



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Τίτλος: Προσδιορισμός της βέλτιστης διάταξης συστάδας συσκευών
ανάκτησης της κυματικής ενέργειας για την μεγιστοποίηση της
ενεργειακής τους απόδοσης**

**Title: Defining the Optimal Configuration for Wave Energy Recovery
Devices for Maximizing Energy Performance**

**Διπλωματική Εργασία
Ανδρούτσος Ανδρέας**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Κονισπολιάτης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ο καθορισμός της βέλτιστης διαμόρφωσης για έναν αριθμό συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Η κυματική ενέργεια έχει αναδειχθεί ως μια πολύ υποσχόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες μετατροπής κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, ο καθορισμός της βέλτιστης διαμόρφωσης αυτών των συσκευών παραμένει μια πρόκληση λόγω της πολύπλοκης φύσης των κυμάτων του ωκεανού και των διαφορετικών χαρακτηριστικών των διαφορετικών συσκευών. Αυτή η διατριβή θα χρησιμοποιήσει αφ' ενός μια συστηματική προσέγγιση για την ανάλυση και αξιολόγηση των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας και αφ' ετέρου θα αναπτύξει ένα πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσής τους.

Η κυματική ενέργεια είναι ένας τρομερός αλλά απρόβλεπτος πόρος, που απαιτεί καινοτόμες λύσεις μηχανικής για αποτελεσματική χρήση. Η μελέτη αυτή εστιάζεται στη διαμόρφωση τοποθέτησης σημειακών απορροφητών ενέργειας (Point absorbers), οι οποίες είναι γνωστές για την προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικές συνθήκες κυμάτων. Ο στόχος είναι να εντοπιστεί η αποτελεσματικότερη διάταξη αυτών των συσκευών για εξαγωγή της μέγιστης ενέργειας από ένα περιβάλλον μεταβλητής συχνότητας κυμάτων.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη ανάλυση. Αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο για να περιγράψει τη συμπεριφορά των σημειακών απορροφητών κάτω από ποικίλες συχνότητες και διαμορφώσεις κυμάτων. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της απόδοσης δέσμησης ενέργειας διαφορετικών διαμορφώσεων τοποθέτησης.

Τα ευρήματα αυτής της έρευνας φωτίζουν τη διαφοροποιημένη δυναμική των διαμορφώσεων τοποθέτησης σημειακών απορροφητών σε περιβάλλοντα μεταβλητής συχνότητας κυμάτων. Παρατηρήθηκε ότι μια ίση απόσταση από απορροφητές τεσσάρων σημείων που σχηματίζουν μια ευθεία διάταξη επέδειξε αξιοσημείωτη προσαρμοστικότητα και σταθερά υψηλή δέσμηση ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων κυμάτων. Αυτή η διαμόρφωση ξεπέρασε τις άλλες γεωμετρίες, συμπεριλαμβανομένων των τετράγωνων και ρομβοειδών διατάξεων, κάτω από διάφορες συνθήκες κυμάτων.

Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία των κατάλληλων διαμορφώσεων τοποθέτησης για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής και απορρόφησης κυματικής ενέργειας. Η ισαπέχουσα ευθεία διαμόρφωση απέδειξε την ευρωστία της, βελτιστοποιώντας σταθερά τη δέσμηση ενέργειας, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στις συχνότητες των κυμάτων. Αυτή η εικόνα έχει βαθιές συνέπειες για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστοιχιών ενέργειας κυμάτων.

Συμπερασματικά, η μελέτη προσδιορίζει τη διαμόρφωση ισαπέχουσας ευθείας τοποθέτησης ως την πιο αποτελεσματική διάταξη των τεσσάρων σημειακών απορροφητών ενέργειας (Point absorbers) σε συνθήκες μεταβλητής συχνότητας κύματος. Αυτή η διαμόρφωση προσφέρει προσαρμοστικότητα, σταθερότητα και σταθερές δυνατότητες υψηλής απόδοσης, καθιστώντας την ιδανική επιλογή για έργα συλλογής κυματικής ενέργειας σε θαλάσσια περιβάλλοντα σαν αυτά που ερευνήθηκαν.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας συνεισφέρουν στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας, παρέχοντας πολύτιμη καθοδήγηση για τη βέλτιστη τοποθέτηση των σημειακών απορροφητών για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Αυτή η γνώση είναι κρίσιμη για τους προγραμματιστές και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής που επιδιώκουν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες της κυματικής ενέργειας ως βιώσιμης και καθαρής πηγής ενέργειας.

Abstract

The objective of this thesis is to investigate and determine the optimal configuration for a number of wave energy Converters to maximize their energy efficiency. Wave energy has emerged as a promising renewable energy source and various wave energy conversion technologies have been developed. However, determining the optimal configuration of these devices remains a challenge due to the complex nature of ocean waves and the different characteristics of different devices. This thesis will use a systematic approach to analyse and evaluate the key parameters affecting the energy performance of wave energy recovery devices and develop a framework for optimizing their configuration.

Wave energy is a formidable but unpredictable resource, requiring innovative engineering solutions for efficient use. This study focuses on the positioning configuration of point energy absorbers (point absorbers), which are known for their adaptability to different wave conditions. The goal is to identify the most effective configuration of these devices to extract maximum energy from a variable wave frequency environment.

To achieve this objective, a comprehensive analysis was carried out. A mathematical model was developed to describe the behaviour of point absorbers under varying frequencies and wave configurations. The model incorporated fluid dynamics, structural mechanics and wave frequency data analysis. Numerical simulations were then performed to evaluate the energy capture performance of different mounting configurations.

The findings of this research shed light on the varying dynamics of point absorber placement configurations in variable wave frequency environments. It was observed that an equal spacing of four-point absorbers forming a straight array demonstrated remarkable adaptability and consistently high energy capture over a wide range of wave frequencies. This configuration outperformed other geometries, including square and rhomboidal arrays, under various wave conditions.

These results highlight the importance of appropriate placement configurations to maximize wave energy generation and absorption. The isoplanar straight configuration demonstrated its robustness by consistently optimizing energy capture regardless of variations in wave frequencies. This insight has profound implications for the design and development of wave energy arrays.

In conclusion, the study identifies the equidistant straight mounting configuration as the most efficient arrangement of the four-point absorbers under variable wave frequency conditions. This configuration offers adaptability, stability and consistent high-performance capabilities, making it an ideal choice for wave energy harvesting projects in marine environments such as those investigated.

The results of this research hold substantial promise for the wave energy industry, providing valuable guidance for optimal placement of point source absorbers to maximize energy production. This knowledge is critical for developers and policy makers seeking to fully realize the potential of wave energy as a sustainable and clean energy source.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ

1	Εισαγωγή	6
1.1	Ιστορική Αναδρομή	6
1.2	Ενεργειακοί Πόροι.....	11
	Ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι.....	11
	Μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι	12
1.3	Διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων	14
1.4	Θετικά και αρνητικά της χρήσης των ΑΠΕ.	15
2	Συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας.....	17
2.1	Τεχνολογίες Σ.Α.Κ.Ε και επιλογή συσκευής	17
2.2	Κυματική Ενέργεια	23
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας	28
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο	32
3.1	Διατύπωση υδροδυναμικού προβλήματος (περίθλαση – ακτινοβολία)	33
3.2	Αλληλεπίδραση κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς.....	35
3.3	Προσδιορισμός των συντελεστών περίθλασης $S^{ης}$ τάξης	40
4	Μεθοδολογία	42
4.1	Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης. Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας.....	42
4.2	Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς.....	44
5	Διατάξεις που ερευνήθηκαν	47
6	Κώδικες Υπολογισμού	49
6.1	Περιγραφή των παραμέτρων του αρχείου δεδομένων	50
6.2	Περιγραφή Κώδικα στην Python για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων	51
7	Αποτελέσματα και αναγνώριση βέλτιστης διάταξης	52
7.1	Συντελεστής Απόσβεσης	52
7.2	Απορροφούμενη κυματική ισχύς σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς.....	53
7.3	Απορροφούμενη κυματική ισχύς για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε διάταξης.....	54
7.4	Μέση ετήσια απόδοση κάθε κυματικής συσκευής στις τρεις διατάξεις που εξετάστηκαν	55
8	Συμπεράσματα και προτάσεις	64
	Βιβλιογραφία	66
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	68

Εικόνα 1 The International Renewable Energy Agency: Electricity Generation Trends.....	9
Εικόνα 2 Εγκατεστημένη παγκόσμια δυναμικότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά τεχνολογία.....	9
Εικόνα 3 Χρόνια ορυκτών καυσίμων που έχουν απομείνει [5]	13
Εικόνα 4 Το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια [6]	13
Εικόνα 5 Οι κατηγορίες των διαφόρων τεχνολογιών ανάκτησης κυματικής ενέργειας (14)	18
Εικόνα 6 Αρχή λειτουργίας σημειακών απορροφητήρων [12]	19
Εικόνα 7 Σημειακός απορροφητήρας με υδραυλικό μηχανισμό απόληψης ενέργειας [13]	20
Εικόνα 8 Σημειακός απορροφητήρας με γραμμικό ηλεκτρικό κινητήρα απόληψης ενέργειας [14]	20
Εικόνα 9 Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [14]	21
Εικόνα 10 Υπό κλίμακα διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies [33]	21
Εικόνα 11 Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων. WaveBob [20], [16]	22
Εικόνα 12 Δίκτυο πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών [26]	25
Εικόνα 13 Ετήσιο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό (30)	26
Εικόνα 14 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στη Μεσόγειο [28].....	27
Εικόνα 15 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό ανά μήκος μετώπου κύματος [28]	27
Εικόνα 16 Διαχωρισμός ροής γύρω από σημειακό απορροφητή.....	32
Εικόνα 17 Θέση στο Αιγαίο Πέλαγος με συντεταγμένες 35.34° N, 26.80° E	44
Εικόνα 18 Μορφή του φάσματος για το ζεύγος τιμών $T_p=4-5$ sec και $H_s=0-1$ m	46
Εικόνα 19 Τετράγωνη διάταξη	47
Εικόνα 20 Ευθεία διάταξη	48
Εικόνα 21 Διάταξη Ρόμβου.....	48
Εικόνα 22 Γραφική παράσταση συντελεστή απόσβεσης b έναντι γωνιακής ταχύτητας ω	52
Εικόνα 23 Απορροφούμενη κυματική ισχύς από τον σημειακό απορροφητήρα, συναρτήσει του πλάτους κύματος	53
Εικόνα 24 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύς) της Ευθείας Διάταξης	55
Εικόνα 25 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύς) της Διάταξης Ρόμβου	58
Εικόνα 26 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύς) της Τετραγωνικής Διάταξης	61

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο κόσμος βρίσκεται σε ένα κομβικό σημείο αναζήτησης βιώσιμων και καθαρών πηγών ενέργειας. Παλαιότερα τα ορυκτά καύσιμα αποτελούσαν τους πρωταρχικούς μοχλούς της οικονομίας, ενώ σήμερα δημιουργούν σοβαρές απειλές για το περιβάλλον και τη σταθερότητα του κλίματος. Σε αυτήν την περιβαλλοντική κρίση προβάλλει πλέον μια ολοένα αυξανόμενη αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων ανανεώσιμης ενέργειας και κυρίως μια συστηματική χρήση και αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας.

Η κυματική ενέργεια έχει τεράστιες δυνατότητες, μια και το 71% σχεδόν της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από ωκεανούς και θάλασσες. Αυτά τα υδάτινα σώματα βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, που οδηγούνται από τις βαρυτικές δυνάμεις της σελήνης και του ήλιου, δημιουργώντας κύματα ποικίλων συχνοτήτων και πλάτους. Αυτή η αέναη κίνηση των κυμάτων μεταφέρει το ενεργειακό ισοδύναμο δισεκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου, περιμένοντας να αξιοποιηθεί ως καθαρή και βιώσιμη πηγή ενέργειας.

Πρώτη αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας

Η πρώιμη ιστορία της κυματικής ενέργειας χρονολογείται από τους τελευταίους μήνες του 18ου αιώνα, όταν ο Γάλλος εφευρέτης Girard και ο γιος του κατοχύρωσαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την πρώτη τεχνολογία κυματικής ενέργειας. Το 1910, ένας Γάλλος ονόματι Busso Belasek εφηύρε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κινητήρια δύναμη την κυματική ενέργεια, ο οποίος παρείχε ηλεκτρική ενέργεια 1000 W για τα κτίριά του (1). Ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής παρήγαγε ενέργεια μέσω μιας πνευματικής συσκευής κυμάτων, η οποία μπορούσε να συμπιέζει ή να αποστραγγίζει τον αέρα με την ενέργεια από τη διακύμανση των κυμάτων και να ωθεί ένα έμβολο να κάνει παλινδρομική κίνηση, η οποία μετατρέπεται σε περιστροφή του στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, το 1910 ο Γάλλος μηχανικός Bochaux Praceique κατασκεύασε την πρώτη πιθανώς ταλαντευόμενη στήλη νερού στον κόσμο, έναν τύπο μετατροπέα κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Μεταξύ του 1856 και του 1973 κατατέθηκαν εκατοντάδες διπλώματα ευρεσιτεχνίας παγκοσμίως, με πάνω από 300 μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK). (2)

Παρόλο που έχουμε κατανοήσει εδώ και καιρό τη δύναμη των κυμάτων, ήταν δύσκολο να κατασκευάσουμε μηχανές για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας. Η διαβρωτικότητα του αλμυρού νερού σε συνδυασμό με την πολύπλοκη κίνηση των ίδιων των κυμάτων άφησε την ενέργεια των κυμάτων καθηλωμένη στη φάση της έρευνας και της ανάπτυξης για πολλά χρόνια.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1900 υπήρχαν διάφορες τεχνολογίες μετατροπής κυματικής ενέργειας (WEC), αλλά η αγορά δεν άρχισε να αναπτύσσεται μέχρι να μελετηθεί σοβαρά η κυματική ενέργεια τη δεκαετία του 1940.

Πρώτη εμπορευματοποίηση των συσκευών κυματικής ενέργειας

Στη δεκαετία του 1940, ο διάσημος Ιάπωνας εφευρέτης Yoshio Masuda διεξήγαγε ουσιαστικές έρευνες σχετικά με την εφαρμογή της κυματικής ενέργειας και σύντομα εφηύρε έναν νέο τύπο συσκευής ταλαντευόμενης στήλης νερού για την παραγωγή ενέργειας για σηματοδότες πλοήγησης (3). Αυτή η νέα συσκευή αξιοποιούσε την ενέργεια των κυμάτων απορροφώντας και συμπιέζοντας τον αέρα για την κίνηση της γεννήτριας ώστε να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Το 1965, αυτό το είδος σηματοδότη φορτισμένης με

κυματική ενέργεια, εμπορευματοποιήθηκε και τέθηκε σε ποσοτική παραγωγή. Τα προϊόντα αυτά, των οποίων η ονομαστική ισχύς κυμαίνονταν από 60 έως 500 W, έγιναν δημοφιλή στην αγορά της Ιαπωνίας και εξήχθησαν σε διάφορες χώρες. Πρόκειται για την πρώτη επιτυχημένη εμπορική αξιοποίηση των συσκευών κυματικής ενέργειας και έχει γίνει μία από τις μικρότερες εμπορικές εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας στην τρέχουσα διεθνή αγορά.

Περαιτέρω έρευνες για την κυματική ενέργεια τη δεκαετία του 1970

Στη δεκαετία του 1970, καθώς η πετρελαϊκή κρίση συνέχισε να επηρεάζει τον διεθνή ενεργειακό τομέα, πολλοί ερευνητές άρχισαν να επικεντρώνονται στη μελέτη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη συνέχεια ανακάλυψαν την τεράστια δυναμική αγορά της κυματικής ενέργειας. Μεταξύ αυτών των πρώτων ερευνητών ήταν ο Stephen Salter από τη Σκωτία, ο Kjell Budal από τη Νορβηγία και ο Michael E. McCormick από την Αμερική (4). Το 1974, ο Stephen Salter του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου εφηύρε την "Πάπια του Εδιμβούργου", που ονομάζεται επίσης "The Nodding Duck", η οποία ήταν μια συσκευή κυματικής ενέργειας ικανή να συλλάβει και να μετατρέψει περίπου το 80% της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προσελκύσει το ενδιαφέρον των επιστημονικών ερευνητικών ιδρυμάτων διεθνώς με στόχο την ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας (5). Πολλές χώρες με τεράστια ποσότητα κυματικής ενέργειας, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιαπωνία και η Νορβηγία, θεώρησαν την κυματική ενέργεια ως σημαντική λύση για την ενεργειακή κρίση και επένδυσαν πολλά κονδύλια και ανθρώπινο δυναμικό στις έρευνες για την κυματική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, το δοκιμαστικό πλοίο κυματικής ενέργειας "Hamming" από την Ιαπωνία κατάφερε να παράγει 190.000 kWh ετησίως και πέτυχε τη μεταφορά ενέργειας μικρής κλίμακας από υπεράκτιους πλωτούς σταθμούς κυματικής ενέργειας στην ξηρά. Το 1976, ο Ιάπωνας Yoshio Masuda διεξήγαγε περισσότερα πειράματα σχετικά με το συνδυασμό διαφόρων τύπων συσκευών κυματικής ενέργειας. Η απόδοση εξόδου, ωστόσο, δεν βελτιώθηκε πολύ, υποδεικνύοντας ότι η μεγάλης κλίμακας αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας είχε ακόμη πολύ δρόμο να διανύσει μέχρι η τεχνολογία να φτάσει στην ωριμότητά της (1).

Ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας στα τέλη του 20ού αιώνα

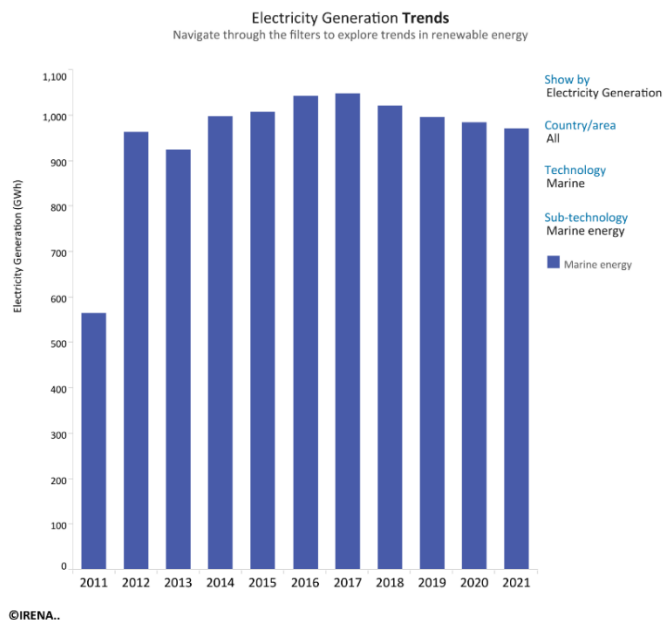
Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η πτώση των τιμών του πετρελαίου προκάλεσε τη μείωση της χρηματοδότησης της κυματικής ενέργειας. Για παράδειγμα, το 1982, το Υπουργείο Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου περιέκοψε τη χορηγία στην τεχνολογία της κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές εξακολούθησαν να διεξάγουν πολλά πειράματα στο πρωτότυπο και να υποστηρίζουν άλλα έργα κυματικής ενέργειας. Το 1985, η Νορβηγία διεξήγαγε θαλάσσιες δοκιμές δύο πρωτοτύπων με ισχύ 350 kW και 500 kW (6). Το 1989, ένα πρωτότυπος μετατροπέας ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης, ισχύος 75 kW, εγκαταστάθηκε στο Islay της Σκωτίας. Εν τω μεταξύ, η Ιαπωνία και η Ινδία έχουν επίσης εγκαταστήσει συσκευές κυματικής ενέργειας ισχύος 60 kW και 125 kW αντίστοιχα (1). Στη δεκαετία του 1990, περισσότεροι πολιτικοί συνειδητοποίησαν τη δυνητική αγορά της κυματικής ενέργειας και απηύθυναν έκκληση για περισσότερη χρηματοδότηση και χορηγία για τη διεξαγωγή περαιτέρω ερευνών. Το 1991 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή άρχισε να συμπεριλαμβάνει την κυματική ενέργεια στο πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό συνέβαλε στη χρηματοδότηση του συγκεκριμένου προγράμματος, ανανέωσε το ενδιαφέρον για την κυματική ενέργεια και άνοιξε το δρόμο για να γίνει η Ευρώπη ηγέτης στην έρευνα για τη θαλάσσια ενέργεια (1).

