οι μηχανές της κατηγορίας “Point absorber”, για παράδειγμα, έχουν τη δυνατότητα να επιπλέουν και σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεγάλο ύψος κύματος, επιβάλλεται να αναπτύσσονται σε μεγάλα βάθη.

Παρότι όμως η τελευταία αυτή κατηγορία φαίνεται να πλεονεκτεί σε σχέση με την πρώτη, μιας και έχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί σε περιοχές με μεγαλύτερη κυματική δραστηριότητα, συνεπώς και να δεσμεύσει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, εμφανίζει μια ιδιαίτερη πρόκληση για το σχεδιαστή της. Στην περίπτωση των υπεράκτιων πλωτών εγκαταστάσεων λοιπόν, ο μηχανικός καλείται να αγκυροβολήσει τη διάταξη που σχεδίασε στο βυθό.



Εικόνα 5

Slack vs. Tight mooring

Παραδοσιακά έχουν δημιουργηθεί δύο σχολές σχετικά με τον τρόπο πρόσδεσης των μηχανών με το βυθό. Όπως υποδεικνύει η Εικόνα 5, ο μηχανικός πρέπει να επιλέξει αν θα δεθεί η μηχανή σφιχτά ή χαλαρά με το βυθό. Στην πρώτη περίπτωση η μηχανή σταθεροποιείται με μεγάλη επιτυχία σε μια συγκεκριμένη θέση, γεγονός που ευνοεί τις περισσότερες φορές την αύξηση της απορρόφησης ενέργειας, αφού διατηρείται ο προσανατολισμός. Από την άλλη όμως, η κατασκευή των μέσων αγκυροβόλησης είναι ιδιαίτερα απαιτητική, μιας και καλούνται να αντέξουν δυνάμεις από μεγάλα κύματα που εμφανίζονται σε κρουστική μορφή. Ένα τέτοιο πρόβλημα λύνεται σαφώς με τη χρήση πιο χαλαρής πρόσδεσης, όμως αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρασύρετε ο μηχανισμός από τα κύματα σχεδόν ανεξέλεγκτα. Είναι λοιπόν εμφανές πως η χρυσή τομή βρίσκεται μεταξύ των δύο, δηλαδή μια πρόσδεση που θα σταθεροποιεί απόλυτα τη διάταξη στο χαμηλό και μέτριο κυματισμό, ενώ θα επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στα ακραία καιρικά φαινόμενα.

Ο μηχανισμός που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, προσανατολίζεται στη λύση του προβλήματος αυτού, κάνοντας χρήση ενός χαλαρού συστήματος πρόσδεσης, μιας και αποτελεί αξονοσυμμετρική διάταξη ή οποία ευνοείται από κάθε επαγόμενη από τα κύματα κίνηση και δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις από άποψη προσανατολισμού.

Είναι πλέον γεγονός πως το ενδιαφέρον εστιάζεται πια στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις, διότι εκτός των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δίνουν εξαιρετικές δυνατότητες στο συνδυασμό δύο ειδών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όπως είναι ήδη γνωστό, γίνεται μεγάλος λόγος για το αιολικό δυναμικό που υπάρχει σε περιοχές χιλιόμετρα μακριά από τη στεριά. Τα ποσά της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας στη θάλασσα έχουν τραβήξει το ερευνητικό ενδιαφέρον και ήδη αναπτύσσονται διατάξεις ανεμογεννητριών που λειτουργούν σε υπεράκτιες εξέδρες ή πλωτήρες.

Έτσι ο ενδεχόμενος συνδυασμός διατάξεων που εκμεταλλεύονται τόσο το αιολικό όσο και το κυματικό δυναμικό, αποτελούν μια συνεχώς αναπτυσσόμενη επιλογή.

Διατάξεις όπως η εικονιζόμενη στη συνέχεια, έχουν πλέον τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η κυματική δραστηριότητα που αυτή τη στιγμή γίνεται αιτία στη δυσκολία σταθεροποίησης των εν λόγω διατάξεων, μπορεί κάλλιστα να αποτελέσει μια επιπλέον πηγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με πολλαπλά οφέλη. Παράδειγμα και πρόταση μιας υλοποίησης αυτής της μορφής θα παρουσιαστεί εκτενέστερα στην ενότητα {6.2} της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 6
Πλωτή ανεμογεννήτρια

Για την αποσαφήνιση των κατηγοριών που μέχρι τώρα περιεγραφήκαν, γίνεται μια σύντομη παράθεση βασικών εκπροσώπων τους στη συνέχεια.

(1) Παράκτιες εγκαταστάσεις

(a) S.D.E. Energy Ltd.



Εικόνα 7
S.D.E.

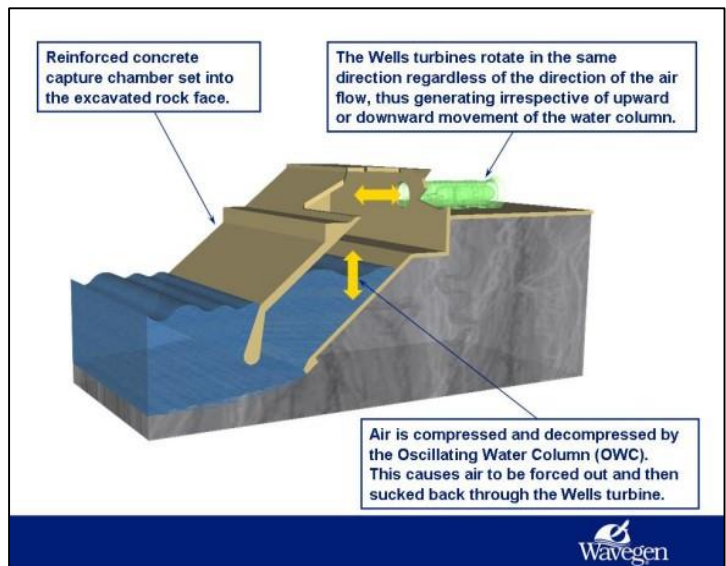
Πρόκειται για μια εταιρία με έδρα το Tel Aviv που δραστηριοποιείται στην κατασκευή διατάξεων απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Η τεχνολογία του μετατροπέα SDE χρησιμοποιεί την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων για να παράγει υδραυλική πίεση, που με την σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος, καθώς και τη ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια.

Αποτελείται από τεράστιες μεταλλικές πλωτές πλατφόρμες οι οποίες βρίσκονται αρθρωμένες σε ένα τοίχο στη στεριά και φέρουν έμβολα τα οποία κινούνται με την ανύψωση και την πτώση της εκάστοτε πλατφόρμας. Τα υδραυλικά έμβολα χρησιμεύουν στην κίνηση ηλεκτρογεννήτριας.

Το S.D.E. έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε οκτώ μονάδες συνολικά. Ένα μοντέλο πλήρης κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί στον Ισραήλ, και παρήγαγε 40 kW/h για σχεδόν ένα χρόνο. Η συγκεκριμένη προσπάθεια έχει πείσει σε πολύ μεγάλο βαθμό το Υπουργείο Βιομηχανίας και Εμπορείου του Ισραήλ με αποτέλεσμα η εταιρία να λαμβάνει οικονομική υποστήριξη ύψους 1,360,000 €.

(b) Limpet

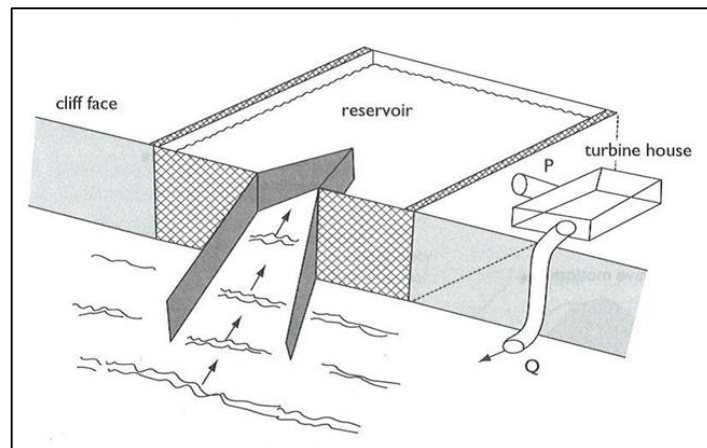
Το 1998 το Queen's University Belfast σε συνεργασία με τις εταιρίες Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και την I.S.T. Portugal σχεδίασαν την παράκτια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Limpet (Last Installed Marine Power Energy Transmitter). Ανήκει στην κατηγορία των OWC (Oscillating Water Column) και πρωτοδοκιμάστηκε το Νοέμβριο του 2000 στη νήσο Islay της Σκωτίας. Η συσκευή χρησιμοποιεί μια στήλη ύδατος η οποία ταλαντώνεται μέσα σε ένα θάλαμο από μπετόν. Όπως φαίνεται και στη σχηματική αναπαράσταση το κύματα προκαλούν την ταλάντωση αυτή της αέριας μάζας, η οποία συμπιέζεται και στη συνέχεια εκτονώνεται σε μια στροβιλογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 8

Η διάταξη Limpet

(c) Tapchan (Tapered Channel)



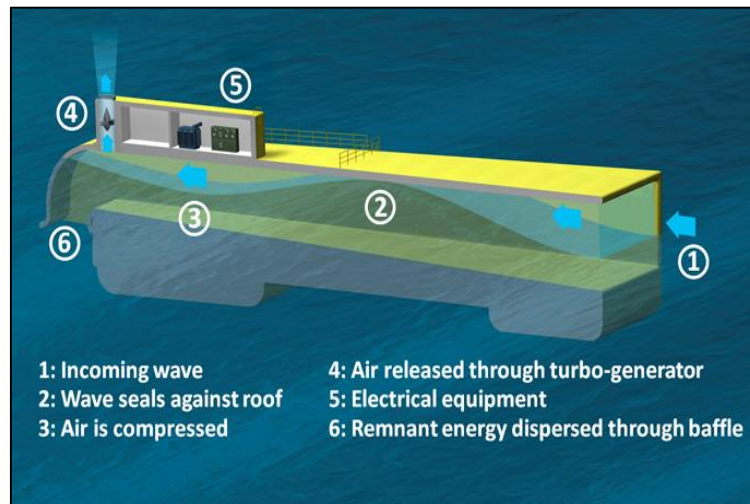
Εικόνα 9

Η διάταξη Tapchan

Πρόκειται για μια διάταξη η οποία συγκεντρώνει το νερό σε μια δεξαμενή υψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας μέσω μιας κεκλιμένης υποδοχής για τα κύματα. Η ορμή των κυμάτων αναγκάζει μάζες νερού να ανέρχονται την κεκλιμένη επιφάνεια και να συγκεντρώνονται στην δεξαμενή που φαίνεται στο σχήμα. Όταν η δεξαμενή γεμίσει, το νερό απελευθερώνεται από τον πυθμένα της και αφού κινήσει έναν υδροστρόβιλο καταλήγει ξανά στη θάλασσα. Λόγω της λογικής πίσω από την κατασκευή αυτή, γίνεται εμφανές πως τα ιδανικά μέρη ανάπτυξης της, είναι περιοχές με έντονα φαινόμενα παλίρροιας.

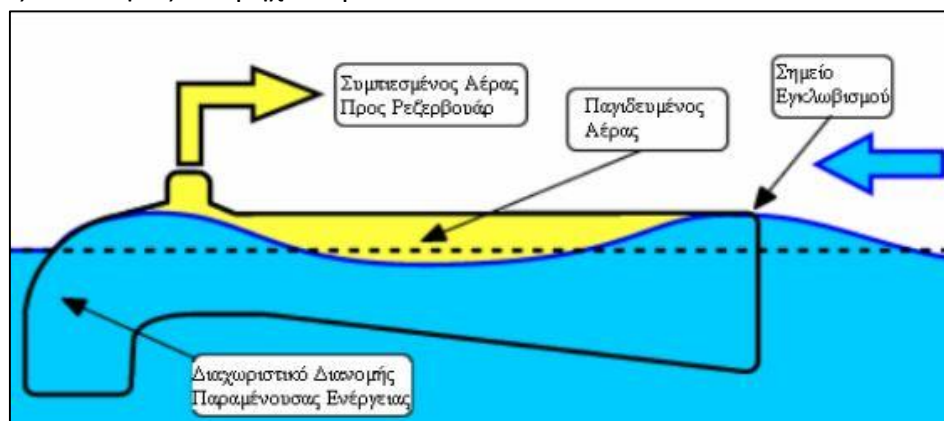
(2) Υπεράκτιες εγκαταστάσεις

(a) OWEL WEC (Wave Energy Converter)



Εικόνα 10
OWEL WEC

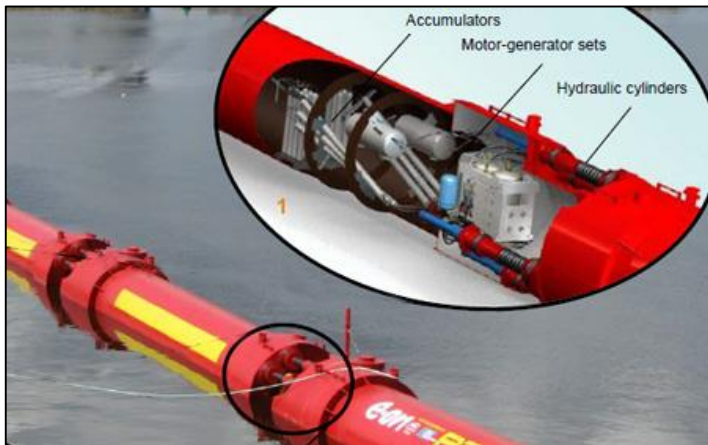
Η εταιρία OWEL (Offshore Wave Energy Ltd) δραστηριοποιείται στον τομέα της κυματικής ενέργειας από το 2001 που είναι και το έτος ίδρυσής της. Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας που έχει σχεδιάσει είναι μια συσκευή ανοιχτής θάλασσας που παγιδεύει και συμπιέζει τον αέρα κατά την διέλευση των θαλάσσιων κυμάτων μέσα από τις κοιλότητες του μηχανισμού.



Εικόνα 11
OWEL WEC

Πρόκειται για έναν οριζόντια πλωτό αγωγό με κεκλιμένη την κάτω επιφάνειά του. Ο αγωγός είναι ανοιχτός στη μια του μεριά για να υποδέχεται τη θάλασσα. Καθώς τα κύματα εισέρχονται στον αγωγό εγκλωβίζουν και συμπιέζουν αέρα ο οποίος τελικά εκτονώνεται σε ένα στρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διάταξη είναι προσδεμένη στο βυθό με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί κάθε φορά να βρεθεί στην κατεύθυνση των κυμάτων. Η συσκευή είναι σχεδιασμένη για εγκατάσταση πάνω σε πλωτές πλατφόρμες, αγκυροβολημένες σε τοποθεσίες στην ανοιχτή θάλασσα όπου τα κύματα έχουν την κατάλληλη πυκνότητα ενέργειας.