Τρέχουσα κατάσταση στον 21ο αιώνα

Στον 21ο αιώνα, η τεχνολογία της κυματικής ενέργειας έχει σταδιακά ωριμάσει. Το τεράστιο διεθνές ενδιαφέρον για την τεχνολογία της κυματικής ενέργειας έχει αυξηθεί από το 2000, καθώς οι εμπορικοί επενδυτές και οι κυβερνήσεις σε διάφορες χώρες έχουν επενδύσει πολύ περισσότερο στην κυματική ενέργεια. Συγκεκριμένα, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC) ιδρύθηκε το 2003 στο Όρκνεϊ της Σκωτίας ως η πρώτη εμπορική εγκατάσταση δοκιμών ανοιχτής θάλασσας για τεχνολογίες κυματικής και παλιρροιακής ενέργειας. Στη συνέχεια, το 2004 το πρώτο μεγάλο έργο που διαχειρίστηκε η WavEC (7) ονομάζεται Demonstration OWC (Oscillating Water Column) και αποτελεί ένα εθνικό έργο που είχε ως στόχο την ανάκτηση και δοκιμή της μονάδας OWC Pico στις Αζόρες, προκειμένου να καταδειχθεί η βιωσιμότητα αυτής της τεχνολογίας. Το έργο ολοκληρώθηκε το 2006. Το 2007, ο σταθμός κυματικής ενέργειας με ταλαντευόμενο πλωτήρα Aqua Buoy (1) στον Καναδά πραγματοποίησε τη θαλάσσια δοκιμή στις ακτές του Όρεγκον των ΗΠΑ και η συσκευή αυτή αποδείχθηκε ότι έχει υψηλή απόδοση σύλληψης και αξία εφαρμογής στη συσκευή. Το 2008 άνοιξε το κυματικό πάρκο Aguçadora στην Πορτογαλία και υπήρξε το πρώτο λειτουργικό σύστημα κυματικής ενέργειας στον κόσμο που είχε παραγωγική ικανότητα 2,25 MW και αποτελείτο από ενωμένους σωλήνες που επέπλεαν στην επιφάνεια του Ατλαντικού Ωκεανού και αξιοποιούσαν την ενέργεια από την "πάνω" και "κάτω" κίνηση των κυμάτων. Τελικά διακόπηκε η λειτουργία του λόγω προβλημάτων συντήρησης. Έπειτα, το 2015 εγκαταστάθηκε το πρωτότυπο ενός καινοτόμου κυματοθραύστη για τη μετατροπή κυματικής ενέργειας που ονομάζεται OBREC (Overtopping Breakwater for Energy Conversion) και αποτελεί το πρώτο παγκοσμίως πρωτότυπο WEC πλήρως ενσωματωμένο σε κυματοθραύστη, το οποίο εκμεταλλεύεται τη διαδικασία υπερπήδησης των κυμάτων (8). Το 2023 η CorPower Ocean εγκατέστησε τον πρώτο μετατροπέα κυματικής ενέργειας εμπορικής κλίμακας, τον CorPower C4, στη βόρεια Πορτογαλία. Η συσκευή συνδέθηκε με το πορτογαλικό εθνικό δίκτυο και ρυμουλκήθηκε στην τοποθεσία του κυματικού πάρκου Aguçadora, όπου θα υποβληθεί σε πρόγραμμα θέσης λειτουργίας. (2)

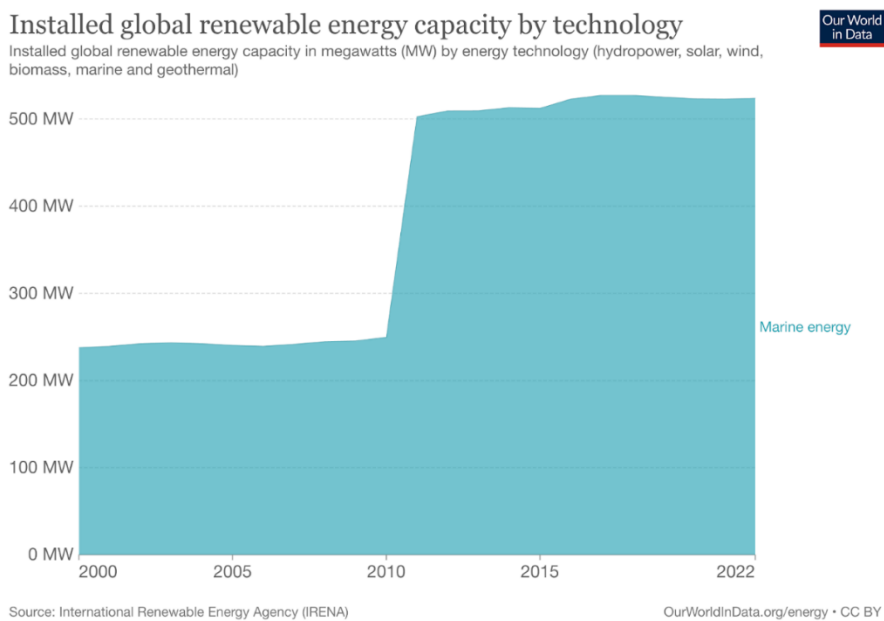
Τα τελευταία χρόνια η κυματική ενέργεια παρέμεινε στάσιμη τόσο από πλευράς εγκατεστημένης δυναμικότητας όσο και από πλευράς επενδύσεων. Με πολύ λίγες χώρες να παράγουν ή να εγκαθιστούν επί του παρόντος κυματική ενέργεια, η εστίαση παραμένει στην τελειοποίηση της τεχνολογίας και στην αύξηση των επενδύσεων για τη μελλοντική πιθανή εμπορευματοποιημένη παραγωγή ενέργειας.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, παρήχθησαν 970 γιγαβατώρες (GWh) ηλεκτρικής ενέργειας το 2022 από θαλάσσια ενέργεια (παλιρροϊκή + κυματική ενέργεια), παρουσιάζοντας μικρή μείωση σε σχέση με το προηγούμενο έτος.



Εικόνα 1 The International Renewable Energy Agency: Electricity Generation Trends (2)

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς της θαλάσσιας ενέργειας (παλιρροϊκή + κυματική ενέργεια) παρέμεινε σχετικά σταθερή τα τελευταία χρόνια, αλλά αυξήθηκε από 238 σε 524 MW μεταξύ 2000 και 2022.



Εικόνα 2 Εγκατεστημένη παγκόσμια δυναμικότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά τεχνολογία (2)

Αν και η παραγωγή ενέργειας από κύματα και παλίρροιες έχει υπερδιπλασιαστεί τα τελευταία 20 χρόνια, η ανάπτυξή της παγκοσμίως ήταν δυσανάλογη. Επιπλέον, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στην αύξηση της παλιρροιακής ενέργειας από ότι της κυματικής. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι η κυματική ενέργεια είναι πιο πολύπλοκη στη μηχανική και πιο δαπανηρή στην εφαρμογή από την παλιρροιακή ενέργεια.

Η Ευρώπη παραμένει στην πρωτοπορία της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας. Οι προγραμματιστές στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιταλία, την Ισπανία και την Πορτογαλία σχεδιάζουν και κατασκευάζουν τα πρώτα πάρκα κυματικής ενέργειας πολλαπλών συσκευών σε όλη την Ευρώπη, με απώτερο στόχο την εμπορική αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας.

Επιπλέον, το Πολιτειακό Πανεπιστήμιο του Όρεγκον αναπτύσσει επί του παρόντος το "PacWave", τον πρώτο δοκιμαστικό χώρο κυματικής ενέργειας σε κλίμακα κοινής ωφέλειας, συνδεδεμένο με το δίκτυο, στις ΗΠΑ. Το "PacWave" αποτελείται από το "PacWave North" και το "PacWave South", 2 υπεράκτιες τοποθεσίες όπου εταιρείες και προγραμματιστές μπορούν να δοκιμάσουν τις τεχνολογίες κυματικής ενέργειας για ενδεχόμενη χρήση στην αγορά. (2)

Το κίνητρο πίσω από αυτή τη διατριβή πηγάζει από την επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης των προκλήσεων που σχετίζονται με τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας και τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων της ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Ενώ η προοπτική της κυματικής ενέργειας είναι αναμφισβήτητη, η πρακτική εφαρμογή των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας παρουσιάζει περίπλοκες μηχανικές προκλήσεις.

Η κυματική ενέργεια, σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή ή η αιολική, είναι εξαιρετικά μεταβαλλόμενη και εξαρτάται από τα τοπικά κυματικά φαινόμενα. Η ενέργεια που μεταφέρεται από τα κύματα ποικίλλει όχι μόνο ανάλογα με τη γεωγραφική θέση αλλά και με το χρόνο, καθώς οι συχνότητες και τα πλάτη των κυμάτων κυμαίνονται συνεχώς. Αυτή η μεταβλητότητα παρουσιάζει ένα μοναδικό σύνολο προκλήσεων για το σχεδιασμό αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας.

Στο επίκεντρο αυτής της πρόκλησης βρίσκεται η βέλτιστη τοποθέτηση συσκευών κυματικής ενέργειας. Η διαμόρφωση τοποθέτησης αυτών των συσκευών παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της δεσμευμένης απόδοσης ενέργειας. Η μη βέλτιστη τοποθέτηση μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη παραγωγή ενέργειας και αυξημένο λειτουργικό κόστος, μειώνοντας την οικονομική βιωσιμότητα των έργων κυματικής ενέργειας. Επομένως, το κρίσιμο ερώτημα που παρακινεί αυτήν την έρευνα είναι το Πώς μπορούμε να τοποθετήσουμε στρατηγικά τις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας για να μεγιστοποιήσουμε την εξαγωγή ενέργειας σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από μεταβλητές συχνότητες κυμάτων;

Το κίνητρο για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα είναι πολύπλευρο. Πρώτον, η επίτευξη της βέλτιστης τοποθέτησης συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική σκοπιμότητα των έργων κυματικής ενέργειας, καθιστώντας τα πιο ελκυστικά για τους επενδυτές και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Δεύτερον, η αποτελεσματική χρήση της κυματικής ενέργειας μειώνει την εξάρτησή μας από τα ορυκτά καύσιμα, μετριαζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας και συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Επιπλέον, η επιτυχής εφαρμογή βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων τοποθέτησης μετατροπέων κυματικής ενέργειας μπορεί να χρησιμεύσει ως μοντέλο για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ευρύτερο ενεργειακό δίκτυο. Καθώς ο κόσμος μεταβαίνει προς την καθαρή ενέργεια, η κατανόηση του τρόπου εξαγωγής του μέγιστου δυναμικού από μεταβλητούς πόρους όπως η κυματική ενέργεια είναι πρωταρχικής σημασίας.

Συμπερασματικά, το υπόβαθρο αυτής της διατριβής υπογραμμίζει το αναξιοποίητο δυναμικό της κυματικής ενέργειας ως βιώσιμης και καθαρής πηγής ενέργειας, ενώ το κίνητρο βρίσκεται στην επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισης των μηχανικών προκλήσεων που σχετίζονται με τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας. Η έρευνα επιδιώκει να παράσχει πρακτικές γνώσεις για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε περιβάλλοντα μεταβλητής συχνότητας κυμάτων, συμβάλλοντας τελικά στην παγκόσμια επιδίωξη ενός καθαρότερου και πιο βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

1.2 Ενεργειακοί Πόροι

Οι ενεργειακοί πόροι χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τους ανανεώσιμους και τους μη ανανεώσιμους (9). Πιο αναλυτικά:

Ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι

Σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (4), καθορίζονται διάφορες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) που θεωρούνται βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές. Αυτές οι ΑΠΕ περιλαμβάνουν:

- Αιολική Ενέργεια (Wind Energy): Αυτή η μορφή ενέργειας προκύπτει από τον άνεμο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια ή μηχανική ενέργεια. Συμπεριλαμβάνει επίσης την υπεράκτια αιολική ενέργεια, γνωστή και ως θαλάσσια αιολική ενέργεια.
- Ηλιακή Ενέργεια (Solar Energy): Αυτή η μορφή ενέργειας εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμότητα του ηλίου για να παράγει ενέργεια. Συμπεριλαμβάνει τη χρήση ηλιακών θερμοσιφώνων και φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Γεωθερμική Ενέργεια (Geothermal Energy): Προέρχεται από τη θερμότητα που υπάρχει στο εσωτερικό της γης και περιλαμβάνει φυσικούς ατμούς, υπόγεια θερμά νερά και θερμά ξηρά πετρώματα.
- Υδραυλική Ενέργεια (Hydraulic Energy): Εκμεταλλεύεται τη δυναμική ενέργεια των υδάτων, συνήθως ποταμών, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ωκεάνια Ενέργεια (Ocean Energy): Ανακτάται από τους ωκεανούς και μπορεί να περιλαμβάνει ενέργεια από παλίρροιες, κύματα, θερμοκλίτους και διαφορές αλατότητας του νερού. (10)
 - I. Ενέργεια από τις παλίρροιες και τα ρεύματα (tidal/sea currents). Εκμεταλλεύεται την άνοδο των υδάτων κατά την παλίρροια ή τα θαλάσσια ρεύματα.
 - II. Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική.

- III. Ενέργεια θερμοκλινούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
- IV. Ενέργεια από την μεταβολή της αλατότητας (salinity gradients). Εκμεταλλεύεται τη διαφορά πυκνότητας του νερού για την παραγωγή ενέργειας.
- Ενέργεια από Βιομάζα: Αυτή η μορφή ενέργειας χρησιμοποιεί υλικά από φυτική προέλευση, όπως ξύλο, τρόφιμα, ζωοτροφές και απόβλητα, για την παραγωγή βιοαιθανόλης και βιοαερίου, που είναι πιο περιβαλλοντικά βιώσιμα καύσιμα από τα ορυκτά καύσιμα.

Αυτές οι μορφές ΑΠΕ αποτελούν σημαντικά εργαλεία στην προσπάθεια μας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προώθηση της βιωσιμότητας στον τομέα της ενέργειας.

Μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι

Οι μη ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι αναφέρονται σε πηγές ενέργειας που δεν ανανεώνονται σε ανθρώπινες κλίμακες και περιλαμβάνουν τα εξής (9):

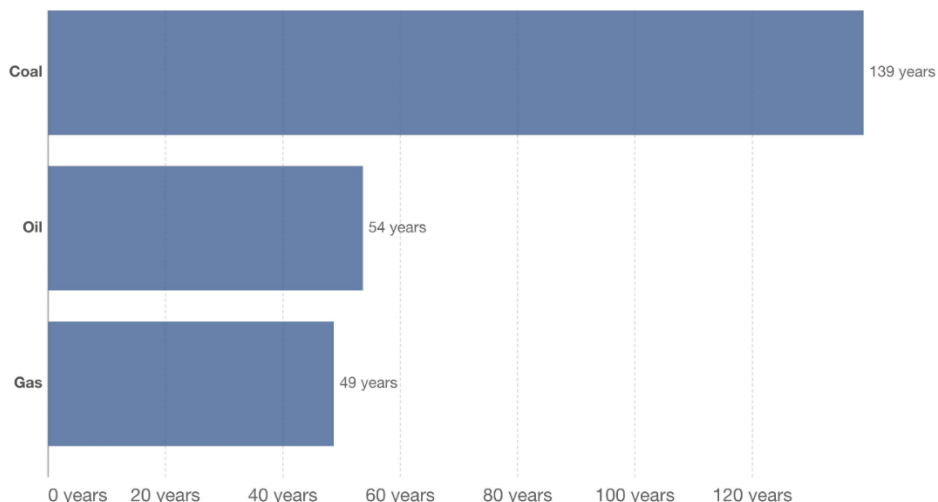
- Πυρηνική Ενέργεια: Αναφέρεται στην ενέργεια που παράγεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες. Παρά την αποδοτικότητα, η πυρηνική ενέργεια συνδέεται με περιβαλλοντικούς και ασφαλείακούς κινδύνους.
- Καύση Ορυκτών Καυσίμων: Τα ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το κάρβουνο, προέρχονται από αποσυντιθέμους οργανισμούς. Οι αποθέσεις αυτών των καυσίμων είναι περιορισμένες και υπολογίζεται ότι μπορεί να εξαντληθούν σε διάστημα από λίγες δεκαετίες έως αιώνες, ανάλογα με τη χρήση.

Τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων που σχηματίστηκαν πριν από εκατομμύρια χρόνια, αλλά χρησιμοποιούνται μόνο για περίπου 200 χρόνια, αδειάζουν πολύ γρήγορα. Είναι επίσης προφανές ότι η ακριβής ημερομηνία εξάντλησης αυτών των καυσίμων παραμένει άγνωστη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συνεχίζουμε να ανακαλύπτουμε νέα αποθέματα, ωστόσο ο αριθμός των νέων αποθεμάτων είναι μικρός και δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του πληθυσμού μας με τα σημερινά και τα αναμενόμενα μελλοντικά επίπεδα χρήσης. Σύμφωνα με έρευνα που βασίζεται σε στοιχεία του 2020, η τρέχουσα δήλωση για το πότε θα αδειάσουν τα αποθεματικά μας είναι στα 139 χρόνια για το ορυκτό κάρβουνο, 54 χρόνια για το πετρέλαιο και 49 χρόνια για το φυσικό αέριο (11):

Years of fossil fuel reserves left, 2020

Our World
in Data

Years of global coal, oil and natural gas left, reported as the reserves-to-product (R/P) ratio which measures the number of years of production left based on known reserves and present annual production levels. Note that these values can change with time based on the discovery of new reserves, and changes in annual production.



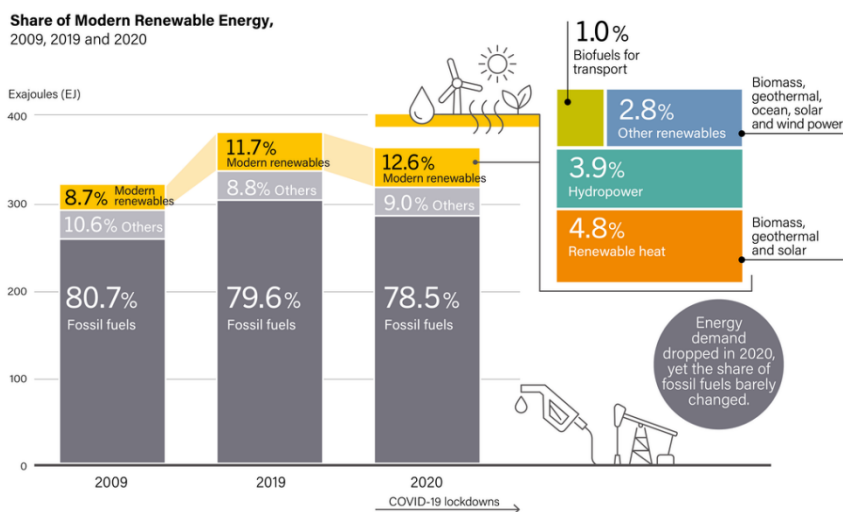
Source: BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/fossil-fuels • CC BY

Εικόνα 3 Χρόνια ορυκτών καυσίμων που έχουν απομείνει (11)

Προσπαθώντας να αντιμετωπίσουμε την εξάντληση αυτών των πόρων, χρειάζεται να επενδύσουμε σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η ωκεάνια και η γεωθερμική ενέργεια. Αυτές οι πηγές ενέργειας δεν εξαντλούνται και δεν προκαλούν τους ίδιους περιβαλλοντικούς κινδύνους όπως οι μη ανανεώσιμοι πόροι. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη διασφάλιση ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος.

Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται σύμφωνα με την (12) το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια. Παρουσιάζεται επίσης η ποσοστιαία συμμετοχή των επιμέρους ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από ανανεώσιμους πόρους.



Εικόνα 4 Το εκτιμώμενο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων στην συνολικά παραγόμενη σε παγκόσμιο επίπεδο ηλεκτρική ενέργεια (12)

1.3 Διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων

Το διαθέσιμο δυναμικό θαλάσσιων ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων αποτελεί μια πολύ σημαντική πηγή ενέργειας που αξίζει την προσοχή στην εποχή μας. Πρόκειται για μια πηγή ενέργειας της οποίας ο κλάδος της επιστήμης και της τεχνολογίας αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς και έχει τεράστιο δυναμικό για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτησή μας από τις συμβατικές πηγές ενέργειας και την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου.

Ένας από τους δύο ήδη εκμεταλλεόμενους θαλάσσιους ανανεώσιμους πόρους είναι:

- Η **θαλάσσια αιολική ενέργεια**. Οι ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται στη θάλασσα εκμεταλλεύονται τα ισχυρά και σταθερά αιολικά ρεύματα που πνέουν πάνω στη θάλασσα. Αυτός ο τύπος ενέργειας έχει το πλεονέκτημα της σταθερότητας και της υψηλής απόδοσης, καθώς οι άνεμοι στη θάλασσα είναι συνήθως πιο δυνατοί και συνεχείς σε σύγκριση με τους άνεμους στην ξηρά.

Η Ελλάδα έχει σήμερα εγκατεστημένα 4,5 GW αιολικής ενέργειας, όλα χερσαία, καλύπτοντας περισσότερο από το 18% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, το δυναμικό της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι πολύ μεγαλύτερο, ιδίως για την υπεράκτια αιολική ενέργεια. (13)

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) της Ελλάδας προβλέπει συνολικά 7 GW αιολικής ενέργειας έως το 2030 (13). Ο στόχος αυτός θα αυξηθεί με την αναθεώρηση του ΕΣΠΑ το 2023. Η κυβέρνηση θέλει να κατασκευάσει τουλάχιστον 2 GW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέχρι τότε. Χάρη στους αιολικούς πόρους γύρω από την ελληνική χερσόνησο, η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα μπορούσε να διαδραματίσει βασικό ρόλο στην παροχή καθαρής και αξιόπιστης ενέργειας σε περισσότερα από 150 κατοικημένα ελληνικά νησιά.

- Ο δεύτερος σημαντικός πόρος είναι η **ωκεανική ενέργεια**. Αυτή η μορφή ενέργειας εκμεταλλεύεται τη θερμότητα και την κίνηση των ωκεανών. Ένας τρόπος είναι η χρήση των θαλάσσιων ρευμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Άλλος τρόπος είναι η χρήση των θαλάσσιων θερμοκηπίων, όπου η θάλασσα λειτουργεί ως θερμικό αποθηκευτικό μέσο. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και ψύξη, αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με ένα συγκλονιστικό παγκόσμιο δυναμικό, η κυματική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει τη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας από τις θάλασσές μας. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) υπολογίζει τη δυνητική ετήσια παγκόσμια παραγωγή σε 29.500 TWh. Αυτό είναι σχεδόν δεκαπλάσιο της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης που ανέρχεται σε 3.000 TWh.

Η κυματική ενέργεια μπορεί να παρέχει παραγωγή ενέργειας σε κλίμακα κοινής ωφέλειας και να λειτουργεί πολύ καλά σε συνδυασμό με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική. Αποτελεί επίσης μια καθαρή, αποτελεσματική εναλλακτική λύση έναντι του ρυπογόνου και ακριβού ντίζελ για απομακρυσμένα νησιά και υπεράκτιες βιομηχανίες, όπως ιχθυοτροφεία ή πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου. (14)

Σήμερα, πρότυπες συσκευές κυματικής ενέργειας σε κλίμακα και σε πλήρες μέγεθος δοκιμάζονται στη θάλασσα. Οι πιο προηγμένοι προγραμματιστές συσκευών σχεδιάζουν και κατασκευάζουν τα πρώτα πάρκα κυματικής ενέργειας πολλαπλών συσκευών σε όλη την Ευρώπη, κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Πορτογαλία, την Ισπανία και την Ιταλία.

Μόλις κατασκευαστούν, αυτά τα πιλοτικά πάρκα θα χρησιμεύσουν ως βάση για την εμπορική αξιοποίηση της τεχνολογίας της κυματικής ενέργειας και τη δημιουργία μιας νέας ευρωπαϊκής βιομηχανίας.

Το βραβείο για την εμπορική αξιοποίηση της ωκεάνιας ενέργειας είναι τεράστιο. Μόνο στην Ευρώπη, η βιομηχανία ωκεάνιας ενέργειας σχεδιάζει να αναπτύξει 100GW παραγωγικής ικανότητας μέχρι το 2050, καλύπτοντας το 10% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό είναι αρκετό για να καλύψει τις καθημερινές ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια 94 εκατομμυρίων νοικοκυριών. Η ανάπτυξη 100GW ωκεάνιας ενέργειας θα σημάνει επίσης τη δημιουργία ενός νέου βιομηχανικού τομέα με σταθερή βάση την Ευρώπη και 500.000 εξειδικευμένες θέσεις εργασίας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. (14)

Οι δύο αυτοί πόροι, η θαλάσσια αιολική ενέργεια και η ωκεανική ενέργεια, ανοίγουν νέες προοπτικές για την ενεργειακή αυτάρκεια και την μείωση των εκπομπών CO₂. Επιπλέον, η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί θέσεις εργασίας και συντελεί στην οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά την ανάπτυξη και λειτουργία αυτών των συστημάτων.

Συνολικά, οι θαλάσσιοι ανανεώσιμοι πόροι αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος του μέλλοντος της ενεργειακής παραγωγής και μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Είναι σημαντικό να επενδύσουμε στην έρευνα και ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και να υποστηρίξουμε την ανάπτυξη της υποδομής που απαιτείται για την εκμετάλλευσή τους, προκειμένου να διασφαλίσουμε ένα βιώσιμο και καθαρό μέλλον για τις επόμενες γενεές.

1.4 Θετικά και αρνητικά της χρήσης των ΑΠΕ.

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ικανοποίηση της αναγκαίας ενεργειακής ζήτησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα και κάποια σημεία που απαιτούν βελτίωση. Ακολουθεί μια συνοπτική ανάλυσή τους:

Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

1. Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον.
2. Αποτελούν ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.
3. Συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων περιοχών, όπως μικρές κοινότητες και νησιά.
4. Προσφέρουν ευέλικτες λύσεις, προσαρμόζονται στις ενεργειακές ανάγκες της τοπικής πληθυσμιακής ομάδας και συμβάλλουν στην επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας από μεμονωμένες κατοικίες έως ολόκληρες κοινότητες στην ύπαιθρο. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει τη συναρμογή της παραγωγής ενέργειας με τις ανάγκες της κοινότητας και απομακρύνει την ανάγκη για μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
6. Τα τελευταία χρόνια η απόδοσή τους έχει αυξηθεί και υπάρχουν πολλές δυνατότητες για περαιτέρω

βελτίωση και ανάπτυξη.

Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) παρουσιάζουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

1. Χαμηλή Απόδοση: Πολλές μορφές ΑΠΕ έχουν σχετικά μικρό συντελεστή απόδοσης, που μπορεί να φτάνει περίπου το 30%. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται μεγαλύτερα αρχικά κεφάλαια για την εγκατάστασή τους, καθώς και εκτάσεις γης για τοποθέτησή τους. Αυτό το γεγονός μπορεί να δυσχεράνει την ικανότητά τους να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες μεγάλων αστικών περιοχών.
2. Εξάρτηση από Κλιματολογικούς Παράγοντες: Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ΑΠΕ εξαρτώνται από εποχιακά καιρικά φαινόμενα, γεωγραφικό πλάτος και το μικρόκλιμα της περιοχής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξομείωση της ενεργειακής παροχής, και γι' αυτό η εξισορρόπηση αυτών των διακυμάνσεων με τη χρήση διαφορετικών μορφών ΑΠΕ είναι σημαντική.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, οι ΑΠΕ παραμένουν αξιόλογες λύσεις για την ενεργειακή κάλυψη, καθώς προσφέρουν φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Επιπλέον, η τεχνολογία τους εξελίσσεται συνεχώς, βελτιώνοντας την απόδοση και τη βιωσιμότητά τους. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα συνεχίζει να αναζητά λύσεις για τα προβλήματα αυτά, προκειμένου να επιτύχει ακόμα μεγαλύτερη διάδοση των ΑΠΕ ως πηγή ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εξέταση των σημειακών απορροφητών ενέργειας, γνωστών και ως "point absorbers," ως έναν από τους τύπους συσκευών που αξιοποιούνται για την ανάκτηση κυματικής ενέργειας. Στο επόμενο κεφάλαιο 2, παρέχεται λεπτομερής ανάλυση των σημειακών απορροφητών ενέργειας, καθώς και των κυριότερων χαρακτηριστικών τους.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει πώς η διάταξη τοποθέτησης των σημειακών απορροφητών ενέργειας επηρεάζει την απόδοση αυτών των συσκευών έχοντας σαν σταθερές τη γεωμετρία των συσκευών, το βύθισμα τους αλλά και το βάθος που θα βρίσκονται.

2 Συσσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας

2.1 Τεχνολογίες Σ.Α.Κ.Ε και επιλογή συσκευής

Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες αιολικής ενέργειας, στις οποίες έχει επικρατήσει ένας τύπος ανεμογεννήτριας για την ανάκτησή της (οριζοντίου άξονα, μεγάλης ονομαστικής ισχύος), υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών και αντίστοιχα μεγάλος αριθμός συσκευών για την ανάκτηση της κυματικής ενέργειας. Πάνω από 1000 πατέντες έχουν κατατεθεί στην Ιαπωνία, τις ΗΠΑ και την Ευρώπη (15). Παρά τον μεγάλο αριθμό συσκευών που διακρίνονται ως προς την σχεδιάσή τους, εν τούτοις μπορεί να καταταχθούν σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασής τους και την αρχή λειτουργίας τους.

Σύμφωνα με την περιοχή εγκατάστασής τους οι Σ.Α.Κ.Ε διακρίνονται σε:

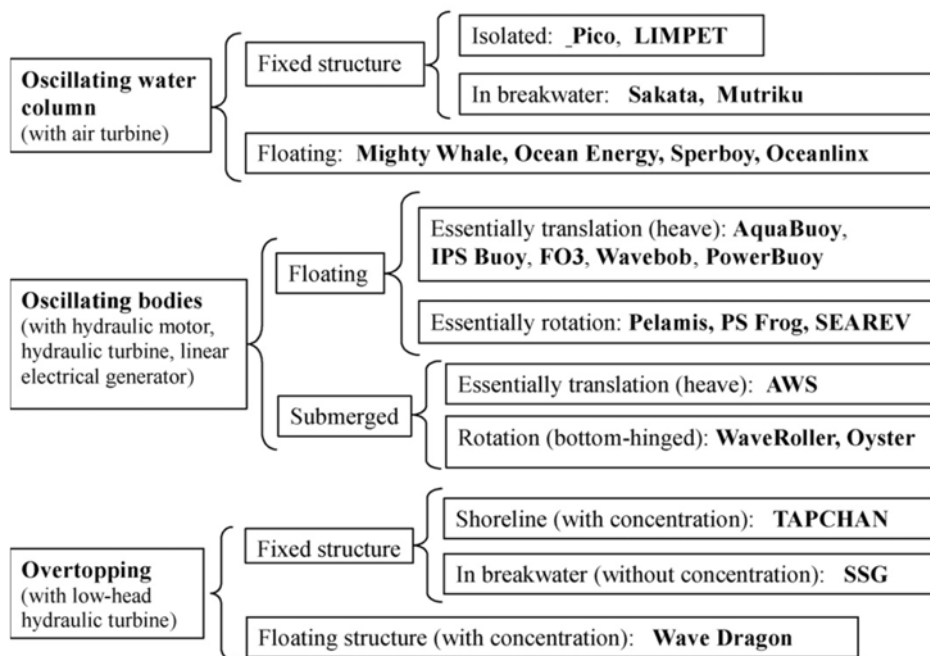
- I. Επάκτιες συσκευές (shoreline devices):
 - Οι επάκτιες συσκευές είναι τοποθετημένες κοντά στην ακτογραμμή και το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Έχουν ως πλεονέκτημα τον εύκολο συντηρητικό έλεγχο και μικρή πιθανότητα ζημιάς από ακραίους κυματισμούς λόγω του ρηχού νερού.
- II. Παράκτιες συσκευές (coastal devices):
 - Οι παράκτιες συσκευές βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή, σε ρηχά νερά (περίπου 20-30 μέτρα βάθος).
 - Είναι οικονομικά πιο προσιτές για εγκατάσταση και συντήρηση, αλλά αντιμετωπίζουν υψηλότερους κυματισμούς από αυτούς που συνηθίζονται στην ακτή.
- III. Υπεράκτιες κατασκευές (offshore devices):
 - Οι υπεράκτιες συσκευές τοποθετούνται σε βαθιά νερά.
 - Έχουν το πλεονέκτημα να απορροφούν περισσότερη ενέργεια λόγω του υψηλού ενεργειακού περιεχομένου των κυμάτων σε βαθύ νερό.
 - Είναι δυσκολότερο να κατασκευαστούν και να συντηρηθούν λόγω της τοποθέτησής τους σε βαθιά νερά.
 - Απαιτούν σχεδιασμό για αντοχή σε ακραίες συνθήκες και έχουν υψηλότερο κόστος κατασκευής.
 - Επιπλέον, προβλήματα όπως η αγκύρωση και η προσβασιμότητα για συντήρηση αποτελούν προκλήσεις.

Κάθε τύπος συσκευής έχει τα πλεονεκτήματά του και τα προβλήματά του, και η επιλογή μεταξύ τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τοπίου, της κλιματικής ζώνης και του κόστους. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των συσκευών αυτών αποτελούν σημαντική πτυχή της ανανεώσιμης ενέργειας και της αειφόρου ενέργειας παραγωγή.

Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις αλλά πολύ διαφορετικές συσκευές κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ενέργειας των ωκεάνιων κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια, και αυτές είναι:

- Συσκευές προφίλ κύματος: Πρόκειται για συσκευές κυματικής ενέργειας που μετατρέπουν το ταλαντευόμενο ύψος της επιφάνειας των ωκεανών σε μηχανική ενέργεια.
- Ταλαντευόμενες στήλες νερού: Πρόκειται για συσκευές κυματικής ενέργειας οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια των κυμάτων σε πίεση αέρα.
- Συσκευές σύλληψης κυμάτων: Πρόκειται για συσκευές κυματικής ενέργειας που μετατρέπουν την ενέργεια των κυμάτων σε δυνητική ενέργεια.

Στην εικόνα 5 που έχει ληφθεί από το (16), παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τεχνολογιών, μαζί με χαρακτηριστικά παραδείγματα συσκευών/μονάδων που έχουν κατασκευαστεί με βάση την κάθε μια από αυτές. Ο κατάλογος των συσκευών είναι ενδεικτικός και δεν εξαντλεί το πλήθος των εγκατεστημένων μονάδων.



Εικόνα 5 Οι κατηγορίες των διαφόρων τεχνολογιών ανάκτησης κυματικής ενέργειας (16)

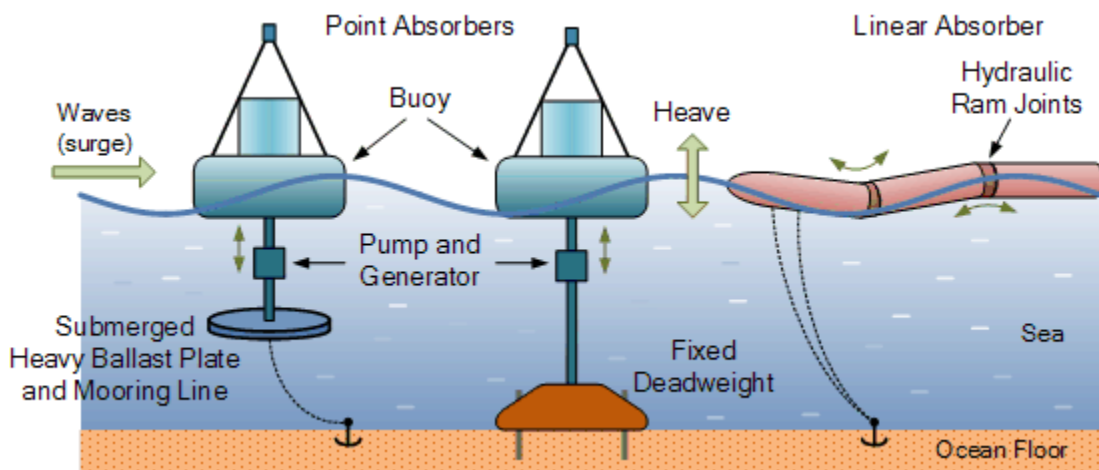
Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των πλέον αντιπροσωπευτικών τεχνολογιών που θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Σημειακοί Απορροφητές ενέργειας (Point absorbers)

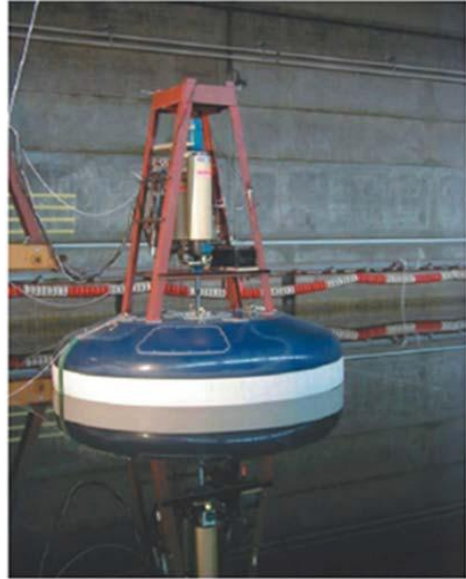
Παρόλο που τα ωκεάνια κύματα σε όλο τον κόσμο είναι γνωστό ότι περιέχουν υψηλά και πυκνά ποσά ενέργειας, οι συλλέκτες κυματικής ενέργειας δεν είναι ακόμα τόσο ώριμοι όσο άλλες μορφές συσκευών απόληψης ανανεώσιμης ενέργειας, ειδικά όταν πρόκειται για την εμπορευματοποίηση, τη μαζική παραγωγή και την ενσωμάτωση στο δίκτυο, αλλά με τις πρόσφατες μελέτες και βελτιστοποιήσεις, ο συλλέκτης κυματικής ενέργειας σημειακού απορροφητή μπορεί να είναι ένας πιθανός υποψήφιος να ξεχωρίσει ως η καλύτερη λύση για τη συγκομιδή ενέργειας από εξαιρετικά ενεργητικές τοποθεσίες στους ωκεανούς του κόσμου.

Οι σημειακοί απορροφητές ενέργειας είναι συσκευές που ανήκουν στην κατηγορία των ταλαντευόμενων σωμάτων, σύμφωνα με την κατάταξη της Εικόνας 5, και εκμεταλλεύονται την ανύψωση και πτώση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (κορυφή και κοιλάδα κύματος), προκειμένου να κινήσουν μέσω διαφόρων μηχανισμών, γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Απορροφούν ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις πρόσπτωσης του κυματισμού. Μπορούν να διακριθούν σε διατάξεις ενός ή δύο καθ' ύψος κινούμενων σωμάτων (16).

Οι διατάξεις ενός καθ' ύψος ταλαντευόμενου σώματος αποτελούνται συνήθως από πλωτήρα ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας και ακολουθεί την καθ' ύψος κίνησή της, κινούμενος σε σχέση με ένα σταθερό σημείο στον πυθμένα στο οποίο αγκυρώνεται (βλέπε εικόνα 6, όπου απεικονίζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας τους (17)). Μεταξύ του πλωτήρα και του κλάδου αγκύρωσης παρεμβάλλεται ο μηχανισμός απόληψης ενέργειας που είναι συνήθως μια υδραυλική εμβολοφόρος αντλία. Η σχετική κίνηση μεταξύ του πλωτήρα και της αγκύρωσης στον πυθμένα, ενεργοποιεί τον μηχανισμό απόληψης ενέργειας (υδραυλική εμβολοφόρο αντλία), ο οποίος καταθλίβει υγρό μέσω βαλβίδων ελεγχόμενης λειτουργίας από δοχείο χαμηλής σε δοχείο υψηλής πίεσης. Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση σημειακού απορροφητήρα που αναπτύχθηκε στην Δανία την δεκαετία του 1990 και απορροφά ενέργεια κατά την καθ' ύψος κίνησή του, παρουσιάζεται στην εικόνα 7 (18).

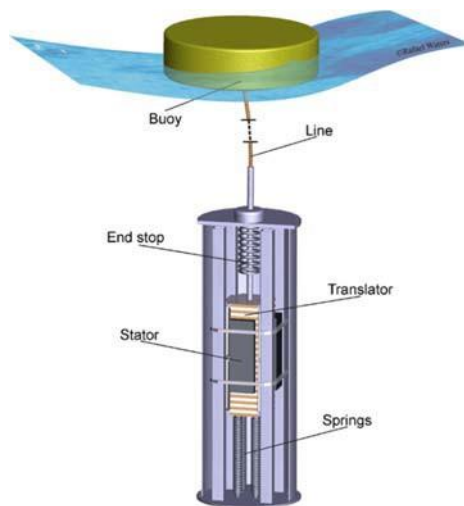


Εικόνα 6 Αρχή λειτουργίας σημειακών απορροφητήρων (17)



Εικόνα 7 Σημειακός απορροφητήρας με υδραυλικό μηχανισμό απόληψης ενέργειας (18)

Παραλλαγή του σημειακού απορροφητήρα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αποτελεί η διάταξη που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Uppsala (19), στην οποία ο υδραυλικός μηχανισμός απόληψης ενέργειας, έχει αντικατασταθεί από ηλεκτρικό κινητήρα που είναι εγκατεστημένος στον πυθμένα της θάλασσας και συνδέεται με τον πλωτήρα μέσω αγκύρωσης υπό προένταση, βλέπε Εικόνα 8 . Στη (19) γίνεται αναφορά και σε πειράματα που έγιναν στα ανοικτά των Σουηδικών ακτών με πλωτήρα 3m.



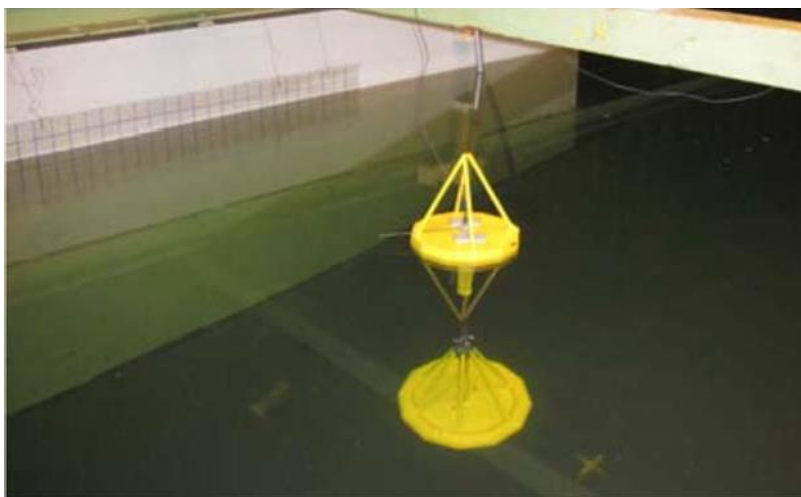
Εικόνα 8 Σημειακός απορροφητήρας με γραμμικό ηλεκτρικό κινητήρα απόληψης ενέργειας (19)

Η διάταξη του ενός καθ' ύψος κινούμενου σώματος που λειτουργεί ως σημειακός απορροφητήρας κυματικής ενέργειας, μπορεί να εμφανίζει δυσκολίες λόγω του βάθους του νερού ή παλιρροϊκών κινήσεων που αυξομειώνουν την στάθμη της θάλασσας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με διατάξεις δυο σωμάτων, στα οποία η ενέργεια απορροφάται μέσω της σχετικής κίνησης των δυο σωμάτων που κινούνται διαφορετικά. Η υδροδυναμική τους συμπεριφορά αλλάζει σε σχέση με εκείνη ενός μεμονωμένου σώματος (20), (21), (22) (23) , (24) ενώ εμφανίζουν και ειδικά προβλήματα ελέγχου της μεταξύ τους κίνησης (16).