(b) Pelamis



Εικόνα 12
Η μηχανή Pelamis



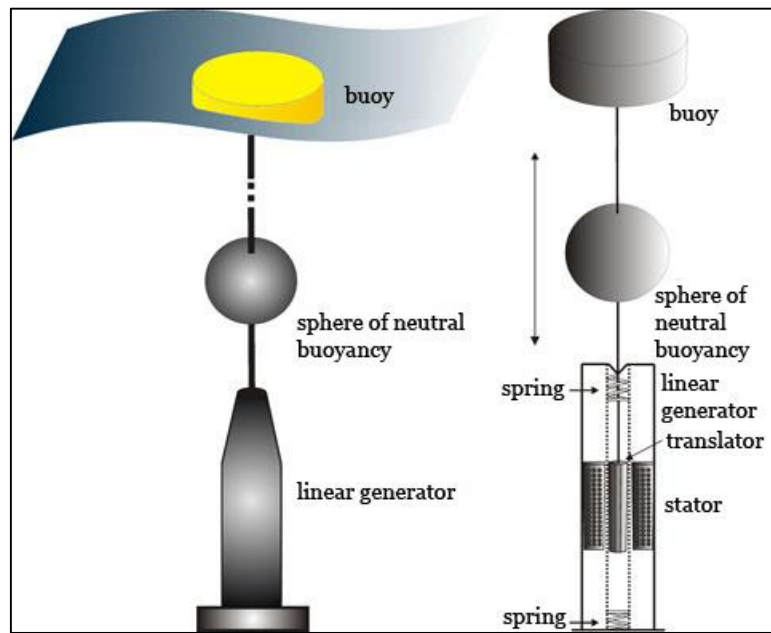
Εικόνα 13
Η μηχανή Pelamis

Το Pelamis είναι ένας μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, ο οποίος αναπτύχθηκε από την Ocean Power Delivery Ltd. Με τεχνολογία ειδικά για τη βιομηχανία ανοικτής θαλάσσης, το Pelamis δίνει περίπου ισοδύναμη έξοδο με μια ανεμογεννήτρια. Το πρώτο μοντέλο παραγωγής φυσικής κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμάζεται στο European Marine Center στο EMEC Test Center στο Orkney.

Στόχος των ερευνητών του εν λόγω εγχειρήματος είναι η κατασκευή και αξιοποίηση πολλών μηχανών Pelamis, σε παράλληλη διάταξη, ώστε να σχηματίζεται ένα είδος πλέγματος ή «φάρμες κυμάτων» όπως ονομάζονται. Η συστοιχία αυτή υπολογίζεται να καλύπτει επιφάνεια ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου στη θάλασσα και να παράγει περί τα 30 MW. Ποσό ενέργειας που υπολογίζεται ότι μπορεί να καλύψει περίπου τις ανάγκες σε ρεύμα για 20.000 κατοικίες.

Η μηχανή ονόματι Pelamis αποτελείται από τέσσερις κυλινδρικές διατομές συνδεδεμένες με universal joints που επιτρέπουν την άρθρωση σε 2 κατευθύνσεις. Η διάταξη αυτή επιπλέει στο επίπεδο της θάλασσας και βάλλεται από τα κύματα που την αναγκάζουν να κινείται σε κυματοειδή μορφή. Καθώς οι τέσσερις αυτές διατομές κουνιούνται η μια ως προς την άλλη απορροφάται ενέργεια από το υδραυλικό σύστημα που είναι τοποθετημένο σε κάθε σύνδεσμο και κινείται εν τέλει μια γεννήτρια.

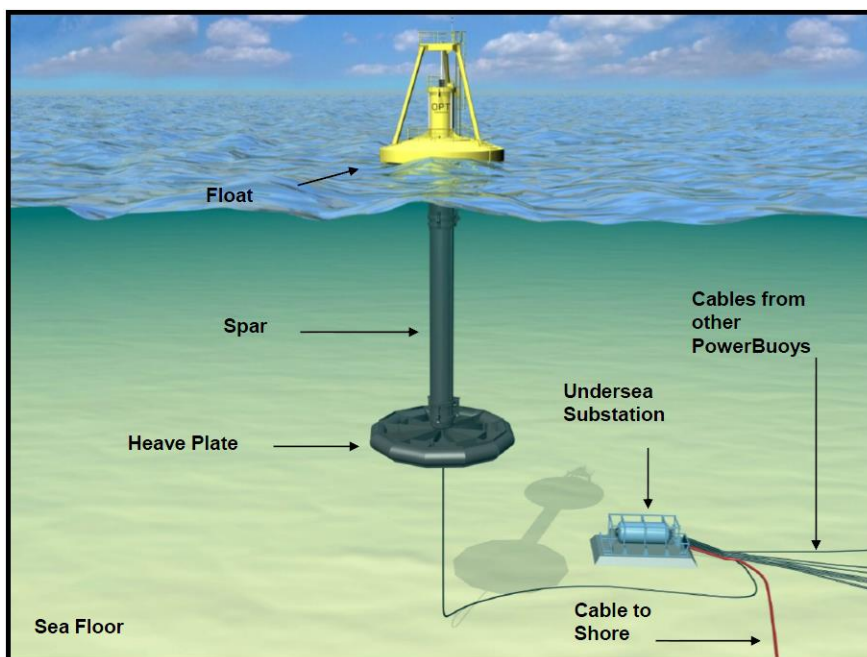
(c) Point Absorbers



Εικόνα 14

Point absorber

Είναι ουσιαστικά μια κατηγορία από μόνη της καθώς πολλές εταιρίες καταφεύγουν στη λύση αυτή. Πρόκειται για μια κατακόρυφη διάταξη που φέρει το μεγαλύτερο μέρος της κάτω από το νερό ενώ περίπου μόνο το ένα τρίτο αυτής βρίσκεται εκτός. Ένας πλωτήρας κινείται με οδηγό έναν κατακόρυφο άξονα και παράγει ενέργεια είτε απευθείας μέσω μιας γραμμικής γεννήτριας, είτε μέσω ενός ηλεκτρο-υδραυλικού συνδυασμού. Το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται προφανώς από το ύψος του κύματος.



Εικόνα 15

Point absorber

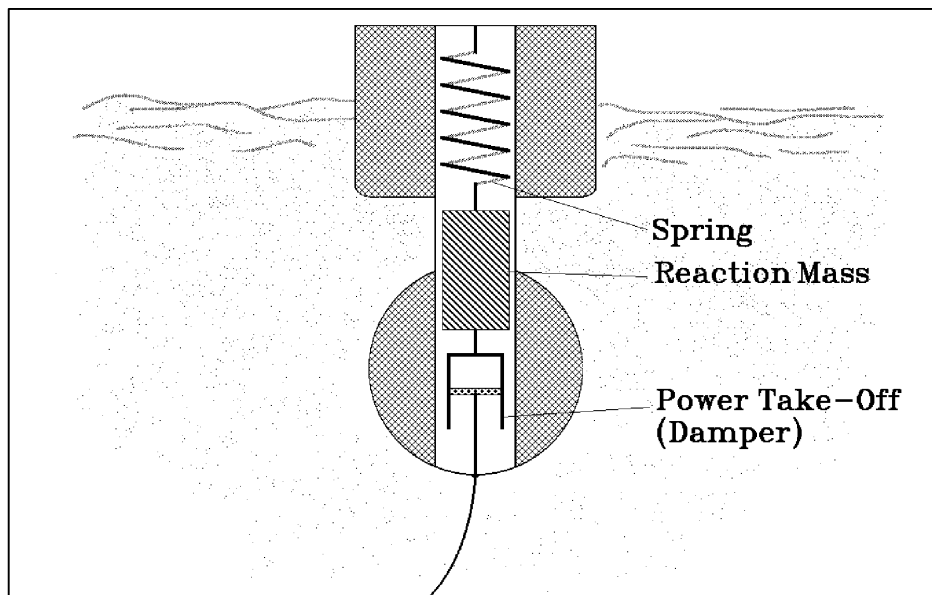
2. Αδρανειακοί μηχανισμοί κυματικής ενέργειας

Μια αξιοσημείωτη κατηγορία, ανάμεσα σε όλες τις ιδέες για απορρόφηση κυματικής ενέργειας, αποτελούν όλα τα αδρανειακά συστήματα. Με τον όρο αδρανειακά συστήματα χαρακτηρίζονται όλες εκείνες οι διατάξεις που αποτελούνται από μεγάλες μάζες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης κινητικής ενέργειας και η λειτουργία τους είναι ανάλογη αυτής ενός σφονδύλου. Στον παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά για τους 5 βασικούς εκπροσώπους τις κατηγορίας αυτής, οι οποίοι αποτέλεσαν τη βάση για την ιδέα του μηχανισμού που θα περιγραφεί στη συνέχεια.

2.1. PS Frog

Πρόκειται ίσως για τον πιο παλιό αδρανειακό μηχανισμό πάνω στον τομέα της κυματικής ενέργειας, αφού ξεκίνησε περί το 1970 με έδρα μελέτης και εξέλιξης το πανεπιστήμιο του Lancaster της Αγγλίας [7], [9-10].

Η αρχή της ιδέας έγινε με το Frog το οποίο ήταν σχεδιασμένο να δουλεύει ως point absorber χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα για την απορρόφηση της κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 16

Frog (μοντέλο μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα)

Το Frog αποτελούντο από ένα κατακόρυφο αξονοσυμμετρικό πλωτήρα του οποίου το σώμα μπορούσε να έχει ποικίλα σχήματα με την προϋπόθεση πως το τμήμα προσβολής της επιφάνειας της θάλασσας να είναι κυλινδρικό. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται πως η υδροστατική στιβαρότητα παραμένει γραμμική ως προς την κατακόρυφη μετατόπιση, ακόμα και σε πολύ μεγάλα εύρη κίνησης. Η απαίτηση κάτω

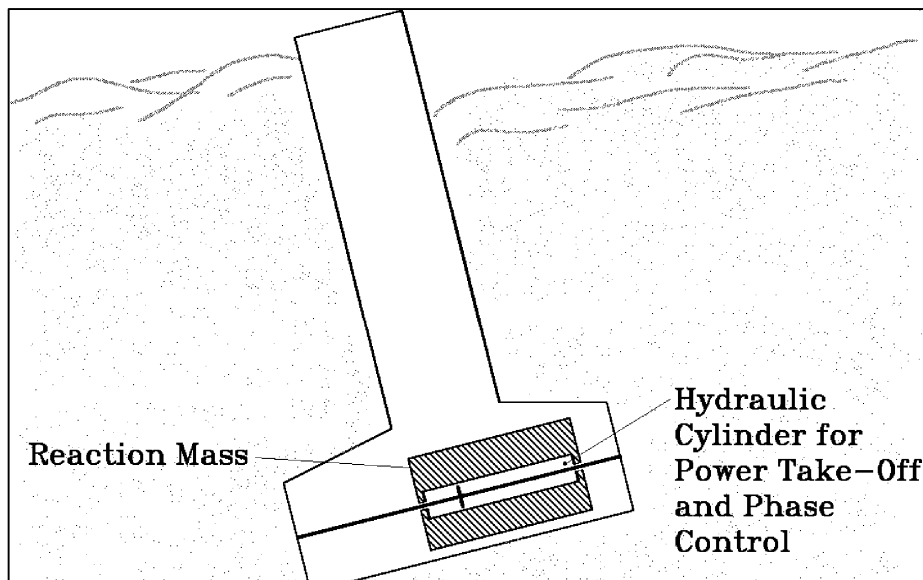
από την ιδέα αυτή είναι η μεγιστοποίηση της ενέργειας που ελκύεται από το περιβάλλον και όχι η ελαχιστοποίηση της ταλάντωσης όπως θα απαιτούσαμε από έναν άλλο αποσβεστήρα.

Το σημαντικότερο στοιχείο για την επιτυχία της διάταξης είναι να μπορεί να μεταβληθεί η σκληρότητα του ελατηρίου έτσι ώστε σε κάθε κύμα να μπορεί η διάταξη να βρίσκεται κοντά στο συντονισμό όπου έχουμε και το μέγιστο ποσό απορροφημένης ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτό, υπάρχουν 2 τρόποι : α) κατάλληλη συγκράτηση της μάζας στο ακραίο σημείο της διαδρομής της έτσι ώστε να απελευθερωθεί την ώρα που θα δώσει συχνότητα πολύ κοντινή με αυτή του κύματος ή β) συνεχής μεταβολή της ευκαμψίας χρησιμοποιώντας 2 ελατήρια σε σειρά πάλι με στόχο το συντονισμό και τη μέγιστη απορρόφηση ενέργειας.

Η ιδέα του Frog σύντομα αντικαταστάθηκε από το PS (Pitching and Surging) Frog. Το PS Frog ήρθε να καλύψει τα κενά του προκατόχου του. Με άλλα λόγια το Frog ήταν δεσμευμένο σε κίνηση αποκλειστικά κατά heave (κατακόρυφος άξονας) και οποιαδήποτε άλλη κίνησή του ήταν μη εκμεταλλεύσιμη. Επιπλέον σε συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων υπήρχε ο κίνδυνος η μάζα να ξεφύγει της προκαθορισμένης διαδρομής της μέσα στον πλωτήρα και να καταστραφεί η εγκατάσταση. Αυτές λοιπόν οι ατέλειες οδήγησαν τους ερευνητές του πανεπιστημίου του Lancaster στη δημιουργία του PS Frog.

Το PS Frog αποτελείται από ένα κατακόρυφα πλωτό πτερύγιο, το οποίο είναι σχεδιασμένο να δουλεύει με τη μεγάλη επιφάνεια του να έρχεται πρόσωπο με το κύμα. Με αυτό τον τρόπο η διάταξη είναι ικανή να δεσμεύσει ενέργεια τόσο από το pitch όσο και από το surge.

Στη βάση του βρίσκεται ένας υδραυλικός κύλινδρος μέσα σε ειδική διαμόρφωση ώστε να απορροφάται η ενέργεια που δεσμεύεται από τη μάζα.

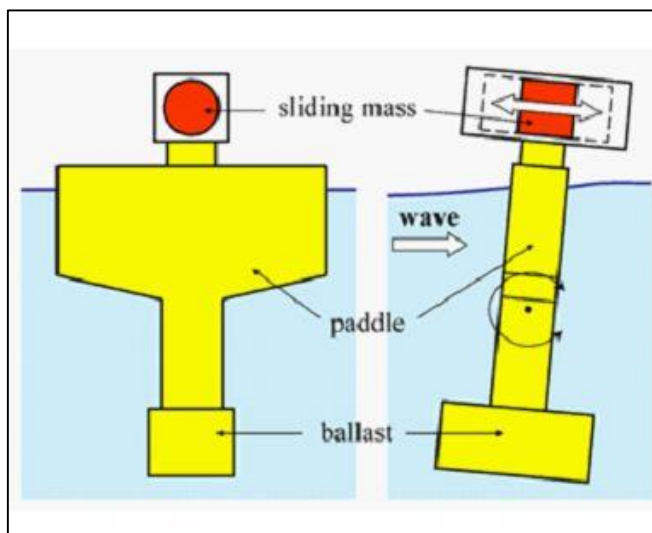


Εικόνα 17

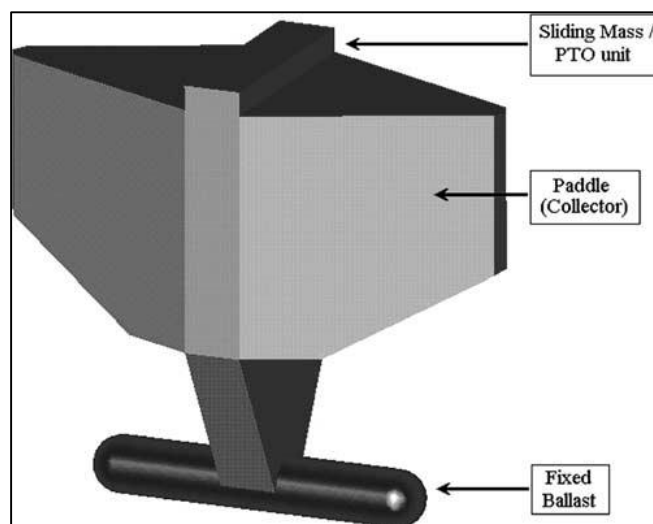
PS Frog (σηματική αναπαράσταση)

Στην απλούστερη μορφή λειτουργίας της διάταξης, φαίνεται πως τα κύματα προσκρούουν πάνω στο πτερύγιο προκαλώντας του μια περιστροφή pitch, ενώ ταυτόχρονα η μάζα που βρίσκεται συγκεντρωμένη στο κάτω μέρος θα κινηθεί μπρος-πίσω λόγω κίνησης του πτερυγίου αλλά και λόγω βαρύτητας. Η κίνηση αυτή βρίσκει αντίσταση στο υδραυλικό σύστημα το οποίο απορροφά τελικά την κινητική και δυναμική ενέργεια της μάζας.