Μια χαρακτηριστική περίπτωση διάταξης δύο σωμάτων είναι αυτή που αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Εταιρεία Ocean Power Technologies, που ονομάζεται PowerBuoy. Απεικονίζεται στις Εικόνες 9 και 10 στις οποίες αναφέρονται και οι βιβλιογραφικές παραπομπές από τις οποίες ελήφθησαν. Στην περίπτωση της διάταξης αυτής, ένας επιφανειακός πλωτήρας μορφής δίσκου αλληλοεπιδρά με ένα βυθισμένο κυλινδρικό σώμα που καταλήγει σε μια οριζόντια πλάκα απόσβεσης που χρησιμοποιείται για να αυξήσει την αδράνεια του βυθισμένου κυλινδρικού σώματος μέσω της πρόσθετης μάζας του περιβάλλοντος νερού. Η σχετική κίνηση μεταξύ των δύο σωμάτων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδραυλικού μηχανισμού απόληψης της ενέργειας. Ένας τέτοιος πλωτήρας δοκιμάστηκε στην Ισπανία στην ανοικτή θάλασσα το 2008 (16).

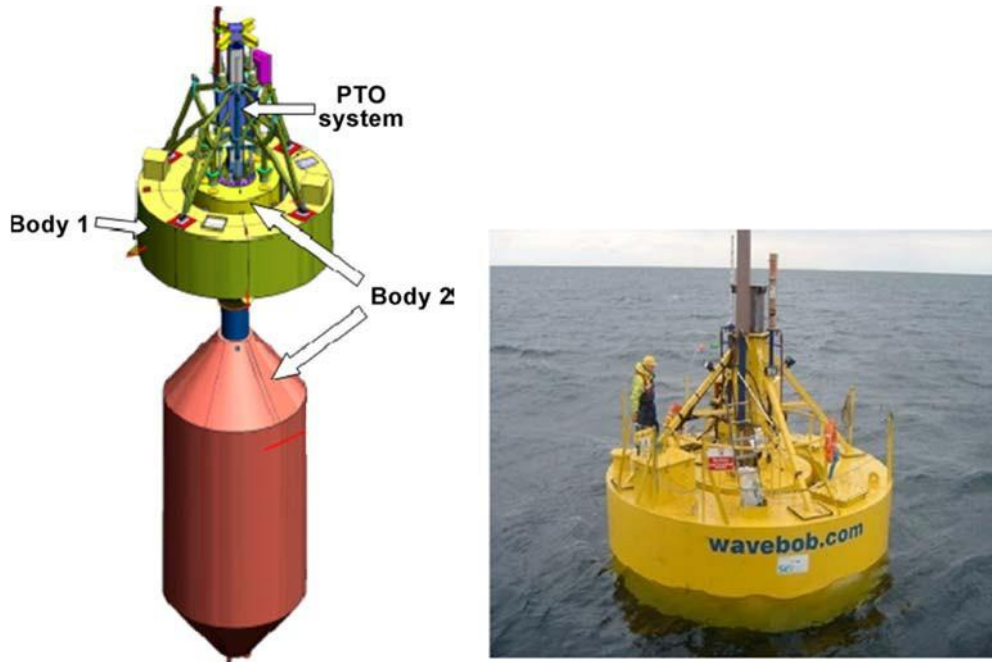


Εικόνα 9 Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies (19)



Εικόνα 10 Υπό κλίμακα διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων της Ocean Power Technologies (19)

Μια άλλη διάταξη δύο καθ' ύψος ταλαντευόμενων σωμάτων είναι ο πλωτήρας που φέρει το όνομα WaveBob (25) και απεικονίζεται στην Εικόνα 11. Αποτελείται από δύο ομοαξονικούς πλωτήρες, η σχετική κίνηση των οποίων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός υδραυλικού συστήματος υψηλής πίεσης με χρήση λαδιού. Ο εσωτερικός κύλινδρος είναι σταθερά συνδεδεμένος με υποβρύχιο σώμα που βρίσκεται σε αρκετή απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια (βλέπε εικόνα 11) και το οποίο συνεισφέρει στην αύξηση της αδράνειας και επιτρέπει τον καλύτερο συντονισμό με την μέση συχνότητα του κύματος. Ένα υπό κλίμακα 1/4 μοντέλο της συσκευής δοκιμάστηκε στην Ιρλανδία (Galway Bay).



Εικόνα 11 Διάταξη σημειακού κυματικού απορροφητήρα δύο κινούμενων σωμάτων. WaveBob (25), (21)

Σε σχέση με τους σημειακούς απορροφητήρες απορρόφησης ενέργειας έχουν γίνει τις τελευταίες δεκαετίες πολλές έρευνες ((26), (27), (28), (29)) για την διάταξή τους σε συστοιχίες κατασκευών που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, σε τρόπο ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί η θετική επίδραση που μπορεί να έχουν οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συσκευών στην απόδοσή τους, καθώς επίσης και οι κοινές υποδομές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να βελτιωθεί η παραγόμενη τιμή της ενέργειας ανά KWh.

2.2 Κυματική Ενέργεια

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλύσουμε την κυματική ενέργεια και τους παράγοντες που την επιβάλλουν, εστιάζοντας στον γενεσιουργό ρόλο των κυμάτων. Θα εξετάσουμε το κυματικό δυναμικό, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εθνικό επίπεδο, και θα παρουσιάσουμε μια σύντομη ιστορική αναδρομή της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από τον 18ο αιώνα έως τη σύγχρονη εποχή. Επιπλέον, θα εξετάσουμε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας και θα παρουσιάσουμε τους κυριότερους τύπους συσκευών απορρόφησης κυματικής ενέργειας επικεντρώνοντας κυρίως στους point absorbers καθώς και τους τρόπους λειτουργίας τους.

Τα κύματα δημιουργούνται όταν οι άνεμοι επηρεάζουν την επιφάνεια της θάλασσας. Πολλοί παράγοντες επιδρούν στο μέγεθος των κυμάτων, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η διάρκειάς του, η απόσταση που ο άνεμος διανύει πάνω από τη θάλασσα (γνωστή ως "fetch"), και η βαθυμετρίας του ύδατος. Η κίνηση των υδρομορίων μεταφέρει μεγάλες ποσότητες κινητικής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί από τις Συσκευές Απορρόφησης Κυματικής Ενέργειας (Σ.Α.Κ.Ε.). (30)

Οι σύνηθεις πηγές κυματικής ενέργειας εμφανίζονται σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους που έχουν διανύσει μεγάλες αποστάσεις. Στην Ευρώπη, για παράδειγμα, οι βροχές της Δυτικής ακτής είναι πλούσιες σε κύματα εξαιτίας της μεγάλης απόστασης που διανύουν οι άνεμοι πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Σε ανοικτή θάλασσα, τα κύματα διαθέτουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα κύματα που βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή και σε μικρά βάθη, όπου η ενέργειά τους αντιμετωπίζει απώλειες λόγω τριβής με τον πυθμένα.

Για την ανάκτηση της ενέργειας αυτής έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί μεγάλη ποικιλία συσκευών με διαφορετικό τρόπο λειτουργίας από διάφορες κατασκευάστριες εταιρίες.

Η κυματική ισχύς, ή η ροή ενέργειας ανά μονάδα μήκους μετώπου του κυματισμού (flux of energy per unit crest length), στην περίπτωση διάδοσης του σε βαθύ νερό δίνεται με καλή προσέγγιση από την σχέση (31):

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} TH^2 \quad [2.1]$$

όπου: ρ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, έστω $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$, T η περίοδος του κύματος, H το ύψος κύματος και g η επιτάχυνση της βαρύτητας, έστω $g=9.81\text{m/s}^2$, οπότε η προηγούμενη σχέση [2.1] γίνεται:

$$J = (490 \frac{\text{W}}{\text{m}^3\text{s}}) TH^2 \quad [2.2]$$

Επομένως, προκύπτει πως η δυναμική ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη της περιόδου και του τετραγώνου του ύψους του και μετριέται σε KW/m μετώπου του.

Κυματικό δυναμικό

Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών

Τα δεδομένα των κυματισμών συλλέγονται και εκτιμώνται με διάφορους τρόπους:

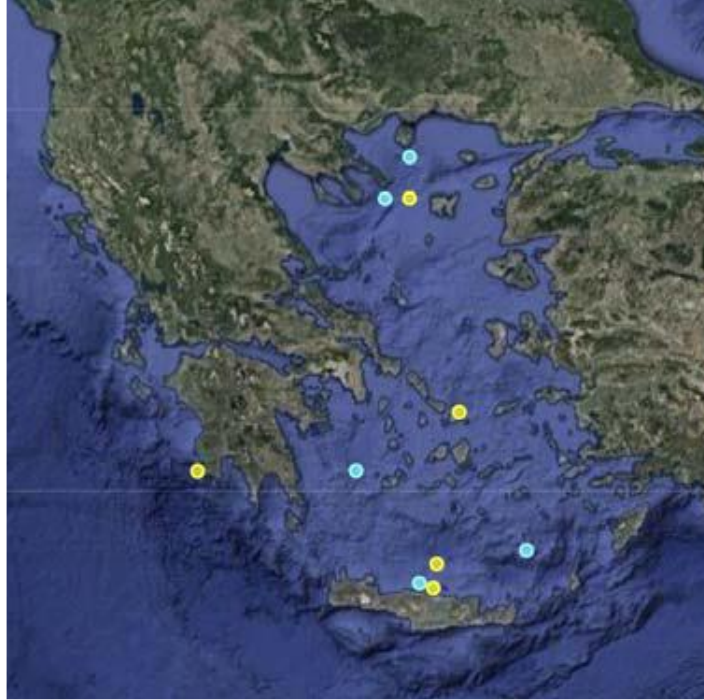
- **Δορυφόροι:** Χρησιμοποιούνται δορυφορικά όργανα όπως σκεδασιόμετρα και αλτίμετρα που παρέχουν συνεχείς μετρήσεις σχετικά με το θαλάσσιο περιβάλλον. Αν και πολύ χρήσιμοι, οι δορυφόροι μετακινούνται συνεχώς, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην παρακολούθηση (π.χ. Satellite radar altimeter-RA, ERS-1/2, TOPEX, Geosat Follow-On, Jason, Envisat, Synthetic Aperture Radar – SAR).
- **Επιτόπιες Μετρήσεις:** Σε αυτήν την περίπτωση, πραγματοποιούνται μετρήσεις στον ωκεανό και παρέχουν συνεχή ενημέρωση. Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα της άμεσης παρακολούθησης, αλλά το δίκτυο μετρήσεων είναι συνήθως περιορισμένο σε όργανα όπως κυματογράφοι, πιεσόμετρα βυθού, συστήματα sonar ULS, Doppler current profilers κ.λπ.
- **Μοντέλα Πρόγνωσης:** Εφαρμόζονται επιχειρησιακά μοντέλα προσομοίωσης που λειτουργούν ως προγνωστικά συστήματα με βάση δεδομένα του παρελθόντος και των δορυφορικών και επιτόπιων μετρήσεων.

Στον ελλαδικό θαλάσσιο χώρο λειτουργεί ένα σημαντικό σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης των κυματισμών, γνωστό ως το δίκτυο κυματογράφων "Ποσειδών" (32), που ανήκει στο Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ). Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει 12 ωκεανογραφικούς σταθμούς και 10 πλωτήρες SeaWatch, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ύψους και της κατεύθυνσης των κυματισμών.

Οι πλωτήρες αυτοί είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες που μετρούν διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της:

- a) Ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου: Αυτή η πληροφορία είναι σημαντική για την κατανόηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επηρεάζουν τα κύματα.
- b) Θερμοκρασίας και πίεσης της ατμόσφαιρας: Αυτές οι παράμετροι συμβάλλουν στην πρόγνωση των καιρικών συνθηκών και των κυματισμών.
- c) Σημαντικού ύψους, κατεύθυνσης και περιόδου του κύματος: Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των κυματισμών και την ασφάλεια της ναυτιλίας.
- d) Επιφανειακής θερμοκρασίας και αλατότητας: Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την θαλάσσια κυκλοφορία και τη θαλάσσια ζωή.
- e) Ταχύτητας και κατεύθυνσης των ρευμάτων: Αυτές οι πληροφορίες είναι σημαντικές για την κίνηση του νερού και την πρόγνωση των ρευμάτων.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποστέλλονται κάθε 3 ώρες δορυφορικά στο ΕΛΚΕΘΕ. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία και χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των προγνωστικών μοντέλων για τα κύματα στην περιοχή. Η εικόνα 12 δείχνει τις θέσεις των πλωτήρων του συστήματος "Ποσειδών" στον ελλαδικό χώρο. (32)



Εικόνα 12 Δίκτυο πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών (32)

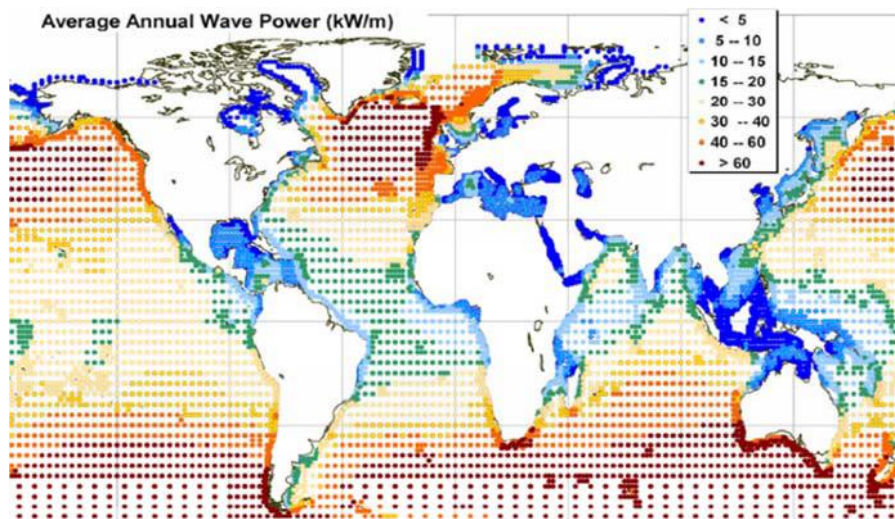
Κατανομή κυματικού Δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.3, το παγκόσμιο δυναμικό της κυματικής ενέργειας εκτιμάται στα 29.500 TWh/yr, με το 10% αυτής της ενέργειας να εντοπίζεται στην Ευρώπη. Οι διάφορες ευρωπαϊκές χώρες διαθέτουν διάφορα επίπεδα κυματικής ενέργειας κατά μήκος των ακτογραμμών τους, και αυτές οι διαφορές οφείλονται σε διάφορους παράγοντες.

Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται στα εξής στοιχεία:

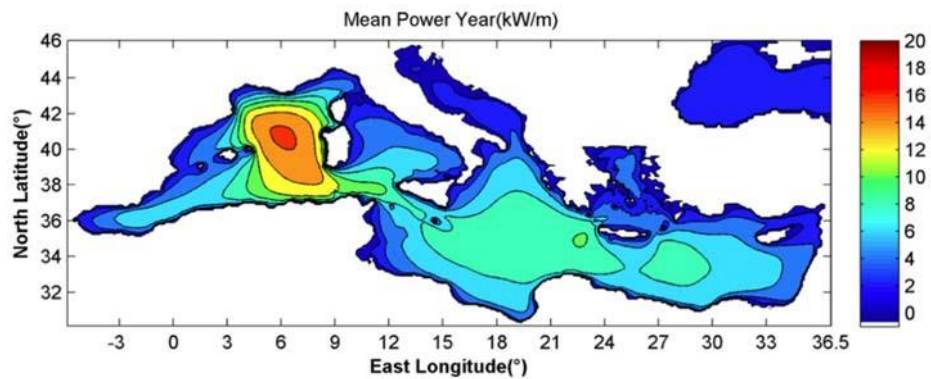
1. Βάθος του νερού: Στις περιοχές με ρηχά νερά, οι κυματικοί πόροι είναι πιο εύκολα προσβάσιμοι, καθώς τα κύματα διαταράσσουν το νερό κατά μήκος του βυθού. Σε αντίθεση, σε περιοχές με βαθύτερα νερά, η απορρόφηση της κυματικής ενέργειας είναι πιο προβληματική και απαιτεί πιο προηγμένες τεχνολογίες.
2. Γεωλογικά Χαρακτηριστικά του Πυθμένα: Οι ποικίλες συνθήκες του πυθμένα, όπως η τοπογραφία και η σύσταση του εδάφους, επηρεάζουν τη διάδοση και την ενέργεια των κυμάτων. Ορισμένες περιοχές είναι πιο κατάλληλες για την εξαγωγή κυματικής ενέργειας από άλλες.
3. Θαλάσσια Ρεύματα και Παλίρροιες: Η κατεύθυνση και η ένταση των θαλάσσιων ρευμάτων και η παλίρροια μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση των κυμάτων και, ως εκ τούτου, την κυματική ενέργεια που είναι διαθέσιμη σε μια περιοχή (33).

Επιπλέον, η κυματική ενέργεια είναι πιο υψηλή σε περιοχές που βρίσκονται στην εύκρατη ζώνη, με γεωγραφικά ύψη μεταξύ 30° και 60°. Σε αυτές τις περιοχές, η δυναμική των κυματισμών είναι υψηλότερη, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 20-70GW/m κυματικού μετώπου. Αυτό καθιστά αυτές τις περιοχές περισσότερο κατάλληλες για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας.

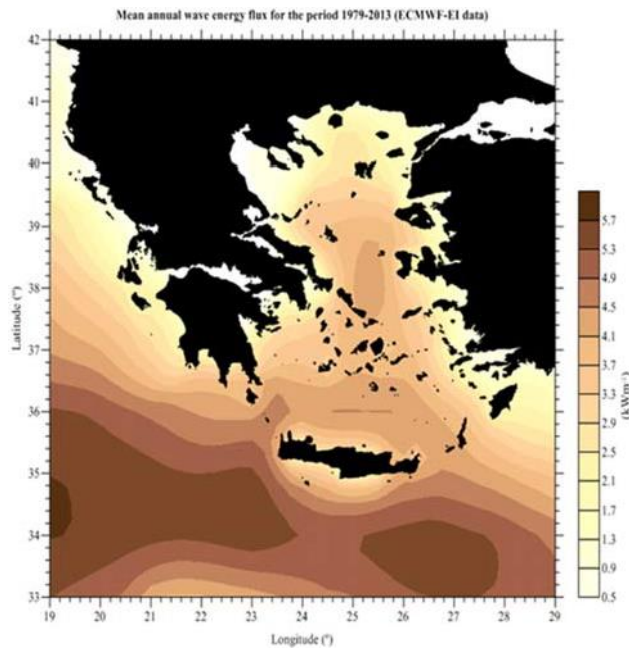


Εικόνα 13 Ετήσιο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό (46)

Υπολογίζεται πως το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό των χωρών της Ε.Ε. είναι 150-230 TWh/γ, εκ των οποίων τα 4-11TWh/γ αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες. Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στην Μεσόγειο (34), ενώ στην εικόνα 15 παρουσιάζεται κατ' αντιστοιχία το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στις Ελληνικές θάλασσες.