Η ιδέα αυτή μετά από αρκετές ζυμώσεις και μετατροπές έχει φτάσει στη σημερινή της μορφή, την έκδοση PS Frog Mk 5.



Εικόνα 19
PS Frog Mk 5



Εικόνα 18
PS Frog Mk 5

Το βασικό πρόβλημα όλων των μετατροπέων κυματικής ενέργειας είναι η απαίτηση για συντονισμό, δηλαδή μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας, κάτι που σημαίνει πως πρέπει να υπάρχει συνεχής ρύθμιση στην απόκριση της διάταξης. Μιλώντας όμως για υπεράκτιες εγκαταστάσεις οι οποίες εκτίθενται στο αφιλόξενο περιβάλλον της θάλασσας, κρίνεται απαραίτητο η συσκευή ή ο μηχανισμός που τα ελέγχει και θα ρυθμίζει το συντονισμό να βρίσκεται εντός της όλης εγκατάστασης σε αυστηρά στεγανό περιβάλλον. Αυτό ακριβώς έρχεται να υλοποιήσει το PS Frog Mk 5 καθώς έχει όλα του τα εξαρτήματα κλεισμένα μέσα στο πλωτό σκάφος.

Όπως το πρώτο PS Frog, έτσι και το Mk 5 αποτελείται από ένα μεγάλο πλωτό πτερύγιο, μια μάζα που λειτουργεί ως σφόνδυλος και το μηχανισμό απορρόφησης της κινητικής ενέργειας από τη μάζα-σφόνδυλο. Έτσι η διαταραχή που προκαλείται στη διάταξη από το κύμα μετατρέπεται και πάλι σε κινητική ενέργεια της μάζας και τελικά απορροφάται από το υδραυλικό κύκλωμα για να γίνει στη συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας υδραυλικής γεννήτριας.

Το Mk 2 όπως φαίνεται διαθέτει ένα χώρο στο κάτω μέρος του ο οποίος γεμίζει με θαλασσινό νερό και λειτουργεί έτσι ως αντίβαρο. Το ποσό του νερού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κάθε φορά από τον επιθυμητό συντονισμό που θέλουμε

να επιτευχθεί, μιας και με την προσθαφαίρεση νερού αλλάζει η αδράνεια συνολικά της διάταξης.

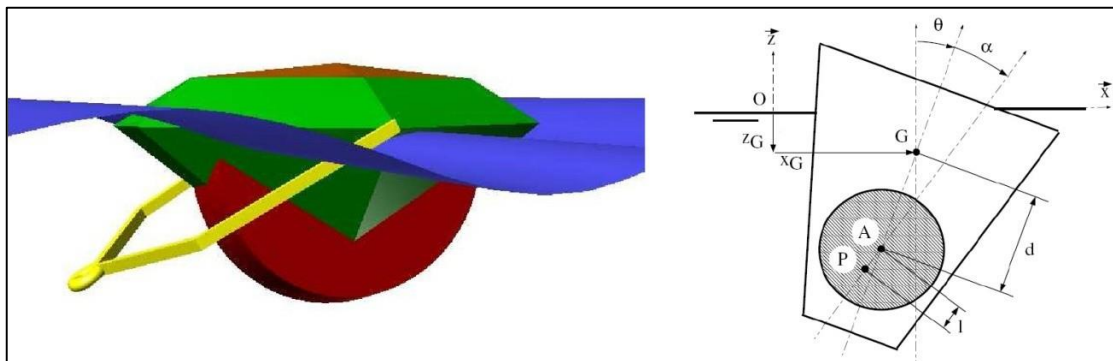
Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει η τελευταία αυτή έκδοση είναι πως η γεωμετρία του πλωτήρα συνολικά σε συνδυασμό με το αντίβαρο στο κάτω μέρος, επιτρέπει στη διάταξη να αυτοευθυγραμμίζεται με τον επιθυμητό προσανατολισμό, χωρίς να χρησιμοποιούνται πολύπλοκα συστήματα πρόσδεσης.

Η ιδέα που αναπτύσσεται στο Lancaster δείχνει να λύνει αρκετά καλά τα προβλήματα τα οποία είχαν οι πρόγονοί της, όμως η βιωσιμότητα μιας τέτοιας διάταξης παραμένει ακόμα αμφίβολη. Με συνολικό βάρος για όλη τη διάταξη τους 4.600 τόνους από τους οποίους οι 150 είναι η κινούμενη μάζα-σφόνδυλος γίνεται εύκολα αντιληπτό πως τα κόστη κατασκευής, μεταφοράς και συντήρησης αυτής της διάταξης ίσως και να είναι απαγορευτικά.

2.2. SEAREV

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το PS Frog αποτέλεσε έμπνευση για τις ιδέες που ακολούθησαν. Μια από αυτές είναι και το SEAREV που εξελίσσεται με έδρα τη Γαλλία [21], [23].

Σε παρόμοια μορφή με τον εμπνευστή του, αποτελεί και αυτό μια πλωτή διάταξη όπως φαίνεται και στη φωτογραφία του.



Εικόνα 20

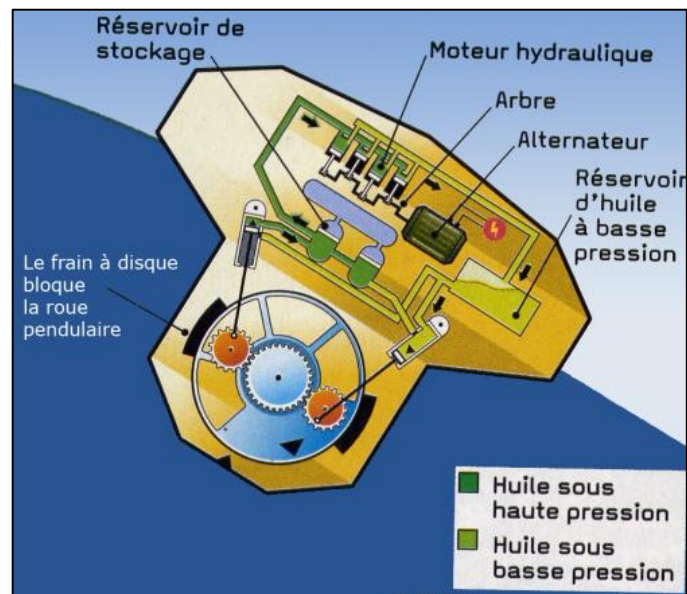
SEAREV

Στο σχεδιάγραμμα της δεξιάς πλευράς φαίνεται η βασική αρχή λειτουργίας του μηχανισμού αυτού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια περιστρεφόμενη μάζα αντί της παλινδρομικής του PS Frog. Όπως φαίνεται και από τη φωτογραφία η μάζα περιστρέφεται με τον άξονα της (A) οριζόντια και έχει το κέντρο μάζας της (P) σε απόσταση από το κέντρο περιστροφής. Με αυτό τον τρόπο ο σφόνδυλος αυτός κινείται σαν ένα εκκρεμές.

Κάθε περιστροφή ως προς pitch της διάταξης προκαλεί σχετική περιστροφή μεταξύ πλωτήρα και σφονδύλου. Αυτή η σχετική περιστροφή γίνεται εκμεταλλεύσιμη από ένα υδραυλικό σύστημα απορρόφησης ενέργειας και μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας υδραυλικά κινούμενης.

Το SEAREV βρίσκεται και αυτό προσδεμένο με το βυθό της θάλασσας και έχει τη δυνατότητα να αυτοευθυγραμμίζεται με την επιθυμητή διεύθυνση του κύματος. Τη δυνατότητα αυτή τη δημιουργεί η εξωτερική σχεδίαση τη διάταξης αλλά και η ελευθερία που παρέχει το δέσιμο στο βυθό με ένα μόνο σημείο πρόσδεσης.

Σύμφωνα με τους δημιουργούς της ιδέας το SEAREV προσφέρει τα εξής 2 πλεονεκτήματα : α) Όλα του τα παρελκόμενα βρίσκονται κλεισμένα στεγανά μέσα στον πλωτήρα περιλαμβανομένων του υδραυλικού και ηλεκτρικού συστήματος. β) Ο έκκεντρος αυτός σφόνδυλος διευκολύνει τον έλεγχο της κίνησής του μέσω του συστήματος φρεναρίσματος που φαίνεται στη φωτογραφία.



Εικόνα 21

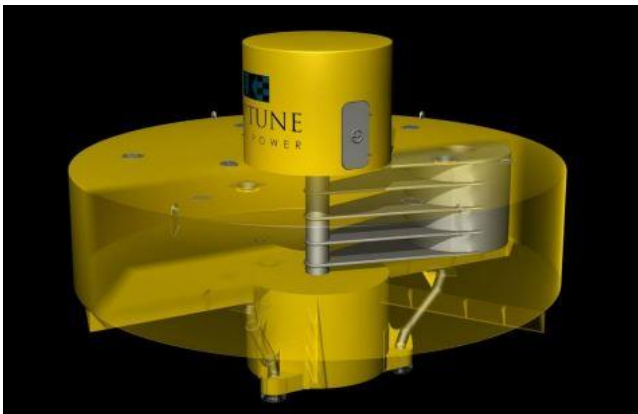
Στο εσωτερικό του SEAREV

Ακόμα όμως και αυτή η διάταξη δυσκολεύεται να ξεπεράσει τα προβλήματα που θα την καταστήσουν εύκολα βιώσιμη στην αγορά. Μπορεί το βάρος αυτής να περιορίζεται στους 1.000 τόνους (σημαντικά μικρότερο βάρος σε σχέση με το PS Frog Mk 5) όμως ο σφόνδυλος έχει μάζα 400 τόνους. Είναι σαφές πως η στήριξη ενός έκκεντρο 400 τόνων κάθε άλλο παρά εύκολο και οικονομικό εγχείρημα είναι.

2.3. Neptune

Η Neptune Wave Power αποτελεί μια εταιρία με έδρα το Τέξας της Αμερικής και προσανατολίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από συσκευές που δεσμεύουν την κυματική ενέργεια. Η εταιρία αυτή έχει ήδη κατασκευάσει το πρώτο της μοντέλο αληθινής λειτουργίας και βρίσκεται σε δοκιμή και εξέλιξη στο πανεπιστήμιο του Oregon [16].

Πρόκειται για μια συσκευή η οποία ανατύσσεται με μεγάλη μυστικότητα και καλύπτεται με πατέντα από τα πρώτα κίολας χρόνια εξέλιξής της. Για το λόγο αυτό οι πληροφορίες οι οποίες διατίθενται στο ευρύ κοινό αλλά και στην επιστημονική κοινότητα είναι ελάχιστες. Παρόλα αυτά η διάταξη είναι αυτή που φαίνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 23
Neptune



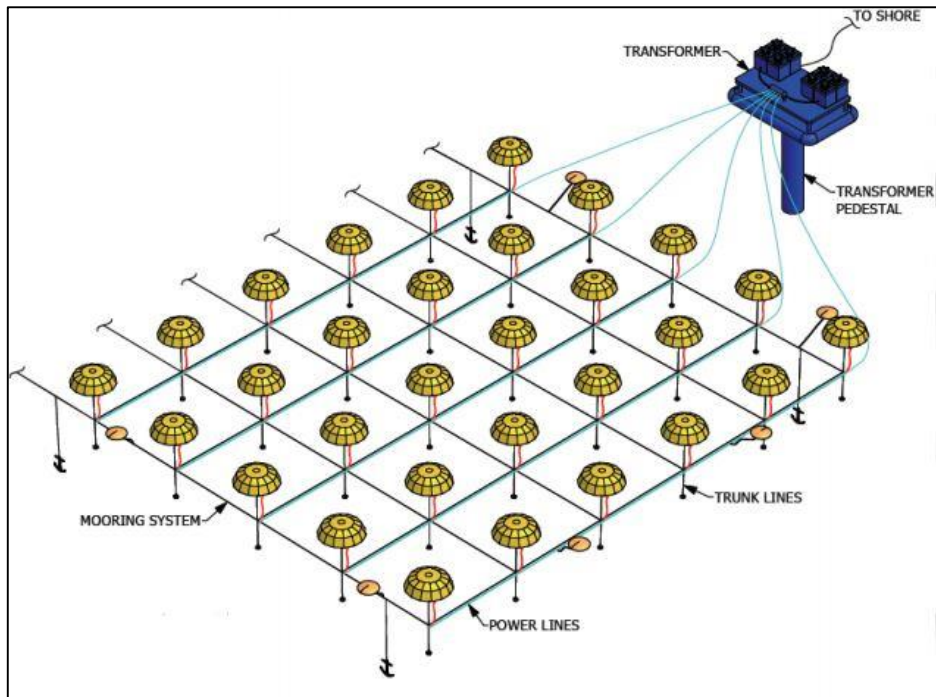
Εικόνα 22
Neptune

Όπως φαίνεται στη φωτογραφία το Neptune θυμίζει έντονα το SEAREV σε κατακόρυφη εκδοχή. Μια έκκεντρη μάζα που περιστρέφεται έκκεντρα, πάλι σε μορφή εκκρεμούς, χρησιμοποιείται για δέσμευση κινητικής ενέργειας. Η ίδια μάζα βρίσκεται ομοαξονικά συνδεδεμένη με μια γεννήτρια για την απευθείας παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Είναι προφανές πως οποιαδήποτε περιστροφή του πλωτήρα που φιλοξενεί τη μάζα και τη γεννήτρια προκαλεί σχετική περιστροφή στη μάζα λόγω αδράνειας και βαρύτητας.

Η συσκευή αυτή δείχνει να πλεονεκτεί σοβαρά σε σχέση με τον ανταγωνισμό της μιας και παράγει ρεύμα απευθείας χωρίς να μεσολαβεί υδραυλικός μεταλλάκτης. Επιπλέον εκμεταλλεύεται κάθε κίνηση του κύματος, εκτός βέβαια του heave.

Στόχος της εταιρίας είναι η δημιουργία πλωτού δικτύου με μια σειρά από τέτοιες διατάξεις. Η κάθε μία μεμονωμένη συσκευή Neptune μπορεί να παράξει ως και 250 kW ισχύος.