Εικόνα 14 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό στη Μεσόγειο (34)



Εικόνα 15 Μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό ανά μήκος μετώπου κύματος (34)

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας

Η κυματική ενέργεια έχει γνωρίσει βραδύτερη ανάπτυξη και χαμηλότερες επενδύσεις σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά γίνονται προσπάθειες για τη μείωση του κόστους και την αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων ώστε να αυξηθεί η ανάπτυξη της. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας, όπως πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσφέρουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Ακολουθεί μια λεπτομερής ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των συσκευών κυματικής ενέργειας, βασισμένη σε εκτενή βιβλιογραφία (2) (14) (35):

Πλεονεκτήματα

1. Η κυματική ενέργεια θεωρείται ότι έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση γης, η οποία καθίσταται πολύτιμος πόρος σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο, ιδίως λόγω της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης ζήτησης για παραγωγή τροφίμων λόγω του υπερπληθισμού. Δεδομένου ότι οι συσκευές κυματικής ενέργειας μπορούν να αναπτυχθούν σε υπεράκτιες τοποθεσίες, μειώνεται η ανάγκη για χερσαία παραγωγή ενέργειας και μειώνονται οι επιπτώσεις στα ευαίσθητα οικοσυστήματα και ενδιαίτηματα.
2. Καμία ρύπανση ή θάνατος: Σε αντίθεση με τις πετρελαιοκηλίδες και τη ρύπανση από ορυκτά καύσιμα όπως ο άνθρακας, δεν υπάρχει σχεδόν καμία ρύπανση από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα.
3. Παγκόσμιο δυναμικό: Με ένα εκτιμώμενο παγκόσμιο δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 2 terawatts (TW) από τα κύματα, υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας σε έναν από τους πολλούς πόρους για το μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα ωκεάνια κύματα υπάρχουν κατά μήκος των ακτογραμμών σε όλο τον κόσμο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές περιοχές. Ειδικότερα, οι περιοχές με ισχυρά, σταθερά κυματικά πρότυπα και υψηλό δυναμικό κυματικής ενέργειας, όπως ο βόρειος Ειρηνικός Ωκεανός, ο Ατλαντικός Ωκεανός της Ευρώπης και ο νότιος Ινδικός Ωκεανός, έχουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες για την παραγωγή κυματικής ενέργειας. Με τη συνεχή τεχνολογική πρόοδο και την αύξηση των επενδύσεων, η κυματική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να καταστεί σημαντικός συντελεστής στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα.
4. Προβλέψιμη πηγή ενέργειας: Τα ωκεάνια κύματα κινούνται από τον άνεμο και τη βαρυτική έλξη της σελήνης, τα οποία ακολουθούν κανονικά μοτίβα. Τα μοτίβα αυτά μπορούν να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν με μεγάλη ακρίβεια, επιτρέποντας την πρόβλεψη της διαθεσιμότητας της κυματικής ενέργειας. Η προβλεψιμότητα της κυματικής ενέργειας θεωρείται υψηλότερη από εκείνη της αιολικής ενέργειας, αλλά χαμηλότερη από εκείνη της ηλιακής ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι πρόοδοι στην τεχνολογία πρόβλεψης και παρακολούθησης βελτιώνουν συνεχώς την ακρίβεια των προβλέψεων της κυματικής ενέργειας. Αυτό, με τη σειρά του, διευκολύνει τους παροχείς ενέργειας να ενσωματώσουν την κυματική ενέργεια στο ενεργειακό τους καθεστώς και να σχεδιάσουν τη χρήση της με αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

5. Αποδοτική παραγωγή ενέργειας: Τα κύματα έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να παράγουν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από μια σχετικά μικρή περιοχή. Η ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων κατά μήκος των ακτογραμμών είναι περίπου 30 έως 40 kW/m κύματος, ενώ πιο έξω στον ωκεανό, τα περισσότερα κύματα μπορούν να παράγουν 100 kW/m ηλεκτρικής ενέργειας. Λιγότερο από ½ τετραγωνικό μίλι ωκεανού έχει τη δυνατότητα να παράγει περισσότερα από 30 MW ενέργειας, δηλαδή αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει 20.000 βρετανικά σπίτια.
6. Ελάχιστες οπτικές επιπτώσεις: Οι σταθμοί κυματικής ενέργειας σχεδιάζονται με στόχο την ελαχιστοποίηση των οπτικών τους επιδράσεων, προκειμένου να διατηρηθεί η ομορφιά και ο φυσικός χαρακτήρας των παράκτιων περιβαλλόντων. Η χρήση προηγμένης τεχνολογίας και σχεδιασμού σε συνδυασμό με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, διασφαλίζουν τη συμβατότητα των μονάδων κυματικής ενέργειας με το περιβάλλον, οι οποίοι δεν υποβαθμίζουν το τοπίο. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας εγκαθίστανται για να είναι κυρίως ή εξ ολοκλήρου βυθισμένες κάτω από το νερό. Οι συσκευές μπορούν να τοποθετηθούν αρκετά μακριά από την ακτή ώστε να επιτρέπουν την ελάχιστη οπτική επίδραση. Και οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας σχεδιάζονται με χρώματα και σχήματα που εναρμονίζονται με το περιβάλλον, καθιστώντας τους λιγότερο αισθητούς.
7. Μπορεί να τοποθετηθεί υπεράκτια: Οι συσκευές κυματικής ενέργειας εκτός του ότι μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στις ακτές, μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε ανοικτές ακτές, γεγονός που μειώνει τις συγκρούσεις συμφερόντων για χρήσης των ακτών για αναψυχή και αλιεία.
8. Πλεονέκτημα μεγέθους: Οι συσκευές κυματικής ενέργειας μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με την τοπική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και, ως εκ τούτου, μπορούν να κατασκευαστούν σε διαφορετικά μεγέθη που είναι κατάλληλα για κάθε τοποθεσία. Αντίθετα, τα ορυκτά καύσιμα απαιτούν γενικά μεγάλες εγκαταστάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (36)

Μειονεκτήματα

Η κυματική ενέργεια έχει ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της ως πηγής σταθερής ενέργειας που θα μπορούσε να παρέχει αρκετή ενέργεια για τις ανάγκες μας. Ας ρίξουμε μια ματιά σε αυτά.

1. Τρέχον υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης: Η ανάπτυξη και η υλοποίηση έργων κυματικής ενέργειας είναι δαπανηρή, ιδίως στα αρχικά στάδια της ανάπτυξής της. Αυτό μπορεί να καταστήσει δύσκολο το έργο της αφού ανταγωνίζεται τις καθιερωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επειδή η κυματική ενέργεια βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης, η κατασκευή κυματικών συσκευών είναι πολύ δαπανηρή. Ωστόσο, το θετικό είναι ότι, καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται και η ζήτηση για τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται, το κόστος επένδυσης και κατασκευής τεχνολογίας κυματικής ενέργειας αναμένεται να μειωθεί.
2. Τεχνικές δυσκολίες: Η αξιοποίηση της ενέργειας του ωκεανού μπορεί να είναι τεχνικά δύσκολη και υπάρχουν ακόμη πολλά τεχνικά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για να καταστεί η κυματική ενέργεια πιο αποδοτική και αποτελεσματική. Πρώτα απ' όλα, η ενέργεια που μαζεύεται από τα κύματα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, πράγμα που αποτελεί πρόκληση λόγω των διακυμάνσεων της έντασης και της κατεύθυνσης των κυμάτων. Δεύτερον, η ενσωμάτωση της κυματικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι δύσκολη, καθώς η ενέργεια που παράγεται από τις κυματικές συσκευές δεν είναι σταθερή και παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, ιδίως όταν

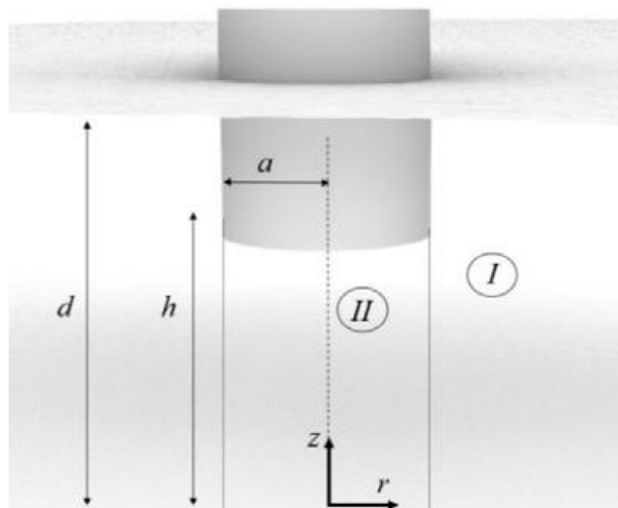
επηρεάζεται από τα ακραία καιρικά φαινόμενα, τα οποία θα μπορούσαν να γίνουν συχνότερα με την κλιματική αλλαγή.

3. Συντήρηση και επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών: Ο εξοπλισμός που εκτίθεται σε δύσκολες ωκεάνιες συνθήκες 24 ώρες το 24ωρο, καταστρέφεται ή διαβρώνεται από το αλμυρό θαλασσινό νερό. Τα συστήματα κυματικής ενέργειας απαιτούν τακτική συντήρηση προκειμένου να λειτουργούν αποτελεσματικά, η οποία μπορεί να γίνει αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα. Η ένταση και το ύψος των κυμάτων επηρεάζονται από τα μοτίβα των ανέμων που συχνά συνδέονται με καιρικά συστήματα όπως καταιγίδες και τυφώνες. Όταν τα κύματα είναι πολύ υψηλά, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στις ενεργειακές συσκευές και να μειώσουν την αποδοτικότητά τους. Ο καιρός αλλάζει επίσης την κατεύθυνση των κυμάτων. Αυτό επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των μετατροπέων κυματικής ενέργειας που είναι βελτιστοποιημένοι για μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κύματος. Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη στάθμη του νερού και αυτές έχουν άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση των συσκευών κυματικής ενέργειας που έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος στάθμης νερού.
4. Επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή: Ενώ η κυματική ενέργεια έχει χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας, εξακολουθεί να υπάρχει ο κίνδυνος να έχει αρνητικές επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα, ιδίως εάν ο εξοπλισμός δεν εγκατασταθεί και δεν συντηρηθεί σωστά. Η θαλάσσια ζωή μπορεί να πληγεί, να μετακινηθεί ή να επηρεαστεί αρνητικά ο οικότοπος της με την κατασκευή συσκευών κυματικής ενέργειας.
5. Γεωγραφικοί περιορισμοί: Η κυματική ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές των παράκτιων περιοχών και σε περιοχές με ισχυρά κύματα. Αυτό τις καθιστά λιγότερο προσιτές στους ανθρώπους που ζουν στο εσωτερικό μέρος μίας χώρας. Η ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας δεν περιορίζεται μόνο από τη διαθεσιμότητα κατάλληλων κυμάτων, αλλά και από το βάθος του νερού, την προσβασιμότητα των ακτών, τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς και τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των κυμάτων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία. Η κυματική ενέργεια είναι πιο άφθονη σε παράκτιες περιοχές με σταθερά και ισχυρά κύματα, όπως αυτά που βρίσκονται στον Βόρειο Ατλαντικό και τον Νότιο Ωκεανό. Ωστόσο, σε ορισμένες τοποθεσίες μπορεί να είναι πολύ δύσκολη η πρόσβαση για τη συντήρηση του εξοπλισμού, ιδίως σε περιοχές με δύσκολες καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί για την ανάπτυξη συσκευών κυματικής ενέργειας σε ορισμένες περιοχές, όπως οι προστατευόμενοι θαλάσσιοι οικότοποι ή οι ναυτιλιακοί δρόμοι, μπορεί να περιορίσουν τις δυνατότητες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας. Σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, η διαθεσιμότητα ενός κοντινού ηλεκτρικού δικτύου θα μπορούσε να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα.
6. Διαλείπουσα πηγή ενέργειας: Τα κύματα δεν είναι σταθερά, πράγμα που σημαίνει ότι η ενέργεια που παράγουν δεν είναι πάντα διαθέσιμη. Αυτό καθιστά την ενέργεια των κυμάτων μια διαλείπουσα πηγή ενέργειας, η οποία απαιτεί εφεδρική ενέργεια για να εξασφαλιστεί η σταθερή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Μειωμένη χρήση της θάλασσας: Η φυσική παρουσία "πάρκων" συσκευών κυματικής ενέργειας θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει το μέγεθος των διαύλων ναυσιπλοΐας, καθώς και τις ευκαιρίες για αναψυχή και αλιεία.

8. Ηχορύπανση: Οι συσκευές κυματικής ενέργειας που λειτουργούν συνεχώς μπορεί να είναι πολύ πιο θορυβώδεις από ό,τι είναι τα κύματα στη φύση, και αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να είναι ενοχλητικό τόσο για τους ανθρώπους όσο και για τη θαλάσσια ζωή που ζει κοντά στις συσκευές αυτές.
9. Αργές τεχνολογικές βελτιώσεις: Η κυματική ενέργεια αναπτύσσεται από τη δεκαετία του 1700, αλλά εξακολουθεί να είναι μια τεχνολογία που βρίσκεται σε αρχικό στάδιο και χρειάζεται περισσότερη προσοχή. Αυτή η μορφή ενέργειας ανταγωνίζεται άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Περισσότερες επενδύσεις και ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια έχουν πάει σε αυτές λόγω του χαμηλότερου κόστους και των πιο καθιερωμένων τεχνολογικών επιλογών τους. Το κόστος της ανάπτυξης συσκευών κυματικής ενέργειας και της ανάπτυξής τους σε υπεράκτιες τοποθεσίες είναι υψηλό. Το κόστος αυτό έχει περιορίσει τις επενδύσεις σε νέα έργα κυματικής ενέργειας. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με την κυματική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης για αξιόπιστα συστήματα μετατροπής ενέργειας, της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στις συσκευές και της ανάγκης για τακτική συντήρηση. Η αγορά της κυματικής ενέργειας είναι σχετικά μικρή, με περιορισμένο αριθμό χωρών με κατάλληλο κυματικό δυναμικό και επενδυτικούς πόρους. Αυτό έχει περιορίσει την ανάπτυξη της βιομηχανίας κυματικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια.
10. Δύσκολη μετάδοση κυματικής ενέργειας: Επί του παρόντος, είναι πολύ δύσκολο να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα ωκεάνια κύματα σε μεγάλες αποστάσεις μέχρι το σημείο όπου θα καταναλωθεί στην ενδοχώρα. Η μεταφορά της κυματικής ενέργειας από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης παρουσιάζει αυτές τις προκλήσεις:
- Απόσταση: Συχνά οι συσκευές υπεράκτιας κυματικής ενέργειας βρίσκονται μακριά από την ακτή και απαιτούν γραμμές μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων για τη σύνδεσή τους με το ηλεκτρικό δίκτυο.
 - Ποιότητα ισχύος: Η ισχύς που παράγεται από τις συσκευές κυματικής ενέργειας μπορεί να είναι μεταβλητή και να αυξομειώνεται σε ένταση. Αυτό επηρεάζει την ποιότητα της μεταδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Ενσωμάτωση στο δίκτυο: Η ενσωμάτωση της κυματικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, καθώς η ενέργεια που παράγεται από τις κυματικές συσκευές δεν είναι σταθερή και παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις. Η διαλείπουσα φύση της θα επηρέαζε τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου με τον τρέχοντα τύπο υποδομής που έχει δημιουργηθεί για τα ορυκτά καύσιμα.
 - Κόστος: Το κόστος μεταφοράς της κυματικής ενέργειας μπορεί να είναι υψηλό λόγω της ανάγκης για γραμμές μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις και της ανάγκης για προηγμένες τεχνολογίες μετατροπής και διαχείρισης ισχύος.
11. Οπτικές επιπτώσεις: Οι οπτικές επιπτώσεις των συσκευών κυματικής ενέργειας ποικίλουν ανάλογα με τη θέση και το σχεδιασμό των συσκευών. Παρά τις προσπάθειες ελαχιστοποίησης των οπτικών επιπτώσεων, για τους κατοίκους που ζουν κοντά σε ωκεάνιες ακτές, ορισμένοι τύποι συσκευών κυματικής ενέργειας μπορεί να είναι αντιαισθητικοί και να παρεμποδίζουν τη θέα στον ωκεανό. Οι υπεράκτιες συσκευές κυματικής ενέργειας μπορεί να είναι ορατές από την ακτή και μπορεί να επηρεάσουν την αισθητική ελκυστικότητα της ακτογραμμής. Η αντανάκλαση του φωτός από τις συσκευές κυματικής ενέργειας μπορεί να επηρεάσει την ορατότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ιδίως τη νύχτα. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας μπορεί επίσης να ρίχνουν σκιές στο νερό και να αλλοιώνουν την ορατότητα των υποβρυχίων που ενδιαφέρονται για την προστασία και διατήρηση ενδιαιτημάτων άγριας ζωής. (36)

3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά του θεωρητικού υπόβαθρου της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες έρευνες για την υδροδυναμική ανάλυση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας, η απόληψη της οποίας βασίζεται στον ταλαντευόμενο σημειακό απορροφητή (point absorber) κυλινδρικής γεωμετρίας με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας. Η μέθοδος βασίζεται στο διαχωρισμό του πεδίου της ροής γύρω από το σώμα, χρησιμοποιώντας ομοαξονικά δακτυλιοειδή στοιχεία, (βλέπε Εικόνα 16). Παρατηρούμε ότι κάθε σώμα της μορφής που εξετάζουμε και εμφανίζει συμμετρία ως προς κατακόρυφο άξονα, μπορεί να προσεγγιστεί με ομοαξονικά κυλινδρικά δακτυλιοειδή στοιχεία και ταυτόχρονα, το πεδίο ροής γύρω του διαχωρίζεται από αντίστοιχα κυλινδρικά δακτυλιοειδή στοιχεία, τα οποία ορίζονται τώρα από την βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος, την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και τον πυθμένα. Επομένως, έχουμε πεπερασμένα δακτυλιοειδή στοιχεία, που καλύπτουν το πεδίο ροής γύρω από το σώμα αλλά και ένα που επεκτείνεται μέχρι το άπειρο. Το τελευταίο «απείρου μεγέθους» δακτυλιοειδές στοιχείο χαρακτηρίζεται σαν τύπου I ενώ το «πεπερασμένο» δακτυλιοειδές στοιχείο II εκτείνεται μεταξύ του σώματος και του πυθμένα.



Εικόνα 16 Διαχωρισμός ροής γύρω από σημειακό απορροφητή

3.1 Διατύπωση υδροδυναμικού προβλήματος (περίθλαση – ακτινοβολία)

Εξετάζεται ο σημειακός απορροφητής (point absorber), κυκλικής διατομής με ακτίνα a και βύθισμα $(d - h)$. Η ροή του ρευστού θεωρείται αστρόβιλη, ασυμπιεστή και μη συνεκτική, οπότε μπορεί να περιγράψει από δυναμικό ταχύτητας. Λόγω της γεωμετρίας των εξεταζόμενων σωμάτων, χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες (r, θ, z) , με αρχή τον πυθμένα της θάλασσας, και κατακόρυφο άξονα πάνω στον νοητό άξονα συμμετρίας κάθε συσκευής, διευθυνόμενο προς τα πάνω. Θεωρείται ότι το βάθος του νερού d , είναι σταθερό και ότι η ελεύθερη επιφάνεια είναι άπειρη προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι κινήσεις των κυματικών συσκευών και του περιρρέοντος ρευστού θεωρούνται μικρές ώστε το πρόβλημα περίθλασης και ακτινοβολίας να θεωρείται γραμμικό. Υπό την επίδραση ενός αρμονικού κυματισμού και υποθέτοντας ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα περί τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, το σώμα εκτελεί κίνηση σε τρεις βαθμούς ελευθερίας στο επίπεδο διάδοσης του κυματισμού, δύο μεταφορικές κινήσεις (στον άξονα x' , x_1 , καθ' ύψος μετατόπιση στον άξονα z' , x_3) και μια περιστροφή γύρω από τον άξονα yy' , x_5 .

Υποθέτοντας ιδανικό ρευστό, μπορούμε να περιγράψουμε το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού γύρω από το σώμα κάνοντας χρήση του δυναμικού ταχύτητας, το ανάδελτα του οποίου, δίνει την ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου.

Το δυναμικό της ταχύτητας πρώτης τάξης μπορεί να εκφραστεί ως (37):

$$\Phi(r, \theta, z, t) = Re \left\{ \varphi_0(r, \theta, z) * e^{-\omega t} + \varphi_7(r, \theta, z) * e^{-\omega t} + \sum_{j=1,3,5}^n \dot{x}_{j0} * \varphi_j(r, \theta, z) * e^{-\omega t} \right\} \quad [3.1]$$

όπου φ_0 είναι το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος απλού αρμονικού κυματισμού, φ_7 είναι το δυναμικό σκέδασης (scattered wave potential) γύρω από το σώμα όταν αυτό είναι ακίνητο στον κυματισμό, φ_j , ($j=1,3,5$) είναι το δυναμικό ακτινοβολίας, το οποίο προκύπτει από την εξαναγκασμένη κίνηση του σώματος στην j -διεύθυνση της κίνησης με μοναδιαίο πλάτος ταχύτητας \dot{x}_{j0} στην j -διεύθυνση.

Το δυναμικό της περίθλασης (diffraction potential) ισούται με:

$$\varphi_D(r, \theta, z) = \varphi_0(r, \theta, z) + \varphi_7(r, \theta, z) \quad [3.2]$$

Το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος απλού αρμονικού κυματισμού μπορεί να εκφραστεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες ως εξής :

$$\varphi_0(r, \theta, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=0} \varepsilon_m i^m \Psi_{0,m}(r, z) \cos(m\theta) \quad [3.3]$$

Όπου

$$\frac{1}{d} \Psi_{0,m}(r, z) = \frac{J_m(kr) Z_0(z)}{d Z'_0(d)} \quad [3.4]$$

Εδώ, J_m είναι οι συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους και m -τάξης, ε_m είναι το σύμβολο Neumann, με $\varepsilon_0 = 1$ και $\varepsilon_m = 2$, όταν $m \geq 1$, και Z_0 ορίζεται από τη σχέση:

$$Z_0(z) = N_0^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) = \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) \quad [3.5]$$

με $Z'_0(d)$ τη παράγωγο της σχέσης [3.5] ως προς z , όταν $z=d$.

Η κυκλική συχνότητα ω και ο κυματικός αριθμός k συνδέονται μέσω της εξίσωσης διασποράς:

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad [3.6]$$

Σε συμφωνία με τη σχέση (3.3) το δυναμικό περίθλασης γύρω από την κάθε κατασκευή μπορεί να γραφεί στη μορφή :

$$\varphi_D(r, \theta, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=0} \varepsilon_m i^m \Psi_{D,m}(r, z) \cos(m\theta) \quad [3.7]$$

ενώ τα δυναμικά ακτινοβολίας λόγω κίνησης

$$\varphi_j(r, \theta, z) = \Psi_{j,m}(r, z) \cos(m\theta) \Big|_{j=1,3,5} \quad [3.8]$$

Η ροή του ρευστού, που προκαλείται από την ταλαντωτική κίνηση της συσκευής, σε ήρεμο νερό για την περίπτωση εξαναγκασμένης κίνησής της στον x '-άξονα (surge, $j=1$) και για την περιστροφή γύρω από τον y ' άξονα (pitch, $j=5$) είναι συμμετρική με αναφορά το επίπεδο $\theta=0^\circ$ και αντισυμμετρική αναφορικά με το επίπεδο $\theta = \frac{\pi}{2}$, ενώ είναι συμμετρική αναφορικά και με τα δύο επίπεδα για την καθ' ύψος κίνηση στον άξονα z ' (heave, $j=3$).