Εικόνα 24

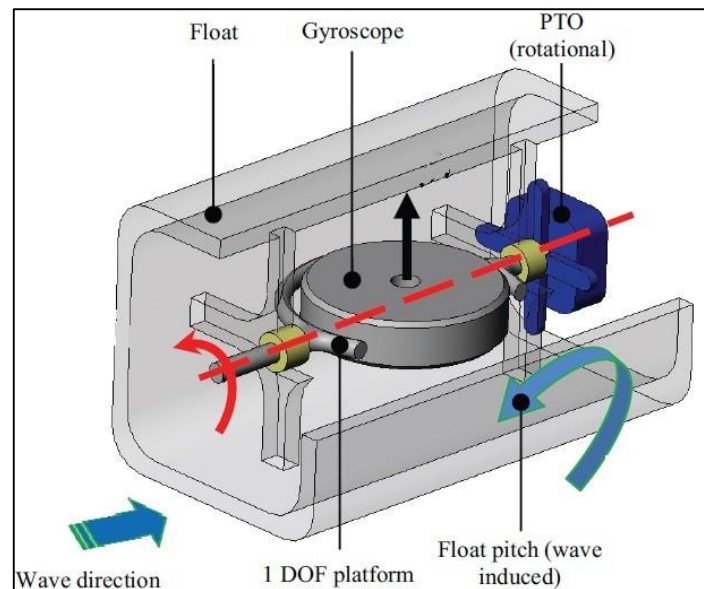
Neptune Foundation

Σύμφωνα με τις ανακοινώσεις της εταιρίας, το πρώτο Neptune που δημιουργήθηκε έχει επιβεβαιώσει πλήρως τις προβλέψεις και τους υπολογισμούς λειτουργίας του και θα μπορέσει εύκολα να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση.

Οι διαστάσεις του έχουν περιοριστεί τόσο έτσι ώστε ο όγκος και τα βάρη που προκύπτουν να μην είναι απαγορευτικά. Επαλήθευση του γεγονότος αυτού είναι η σχετική μικρή απορρόφηση ενέργειας ανά συσκευή σε σχέση βέβαια με τον ανταγωνισμό.

2.4. ISWEC

Το ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) αποτελεί μια ιδέα που ερευνάται στο πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου. Όπως προδίδει και το ίδιο του το όνομα, βασίζεται και αυτό σε μια αδρανειακή διάταξη, γεγονός που του δίνει και τη δυνατότητα να αποτελέσει μια πλήρως στεγανή εγκατάσταση. Η μεγάλη διαφορά σε σχέση με τους προηγούμενους μηχανισμούς είναι ότι αντί να χρησιμοποιείται μια βαριά αντιδρώσα μάζα για αδρανειακό φορτίο, αυτή αντικαθίσταται στο ISWEC από ένα σφόνδυλο-γυροσκόπιο [21], [22].



Εικόνα 25
ISWEC

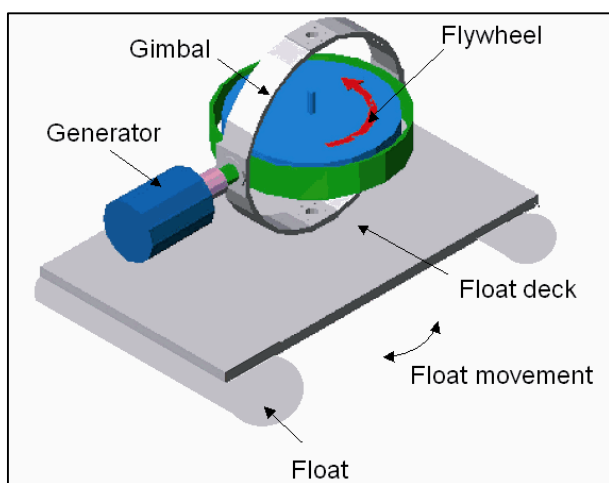
Η σχηματική αναπαράσταση που δίνεται προηγουμένως παρουσιάζει το σφόνδυλο με τον άξονα του κατακόρυφο να είναι αναρτημένο σε μια πλατφόρμα ενός βαθμού ελευθερίας. Τα κύματα που προσπίπτουν πάνω στον πλωτήρα που φιλοξενεί την όλη διάταξη, επάγουν κίνηση σε pitch με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή πάνω στην πλατφόρμα του ενός βαθμού ελευθερίας. Ακολουθώντας την κατά Νεύτωνα αρχή διατήρησης της ορμής, μια αντίδραση αναπτύσσεται στο γυροσκόπιο (γνωστό και ως γυροσκοπικό φαινόμενο). Η αντίδραση αυτή (precession motion) είναι σχεδιασμένη με κόκκινο βέλος στο σχήμα και πρόκειται για μια περιστροφή ως προς άξονα ορθοκανονικό ως προς τον (κατακόρυφο) άξονα περιστροφής του σφονδύλου και τον (οριζόντιο) άξονα εφαρμογής της ροπής. Μια μονάδα απόληψης ισχύος (ή Power Take-Off) δεσμεύει ενέργεια από την κίνηση αντίδρασης του γυροσκοπίου και λειτουργεί ταυτόχρονα και σα μηχανισμός απόσβεσης. Το σύστημα αυτό διακρίνεται με μπλε χρώμα.

Σε αντίθεση με τις εσωτερικές μάζες ανάδρασης, των προηγούμενων μηχανισμών, που λειτουργούν σε 6 βαθμούς ελευθερίας, βάση περιστροφής και μετατόπισης, το ISWEC μπορεί να λειτουργήσει το πολύ σε 2 περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Με άλλα λόγια ένα γυροσκόπιο δε μπορεί σε καμία περίπτωση να αλληλοεπιδρά

κατά τις κινήσεις surge και heave. Παρόλα αυτά το μεγάλο του πλεονέκτημα κρύβεται στο γεγονός πως το ποσοστό αλληλοεπίδρασης με τη θάλασσα εξαρτάται από τη συχνότητα περιστροφής του σφονδύλου και τη ροπή αδράνειάς του. Το τελευταίο εξαρτάται σαφώς από τον τρόπο που κατανέμεται η μάζα στο σφόνδυλο του γυροσκοπίου. Συνεπώς ο βαθμός αντίδρασης της διάταξης μπορεί να ρυθμιστεί έτσι χωρίς την ανάγκη κάποιας μεγάλης κινούμενης μάζας.

2.5. Wave Gyro

Ο μετατροπέας αυτός, είναι μια ιδέα που αναπτύσσεται στο πανεπιστήμιο του Κόμπε της Ιαπωνίας, χρηματοδοτούμενη και υποστηριζόμενη από την Gyrodynamics Co., Ltd. Οι ερευνητές του πανεπιστημίου αυτού έχουν αναπτύξει μια καθαρά μηχανολογική ιδέα για την απορρόφηση ενέργειας από τα κύματα. Η αρχή λειτουργίας της είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό όμοια του ISWEC και βασίζεται και αυτή στα γυροσκοπικά φαινόμενα. Το γυροσκόπιο είναι και πάλι προσδεμένο πάνω σε μια πλατφόρμα που έχει ελευθερία κινήσεων στη θάλασσα. Σύμφωνα με την εταιρία είναι αποδεδειγμένο πως το σύστημα αυτό έχει αρκετά μεγαλύτερη αποδοτικότητα από τα συμβατικά OWC συστήματα, καθώς και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Η διάταξη αυτή προορίζεται για την ηλεκτροδότηση μικρών νησιών ή λιμανιών [20].



Εικόνα 27
The Wave Gyro



Εικόνα 26
The Wave Gyro

Το σύστημα αυτό λειτουργεί ως «ανορθωτής» της κινητικής ενέργειας της πλατφόρμας που διεγείρεται από τα κύματα. Η πλατφόρμα φιλοξενείται πάνω σε 2 πλωτήρες και το γυροσκόπιο προσδέεται πάνω της. Καθώς η πλατφόρμα γέρνει μπρος-πίσω προκαλεί μια περιστροφή στον άξονα του σφονδύλου. Ο σφόνδυλος με τη σειρά του λειτουργεί ως γυροσκόπιο και αντιδρά στην κίνηση που του επάγεται. Το γυροσκόπιο όπως και πριν συνδέεται σε μια γεννήτρια η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ακριβώς επειδή το γυροσκόπιο συνδέεται απευθείας πάνω στην γεννήτρια, η εν λόγω διάταξη έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συστήματος φαίνονται στη συνέχεια :

- Πολύ καλή αποδοτικότητα σε ένα μεγάλο εύρος κυμάτων (ύψος κύματος : 0.5m-4m)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Χαμηλές ανάγκες σε αγκύρωση
- Μηδενική ρύπανση και επίδραση στο περιβάλλον του
- Περιορισμένες διαστάσεις (0.3m/kW) και χαμηλό βάρος (λιγότερο από 1ton/kW)
- Χαμηλό κόστος κατασκευής
- Χαμηλό κόστος συντήρησης

3. Η βιωσιμότητα της υπεράκτιας ενέργειας σε Ελλάδα και Ευρώπη

Σύμφωνα με μετεωρολογικές μελέτες [23] τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας εμφανίζονται σε περιοχές ακραίων γεωγραφικών συντεταγμένων. Τέτοιες για παράδειγμα είναι το Ανατολικό κομμάτι του Ατλαντικού και το Νότιο κομμάτι του Ειρηνικού ωκεανού. Παρόλα ταύτα το υπεράκτιο κυματικό δυναμικό για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κάθε άλλο παρά ευκαταφρόνητο είναι. Συμπεριλαμβανομένης και της Νορβηγίας εκτιμάται πως οι θάλασσες της Ευρώπης διαθέτουν 320 GW κυματικής ενέργειας, από τα οποία περίπου τα 30 GW αφορούν τη Μεσόγειο Θάλασσα.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως ο τομέας των υπεράκτιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει τεράστιες προοπτικές για μια μακροπρόθεσμη αιεφόρο ενεργειακή εκμετάλλευση. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται πως σε περιοχές της βορείου θάλασσας, σε βάθη από 50 m και πάνω, μπορεί να παραχθεί τόση ενέργεια ώστε να καλύψει στο τετραπλάσιο τις ενεργειακές απαιτήσεις ολόκληρης της Ευρώπης [4-5]. Αντίστοιχες δυνατότητες προσφέρονται και στην περιοχή της Μεσογείου.

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα ο τομέας αυτός παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον. Σύμφωνα με έρευνες, στο Αιγαίο εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος στη Μεσόγειο ($4\div 11$ kW/m) ανά μήκος διαδιδόμενου κύματος. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε $150\div 230$ TWh/έτος, από τα οποία $5\div 9$ TWh/έτος αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες [23].

3.1. Επιλογή περιοχών στον ελληνικό χάρτη

Οι ελληνικές ακτές είναι πολύπλοκες και ποικίλες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μεγάλο αριθμό νησιών στο Ιόνιο και ιδιαίτερα στο Αιγαίο μετριάζει την ανάπτυξη ενός ισχυρού κυματικού δυναμικού. Επομένως η έρευνα στρέφεται σε περιοχές που εκτίθενται στην ανοιχτή θάλασσα χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια στεριά. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ανεπηρέαστη ανάπτυξη κυμάτων που μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας [24].

Ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στην εύρεση τέτοιου είδους περιοχών, αποτελεί το σύστημα «Ποσειδών», που αριθμεί αρκετές δεκάδες σημαδούρες παρατήρησης και καταγραφής της κυματικής δραστηριότητας. Κάνοντας λοιπόν χρήση του εργαλείου αυτού και σε στενή συνεργασία με το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιας Έρευνας (Poseidon-Hellenic Center for Marine Research) καθορίζονται οι ακόλουθες ιδανικές τοποθεσίες για την εγκατάσταση μηχανών απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Η ενδεδειγμένη εξέταση του ανατολικού τμήματος της χώρας, έδειξε ότι η βορειοδυτική ακτή της Τήνου έχει απρόσκοπτη έκθεση στο Αιγαίο Πέλαγος. Στην περιοχή αυτή το

δυναμικό από τα κύματα εμφανίζει την υψηλότερη τιμή στο Αιγαίο με εκτιμώμενο μέσο όρο ενέργειας τα 4.49 kW ανά μέτρο κύματος. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός πως στη θέση αυτή, δύναται με ένα μόνο υποθαλάσσιο καλώδιο από την Τήνο στην Άνδρο να τροφοδοτηθεί το χερσαίο τμήμα της ανατολικής Ελλάδας. Για τους λόγους αυτούς, το νησί της Τήνου είναι η καταλληλότερη περιοχή για μια προκαταρκτική μελέτη όσον αφορά την κυματική ενέργεια, για την εξυπηρέτηση του ανατολικού τμήματος της Ελλάδας [24].

Για τη δυτική πλευρά της χώρας, η νοτιοδυτική παραλία της Πελοποννήσου, εμφανίζει ένα πολύ μεγάλο κομμάτι εκτεθειμένο στη θάλασσα του Ιονίου. Εκεί εμφανίζεται και το μέγιστο κυματικό δυναμικό που συναντάται στην Ελλάδα με τιμή περί τα 5.45 kW ανά μέτρο κύματος. Όμοια με την Τήνο, η περιοχή αυτή παρουσιάζει τα ίδια οφέλη από άποψη διασύνδεσης της ηπειρωτικής χώρας με την εγκατάσταση παραγωγής της ενέργειας [26].

3.2. Συνεισφορά της «μπλε» ενέργειας στην οικονομία

Σύμφωνα με συστηματική έρευνα πάνω στο συνδυασμό αιολικής και κυματικής ενέργειας, που προέρχεται από το ερευνητικό ευρωπαϊκό πρόγραμμα Orecsa, υπολογίζεται πως το 80% της ενέργειας από τις πηγές αυτές μπορεί να παραχθεί σε βάθη μεγαλύτερα των 60 m σε απόσταση 100 km από την ακτή. Αυτά τα νούμερα κάνουν σαφή την ανάγκη για ανάπτυξη υπεράκτιων εγκαταστάσεων συνδυαστικής ενέργειας, μιας και δείχνουν το δρόμο διαφυγής από τη δέσμευση των ορυκτών πηγών ενέργειας, οι οποίες τείνουν γοργά προς εξάντληση.

Παρόλο που οι ενεργειακές δυνατότητες των θαλασσών βρίσκονται σε αφθονία, η ανάπτυξη διατάξεων για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο, λόγω περιορισμένης έρευνας αλλά και κόστους. Είναι όμως γεγονός πως με τις κατάλληλες συνέργειες και με συνδυαστικές διατάξεις, είναι πιθανό να περιοριστούν αρκετά τα κόστη, να αυξηθεί η έρευνα και να βελτιωθεί η απόδοση ενός συνεργαζόμενου ζεύγους ανεμογεννήτριας και μηχανισμού απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Η μείωση του κοστολογίου θα προέλθει από το γεγονός πως η συνολική διάταξη θα μοιράζεται κοινά στοιχεία, όπως τα συστήματα πρόσδεσης στο βυθό, τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, κοινή εγκατάσταση και συντήρηση, κοινό PTO.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι ένα ισχυρό πλεονέκτημα της ευρωπαϊκής θαλάσσιας οικονομίας. Χρησιμοποιώντας 58.000 εργαζόμενους το 2012, είναι μια πολλά υποσχόμενη βιομηχανία με τη δυνατότητα να μετασχηματίσει και να απαλλάξει από υδρογονάνθρακες το υπάρχων σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να δημιουργήσει σημαντική οικονομική ανάπτυξη που ωφελεί το σύνολο της κοινωνίας, καθώς και θαλάσσιες περιοχές και άλλους θαλάσσιους τομείς [4]. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η EU-OEA (European Ocean Energy Association) προβλέπει ότι η υλοποίηση του ευρωπαϊκού στόχου των 188GW εγκατεστημένης

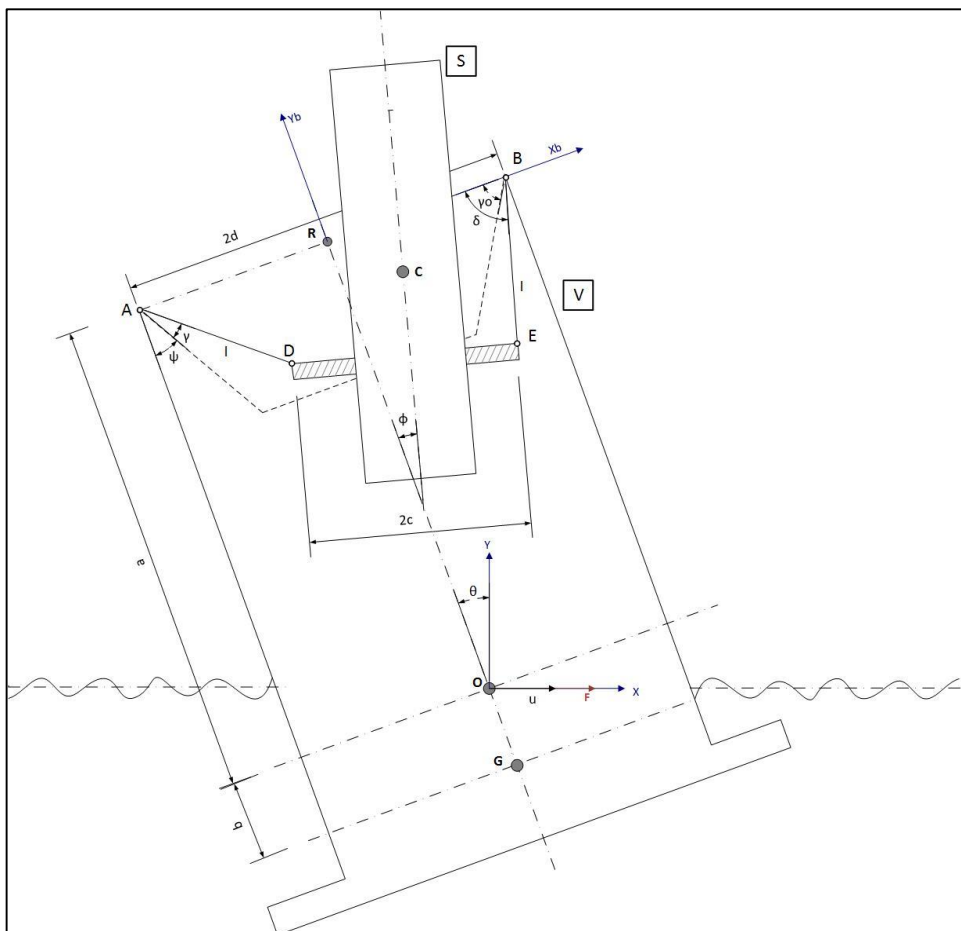
ισχύος στους ωκεανούς μέχρι το 2050 και μόνο θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία άνω των 450.000 θέσεων εργασίας [5]. Σήμερα όλες οι πλωτές ανεμογεννήτριες πλήρους κλίμακας βρίσκονται σε ευρωπαϊκά ύδατα. Η ανάπτυξή τους, η δοκιμή και η εγκατάσταση προσελκύει την παγκόσμια προσοχή, καθώς η εμπορική ανάπτυξη στον τομέα αυτό κλιμακώνεται. Είναι γεγονός πως η ευρωπαϊκή πρωτοπορία παρακολουθείται στενά από εταιρίες με έδρα την Αμερική και την Ασία, οι οποίες ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη της εν λόγω τεχνολογίας στις εγχώριες αγορές τους.

4. Κινηματική και δυναμική ανάλυση του μηχανισμού

4.1. Περιγραφή της διάταξης και βασικοί ορισμοί

Η διάταξη που θεωρείται αναπαρίσταται στην Εικόνα 28 και αποτελείται από ένα πλωτό εξωτερικό σκάφος V , στο οποίο περιέχεται ένας εσωτερικός μηχανισμός τεσσάρων ράβδων $ABDE$. Τα κύματα επάγουν στο σκάφος ταυτόχρονα μια κίνηση κατά τη διεύθυνση surge με μέγεθος u και μια κίνηση κατά τη διεύθυνση pitch με γωνία θ , σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων OXY . Το κέντρο αξόνων O , βρίσκεται στην τομή του επιπέδου της θάλασσας με τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του σκάφους. Το κέντρο μάζας του σκάφους G βρίσκεται σε μια απόσταση b από το σημείο O , κάτω από το επίπεδο της θάλασσας.

Το τμήμα DE του μηχανισμού τεσσάρων ράβδων παρέχει μια βάση πάνω στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ένα στερεό σώμα S . Το στερεό σώμα παρέχει μια αντιδρώσα μάζα στην κίνηση του εξωτερικού σκάφους, που περιστρέφεται με μια γωνία ϕ γύρω από τον άξονα Z του αδρανειακού συστήματος αναφοράς OXY . Η αρχική θέση (θέση ισορροπίας) R του κέντρου μάζας του στερεού σώματος βρίσκεται πάνω στον άξονα συμμετρίας του σκάφους V , σε μια απόσταση a από το κέντρο O . Το σύστημα αναφοράς συντεταγμένος RX_bY_b είναι σταθερά προσαρτημένο στο σκάφος V και ακολουθεί την κίνησή του.



Εικόνα 28

Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης. Μια εσωτερική μάζα αντίδρασης S κρεμάται με ένα κατάλληλο μηχανισμό από το σκάφος V .

4.2. Κινηματική ανάλυση

Η μετατόπιση και η ταχύτητα του σημείου G σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων είναι ως ακολούθως:

$$x_G = u + b \sin \theta \quad (1.a)$$

$$y_G = -b \cos \theta \quad (1.b)$$

$$\dot{x}_G = \dot{u} + \dot{\theta}(b \cos \theta) \quad (2.a)$$

$$\dot{y}_G = -\dot{\theta}(b \sin \theta) \quad (2.b)$$

Η μετατόπιση του κέντρου μάζας C σύμφωνα με το σύστημα OXY είναι:

$$x_M = x_R + x_B \cos \theta - y_B \sin \theta = u + x_B \cos \theta - (a + y_B) \sin \theta \quad (3.a)$$

$$y_M = y_R + x_B \sin \theta + y_B \cos \theta = x_B \sin \theta + (a + y_B) \cos \theta \quad (3.b)$$

όπου:

$$x_R = u - a \sin \theta \quad (4.a)$$

$$y_R = a \cos \theta \quad (4.b)$$

Οι αντίστοιχες εκφράσεις για τα x_B , y_B δίνονται στην εξίσωση (A.21) του παραρτήματος A1, όπου γίνεται λεπτομερής κινηματική ανάλυση της κίνησης του κέντρου μάζας C του σώματος S σε σχέση με το σύστημα RX_bY_b .

Οι εκφράσεις για τις αντίστοιχες ταχύτητες \dot{x}_M και \dot{y}_M προκύπτουν ως ακολούθως:

$$\dot{x}_M = \dot{u} + \dot{x}_B \cos \theta - \dot{\theta} x_B \sin \theta - \dot{y}_B \sin \theta - \dot{\theta}(a + y_B) \cos \theta$$

$$\dot{x}_M = \dot{u} - [(a + y_B) \cos \theta + x_B \sin \theta] \dot{\theta} + (r_x \cos \theta - r_y \sin \theta) \dot{\phi}$$

$$\dot{x}_M = \dot{u} - l_{xM} \dot{\theta} + r_{xM} \dot{\phi} \quad (5)$$

$$\dot{y}_M = -\dot{\theta}(a + y_B) \sin \theta + \dot{\theta} x_B \cos \theta + \dot{y}_B \cos \theta + \dot{x}_B \sin \theta$$

$$\dot{y}_M = [x_B \cos \theta - (a + y_B) \sin \theta] \dot{\theta} + (r_y \cos \theta + r_x \sin \theta) \dot{\phi}$$

$$\dot{y}_M = l_{yM} \dot{\theta} + r_{yM} \dot{\phi} \quad (6)$$

όπου:

$$l_{xM} = (a + y_B) \cos \theta + x_B \sin \theta \quad (7.a)$$

$$l_{yM} = x_B \cos \theta - (a + y_B) \sin \theta \quad (7.b)$$

$$r_{xM} = r_x \cos \theta - r_y \sin \theta \quad (8.a)$$

$$r_{yM} = r_x \sin \theta + r_y \cos \theta \quad (8.b)$$

Ενώ οι εκφράσεις των \dot{x}_B, \dot{y}_B δίνονται στην Εξίσωση (A.25).

4.3. Δυναμικές εξισώσεις κίνησης

Η κινητική ενέργεια που μπορεί να δεσμευτεί από τα σώματα γράφεται ως:

$$T = \frac{1}{2} m_V (\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2) + \frac{1}{2} I_V \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2) + \frac{1}{2} I_s (\dot{\theta} - \dot{\varphi})^2 \quad (9)$$

όπου:

m_V είναι η μάζα του σκάφους V, συμπεριλαμβανομένης της προστιθέμενης μάζας του νερού

m_s είναι η μάζα του σώματος S

I_V είναι η ροπή αδράνειας του σκάφους περί το O

I_s είναι η ροπή αδράνειας του σώματος περί το κέντρο μάζας του C.

Η δυναμική ενέργεια μπορεί να γραφεί ως:

$$U = m_s g y_M + \frac{1}{2} K_V \theta^2 + m_V g y_G \quad (10)$$

όπου K_V είναι η υδροστατική στιβαρότητα σε pitch (και/ή roll) για το σκάφος γύρω από το O.

Το σύστημα παρουσιάζει 3 βαθμούς ελευθερίας:

$$r_1 = u \quad (11.a)$$

$$r_2 = \theta \quad (11.b)$$

$$r_3 = \varphi \quad (11.c)$$

Οι δυναμικές εξισώσεις κίνησης του συστήματος μπορούν να παραχθούν με εφαρμογή της ακόλουθης αρχής Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{r}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial r_i} \right) = F_i \quad i = 1,3 \quad (12)$$

$$L = T - U \quad (13)$$

όπου F_i δηλώνει τις εξωτερικές δυνάμεις και τις δυνάμεις απόσβεσης του συστήματος.

Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των παραγώγων του παραρτήματος Α2, οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν ως:

$$\frac{d}{dt}P_u + R_u\dot{u} = F_w \quad (14.a)$$

$$\frac{d}{dt}P_\theta + K_v\theta + T_{v\theta} + T_{g\theta} = 0 \quad (14.b)$$

$$\frac{d}{dt}P_\varphi + T_{g\varphi} = T_p \quad (14.c)$$

Όπου οι όροι ορμής P_u , P_θ , P_φ ορίζονται ως:

$$P_u = M_{uu}\dot{u} + M_{u\theta}\dot{\theta} + M_{u\varphi}\dot{\varphi} \quad (15.a)$$

$$P_\theta = M_{u\theta}\dot{u} + M_{\theta\theta}\dot{\theta} + M_{\theta\varphi}\dot{\varphi} \quad (15.b)$$

$$P_\varphi = M_{u\varphi}\dot{u} + M_{\theta\varphi}\dot{\theta} + M_{\varphi\varphi}\dot{\varphi} \quad (15.c)$$

με:

$$M_{uu} = m_v + m_s \quad (16.a)$$

$$M_{u\theta} = m_v b \cos \theta - m_s l_{xM} \quad (16.b)$$

$$M_{u\varphi} = m_s r_{xM} \quad (16.c)$$

$$M_{\theta\theta} = I_v + I_s + m_v b^2 + m_s (l_{xM}^2 + l_{yM}^2) \quad (16.d)$$

$$M_{\theta\varphi} = -[I_s + m_s (r_{xM} l_{xM} - r_{yM} l_{yM})] \quad (16.e)$$

$$M_{\varphi\varphi} = I_s + m_s (r_{xM}^2 + r_{yM}^2) \quad (16.f)$$

Οι αναπτυσσόμενες ροπές λόγω βαρύτητας είναι:

$$T_{v\theta} = m_v g b \sin \theta \quad (17.a)$$

$$T_{g\theta} = m_s g l_{yM} \quad (17.b)$$

$$T_{g\varphi} = m_s g r_{yM} \quad (17.c)$$

Οι υπόλοιποι όροι είναι:

R_u ένας πρόσθετος συντελεστής απόσβεσης για την κίνηση surge που προκαλείται από τα κύματα.

F_w η δύναμη που οφείλεται στο προσπίπτον και το διαθλώμενο κύμα.

T_p η δύναμη αντίδρασης από το ΡΤΟ.

4.4. Χώρος κατάστασης αναπαράστασης εξισώσεων

Μια συμπαγής αναπαράσταση για το σύστημα των εξισώσεων είναι δυνατή σύμφωνα με την ακόλουθη μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{z}_2 \quad (18.a)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{f}_R \quad (18.b)$$

όπου:

$$\mathbf{z}_1^T = \mathbf{r}^T = [u \quad \theta \quad \varphi] \quad (19.a)$$

$$\mathbf{z}_2^T = [P_u \quad P_\theta \quad P_\varphi] \quad (19.b)$$

$$\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} F_w - R_u \dot{u} \\ -K_{v\theta} - T_{v\theta} - T_{g\theta} \\ -T_{g\varphi} + T_p \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{uu} & M_{u\theta} & M_{u\varphi} \\ M_{u\theta} & M_{\theta\theta} & M_{\theta\varphi} \\ M_{u\varphi} & M_{\theta\varphi} & M_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \quad (21)$$

4.5. Εξίσωση κίνησης του εσωτερικού αδρανειακού αντιδρώντος σώματος

Με την παραδοχή ότι η κίνηση κατά surge και pitch του σκάφους είναι γνωστή στο πεδίο του χρόνου, οι εξισώσεις κίνησης μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω, διατηρώντας μόνο το σύνολο των εξισώσεων που αναφέρονται στο μηχανισμό:

$$\frac{d}{dt}(M_{\varphi\varphi}\dot{\varphi}) = -\frac{d}{dt}(M_{u\varphi}\dot{u} + M_{\theta\varphi}\dot{\theta}) - T_{g\varphi} + T_p \quad (22)$$

Ή σε ισοδύναμη αναπαράσταση στο χώρο κατάστασης:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \varphi \\ P_\varphi \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{P}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_\varphi - M_{u\varphi}\dot{u} - M_{\theta\varphi}\dot{\theta})/M_{\varphi\varphi} \\ -T_{g\varphi} + T_p \end{bmatrix} \quad (24)$$

5. Μέγιστη δυνατότητα μετατροπής ενέργειας

5.1. Γραμμικοποίηση των εξισώσεων κίνησης

Υπό την παραδοχή των μικρών διαταραχών γύρω από το σημείο ηρεμίας του μηχανισμού, οι ακόλουθες κατά προσέγγιση σχέσεις ισχύουν και για τις γωνίες $\alpha \in \{\varphi, \psi, \theta\}$ της διάταξης:

$$\cos a \approx 1 \quad (25.a)$$

$$\sin a \approx a \quad (25.b)$$

Με αποτέλεσμα να μπορούμε να γράψουμε:

$$\cos \gamma = \cos(\gamma_o - \psi) \approx \cos \gamma_o + \psi \sin \gamma_o \quad (26.a)$$

$$\sin \gamma = \sin(\gamma_o - \psi) \approx \sin \gamma_o - \psi \cos \gamma_o \quad (26.b)$$

Οι εξισώσεις κίνησης (A.21a) και (A.21b) του κέντρου μάζας C του ταλαντευόμενου σώματος σε σχέση με το κέντρο R του συστήματος RX_bY_b μπορούν να απλοποιηθούν ως εξής:

$$x_B \approx l_p \varphi \quad (27.a)$$

$$y_B \approx 0 \quad (27.b)$$

$$l_p = (\mu + 1)h \quad (28)$$

$$\mu \approx \mu_0 = \frac{2c}{l\sigma_0} = \frac{c}{l \cos \gamma_0} = \frac{1}{d/c - 1} \quad (29)$$

$$\sigma \approx \sigma_0 = \frac{\sin 2\gamma_0}{\sin \gamma_0} = 2 \cos \gamma_0 \quad (30)$$

Η εξίσωση (27) υποδηλώνει ότι η φυσική κίνηση του κέντρου μάζας του σώματος είναι γραμμική, κατά τον ίδιο τρόπο που γίνεται η ολίσθηση (γραμμική κίνηση) της μάζας των παραδοσιακών WECs, όπως για παράδειγμα στο PS Frog.