Επομένως η σχέση 3.8 γράφεται

$$\varphi_1(r, \theta, z) = \Psi_{1,1}(r, z) \cos(\theta)$$

$$\varphi_3(r, \theta, z) = \Psi_{3,0}(r, z) \quad [3.9]$$

$$\varphi_5(r, \theta, z) = \Psi_{5,1}(r, z) \cos(\theta)$$

Στις συναρτήσεις $\Psi_{j,m}$ των εξισώσεων [3.7], [3.9], ο πρώτος δείκτης $j = D, 1, 3, 5$, δηλώνει το αντίστοιχο πρόβλημα οριακών τιμών, ενώ ο δεύτερος τις τιμές m που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Για τον λόγο αυτό οι συναρτήσεις $\Psi_{D,m}(m = 1, 2, 3, \dots)$, $\Psi_{1,1}$, $\Psi_{3,0}$, $\Psi_{5,1}$ παραμένουν οι βασικοί άγνωστοι του προβλήματος.

3.2 Αλληλεπίδραση κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ επιπλεόντων σωμάτων αποτελεί ένα πρόβλημα ιδιαίτερης σημασίας στον σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών σύνθετης μορφής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η παρουσία γειτονικών σωμάτων επηρεάζει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής. Κάθε σώμα ανακλά κυματισμούς που επιδρούν στα υπόλοιπα, τα οποία ανταποκρίνονται δημιουργώντας επιπρόσθετους κυματισμούς. Αυτοί συμβάλλουν στην αλληλεπίδραση και ενισχύουν τη διέγερση του αρχικού σώματος.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η επίλυση του υδροδυναμικού προβλήματος αλληλεπίδρασης μεταξύ κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων σταθερών ως προς προσπίπτοντες αρμονικούς κυματισμούς. Με τη χρήση μιας ακριβούς αναλυτικής μεθόδου, προκύπτουν σειρές αναπαράστασης του δυναμικού ταχύτητας, οι οποίες απλοποιούνται κατά το στάδιο της διαδικασίας αριθμητικής επίλυσης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός μεμονωμένου σώματος και λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης. Δεδομένου ότι οι οριακές συνθήκες ικανοποιούνται διαδοχικά σε κάθε σώμα της σύνθετης διάταξης, επιτυγχάνεται μια σημαντική μείωση τόσο του χρόνου υπολογισμού, όσο και του απαιτούμενου αποθηκευτικού χώρου του Η/Υ. Η αναγκαία επίλυση του προβλήματος περίθλασης για μεμονωμένο αξονοσυμμετρικό σώμα της διάταξης επιτυγχάνεται με τη μέθοδο του συνδυασμού των ίδιο συναρτήσεων, για το δυναμικό ταχύτητας στο πεδίο του ρευστού που περιβάλλει κάθε σώμα.

Διατύπωση του προβλήματος Περίθλασης

Ένας αρμονικός κυματισμός, πλάτους $H/2$, συχνότητας ω και αριθμού κύματος k , που διαδίδεται σε νερό βάθους d , προσπίπτει σε μια ομάδα N σταθερών, τυχαίας μορφής, κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων. Κάθε ένα από αυτά μπορεί να είναι είτε μερικώς είτε ολικώς βυθισμένο, είτε πακτωμένο στον πυθμένα. Υποθέτουμε μικρό πλάτος κυματισμών, μη-συνεκτική ασυμπίεστη και αστρόβιλη ροή, ώστε να ισχύει η γραμμική θεωρία. Χρησιμοποιείται καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $O-XYZ$, με αρχή των αξόνων στον πυθμένα και τη φορά του κατακόρυφου άξονα Oz προς τα πάνω (Εικόνα 16). Τα επιμέρους N κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων (r_p, θ_p, z_p) , $p=1,2,\dots,N$, ορίζονται επίσης με την αρχή των αξόνων τους στον πυθμένα.

Το ολικό δυναμικό της ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από τα σταθερά ως προς τους κυματισμούς σώματα, περιγράφεται ως εξής:

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}[\Phi(x, y, z) * e^{-i\omega t}] \quad [3.10]$$

Όπου το σύνθετο δυναμικό λειτουργίας $\Phi(x, y, z)$ μπορεί να εκφραστεί βάσει της γραμμικής θεωρίας ως υπέρθεση του δυναμικού πρόσπτωσης Φ_I και του δυναμικού διάθλασης Φ_B :

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_B \quad [3.11]$$

Το δυναμικό Φ πρέπει να αποτελεί λύση της εξίσωσης Laplace σε όλο το πεδίο ροής και να ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες:

$$\omega^2 \Phi - g \frac{d\Phi}{dz} = 0 \quad \text{για } z=d \text{ (συνθήκη ελεύθερης επιφανείας)}$$

$$\frac{d\Phi}{dz} = 0 \quad \text{για } z=0 \text{ (συνθήκη για τον πυθμένα της θάλασσας)} \quad [3.12]$$

$$\frac{d\Phi}{dn^{(p)}} = 0, \quad p = 1, 2, \dots, N \text{ στο } S^{(p)}, \quad p = 1, 2, \dots, N \quad [3.13]$$

Επιπλέον το δυναμικό διάθλασης Φ πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη ακτινοβολίας στο άπειρο:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{d}{dr} - ik \right) \Phi_B = 0 \quad [3.14]$$

$$\text{Όπου } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ισχύει ότι:

$$\Phi_I(r_p, \theta_p, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{I,m}(r_p, z) e^{-im\theta_p} \quad [3.15]$$

Με

$$\frac{1}{d} \Psi_{I,m}(r_p, z) = \frac{e^{ikl_{op} \cos(\theta_{op}-\beta) Z_0(z)}}{dZ'_0(d)} J_m(kr_p) e^{-im\beta} \quad [3.16]$$

Όπου

$J_m(kr_p)$: η m στής τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους

$$Z_0(z) = N_0^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) = \left[\frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \right]^{-\frac{1}{2}} \cosh(kz) \quad [3.17]$$

με $Z'_0(d)$ τη παράγωγο της σχέσης [3.5] ως προς z , όταν $z=d$.

Η κυκλική συχνότητα ω και ο κυματικός αριθμός k συνδέονται μέσω της εξίσωσης διασποράς:

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad [3.18]$$

Το ολικό δυναμικό της ταχύτητας εκφρασμένο σε κυλινδρικές συντεταγμένες του p -στού σώματος (r_p, θ_p, z) προκύπτει ως (23):

$$\Phi(r_p, \theta_p, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_m(r_p, z) e^{-im\theta_p} \quad [3.19]$$

Θεωρώντας ότι το αξονοσυμμετρικό σώμα p ($p=1, 2, \dots, N$) της διάταξης διεγείρεται αρχικά μόνο από το αδιατάρακτο προσπίπτοντα κυματισμό, έχουμε για την «1^η τάξη της περίθλασης» την επίλυση του προβλήματος ${}^1\Phi_I^{(p)} + {}^1\Phi_B^{(p)} = {}^1\Phi^{(p)}$, με :

$${}^1\Phi_I^{(p)} = \sum_{q=1}^N {}^1\Phi_B^{(p)}$$

Στη συνέχεια, σε απόκριση όλων των κυματισμών της «1^{ης} τάξης της περίθλασης» από τα υπόλοιπα σώματα («2^η τάξη της διέγερσης» για το ρ-στο σώμα), το ρ-στο σώμα ακτινοβολεί ένα κύμα της «2^{ης} τάξης της περίθλασης», ώστε και πάλι να ικανοποιείται η εξίσωση του ολικού δυναμικού (2^{ης} τάξης πλέον), ${}^2\Phi_I^{(p)} + {}^2\Phi_B^{(p)} = {}^2\Phi^{(p)}$, με:

$${}^2\Phi_I^{(p)} + \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^1\Phi_B^{(q)}$$

Με αυτόν τον τρόπο προχωρούμε στην s τάξη αλληλεπίδρασης για κάθε σώμα p ($p=1,2,\dots,N$) της διάταξης. Τα αντίστοιχα δυναμικά πρόσπτωσης, περίθλασης και το ολικό δυναμικό θα είναι:

$${}^s\Phi_j^{(p)} = \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^{s-1}\Phi_B^{(q)}(r_p, \theta_p, z) \quad s \geq 2$$

[3.20]

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z), \quad {}^s\Phi^{(p)} = {}^1\Phi_I^{(p)} + {}^s\Phi_B^{(p)}$$

Με το s να τείνει στο άπειρο, και με υπέρθεση των τάξεων αλληλεπίδρασης, προκύπτουν:

- Το περιθλώμενο κύμα από το ρ-στο σώμα:

$$\Phi_B^{(p)} + \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) \quad [3.21]$$

- Το προσπίπτον ρ-στο σώμα κύμα :

$$\Phi_I^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi_I^{(p)} = {}^1\Phi_I^{(p)}(r_p, \theta_p, z) + \sum_{s=2}^{\infty} \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^{s-1}\Phi_B^{(q)}(r_p, \theta_p, z) \quad [3.22]$$

- Το ολικό πεδίο κύματος γύρω από το ρ-στο σώμα :

$$\begin{aligned} \Phi^{(p)} &= \Phi_I^{(p)} + \Phi_B^{(p)} = {}^1\Phi_I^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^{s-1}\Phi_B^{(q)} \\ &= {}^1\Phi_B^{(p)} + {}^1\Phi_B^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \left[{}^s\Phi_B^{(p)} + \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^{s-1}\Phi_B^{(q)} \right] \\ &= {}^1\Phi^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \left[{}^s\Phi_B^{(p)} + {}^s\Phi_I^{(p)} \right] = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi^{(p)} \end{aligned} \quad [3.23]$$

Κάθε τάξη των δυναμικών περίθλασης ${}^s\Phi_B^{(p)}$ που συμβάλλουν στο ολικό δυναμικό ${}^s\Phi^{(p)}$, ($p=1,2,\dots,N$), μπορεί να περιγραφεί ως:

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m {}^s\Psi_{B,m}^{(p)}(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad [3.24]$$

με

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_{B,m}^{(p)}(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} {}^sF_{j,m}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)} Z_j(z) \quad [3.25]$$

Όπου K_m : είναι η δευτέρου είδους τροποποιημένη συνάρτηση Bessel m τάξης

$Z_j(z)$: είναι ορθοκανονικές συναρτήσεις στο $[0,d]$, για $j \geq 1$:

$$Z_j(z) = N_j^{-1/2} \cos(a_j z) \quad [3.26]$$

$$N_j = \left[1 + \frac{\sin(2a_j d)}{2a_j d} \right] \quad [3.27]$$

a_j : είναι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης

$$\frac{\omega^2}{g} + a_j \tan(a_j d) = 0 \quad [3.28]$$

Η οποία έχει δύο φανταστικές και άπειρες πραγματικές ρίζες.

Εδώ λαμβάνονται υπόψη η φανταστική $a_0 = ik, k>0$, και οι πραγματικές θετικές ρίζες. Αντικαθιστώντας $a_0 = ik$, έχουμε:

$$K_m(-ikr_p) = \frac{\pi}{2} i^{m+1} H_m(kr_p) \quad [3.29]$$

Όπου H_m εκφράζει την συνάρτηση Hankel, που ικανοποιεί την συνθήκη ακτινοβολίας του Sommerfeld.

Οι συντελεστές περίθλασης s -τάξης στην εξίσωση [3.25] θα λαμβάνονται μέσω της επίλυσης του προβλήματος περίθλασης της αντίστοιχης τάξης, που περιγράφεται από το δυναμικό ταχύτητας ${}^s\Phi^{(p)}$ – στο σύστημα συντεταγμένων του σώματος p . Μόλις οι συντελεστές αυτοί έχουν προσδιοριστεί, το δυναμικό ${}^s\Phi^{(p)}$ γύρω από το σώμα p , ($p=1,2,\dots,N$) της διάταξης μπορεί να βρεθεί με κατάλληλη αντικατάσταση της εξίσωσης [3.24] στην [3.20].

Ωστόσο, αν κάθε ένα από τα περιθλόμενα κύματα ${}^{s-1}\Phi_B^{(q)}(r_q, \theta_q, z)$, ($q = 1,2,\dots,N: q \neq p$) εκφραστεί μέσω διαφορετικών συντεταγμένων, οι προκύπτουσες εκφράσεις είναι δύσκολες ως προς το χειρισμό τους. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας το θεώρημα των συναρτήσεων του q -στου σώματος (r_q, θ_q, z) μπορούν να μετατραπούν και να εκφραστούν ως προς το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς (r_p, θ_p, z) . Έτσι έχουμε:

$$K_\nu(a_j r_q) e^{i\nu\theta_q} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m K_{\nu-m}(a_j J_{qp}) I_m(a_j r_p) e^{i(\nu-m)\theta_{qp}} e^{im\theta_p} \quad [3.30]$$

Με τον περιορισμό ότι $r_q < I_{qp}$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, όλοι οι όροι του δυναμικού ταχύτητας ${}^s\Phi^{(p)}$, που περιγράφονται στην εξίσωση [3.20] μπορούν τώρα να εκφραστούν στα πλαίσια του συστήματος συντεταγμένων του ρ-στού σώματος, για παράδειγμα:

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_m^{(p)}(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad [3.31]$$

με

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_m^{(p)}(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} [{}^sQ_{j,m}^{(p)} \frac{I_m(a_j r_p)}{I_m(a_j b_p)} + F_{j,m}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)}] Z_j(z) \quad [3.32]$$

Όπου I_m : δηλώνει την μετασχηματισμένη συνάρτηση Bessel m-τάξης

$$\text{και } {}^sQ_{j,m}^{(p)} = \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{qp}) \sum_{\omega=-\infty}^{\infty} i^{m+\nu} \frac{K_{m-\nu}(a_j I_{qp})}{K_{\nu}(a_j b_p)} I_m(a_j b_p) \times {}^{s-1}F_{\nu}^{(q)} e^{i(\nu-m)\theta_{qp}}, \quad s \geq 2 \quad [3.33]$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (3.32) αντιπροσωπεύει την συμβολή του προσπίπτοντας κύματος s-της τάξης, ${}^s\Phi_I^{(p)}$, στο δυναμικό ${}^s\Phi^{(p)}$. Ειδικά για την αλληλεπίδραση 1^{ης} τάξης, s=1, το δυναμικό αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού, ${}^1\Phi_I^{(p)}$, δίνεται από την εξίσωση [3.15]. Ωστόσο, προκειμένου να υπάρχει ενιαίος τρόπος έκφρασης για τα δυναμικά ταχύτητας ${}^s\Phi^{(p)}$ για όλες τις τάξεις αλληλεπίδρασης, χρησιμοποιείται η εξής έκφραση:

$${}^1Q_{j,m}^{(p)} = i^m \frac{e^{ikl_{op} \cos(\theta_{op}-\beta)} e^{-im\beta}}{dZ'_0(d)} I_m(a_j b_p) \delta_{oj} \quad [3.34]$$

$$J_m(k_{rp}) = i^m I_m(-k_{rp}) = i^m I_m(a_0 r_p) \quad [3.35]$$

Πλέον με τις εκφράσεις [3.31], [3.32] το ολικό δυναμικό $\Phi^{(p)}$ όπως δίνεται στην εξίσωση (3.23) γράφεται ως εξής:

$$\frac{1}{d} \Psi_m(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[Q_{j,m}^{(p)} \frac{I_m(a_j r_p)}{I_m(a_j b_p)} + F_{j,m}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)} \right] Z_j(z) \quad [3.36]$$

με

$$Q_{j,m}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} (s) Q_{j,m}^{(p)}, \quad F_{j,m}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s F_{j,m}^{(p)} \quad [3.37]$$

Έτσι, το ολικό δυναμικό ταχύτητας γύρω από το ρ-στο σώμα της διάταξης προκύπτει από την υπέρθεση του αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού με τις περιθλάσεις διαφόρων τάξεων, οι οποίες οφείλονται στο ρ σώμα καθώς και τα υπόλοιπα της διάταξης. Με τον τρόπο αυτό, η σχέση [3.36] μας επιτρέπει να μελετήσουμε το ρ-στο σώμα, (ρ=1,2,...,N), ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των γειτονικών σωμάτων μέσω της επίδρασης τους στο δυναμικό ρόης του ρ-στού σώματος.

3.3 Προσδιορισμός των συντελεστών περίθλασης S^{ns} τάξης

Από την επίλυση του προβλήματος περίθλασης s -τάξης για κάθε επιμέρους σώμα της σύνθετης διάταξης προκύπτουν οι άγνωστοι συντελεστές $F_{j,m}^{(p)}$, ($p=1, 2, \dots, N$) που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις [2.25] και [2.37].

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια ημι-αναλυτική προσέγγιση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη γεωμετρία του κατακόρυφου κυλινδρικού σώματος (εικόνα 16) που μελετάται στην παρούσα ανάλυση.

Δεδομένου ότι στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης, κάθε σώμα της πολλαπλής διάταξης μελετάται ξεχωριστά, οι εκθέτες και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται στην προηγούμενη ενότητα για τη ταυτοποίηση του p -στού σώματος, παραλείπονται στην ακόλουθη ενότητα για λόγους απλοποίησης της σημειογραφίας. Το s -τάξης δυναμικό ταχύτητας ${}^s\Phi$, γύρω από την εξεταζόμενο σώμα εκφράζεται μέσω των δικών του κυλινδρικών συντεταγμένων ως εξής:

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m {}^s\Psi_m(r_p, z) e^{im\theta} \quad [3.38]$$

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της κατασκευής (εικόνα 16), η εξίσωση [2.13], στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος μπορεί να διατυπωθεί ξεχωριστά για τα οριζόντια και για τα κάθετα όρια του εξεταζόμενου σώματος:

$$\frac{d {}^s\Psi_m}{dz} = 0 \quad [3.39]$$

Για $r \leq a$ και $z = h$

$$\frac{d {}^s\Psi_m}{dr} = 0 \quad [3.40]$$

Για $r=a$, $h \leq z \leq d$

Επιπλέον, το δυναμικό της ταχύτητας καθώς και η παράγωγός του $\frac{d {}^s\Phi}{dz}$ πρέπει να είναι συνεχείς στα κάθετα όρια των γειτονικών περιοχών ρευστού. Κατά συνέπεια:

$${}^s\Psi_m^I(a, z) = {}^s\Psi_m^{II}(a, z), \quad 0 \leq z \leq h \quad [3.41]$$

$$\left. \frac{\Psi_{i,m}^I(a,z)}{dr} \right|_{r=a} = \left. \frac{\Psi_{i,m}^{II}(a,z)}{dr} \right|_{r=a} \quad [3.42]$$

Στην παραπάνω ανάλυση ο εκθέτης I σχετίζεται με το «άπειρο»-εξωτερικό μακροστοιχείο, ενώ ο εκθέτης II για το μακροστοιχείο που αναφέρεται στο από «κάτω πεδίο» ροής.

Ξεκινώντας με την μέθοδο χωριζομένων μεταβλητών της διαφορικής εξίσωσης Laplace, μπορούν να βρεθούν κατάλληλες εκφράσεις για τα δυναμικά ταχύτητας ${}^s\Psi_m$ σε κάθε μακροστοιχείο. Οι εκφράσεις αυτές αναλυμένες σε σειρές Fourier επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται:

- η κινηματική οριακή συνθήκη στα οριζόντια τοιχώματα της κυματικής συσκευής,
- η γραμματικοποιημένη συνθήκη στην επιφάνεια τις θάλασσας,
- η κινηματική συνθήκη για τον πυθμένα,
- η συνθήκη ακτινοβολίας σε μεγάλη απόσταση από το σώμα.

Η κατάλληλη έκφραση για την ${}^s\Psi_m^I$ στο μακρο-στοιχείο τύπου I (βλέπε εικόνα 16) δίνεται στην προηγούμενη ενότητα από την εξίσωση [3.32]. Οι s-τάξεις συντελεστές διάθλασης ${}^sF_{j,m}^{(p)}$ όπως δόθηκαν στη σχέση [3.31] παριστούν, τους του άγνωστους συντελεστές Fourier ${}^sF_{j,m}^I$ στην εξωτερική περιοχή του ρ-σώματος.

Για τον τύπο μακρο-στοιχείου II δίνεται η ακόλουθη έκφραση της συνάρτησης ${}^s\Psi_m^{II}$.

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_m^{II}(r, z) = \sum_{l=0}^{\infty} \epsilon_n {}^sF_{ml}^{II} \frac{I_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right)}{I_m\left(\frac{n\pi a}{h}\right)} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right), \quad 0 \leq r \leq a, \quad 0 \leq z \leq h \quad [3.43]$$

ϵ_n είναι το σύμβολο του Neumann.

$$\epsilon_n = 1, \epsilon_n = 2 \quad n \geq 1$$

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η μορφή των επιλεγμένων λύσεων των συναρτήσεων ${}^s\Psi_m$ είναι τέτοια ώστε οι οριακές συνθήκες σε όλα τα οριζόντια όρια των μακρο-στοιχείων καθώς και στο $r = a$ να ικανοποιούνται *a priori*. Η κινηματική συνθήκη, εξίσωση [3.39] καθώς και οι απαιτήσεις για συνέχεια της συνάρτησης δυναμικού και των πρώτων παραγώγων της, εξισώσεις [3.40],[3.42], στις κατακόρυφες οριακές συνθήκες των γειτονικών περιοχών ρευστού, ικανοποιούνται. Εκφράζοντας αυτές τις συνθήκες, προκύπτει ένα σύστημα άπειρων γραμμικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών διάθλασης s-τάξης ${}^sF_{mj}^I$ στην περιοχή I του ρευστού (εικόνα 16) για κάθε επιμέρους σώμα.