Παρόμοια απλοποιημένες σχέσεις ισχύουν και για τους παράγοντες r_x , r_y , l_{xM} , l_{yM} , r_{xM} και r_{yM} :

$$r_x \approx l_p \quad (31.a)$$

$$r_y \approx 0 \quad (31.b)$$

$$l_{xM} \approx a \quad (32.a)$$

$$l_{yM} \approx l_p \varphi \quad (32.b)$$

$$r_{xM} \approx l_p \quad (33.a)$$

$$r_{yM} \approx l_p \theta \quad (33.b)$$

όπως και για τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{M} :

$$M_{uu} \approx m_v \quad (34.a)$$

$$M_{u\theta} \approx m_v b \quad (34.b)$$

$$M_{u\varphi} \approx m_s l_p \quad (34.c)$$

$$M_{\theta\theta} \approx I_v + I_s + m_v b^2 \quad (34.d)$$

$$M_{\theta\varphi} \approx -I_\theta = -[I_s + m_s l_p a] \quad (34.e)$$

$$M_{\varphi\varphi} \approx I_\varphi = I_s + m_s l_p^2 \quad (34.f)$$

και για τις ροπές λόγω αδρανειακών δυνάμεων :

$$T_{v\theta} \approx 0 \quad (35.a)$$

$$T_{g\theta} \approx m_s g l_p \varphi \quad (35.b)$$

$$T_{g\varphi} \approx m_s g l_p \theta \quad (35.c)$$

5.2. Προτεινόμενη μορφή για τη δύναμη του ΡΤΟ και νόμος ανάδρασης

Ενόψει της μη γραμμικής εξίσωσης κίνησης (22), ο μηχανισμός είναι επιρρεπής σε μια ασταθή συμπεριφορά . Για το λόγο αυτό, ένας νόμος ανάδρασης εφαρμόζεται στη δύναμη από το ΡΤΟ, που είναι της ακόλουθης μορφής:

$$T_p = -K_p \varphi - R_p \dot{\varphi} + T_N \quad (36)$$

όπου K_p και R_p είναι σταθερά γραμμικά κέρδη τα οποία πρέπει α επιλεχθούν καταλλήλως, ενώ T_N υποδηλώνει ένα κατάλληλο αντισταθμιστή για τη μη γραμμικότητα του συστήματος.

$$T_N = \frac{d}{dt} (P_\varphi - m_s l_p \dot{u} + I_\theta \dot{\theta} - I_\varphi \dot{\varphi}) + (T_{g\varphi} - m_s g l_p \theta) \quad (37)$$

που έχει σαν αποτέλεσμα την ακόλουθη εξίσωση για την κίνηση του αδρανειακού σώματος:

$$I_\varphi \ddot{\varphi} + R_p \dot{\varphi} + K_p \varphi = -m_s l_p \ddot{u} + I_\theta \ddot{\theta} - m_s g l_p \theta + T_N \quad (38)$$

Προφανώς το T_N είναι ίσο με το μηδέν για το γραμμικοποιημένο σύστημα.

5.3. Ανάλυση της αναμενόμενης δυναμικής συμπεριφοράς

Η εξίσωση (38) υποδηλώνει πως η κίνηση του εσωτερικού σώματος είναι πλήρως ισοδύναμη, από άποψη δυναμικής, με εκείνη ενός φυσικού εκκρεμούς, το οποίο έχει μάζα m_s , ροπή αδράνειας I_s και αναρτάται σε μια απόσταση l_p από το κέντρο μάζας.

Ωστόσο, θα πρέπει εδώ να τονισθεί ιδιαιτέρως εν όψει της εξίσωσης (28), ότι το ισοδύναμο μήκος l_p μπορεί να είναι τάξεις μεγέθους υψηλότερο από αυτό που αναμένεται από οποιοδήποτε άλλο κατακόρυφο εκκρεμές που υλοποιείται με τον παραδοσιακό τρόπο, όπως για παράδειγμα στη μορφή του SEAREV.

Το εκκρεμές αυτό μπορεί να μετατρέψει ταυτόχρονα 3 διαφορετικές μορφές κυματικής ενέργειας:

- Την κινητική ενέργεια που προέρχεται από την κίνηση κατά surge
- Την κινητική ενέργεια που προέρχεται από την περιστροφή κατά pitch
- Τη δυναμική ενέργεια που προέρχεται λόγω περιστροφής κατά pitch

Ενόψει της εξίσωσης (36), η επιλογή των κερδών μπορεί να γίνει κατά τέτοιο τρόπο που να διασφαλίσει τη σταθερότητα του συστήματος, την βέλτιστη ρύθμιση των φυσικών συχνοτήτων του συστήματος στις συχνότητες του διεγέρτη, καθώς και να διασφαλίσει την ικανότητα μέγιστης μετατροπής ισχύος.

5.4. Υπολογισμός της μέγιστης ικανότητας μετατροπής ενέργειας

Η ανάλυση της δυνατότητας μετατροπής της ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα για τις κινήσεις κατά pitch και surge του μετατροπέα κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του εξωτερικού σκάφους και η συζευγμένη μορφή των εξισώσεων (14) επάγουν ότι στην πραγματικότητα υπάρχει μια σημαντική εξάρτηση μεταξύ τους. Μια λεπτομερής ανάλυση μιας τέτοιας εξάρτησης περιγράφεται στο [14]. Ακολουθώντας το συμπέρασμα μιας τέτοιας ανάλυσης, θα πρέπει να θεωρηθεί πως το σκάφος υποβάλλεται σε μια κίνηση κατά pitch εύρους θ_c και φυσικής συχνότητας ω .

$$\theta(t) = \theta_c \cos \omega t \quad (39)$$

ενώ η κίνηση κατά surge συνδέεται με την περιστροφή pitch ως:

$$u(t) = -b\theta(t) = -b\theta_c \cos \omega t \quad (40)$$

Ως αποτέλεσμα, η εξίσωση κίνησης (37) γίνεται τώρα:

$$I_\varphi \ddot{\varphi} + R_p \dot{\varphi} + K_p \varphi = -M_e \theta_c \cos \omega t \quad (41)$$

$$T_p = -K_p \varphi - R_p \dot{\varphi} \quad (42)$$

$$M_e = \omega^2 I_p + m_s g l_p \quad (43)$$

$$I_p = I_s + m_s l_p (a + b) \quad (44)$$

Η απόκριση του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση είναι μια αρμονική συνάρτηση με συχνότητα ίση προς ω και διαφορά φάσης $\pi/2$ με τη δύναμη διέγερσης, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η σύλληψη ισχύος από τη δύναμη διέγερσης:

$$\varphi(t) = -\Phi_s \sin \omega t \quad (45)$$

Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ότι για τη θετική γωνία θ , μια αρνητική γωνία ϕ πρέπει να προκύψει, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του σκάφους.

Η αντικατάσταση της (34.f) και της (43) στην εξίσωση (41) οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$R_p = M_e \theta_c / \omega \Phi_s \quad (46.a)$$

$$K_p = \omega^2 I_\varphi \quad (46.b)$$

Η μέση τιμή της ισχύος που απορροφάται από το ΡΤΟ βρίσκεται ως ακολούθως:

$$P_{out} = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} T_p \varphi \dot{t} \quad (47)$$

$$T_w = 2\pi/\omega \quad (48)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (42), (48) στην (47) καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση:

$$P_{out} = -\frac{1}{2} \omega M_e \theta_c \Phi_s = -P_{in} \quad (49)$$

ή διαφορετικά στην:

$$P_{out} = -\frac{1}{2} \omega \theta_c m_s X_M a_e \quad (50)$$

όπου:

$$X_M = l_p \Phi_s \quad (51.a)$$

$$a_e = g + \omega^2 (a + b + l_l) \quad (51.b)$$

$$l_l = I_s / (m_s l_p) \quad (51.c)$$

και

ω : Φυσική συχνότητα των κυμάτων

θ_c : Εύρος περιστροφής κατά pitch

m_s : Αντιδρώσα μάζα

X_M : Πλάτος της παλινδρομικής κίνησης του κέντρου μάζας του σώματος

Φ_s : Μέγιστη γωνία του μηχανισμού

I_P : Ισοδύναμο μήκος εκκρεμούς

I_S : Αδράνεια του ταλαντευόμενου σώματος ως προς το κέντρο μάζας του

a : Απόσταση του σημείου ανάρτησης από το ύψος της θάλασσας

b : Απόσταση του κέντρου μάζας σκάφους από το ύψος της θάλασσας

6. Ενδεικτικές εφαρμογές

6.1. Ένας αυτόνομος μετατροπέα ενέργειας 2 MW ισχύος

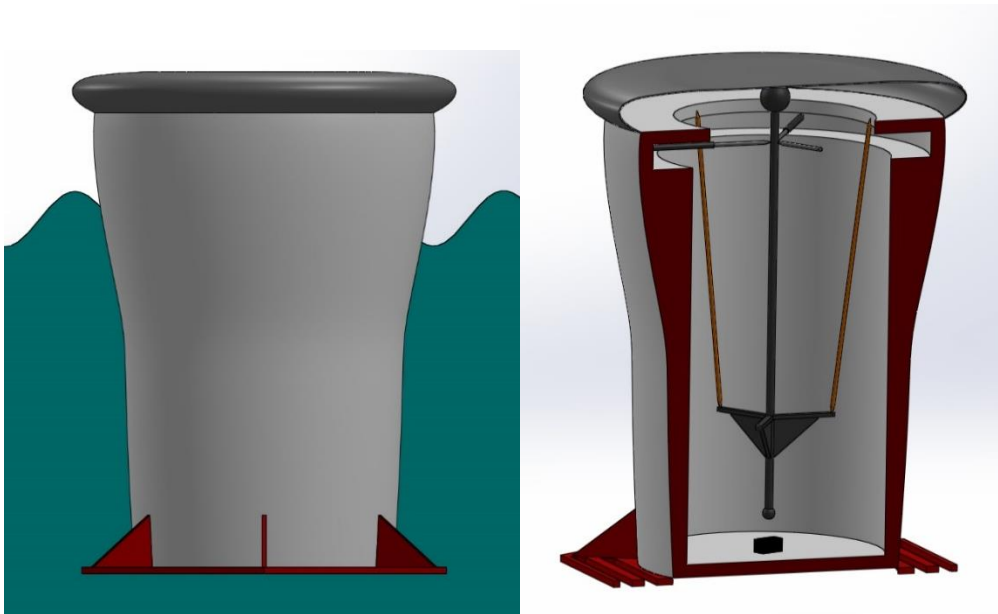
Το επίπεδο της ενέργειας των κυμάτων εκφράζεται ως δύναμη ανά μονάδα μήκους κατά το μήκος της κορυφής των κυμάτων ή κατά το μήκος της διεύθυνσης ακτογραμμής. Τέτοιες τυπικές τιμές για «καλές» υπεράκτιες τοποθεσίες κυμαίνονται μεταξύ των 20 και 70 kW/m ως ετήσιος μέσος όρος και εμφανίζονται κυρίως σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, όπως για παράδειγμα στη Βόρεια Θάλασσα. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση του σχεδιασμού για ένα ενεργειακό επίπεδο της τάξης των 50 kW/m [7] μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια λογική τιμή για το σχεδιασμό ενός κυματικού μετατροπέα.

Η πραγματική ισχύς που μπορεί να απορροφήσει ένας κυματικός μετατροπέας, όταν κινείται κατά surge και pitch, εκφράζεται ως συνάρτηση του «πλάτους δυνατής απορρόφησης» (Capture Width), το οποία είναι ίσο με $L = \lambda/\pi$ για μετατροπείς κατά pitch και surge [7]. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τη διαθέσιμη κυματική ενέργεια ανά μονάδα μήκους, λαμβάνουμε μεγέθη ισχύος περί τα 2-2.5 MW [14]. Αυτό είναι το ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένας αυτόνομος μετατροπέας σε μια τοποθεσία όπως η Βόρεια Θάλασσα.

Επιπλέον, υποθέτοντας πως το σκάφος του μετατροπέα έχει ημισφαιρικό σχήμα, μια εκτίμηση για την βέλτιστη ακτίνα αυτού $R=0.262*(T_w)^2$ μπορεί να πραγματοποιηθεί [7]. Παρόλα ταύτα η σχέση αυτή έχει αποδειχθεί μόνο για κίνηση κατά heave. Λαμβάνοντας υπόψη περιόδους κύματος περί τα 8-10 δευτερόλεπτα, αυτό οδηγεί σε σκάφη με ακτίνα τουλάχιστον 16-20m, τα οποία είναι σε θέση να συλλάβουν τα ποσά ισχύος που αναφέρθηκα προηγουμένως.

Ως εκ τούτου, ένας ενδεικτικός μηχανισμός μιας διάταξης των 2MW παρουσιάζεται στη συνέχεια. Ένα σώμα που αποτελείται από 2 άνισες, αντιδιαμετρικές σφαίρες, συνδεδεμένες μεταξύ τους με ένα σωλήνα, χρησιμοποιείται ως αδρανειακό φορτίο. Το σώμα αυτό είναι αναρτημένο με τρία συρματόσχοινα μέσα σε ένα απολύτως στεγανό σκάφος. Αυτή η βασική μορφή παρουσιάζεται στις εικόνες 29 και 30.