Έχοντας ορίσει το δυναμικό ταχύτητας σε όλες τις περιοχές του ρευστού γύρω από κάθε σώμα της πολυσύνθετης διαμόρφωσης, η υδροδυναμική πίεση λαμβάνεται από την γραμμικοποιημένη εξίσωση του Bernoulli:

$$p = -\rho \frac{d\Phi}{dt} = i\omega\rho\Phi e^{-i\omega t} \quad [3.44]$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές που ενεργούν για το σώμα ρ, ($\rho=1,2, \dots, N$), μπορούν να υπολογιστούν με ολοκλήρωση της πίεσης στη μέση βρεχόμενη επιφάνεια χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$F = - \iint_{S_p} p n dS \quad [3.45]$$

Και

$$M = - \iint_{S_p} p (\mathbf{r} \times \mathbf{n}) dS \quad [3.46]$$

όπου το \mathbf{r} υποδηλώνει ένα διάνυσμα θέσης που εκτείνεται από το σημείο αναφοράς των δυνάμεων και ροπών σε ένα τοπικό σημείο στο S_p . Ολοκλήρωση των [3.45] και [3.46] οδηγεί σε αναλυτικές εκφράσεις για τις διεγείρουσες φορτίσεις των κυματισμών που δρουν σε κάθε «βαθμίδα» της κατασκευής (38).

4 Μεθοδολογία

4.1 Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης. Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας

Συζευγμένες εξισώσεις κίνησης

Η υδροδυναμική ανάλυση της πλωτής αγκυρωμένης συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας, απαιτεί την σύζευξη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλωτήρα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος αγκύρωσης. Η εξίσωση [4.1] περιγράφει τις εξισώσεις κίνησης κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών κυματικών μετατροπένων. Το σύστημα των συζευγμένων εξισώσεων στην γενική περίπτωση κίνησης αξονοσυμμετρικού κυματικού μετατροπέα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας που κινείται στο επίπεδο πρόσπτωσης του μπορεί να γραφτεί με βάση τις εξισώσεις ως ακολούθως (31):

$$\sum_{j=1,3,5} (m_{ij} + a_{ij}) \ddot{\xi}_{j0} + (b_{ij} + b_{PTO,i}) \dot{\xi}_{j0} + (c_{ij}^h) \xi_{j0} = F_{exc,i} \quad [4.1]$$

Όπου ξ_{j0} είναι το άνησμα των μετατοπίσεων της κατασκευής στους τρεις βαθμούς ελευθερίας, m_{ij} είναι το γενικευμένο μητρώο της μάζας που δίνεται από την σχέση [4.2] πιο κάτω, a_{ij} , b_{ij} είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης στην κατεύθυνση i λόγω της κίνησης της κατασκευής στην κατεύθυνση j , c_{ij}^h είναι το μητρώο των υδροστατικών συντελεστών επαναφοράς, που δίνεται από τη σχέση [4.3] πιο κάτω.

Το γενικευμένο μητρώο μάζας στην εξίσωση (4.1) για τους έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης της κατασκευής είναι:

$$m_{ij} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m * X_{g3} & 0 \\ 0 & m & 0 & -m * X_{g3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m * X_{g3} & 0 & J_{44} & 0 & -J_{46} \\ m * X_{g3} & 0 & 0 & 0 & J_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_{64} & 0 & J_{66} \end{pmatrix} \quad [4.2]$$

Όπου m είναι η μάζα της συσκευής, J_{ii} οι ροπές αδρανείας, $J_{46} = J_{64}$ γινόμενο αδρανείας, αντίστοιχα, $(0,0, X_{g3})$ η θέση του κέντρου βάρους της κατασκευής ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων $0 - xyz$ ως προς το οποίο υπολογίζονται οι κινήσεις της κατασκευής (συνήθως στην μέση ηρεμούσα ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού), πάνω στον νοητό άξονα συμμετρίας της συσκευής.

Το μητρώο με τους υδροστατικούς συντελεστές επαναφοράς δίνεται από την [4.3]

$$c_{ij}^h = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_{wp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g \nabla(\overline{GM}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho g \nabla(\overline{GM}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad [4.3]$$

Όπου A_{wp} είναι η επιφάνεια της ισάλου, GM το μετακεντρικό ύψος και ∇ ο εκτοπιζόμενος όγκος της συσκευής.

Στην εξίσωση (4.1), ο μηχανισμός απόληψης ενέργειας (power take off mechanism) στην i κατεύθυνση έχει προσομοιαστεί με τον συντελεστή απόσβεσης $b_{PTO,i}$.

Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς

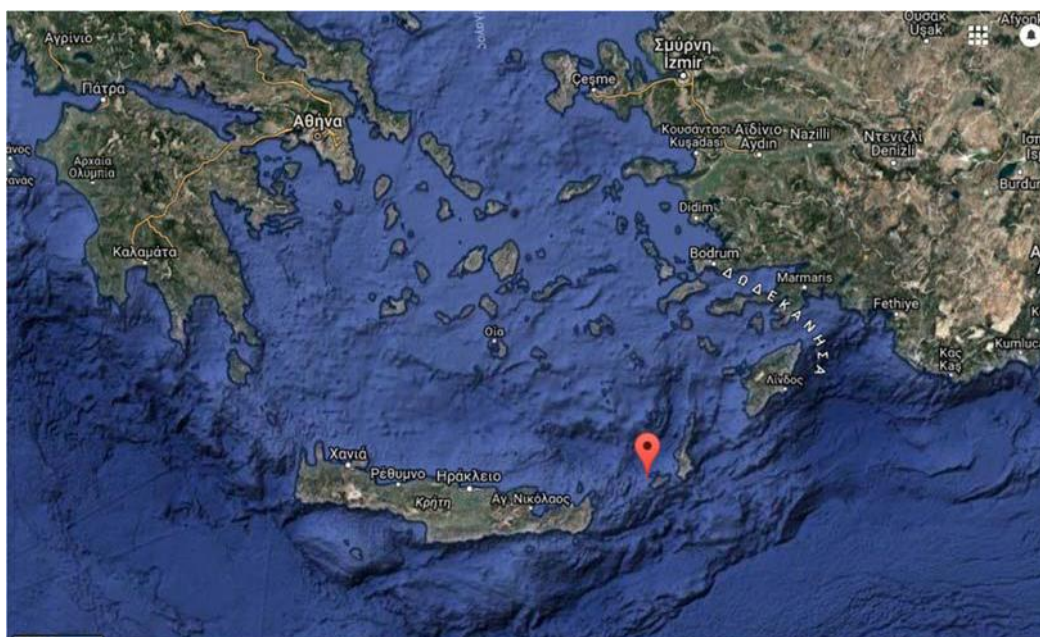
Έχοντας προσδιορίσει τις κινήσεις του πλωτού κυματικού μετατροπέα, ξ_{jo} , μέσω της επίλυσης εξίσωσης (4.1) για την περίπτωση κατακόρυφου αξονοσυμμετρικού κυματικού μετατροπέα, η απορροφούμενη κυματική ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P_i(\omega) = \frac{1}{2} b_{PTO,i} \omega^2 |(\xi_{io})_p|^2 \quad \text{όπου } p = 1, \dots, N \text{ δηλώνει το κάθε σώμα} \quad [4.4]$$

Όπου P_i η απορροφούμενη κυματική ισχύς στην i κατεύθυνση, ξ_{io} το πλάτος της κίνησης στην i κατεύθυνση, $b_{PTO,i}$ ο συντελεστής απόσβεσης του μηχανισμού απόληψης της κυματικής ενέργειας, ο οποίος στα πλαίσια των αριθμητικών υπολογισμών της παρούσας εργασίας, λαμβάνεται ίσος με τον συντελεστή της υδροδυναμικής απόσβεσης στην συχνότητα συντονισμού στην αντίστοιχη κίνηση του πλωτήρα.

4.2 Εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ισχύος σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς

Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογισμός της παραγόμενης κυματικής ισχύος σε πραγματικές καταστάσεις θάλασσας. Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται η θαλάσσια περιοχή ανοιχτά της Κάσου (βλέπε Εικόνα 17), τα μακροχρόνια χαρακτηριστικά σημαντικών τιμών και περιόδων κύματος μελετήθηκαν στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος REFOS (39) και αφορούν χρονική διάρκεια 31 ετών. Η θέση χαρακτηρίζεται από συντεταγμένες 35.34° N, 26.80° E.



Εικόνα 17 Θέση στο Αιγαίο Πέλαγος με συντεταγμένες 35.34° N, 26.80° E

Στη σχετική έκθεση του προγράμματος αναλύονται τα αποτελέσματα εκτιμήσεων τριώνων καταγραφών για χρονικό διάστημα 31 ετών και αφορούν χρονο-ιστορίες του σημαντικού ύψους κύματος, H_s (m), της μέσης διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού, θ_H (deg), της ταχύτητας ανέμου, U_M (m/s), της μέσης διεύθυνσης πνοής του ανέμου, θ_U (deg) και της περιόδου κορυφής φάσματος, T_p (sec).

Ο Πίνακας 4.1 δίνει για την περιοχή της Κάσου το πλήθος των τρίωρων εκτιμήσεων για συνδυασμούς ζευγών σημαντικού ύψους κύματος και περιόδου κορυφής φάσματος, με την βοήθεια του οποίου μπορεί να παραχθεί για κάθε ζεύγος τιμών το αντίστοιχο φάσμα βραχυχρόνιας περιγραφής της κατάστασης θάλασσας (39).

Πίνακας 4.1 Συχνότητα εμφάνισης κάθε ζεύγους τιμών H_s-T_p για την περιοχή της Κάσου

Frequency of occurrence of each T_p-H_s pair								
	H_s	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T_p								
2-3		221	0	0	0	0	0	0
3-4		6702	7	0	0	0	0	0
4-5		24291	1634	0	0	0	0	0
5-6		18937	11619	41	0	0	0	0
6-7		6869	11028	1498	1	0	0	0
7-8		462	2492	2328	223	1	0	0
8-9		100	463	747	517	30	0	0
9-10		24	58	76	121	57	7	0
10-11		0	9	8	5	3	3	0
11-12		0	1	1	0	0	0	0

Όπως παρατηρούμε από τον πιο πάνω πίνακα το ζεύγος τιμών H_s-T_p με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στα 31 χρόνια, είναι $T_p=4-5$ sec και $H_s=0-1$ m για την περιοχή της Κάσου.

Για να υπολογίσουμε την πραγματικά παραγόμενη ισχύ στην θέση που εξετάζουμε, θα χρησιμοποιήσουμε το φάσμα JONSWAP (40) για την περιγραφή των βραχυχρόνιων καταστάσεων θάλασσας. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ισχύ στη διάρκεια των 31 ετών. Η μαθηματική διατύπωση του φάσματος, βλέπε σχέση [4.5], προγραμματίστηκε στη Python.

$$S(\omega) = A_\gamma \frac{5}{16} \frac{\omega_p^2 H_s^2}{\omega^5} e^{-\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4} \gamma^a} \quad [4.5]$$

Όπου:

$$a = e^{-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\omega_p^2 \sigma^2}}$$

ω : συχνότητα σε rad/sec

ω_p : συχνότητα κορυφής σε rad/sec

H_s : Σημαντική τιμή ύψους κύματος σε m

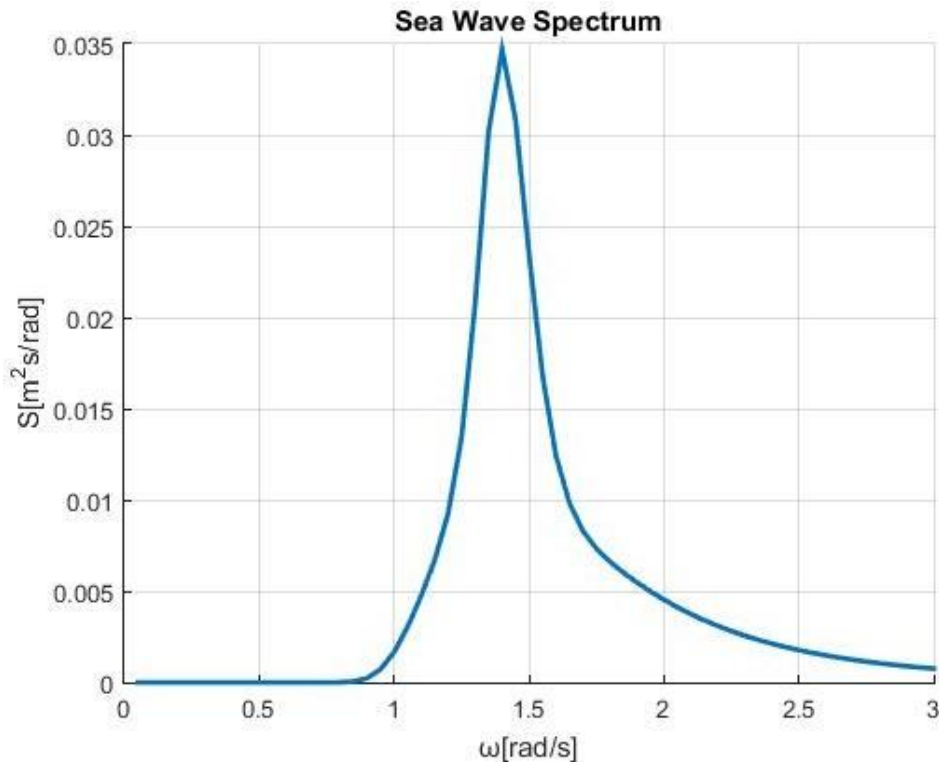
A_γ : 1- 0,287ln(γ)

$$\gamma: \text{αδιάστατη παράμετρος κορυφής φάσματος} \quad \begin{cases} 5 \text{ if } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \text{ if } 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \\ 1 \text{ if } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \geq 5 \end{cases}$$

$$0,07 \text{ if } \omega < \omega_p$$

$$\sigma: 0,09 \text{ if } \omega > \omega_p$$

Η μορφή του φάσματος για την συχνότερα εμφανιζόμενη κατάσταση θάλασσας στην διάρκεια των 31 ετών, απεικονίζεται στην εικόνα 18.



Εικόνα 18 Μορφή του φάσματος για το ζεύγος τιμών $T_p=4-5$ sec και $H_s=0-1$ m

Η κυματική ισχύς σε απόλυτες τιμές, που απορροφάται σε κάθε μια κατάσταση θάλασσας χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τιμών σημαντικού ύψους κύματος, περιόδου κορυφής, του πίνακα 4.1 και δίνεται από την σχέση (35), (41):

$$P = \int 2 \cdot E_{abs} \cdot S(\omega) d\omega \quad [4.6]$$

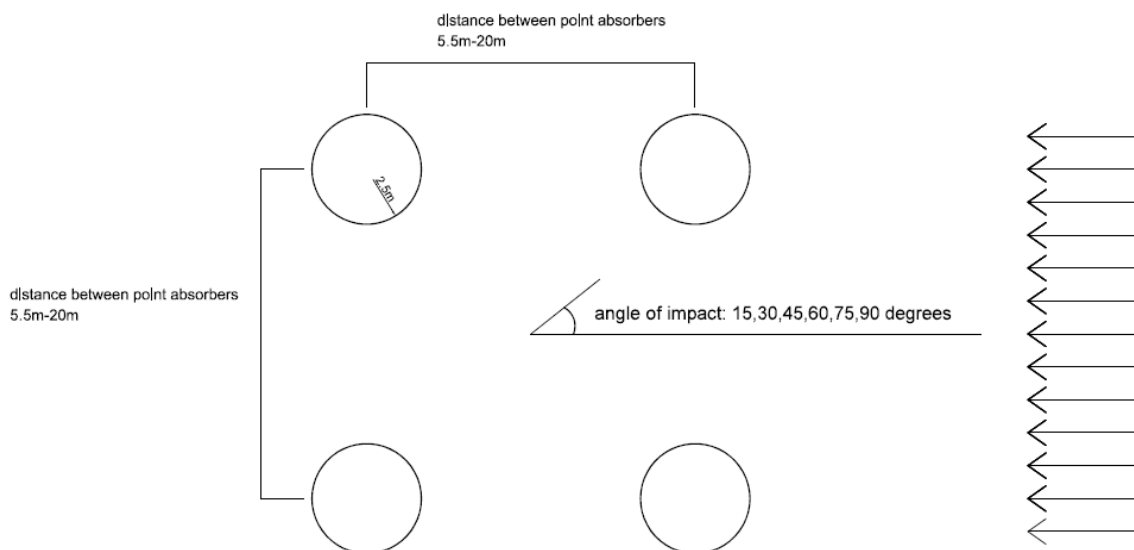
Όπου E_{abs} η ανά τετράγωνο πλάτους του κυματισμού κυματική ισχύς που δίνεται από τη σχέση [4.4] και $S(\omega)$ το φάσμα της θάλασσας. Το ολοκλήρωμα [4.6] θα πρέπει να επαναληφθεί για κάθε ένα συνδυασμό τιμών σημαντικού ύψους κύματος – περιόδου που εμφανίζεται στον Πίνακα 4.1, τα επί μέρους αποτελέσματα να προστεθούν για να υπολογίσουμε την συνολικά απορροφούμενη κυματική ισχύ στην διάρκεια των 31 χρόνων.

5 Διατάξεις που ερευνήθηκαν

Σε αυτή την έρευνα έχουν επιλεγεί τρεις διατάξεις τοποθέτησης των σημειακών απορροφητών ενέργειας (Point absorbers) . Οι διατάξεις αυτές είναι η τετράγωνη διάταξη, η διάταξη σε ευθεία γραμμή και η διάταξη σε ρόμβο οι οποίες θα μελετηθούν στην περιοχή της Κάσου. Η κάθε διάταξη θα επαναληφθεί για ένα εύρος αποστάσεων μεταξύ των συσκευών και γωνιών διάδοσης του προσπίπτοντος κύματος. Οι εξεταζόμενοι σημειακοί απορροφητές, έχουν τη μορφή κατακόρυφου κυλινδρικού σώματος, με εξωτερική ακτίνα $a=2.5\text{m}$ και βύθισμα $d-h=5\text{m}$, σε βάθος νερού $d=50\text{m}$.

Τετράγωνη

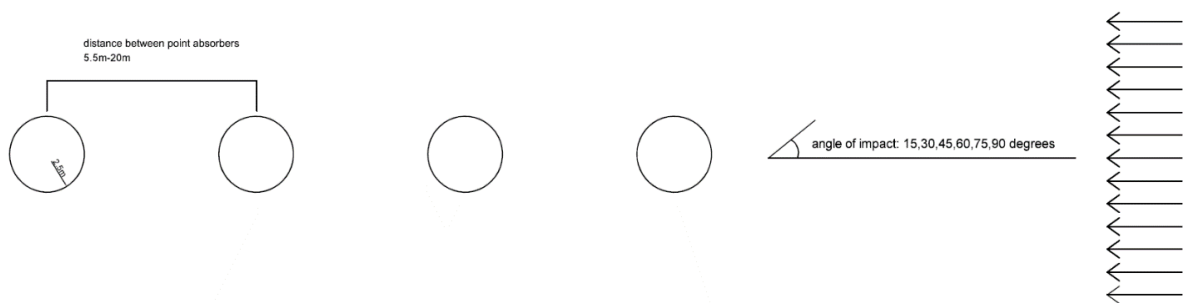
Οι συσκευές των σημειακών απορροφητών στην τετράγωνη διάταξη έχουν τοποθετηθεί αρχικά σε απόσταση μεταξύ τους 5.5m η οποία έχει οριστεί σαν η ελάχιστη απόσταση που θα μπορούν να τοποθετηθούν οι συσκευές μεταξύ τους έτσι ώστε να έχουν τουλάχιστο μισό μέτρο απόσταση η μια από την άλλη. Επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για αυτή τη διάταξη για αποστάσεις μέχρι 20m μεταξύ της κάθε συσκευής με βήμα 0.5m. Στο πιο κάτω σχήμα (Εικόνα 19) παρουσιάζεται η τετραγωνική διάταξη με τις αρχικές της αποστάσεις.



Εικόνα 19 Τετράγωνη διάταξη

Ευθεία

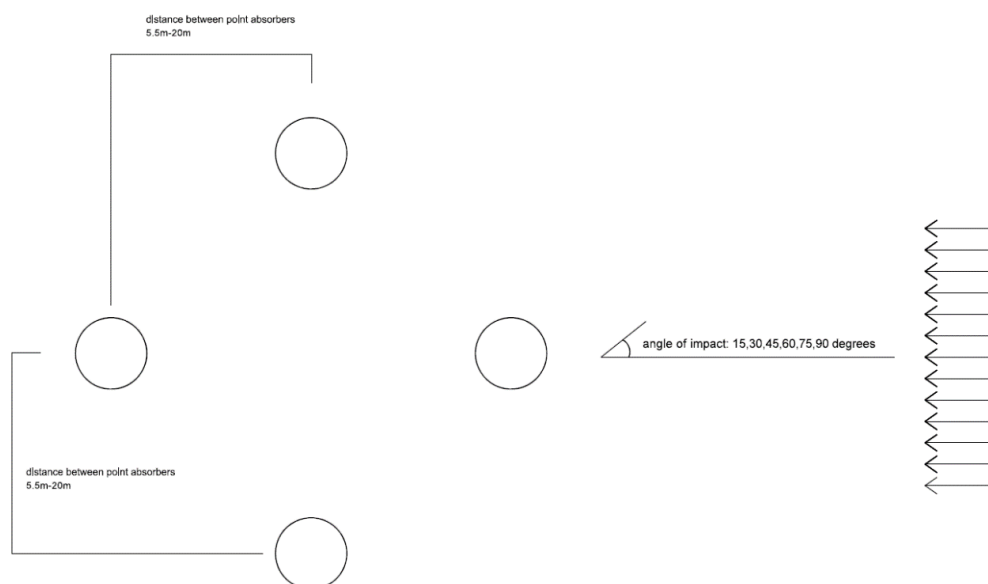
Στην ευθεία διάταξη (Εικόνα 20) οι συσκευές έχουν τοποθετηθεί σε ευθεία γραμμή ώστε να ισαπέχουν η μια από την άλλη. Ως αρχική απόσταση μεταξύ τους έχουν τεθεί τα 5.5m. Επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για αυτή διάταξη όπως και στην προηγούμενη διάταξη για αποστάσεις μέχρι 30m μεταξύ της κάθε συσκευής με βήμα 0.5m.