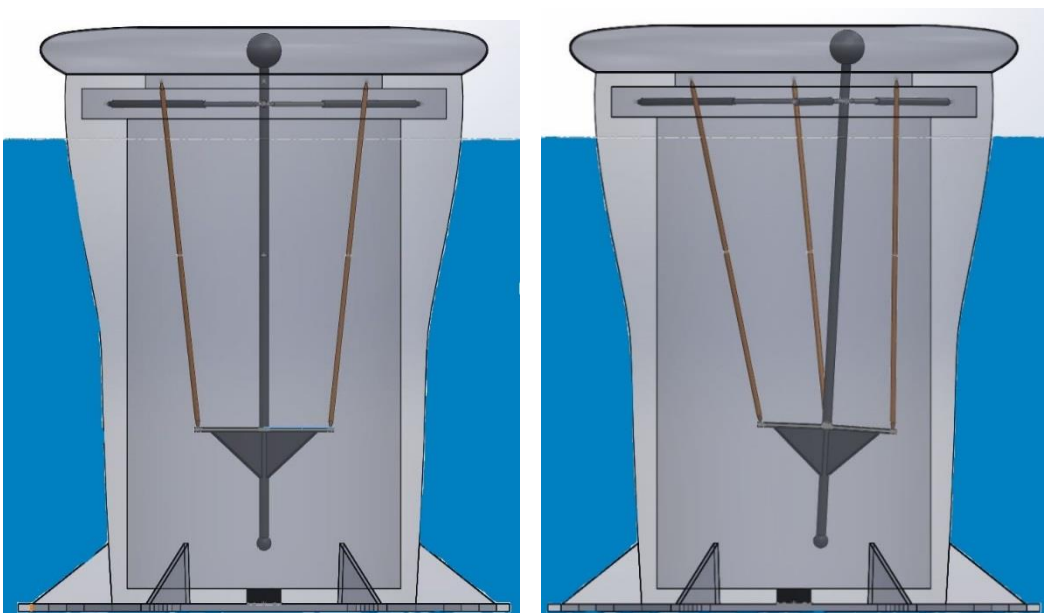
Όπως παρουσιάζουν οι εικόνες 29 και 30, το σκάφος αποτελεί ένα πλήρως σφραγισμένο κύτος με μια πλάκα στο κάτω μέρος του, που χρησιμεύει στη μεγιστοποίηση της αντίδρασης, στην αύξηση της προστιθέμενης μάζας από το νερό, αλλά και στο χαμήλωμα του κέντρου μάζας. Το συγκρότημα υδραυλικής ισχύος του συστήματος μπορεί να τοποθετηθεί στο κάτω μέρος, ενώ τα έμβολα λειτουργούν στο ίδιο επίπεδο με το κέντρο μάζας του ταλαντευόμενου σώματος.



Εικόνα 29

Ο κλειστός μετατροπέας πολλαπλών αξόνων των 2 MW σε συνδυασμό pitch και surge

Η πρώτη σφαίρα, κατασκευασμένη από σίδηρο, έχει ακτίνα $R_1 = 1.14$ m, ενώ η δεύτερη (από το ίδιο υλικό) $R_2 = 0.47$ m. Τα κέντρα των δύο αυτών σφαιρών απέχουν 32.5 m. Ο σωλήνας που τις ενώνει έχει εξωτερική διάμετρο 0.6 m και διατομή ίση προς 0.157 m². Υποθέτοντας πως το βάρος της σωλήνας και των στηριγμάτων είναι κατανομημένο ομοιόμορφα στο μήκος, οι τιμές των $m_1 = 50$ tn, $r_1 = 2.5$ m και $m_2 = 4$ tn, $r_2 = 30$ m επιτυγχάνονται, όπου m_1 και m_2 αναφέρονται στις μάζες των δύο σφαιρών, ενώ τα r_1 , r_2 είναι οι αποστάσεις τους από το κέντρο μάζας. Στον Πίνακα 1, στη συνέχεια, φαίνονται αναλυτικά τα βασικά μεγέθη της διάταξης αυτής.



Εικόνα 30

Κατάσταση ηρεμίας και οριακή κατάσταση του αδρανειακού φορτίου

Total mass (body)	130 tn
M₁ (sphere)	50 tn
M₂ (sphere)	4 tn
r₁ (distance of M₁ from CoM)	2.5 m
r₂ (distance of M₂ from CoM)	30 m
Beam R_{in}	0.2 m
Beam R_{out}	0.3 m
D (Mechanism)	7.8 m
C (Mechanism)	5 m
H (Mechanism)	25 m
a (Vessel)	5 m
b (Vessel)	2.5 m
Vessel outer diameter	33.5 m
T (period of waves)	8 s
Θ (Pitch amplitude)	25 deg
Φ (Internal mass inclination)	5 deg
Translation X_M (concerning CoM)	6.08 m
Rated Power Output	2 MW

Πίνακας 1: Κύριες σχεδιαστικές παράμετροι του αυτόνομου μετατροπέα

Θα πρέπει να διευκρινιστεί, ότι οι παραπάνω τιμές αναφέρονται σε μια ενδεικτική υλοποίηση ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας, ο οποίος δεν είναι βελτιστοποιημένος. Μια τέτοια προσέγγιση είναι προφανώς απαραίτητη για την προκαταρκτική σχεδίαση ενός σκάφους, το οποίο στη συνέχεια θα βελτιστοποιηθεί.

Οι τιμές της ισχύος καθώς και της αναρτώμενης μάζας του πίνακα 1 αποτελούν μια πολύ ευνοϊκή σύγκριση του προαναφερθέντα μηχανισμού σε σχέση με τους ανταγωνιστές του, όπως το PS Frog [14] ή το SEAREV [13]. Εκπληκτικής σημασίας είναι και το γεγονός ότι η γεωμετρία της ανάρτησης και η απλότητα του PTO καθιστούν αυτό το σχεδιασμό πολύ πιο αξιόπιστο και ευκολότερα εφαρμόσιμο από όλους τους άλλους τύπους των είδη γνωστών αδρανειακών εσωτερικών μηχανισμών.

6.2. Ιδέες συνέργειας με πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Ανάμεσα στις ποικίλες ενδιαφέρουσες διαμορφώσεις που μπορούν να προκύψουν, είναι και η ιδέα της πλωτής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, η οποία χρησιμοποιείται ως το αδρανειακό φορτίο του εσωτερικού μηχανισμού, ο οποίος μπορεί να αναρτηθεί καταλλήλως από μια πλωτή εξέδρα ανοικτής θάλασσας. Μια τέτοια διάταξη πέραν της σταθεροποίησης της ανεμογεννήτριας, μπορεί επίσης και να απορροφήσει τεράστια ποσά κυματικής ενέργειας. Προκειμένου να μη διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία του δρομέα της ανεμογεννήτριας, το πλάτος της γωνίας ϕ του μηχανισμού διατηρείται αρκετά χαμηλά. Μια τέτοια διάταξη απεικονίζεται στη συνέχεια, με τις αντίστοιχες παραμέτρους σχεδιασμού να φαίνονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 31

Η πλωτή ανεμογεννήτρια των 2 MW αναρτημένη ως αδρανειακό φορτίο του μετατροπέα των 2 MW

Παρά το γεγονός ότι ένα τέτοιο σχέδιο παρουσιάζει ορισμένες αμφιλεγόμενες πτυχές, δείχνει σαφώς ότι η κατεύθυνση για την αποτελεσματική εφαρμογή των πλωτών υπεράκτιων ανεμογεννητριών βρίσκεται εμφανώς σε αυτές τις έννοιες σχεδιασμού, παρά στο σχεδιασμό πτερυγίων δρομέα από σύνθετα υλικά με τεράστιες διαστάσεις, όσον αφορά το μήκος τους.

Tower length	140 m
WT height	82 m (above sea level)
Additional mass (at r=68 m from CM)	100 tn (at the bottom of the WT)
Total mass	546 tn
D mechanism	7.5 m
C mechanism	3 m
H mechanism	52 m
a vessel	10 m
b vessel	2.5 m
Vessel outer diameter	33.5 m
T	8 s
Θ	5 deg
Φ	2 deg
Translation Xb (concerning CoM)	3 m
Power Output for WT	2 MW
Power Output for WEC	2 MW
Total Power Output	4 MW

Table 2: Σχεδιαστικές παράμετροι ενός μετατροπέα 2 MW που στηρίζει μια ανεμογεννήτρια Vestas V90 των 2MW

Σε κάθε περίπτωση η ευελιξία που προσφέρει ο εν λόγω μηχανισμός, επιτρέπει πολλές άλλες εναλλακτικές υλοποιήσεις, όπως για παράδειγμα την εφαρμογή στις ήδη υπάρχουσες πλωτές πλατφόρμες ή στη μορφή του ημιβυθισμένου, τορροειδούς πλωτήρα. Τέτοιες εκδοχές απεικονίζονται στη συνέχεια.



Εικόνα 32

Εφαρμογή ανεξάρτητων μετατροπέων μέσα στα «πόδια» μια πλωτής πλατφόρμας ανοικτής θάλασσας



Εικόνα 33

Εφαρμογή μέσα σε τορροειδή δακτύλιο γύρω από μια πλωτή ανεμογεννήτρια.

7 Συμπεράσματα

Η νέα τάξη των κυματικών μετατροπέων, οι οποίοι αποτελούνται από πλήρως εσώκλειστα αντιδρώντα σώματα, τα οποία αναρτώνται με την κατάλληλη γεωμετρία από το εξωτερικό σκάφος, μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη σχεδιαστική λύση, ικανή να ανταπεξέλθει στις αντίξοες και ακραίες καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην ανοιχτή θάλασσα.

Όπως προκύπτει, η γραμμική κίνηση του κέντρου μάζας του σώματος, επιτρέπει την εισαγωγή ενός απλοποιημένου συστήματος (Power Take Off system) που θα υλοποιεί την απορρόφηση της δεσμευμένης από το εσωτερικό σώμα ενέργειας. Επιπλέον η απλότητα και η συμμετρία της γεωμετρίας της ανάρτησης και του ΡΤΟ, εξασφαλίζουν μια αρκετά απλή και στιβαρή τεχνολογική υλοποίηση.

Επιπλέον, η βέλτιστη δυναμική σχεδίαση της γεωμετρίας και η κατανομή της μάζας και της αδράνειας του εσωτερικού σώματος, εξασφαλίζουν τη μέγιστη μετατροπή και αποθήκευση της ενέργειας των κυμάτων. Με αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε σε σημαντική μείωση της αναρτώμενης μάζας, συγκριτικά με τα υπόλοιπα αδρανειακά συστήματα που το ανταγωνίζονται.

Η ιδέα αυτή είναι ευέλικτη και παραμετρικά σχεδιασμένη, ώστε να διευκολύνεται η εφαρμογή της σε οποιασδήποτε μορφής πλωτό σκάφος. Ως πρώτη επιλογή αναφέρεται ο αυτόνομος μετατροπέας που τοποθετείται σε πλήρως στεγανά κύτη. Τέλος, μια εναλλακτική κατεύθυνση για την υλοποίησή του αποτελεί η κατάλληλη ενσωμάτωση του σε πλωτές υπεράκτιες πλατφόρμες, στηρίζοντας ανεμογεννήτριες. Μια τέτοια σχεδιαστική επιλογή μπορεί να βελτιώσει δραστικά την απόδοση, την αποτελεσματικότητα και τη δυναμική των υπεράκτιων πλωτών ενεργειακών εφαρμογών.

References

- [1] K. Gunn, C. Stock-Williams, 2012, "Quantifying the Global Wave Power Resource," *Renewable Energy*, N 44, pp. 296-304, 2012.
- [2] D.S.Richardson, G.A.Aggidis, 2013, "The economics of multi-axis point absorber wave energy converters", OMAE2013, paper 11379
- [3] R. Bedard et al., 2005, "Final Summary Report, Project Definition Study, Offshore Wave Power Feasibility Demonstration Project," Electric Power Research Institute, [E21 EPRI Global WP 009 - US Rev 2](#), 22 Sep 05.
- [4] http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf
- [5] <http://www.orecca.eu/project>
- [6] B Drew, A R Plummer, and Sahinkaya, 2009, "A review of wave energy converter technology". Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy, 2009, 887-902.
- [7] Antonio F. de O. Falcao, 2010, "Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", 14, 2010, 899-918.
- [8] [http://www.marina-platform.info/\(deliverable D3.6\)](http://www.marina-platform.info/(deliverable D3.6))
- [9] R H Bracewell, 1990, "Frog and PS Frog: a study of two reactionless ocean wave energy converters", PhD Thesis, Lancaster University, UK, 1990.
- [10] McCabe AP, Bradshaw A, Meadowcroft JAC, Aggidis G. 2006, Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter. *Renewable Energy* 2006;31:141–51.
- [11] Korde UA., 1999, "On providing a reaction for efficient wave energy absorption by floating devices", *Appl Ocean Res* 1999, 21:235–48
- [12] Korde UA. 2001, "Phase control of floating bodies from an on-board reference", *Appl Ocean Res* 2001, 23:251–62.
- [13] Babarit A, Clement AH, Gilloteaux JC. , 2005, "Optimization and time-domain simulation of the SEAREV wave energy converter". In: Proceedings of 24th International Conference Offshore Mechanics Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, 2005, vol. 2, p. 703–12.
- [14] M B Widden, M J French and G A Aggidis, 2008, "Analysis of a pitching-and-surgling wave-energy converter that reacts against an internal mass, when operating in regular sinusoidal waves". Proc. IMechE Vol. 222 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment, 2008, 153-161.
- [15] <http://www.wello.eu/penguin.php>
- [16] <http://neptunewavepower.com>

- [17] D.Zhang, G. Aggidis, Y. Wang, A. McCabe, W. Li, 2013, Experimental results from wave tank trials of a multi-axis wave energy converter, APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 103901 (2013)
- [18] Salcedo F, Ruiz-Minguela P, Rodriguez R, Ricci P, Santos M., 2009, Oceantec: sea trials of a quarter scale prototype. In: Proceedings of 8th European Wave Tidal Energy Conference; 2009. p. 460–5.
- [19] Perez T, Santos-Mujica M, Ruiz-Minguela JP., 2009, Performance analysis and control design of a gyro-based wave energy converter. In: Proceedings of European Control Conference 2009; 2009. p. 3743–8.
- [20] H. Kanki, S. Arii, T. Furusawa and T. Otoyoy, 2009, Development of advanced wave power generation system by applying gyroscopic moment. In Proceeding of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009.
- [21] G Waizmann, 2011, “*The Wave Gyro*” Master Thesis, University of Southampton, UK.
- [22] G.Bracco, E.Giorcelli, G. Mattiazzo, 2011, ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation, Mechanism and Machine Theory 46 (2011) 1411–1424.
- [23] Pontes, M.T. et. Al. , “*The European Wave Energy Resource*”, 3rd EWEC, Patras, Greece, September 1998.
- [24] <http://www.waveplam.eu/files/downloads/Peloponnese-prefeasibility-final.pdf>

Παράρτημα Α1

Κινηματική ανάλυση του μηχανισμού τεσσάρων ράβδων

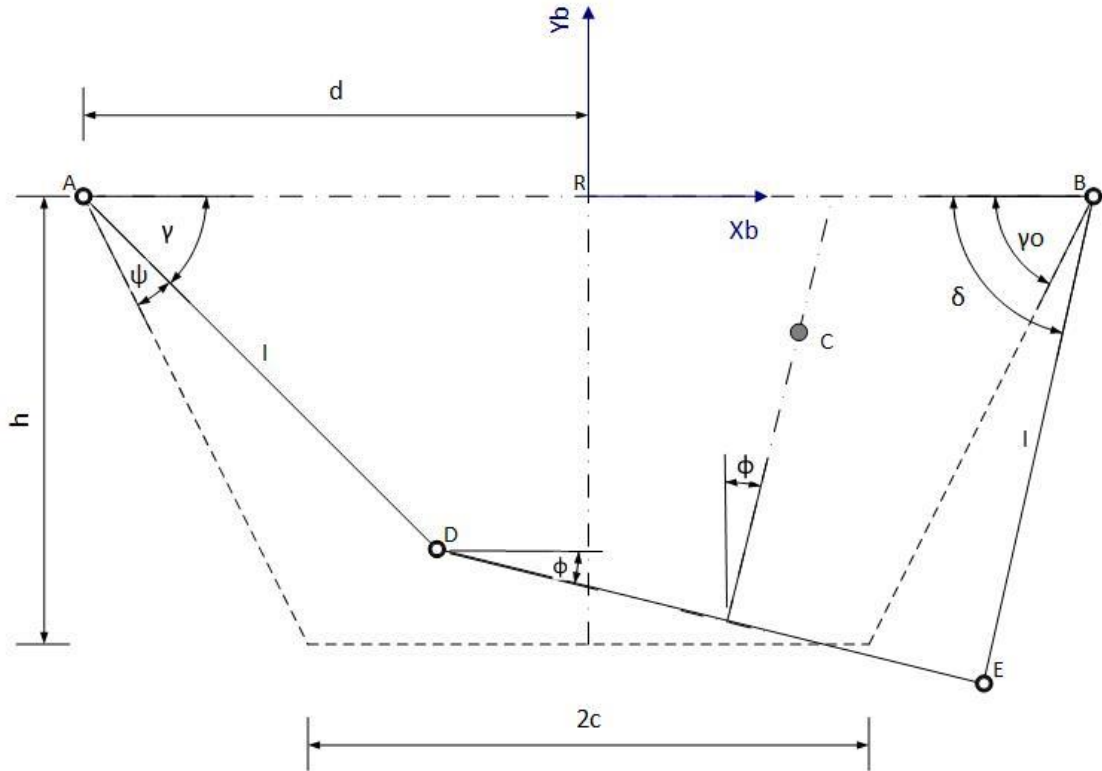


Figure A1. Γεωμετρικές παράμετροι και κινηματικές μεταβλητές του μηχανισμού

Γεωμετρικές παράμετροι

Η βασική γεωμετρική διαμόρφωση του μηχανισμού ορίζεται από την επιλογή των τριών ανεξάρτητων μηκών d , c , h .

Οι υπόλοιπες γεωμετρικές παράμετροι μπορούν να ανακτηθούν ως εξής:

$$l = \sqrt{(d - c)^2 + h^2} \quad (\text{A.1})$$

$$\tan(\gamma_0) = \frac{h}{(d - c)} \quad (\text{A.2})$$

Θέση αναφοράς του μηχανισμού

Η θέση αναφοράς (ισορροπίας) του μηχανισμού, σημαδεμένη με διακεκομμένη γραμμή, ορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\phi = 0 \quad (\text{A.3a})$$

$$\psi = 0 \quad (\text{A.3b})$$

$$\gamma = \gamma_0 \quad (\text{A.3c})$$

$$\delta = \gamma_0 \quad (A.3d)$$

Το κέντρο R του συστήματος συντεταγμένων $RX_b Y_b$ έχει επιλεγεί στη θέση του σταθερού συνδέσμου (έδαφος) AB του μηχανισμού, με τη θέση των αξόνων να αναφέρονται όπως στο σχήμα.

Σχέσεις μεταξύ των γωνιών του μηχανισμού

Η κινηματική του μηχανισμού μπορεί να περιγραφεί πλήρως ως συνάρτηση ενός ενιαίου βαθμού ελευθερίας, της γωνίας φ . Οι υπόλοιπες γωνίες μπορούν να περιγραφούν από τις ακόλουθες σχέσεις συμβατότητας της κλειστής κινηματικής αλυσίδας:

$$l \cos \gamma + 2c \cos \varphi + l \cos \delta = 2d \quad (A.4a)$$

$$l \sin \gamma + 2c \sin \varphi - l \sin \delta = 0 \quad (A.4b)$$

Αναδιατάσσοντας τις προηγούμενες εξισώσεις, προκύπτει το σύστημα:

$$l \cos \delta = 2d - 2c \cos \varphi - l \cos \gamma \quad (A.5a)$$

$$l \sin \delta = 2c \sin \varphi + l \sin \gamma \quad (A.5b)$$

με τις ακόλουθες συντομογραφίες,

$$x_\varphi = d - c \cos \varphi \quad (A.6a)$$

$$y_\varphi = c \sin \varphi \quad (A.6b)$$

$$r_\varphi = x_\varphi^2 + y_\varphi^2 \quad (A.6c)$$

Μετά τον τετραγωνισμό κάθε μιας από τις εξισώσεις (A.5a) και (A.5b) και την πρόσθεσή τους, προκύπτει:

$$l^2 = (2x_\varphi - l \cos \gamma)^2 + (2y_\varphi + l \sin \gamma)^2 \quad (A.7)$$

το οποίο καταλήγει στο,

$$-x_\varphi l \cos \gamma + y_\varphi l \sin \gamma + r_\varphi = 0 \quad (A.8)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να αναδιατυπωθεί περαιτέρω σε πολυωνυμική εξίσωση δεύτερης τάξης :

$$a_{2\varphi} z_\gamma^2 + 2a_{1\varphi} z_\gamma + a_{0\varphi} = 0 \quad (A.9)$$

$$z_\gamma = \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (A.10a)$$

$$a_{2\varphi} = r_\varphi + x_\varphi l \quad (\text{A.10b})$$

$$a_{1\varphi} = y_\varphi l \quad (\text{A.10c})$$

$$a_{0\varphi} = r_\varphi - x_\varphi l \quad (\text{A.10d})$$

που μπορεί να οδηγήσει στον ορισμό της γωνίας γ ως συνάρτηση της γωνίας φ .

$$\gamma = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-a_{1\varphi} + \Delta}{a_{2\varphi}} \right) \quad (\text{A.11a})$$

$$\Delta = \sqrt{a_{1\varphi}^2 - a_{2\varphi} a_{0\varphi}} \quad (\text{A.11d})$$

Οι υπόλοιπες γωνίες επομένως μπορούν να ορισθούν ως ακολούθως:

$$\psi = \gamma_0 - \gamma \quad (\text{A.12})$$

$$\delta = \sin^{-1} \left(\sin \gamma + \frac{2c}{l} \sin \varphi \right) \quad (\text{A.13})$$

Γωνιακές ταχύτητες

Οι χρονικές παράγωγοι των σχέσεων συμβατότητας της κλειστής κινηματικής αλυσίδας (A.4a) και (A.4b), οδηγούν στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$-l\dot{\gamma} \sin \gamma - 2c\dot{\varphi} \sin \varphi - l\dot{\delta} \sin \delta = 0 \quad (\text{A.14a})$$

$$l\dot{\gamma} \cos \gamma + 2c\dot{\varphi} \cos \varphi - l\dot{\delta} \cos \delta = 0 \quad (\text{A.14b})$$

Αυτές μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω ως:

$$l\dot{\delta} \sin \delta = -l\dot{\gamma} \sin \gamma - 2c\dot{\varphi} \sin \varphi$$

$$l\dot{\delta} \cos \delta = l\dot{\gamma} \cos \gamma + 2c\dot{\varphi} \cos \varphi$$

ή

$$l\dot{\delta} \cos \delta \tan \delta = -l\dot{\gamma} \sin \gamma - 2c\dot{\varphi} \sin \varphi \quad (\text{A.15a})$$

$$l\dot{\delta} \cos \delta \tan \delta = (l\dot{\gamma} \cos \gamma + 2c\dot{\varphi} \cos \varphi) \tan \delta \quad (\text{A.15b})$$

Συνδυάζοντας τις (A.15a) και (A.15.b) μαζί, παράγονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$(l\dot{\gamma} \cos \gamma + 2c\dot{\varphi} \cos \varphi) \tan \delta = -l\dot{\gamma} \sin \gamma - 2c\dot{\varphi} \sin \varphi \Leftrightarrow$$

$$\sin \delta (l\dot{\gamma} \cos \gamma + 2c\dot{\phi} \cos \varphi) = \cos \delta (-l\dot{\gamma} \sin \gamma - 2c\dot{\phi} \sin \varphi) \Leftrightarrow$$

$$\dot{\gamma} l \sin(\gamma + \delta) = -\dot{\phi} 2c \sin(\varphi + \delta) \quad (\text{A.16})$$

Που μπορούν τελικά να εκφραστούν στην ακόλουθη συμπαγή μορφή:

$$\dot{\gamma} = -\frac{2c}{l\sigma} \dot{\phi} = -\mu \dot{\phi} \quad (\text{A.17})$$

$$\dot{\psi} = -\dot{\gamma} = \mu \dot{\phi} \quad (\text{A.18})$$

$$\mu = \frac{2c}{l\sigma} \quad (\text{A.19})$$

$$\sigma = \frac{\sin(\gamma + \delta)}{\sin(\varphi + \delta)} \quad (\text{A.20})$$

Κίνηση του κέντρου μάζας

Η αρχική θέση του κέντρου μάζας C ενός σώματος που προσδένεται στο μηχανισμό υποτίθεται ότι συμπίπτει με το κέντρο R του συστήματος συντεταγμένων $RX_b Y_b$ στη θέση ηρεμίας του μηχανισμού. Έτσι, οι συντεταγμένες x_b, y_b που αναφέρονται σε αυτό το σύστημα σε μία αυθαίρετη θέση, μπορούν να περιγραφούν ως:

$$x_B = -d + l \cos \gamma + c \cos \varphi + h \sin \varphi \quad (\text{A.21a})$$

$$y_B = l \sin \gamma + c \sin \varphi - h \cos \varphi \quad (\text{A.21b})$$

$$h = l \sin \gamma_0 \quad (\text{A.22})$$

Είναι εύκολο να δει κανείς ότι το y_B ισούται με μηδέν όταν $l=d=2c$, καθώς αποτελεί την ειδική περίπτωση του Roberts Linkage. Επομένως, το C κινείται σε ευθεία τροχιά πάνω στο τμήμα AB.

Η ταχύτητα του C μπορεί να βρεθεί ως:

$$\dot{x}_B = -l\dot{\gamma} \sin \gamma - \dot{\phi} c \sin \varphi + \dot{\phi} h \cos \varphi \quad (\text{A.23a})$$

$$\dot{y}_B = l\dot{\gamma} \cos \gamma + c\dot{\phi} \cos \varphi + h\dot{\phi} \sin \varphi \quad (\text{A.23b})$$

ή, σύμφωνα με την (A.17)

$$\dot{x}_B = (l\mu \sin \gamma - c \sin \varphi + h \cos \varphi) \dot{\phi} \quad (\text{A.24a})$$

$$\dot{y}_B = (-l\mu \cos \gamma - c \sin \varphi + h \sin \varphi) \dot{\phi} \quad (\text{A.24b})$$

και τελικά σε συμπυγμένη μορφή:

$$\dot{x}_B = r_x \dot{\varphi} \quad (\text{A.25a})$$

$$\dot{y}_B = r_y \dot{\varphi} \quad (\text{A.25b})$$

όπου:

$$r_x = l\mu \sin \gamma - c \sin \varphi + h \cos \varphi \quad (\text{A.26a})$$

$$r_y = -l\mu \cos \gamma + c \cos \varphi + h \sin \varphi \quad (\text{A.26b})$$

Παράρτημα Α2

Παράγωγοι της συνάρτησης Lagrange

Η συνάρτηση του Lagrange για το σύστημα ορίζεται ως:

$$L = T - U \quad (\text{A.27})$$

Όπου οι εκφράσεις για την κινητική ενέργεια T και τη δυναμική ενέργεια U ορίζονται στις εξισώσεις (9) και (10).

Το σύστημα έχει τους ακόλουθους τρεις βαθμούς ελευθερίας:

$$\mathbf{r} = [u \ \theta \ \varphi]^T \quad (\text{A.28a})$$

$$\dot{\mathbf{r}} = [\dot{u} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi}]^T \quad (\text{A.28b})$$

Οι παράγωγοι της συνάρτησης του Lagrange για το κομμάτι της κινητικής ενέργειας είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{u}} &= \frac{\partial T}{\partial \dot{u}} = m_V \dot{x}_G \frac{\partial \dot{x}_G}{\partial \dot{u}} + m_S \dot{x}_M \frac{\partial \dot{x}_M}{\partial \dot{u}} = m_V \dot{x}_G + m_S \dot{x}_M = \\ &= (m_V + m_S) \dot{u} + (m_V b \cos \theta - m_S l_{xM}) \dot{\theta} + m_S r_{xM} \dot{\varphi} \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = I_V \dot{\theta} + I_S (\dot{\theta} - \dot{\varphi}) + m_V \dot{x}_G \\ &\quad + m_V \dot{y}_G \frac{\partial \dot{y}_G}{\partial \dot{\theta}} + m_S \dot{x}_M \frac{\partial \dot{x}_M}{\partial \dot{\theta}} + m_S \dot{y}_M \frac{\partial \dot{y}_M}{\partial \dot{\theta}} = \\ &= I_V \dot{\theta} + I_S (\dot{\theta} - \dot{\varphi}) + \\ &\quad + m_V (\dot{u} + b \dot{\theta} \cos \theta) b \cos \theta + m_V b \dot{\theta} \sin \theta b \sin \theta + \\ &\quad + m_S [\dot{u} - l_{xM} \dot{\theta} + r_{xM} \dot{\varphi}] (-l_{xM}) \\ &\quad + m_S [l_{yM} \dot{\theta} + r_{yM} \dot{\varphi}] l_{yM} = \\ &= [m_V b \cos \theta - m_S l_{xM}] \dot{u} + \\ &\quad + [I_V + I_S + m_V b^2 + m_S (l_{xM}^2 + l_{yM}^2)] \dot{\theta} \\ &\quad - [I_S + m_S (r_{xM} l_{xM} - r_{yM} l_{yM})] \dot{\varphi} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} &= \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = I_S (\dot{\theta} - \dot{\varphi}) + m_S \dot{x}_M \frac{\partial \dot{x}_M}{\partial \dot{\varphi}} + m_S \dot{y}_M \frac{\partial \dot{y}_M}{\partial \dot{\varphi}} = \\ &= m_S [\dot{u} - l_{xM} \dot{\theta} + r_{xM} \dot{\varphi}] r_{xM} + \\ &\quad + m_S [l_{yM} \dot{\theta} + r_{yM} \dot{\varphi}] r_{yM} + I_S (\dot{\theta} - \dot{\varphi}) \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

$$+[I_s + m_s(r_{xM}^2 + r_{yM}^2)] \dot{\phi}$$

Οι παράγωγοι της συνάρτησης του Lagrange για το κομμάτι της δυναμικής ενέργειας είναι:

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial U}{\partial u} = 0 \quad (\text{A.32a})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{\partial U}{\partial \theta} = K_V \theta + m_V g b \sin \theta + m_s g l_{yM} \quad (\text{A.32b})$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{\partial U}{\partial \varphi} = m_s g r_{yM} \quad (\text{A.32c})$$

Οι εκφράσεις των l_{xM} , l_{yM} , r_{xM} , r_{yM} ορίζονται στις εξισώσεις (7.a), (7.b), (8.a), (8.b).