Εικόνα 20 Ευθεία διάταξη

Ρόμβος

Στη διάταξη του ρόμβου (Εικόνα 21) οι τέσσερις συσκευές έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να σχηματίζουν ρόμβο. Σαν σημείο αναφοράς τους έχει τεθεί η ισαπόσταση τους από ένα κεντρικό σημείο. Αυτή η απόσταση έχει αρχική τιμή τα 5.5m μέτρα και οι υπολογισμοί αυτής της διάταξης επαναλαμβάνονται μέχρι και τα 30m με βήμα 0.5m.



Εικόνα 21 Διάταξη Ρόμβου

6 Κώδικες Υπολογισμού

Ο υπολογιστικός κώδικας που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο (hamvab16_80.exe) υπολογίζει τις δυνάμεις διέγερσης και τις κινήσεις που προκαλούνται σε αξονοσυμμετρικά σώματα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας τα οποία διεγείρονται από αρμονικούς κυματισμούς. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran ο οποίος ανήκει στο Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Σύμφωνα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, η ροή γύρω από το σώμα χωρίζεται σε περιοχές δακτυλιοειδούς σχήματος, για κάθε μια εκ των οποίων το δυναμικό ταχύτητας γράφεται με την μορφή σειράς Fourier κάνοντας χρήση των σχέσεων ορθοκανονικότητας που ικανοποιούνται από τις ορθοκανονικές ιδιοσυναρτήσεις $Z_j(z)$ οι οποίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.1. Οι άγνωστοι υδροδυναμικοί συντελεστές προσδιορίζονται από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος, που δημιουργείται από την απαίτηση ικανοποίησης των συνθηκών συνέχειας για το δυναμικό και τη ταχύτητα της ροής στα όρια παρακείμενων δακτυλιοειδών περιοχών, καθώς και από την εκπλήρωση των οριακών συνθηκών στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος.

Ο πιο πάνω κώδικας που αναφέρεται χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία εστιάζοντας στην αποκόμιση των κατακόρυφων κινήσεων (ξί3 με δείκτες τα i3) των σωμάτων με σκοπό τον υπολογισμό της ισχύος κάθε συσκευής, βλέπε εξίσωση (4.4). Αρχικά έχει δημιουργηθεί ένα αρχείο εισόδου για μια απομονωμένη συσκευή. Έπειτα δημιουργήθηκαν αρχεία εισόδου για κάθε διάταξη, οι οποίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 5. Για την κάθε διάταξη έχουν δημιουργηθεί ξεχωριστά αρχεία εισόδου για κάθε απόσταση μεταξύ των συσκευών με βήμα 0.5m όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5. Επίσης για την κάθε μια διάταξη έχουν γίνει και ξεχωριστά αρχεία εισόδου με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°). Οπότε έχουμε 210 αρχεία εισόδου για την τετραγωνική διάταξη και 350 για τις άλλες δυο διατάξεις έκαστος.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού PYTHON ο οποίος είναι υπεύθυνος να τρέχει κάθε αρχείο εισόδου που έχουμε δημιουργήσει, να παίρνει τα στοιχεία που χρειάζονται για τον υπολογισμό της ισχύος από κάθε αρχείο και σαν τελικό αποτέλεσμα να δίνει τη συνολική ισχύ που έχει παραχθεί ανά έτος.

6.1 Περιγραφή των παραμέτρων του αρχείου δεδομένων

Οι εξεταζόμενοι σημειακοί απορροφητές έχουν μάζα ίση με 100.63t έκαστος, ενώ η ροπή αδρανείας ως προς το κέντρο βάρους της συσκευής ισούται με 1235.79 t.m². Οι υπολογισμοί γίνονται κάθε φορά για 30 γωνιακές ταχύτητες κύματος (ω) οι οποίες ξεκινούν από 0.100 με βήμα 0.100 μέχρι το 3 rad/s. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης κυματικής συσκευής.

Πίνακας 6.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗ

a	Εξωτερική ακτίνα	2.5 m
d	Βάθος νερού	50 m
$d-h$	Βύθισμα συσκευής	5 m
m	Μάζα συσκευής	100.63 t
I	Ροπή αδρανείας ως προς το Κ.Β	1235.7t.m ²
C_G	Κέντρο βάρους από την ε.ε.	-2.430 m

Τετράγωνη διάταξη

Στην τετράγωνη διάταξη έχουν δοθεί στα αρχεία συντεταγμένες τοποθέτησης της κάθε συσκευής π.χ. $\sigma_1(0,0)$, $\sigma_2(0,5.5)$, $\sigma_3(5.5,0)$, $\sigma_4(5.5,5.5)$ έτσι ώστε να δημιουργείται τετράγωνο μεταξύ των κέντρων των συσκευών. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 5.1 αυτή η διάταξη επαναλαμβάνεται για αντίστοιχες συντεταγμένες με προσαύξηση τους κατά 0.5m μέχρι τα 20m και κάθε ένα από αυτά επαναλαμβάνεται για 6 διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Παρουσιάζεται παράδειγμα του αρχείου εισόδου στο παράρτημα 1.

Διάταξη ευθείας

Στην ευθεία διάταξη έχουν δοθεί στα αρχεία συντεταγμένες τοποθέτησης της κάθε συσκευής π.χ. $\sigma_1(0,0)$, $\sigma_2(5.5,0)$, $\sigma_3(11,0)$, $\sigma_4(16.5,0)$ έτσι ώστε να δημιουργείται μια ευθεία γραμμή μεταξύ των κέντρων των συσκευών. Όπως και με την προηγούμενη διάταξη έτσι και εδώ επαναλαμβάνεται για αντίστοιχες συντεταγμένες με προσαύξηση 0.5m μέχρι τα 30m και η διάταξη επαναλαμβάνεται για 6 διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Παρουσιάζεται παράδειγμα του αρχείου εισόδου στο παράρτημα 2.

Διάταξη ρόμβου

Στη διάταξη ρόμβου έχουν δοθεί στα αρχεία συντεταγμένες τοποθέτησης της κάθε συσκευής π.χ. $\sigma_1(0,0)$, $\sigma_2(5.5,5.5)$, $\sigma_3(5.5,-5.5)$, $\sigma_4(11,0)$ έτσι ώστε να δημιουργείται ένας ρόμβος μεταξύ των κέντρων των συσκευών. Όπως και με τις προηγούμενες διατάξεις έτσι και εδώ επαναλαμβάνεται για αντίστοιχες συντεταγμένες με προσαύξηση 0.5m μέχρι τα 30m και η διάταξη επαναλαμβάνεται για 6 διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Παρουσιάζεται παράδειγμα του αρχείου εισόδου στο παράρτημα 3.

Έπειτα δημιουργείται ένα ξεχωριστό αρχείο εισόδου για ένα και μόνο σώμα(isolated body) με τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις του οποίου τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του βέλτιστου συντελεστή απόσβεσης b_{PTO} . Βλέπε παράρτημα 4.

6.2 Περιγραφή Κώδικα στην Python για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων

Για την εκτέλεση του προγράμματος "hamvab16_80" έχει δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα run.py στην Python το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκκίνηση της διαδικασίας εκτέλεσης όπου κατά τον τερματισμό ενός τρεξίματος ξεκινάει το επόμενο.

Έπειτα για την απόσπαση των δεδομένων που χρειαζόμαστε από τα αρχεία αποτελεσμάτων έχει δημιουργηθεί άλλο πρόγραμμα ονομαζόμενο utilities.py το οποίο ανοίγει κάθε αρχείο εξόδου ένα προς ένα και αποσπά τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του $P(\omega)$ βλέπε εξίσωση [4.4]. Έχοντας το $P(\omega)$, το find_max_power_scenario.py με τη χρήση του φάσματος jonswar και του κανόνα Simpson τα οποία έχουν υπολογιστεί στο utilities.py υπολογίζει τον πίνακα απορροφούμενης ισχύος για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών (H_s , T_p). Έπειτα αυτό τον πίνακα τον πολλαπλασιάζει με τον πίνακα 4.1 ο οποίος δίνει συχνότητα εμφάνισης κάθε ζεύγους τιμών H_s - T_p για την περιοχή της Κάσου και εφαρμόζει τον υπολογισμό που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 για την εύρεση της απόδοσης της κυματικής συσκευής (kWh/έτος) για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών (H_s , T_p) αλλά και τη συνολική ισχύ.

1. utilities.py

Το αρχείο python όπου υπολογίστηκε το φάσμα jonswar, εφαρμόστηκε ο κανόνας Simpson, και υπολογίστηκε η ετήσια ισχύς.

2. find_max_power_scenario

Το σενάριο που ανατρέχει στο φάκελο με τα αρχεία εξόδου που παράχθηκαν και εξάγει ένα προς ένα τα απαιτούμενα δεδομένα για τον υπολογισμό των πινάκων (zero degrees) απορροφούμενης κυματικής ισχύος για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών. Στη συνέχεια υπολογίζει την ετήσια ισχύς και αποθηκεύει τον πίνακα που υπολογίζεται στο φάκελο της αντίστοιχης διάταξης results/FOLDER_NAME/plthavn.XXXXXX καθώς και την προσθήκη στο αρχείο results.csv το όνομα του αρχείου (file name) και δίπλα την αντίστοιχη ισχύς (power).

Η find_max_power_scenario έχει μια άλλη συνάρτηση η οποία αναζητά στον κατάλογο που δίνεται στο results.txt για να βρει το σενάριο μέγιστης ισχύος.

3. run.py

Αυτό εκτελούμε για να ξεκινήσουμε τη διαδικασία και να λάβουμε τα αποτελέσματα.

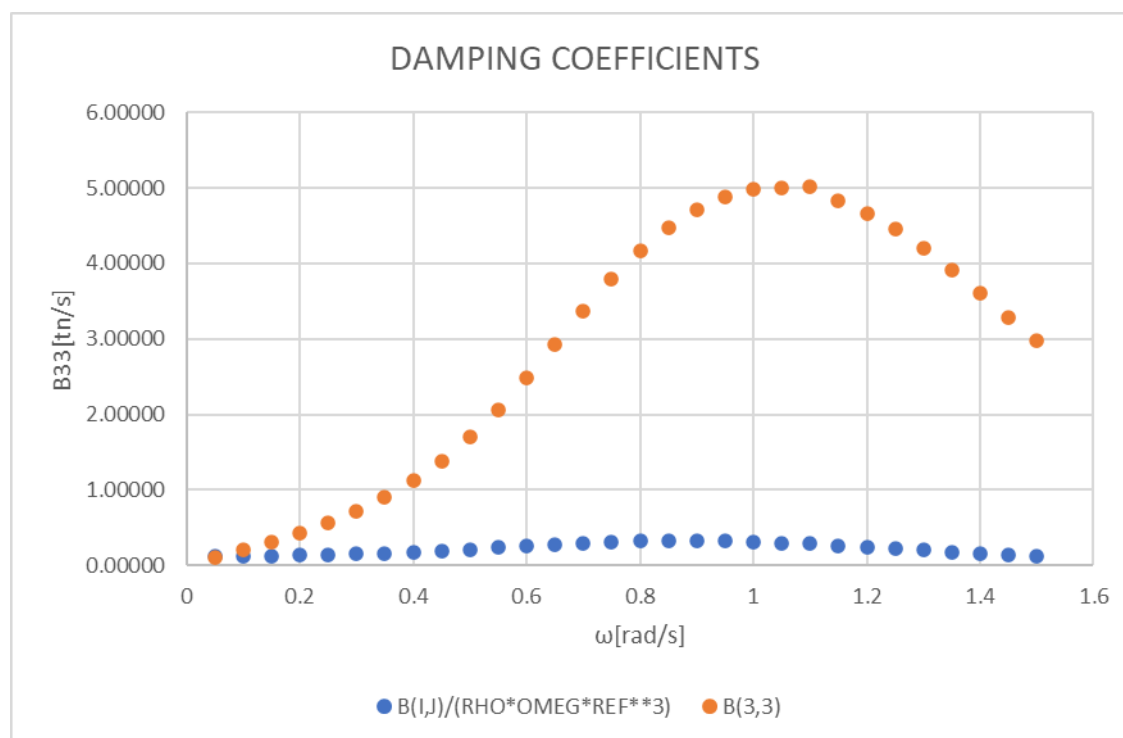
Τα scripts του κώδικα στη Python παρατίθενται στα παραρτήματα 6,7,8.

7 Αποτελέσματα και αναγνώριση βέλτιστης διάταξης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής ανάλυσης των διατάξεων των κυματικών συσκευών, που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται στα κεφάλαια 7.1, 7.2, 7.3 και 7.4 ο συντελεστής απόσβεσης, η απορροφούμενη κυματική ισχύς για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών (Hs, Tp), και η απόδοση κυματικής συσκευής (kWh/έτος) για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών (Hs, Tp).

7.1 Συντελεστής Απόσβεσης

Κατά την εκτίμηση της απορροφούμενης κυματικής ενέργειας έχει επιβληθεί στο σύστημα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, απόσβεση λόγω του συστήματος απόληψης της ενέργειας (Power Take Off-PTO) που ισούται με την βέλτιστη τιμή της, αυτή που ισούται με την υδροδυναμική απόσβεση στο σημείο συντονισμού της καθ' ύψος κίνησης της κατασκευής. Πιο κάτω παρατίθεται γραφική παράσταση με τα αποτελέσματα του συντελεστή απόσβεσης.



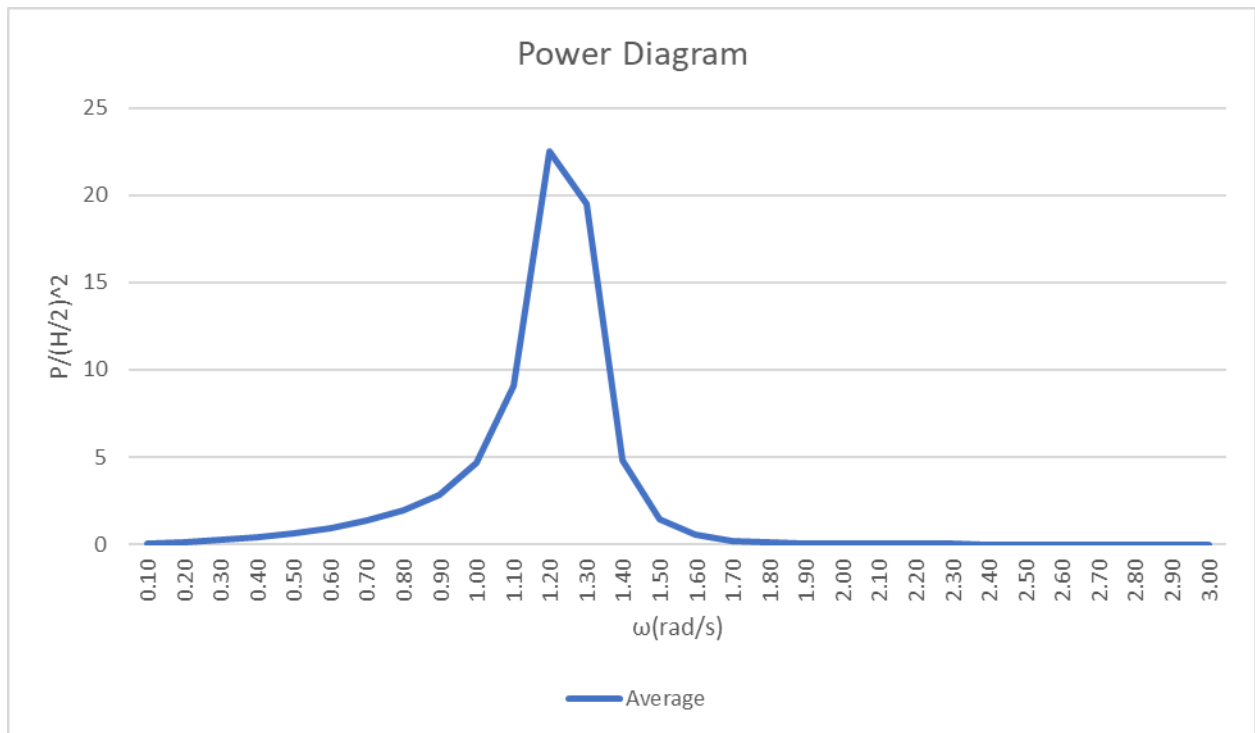
Εικόνα 22 Γραφική παράσταση συντελεστή απόσβεσης b έναντι γωνιακής ταχύτητας ω

Όπως φαίνεται και από την γραφική παράσταση (εικόνα 22) ο βέλτιστος συντελεστής απόσβεσης είναι : $b_{PTO}=5.009095 \text{tn/s}$.
όπου

RHO (Πυκνότητα νερού)	1.025Kg/m ³
OMEGA (Γωνιακή ταχύτητα)	ω
REF (Ακτίνα συσκευής)	2.5m
B (Συντελεστής απόσβεσης)	

7.2 Απορροφούμενη κυματική ισχύς σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς

Έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή απόσβεσης, και προσδιορίσει τις κατακόρυφες κινήσεις των συσκευών κυματικής ανάκτησης ξ_{jo} , τότε με την χρήση του τύπου 4.4 μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ για κάθε ω . Στο πιο κάτω γράφημα (Εικόνα 23) παρουσιάζεται παράδειγμα της μέσης απορροφούμενης κυματικής ισχύος από τον σημειακό απορροφητήρα, συναρτήσει του πλάτους κύματος.



Εικόνα 23 Απορροφούμενη κυματική ισχύς από τον σημειακό απορροφητήρα, συναρτήσει του πλάτους κύματος

Το παραπάνω διάγραμμα παρατέθηκε ενδεικτικά για καλύτερη περιγραφή και κατανόηση των υπολογισμών που έχουν γίνει. Αυτό το βήμα των υπολογισμών με τη χρήση του κώδικα στην Python γίνεται αυτόματα για κάθε περίπτωση. Έπειτα χρησιμοποιώντας την μέση ισχύ `Paverage` και το ω υπολογίζουμε με τη χρήση των σχέσεων [4.5] και [4.6] την απορροφούμενη κυματική ισχύ για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε διάταξης.

Στο πιο κάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα της απορροφούμενης κυματικής ισχύος για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε διάταξης.

7.3 Απορροφούμενη κυματική ισχύς για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε διάταξης

Για κάθε μια από τις 910 περιπτώσεις που έχουν εξεταστεί, έχει υπολογιστεί ένας πίνακας όπου δίνει την απορροφούμενη κυματική ισχύ για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών. Πιο κάτω παρατίθεται παράδειγμα των πινάκων. Ο συγκεκριμένος πίνακας αντιστοιχεί στο μεμονωμένο σώμα.

Πίνακας 7.1 Απορροφούμενη κυματική ισχύς σε kW για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών

Tr(s)/Hs(m)	0 to 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	4 to 5	5 to 6	6 to 7
2 to 3	6.72E-05	0.000605	0.001681	0.003294	0.005445129	0.008134	0.011361
3 to 4	0.01719	0.097711	0.271419	0.53198	0.879396199	1.313666	1.83479
4 to 5	0.149325	1.417803	3.934932	7.712467	12.74917971	19.04507	26.60014
5 to 6	0.236991	2.624956	9.966059	19.53348	32.29003178	48.23573	67.37056
6 to 7	0.223563	2.012063	5.143109	9.563116	15.80841573	23.61504	32.98299
7 to 8	0.180234	1.622102	4.281889	7.153733	10.60926565	15.84841	22.13538
8 to 9	0.139755	1.257792	3.493866	6.193961	8.95656495	11.91564	16.50722
9 to 10	0.108492	0.976431	2.712309	5.316125	7.709291371	10.17436	12.73035
10 to 11	0.085174	0.766567	2.129353	4.173531	6.834796151	9.38165	12.35118
11 to 12	0.067959	0.611633	1.69898	3.330001	5.504695838	8.053855	10.27245

Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές των παραπάνω πινάκων, με τον Πίνακα 4.1 που παρουσιάζει τον αριθμό των εμφανίσεων κάθε ζεύγους (Hs, Tr) στη συνολική διάρκεια των 31 χρόνων, καθώς και με τον αριθμό των 3 ωρών που είναι η χρονική διάρκεια της κάθε εμφάνισης και διαιρώντας με τα 31 χρόνια, προκύπτει ο πίνακας 7.2 που εμφανίζει την κυματική ισχύ kWh ανά έτος για κάθε ζεύγος τιμών (Hs, Tr). Αθροίζοντας, εν συνεχεία, την ετήσια κυματική ισχύ για όλα τα ζεύγη τιμών (Hs, Tr) κάθε πίνακα, προκύπτει η μέση τιμή της ετήσιας απόδοσης κάθε σημειακού απορροφητήρα στην περιοχή εγκατάστασης για κάθε διάταξη και περίπτωση που εξετάστηκε.

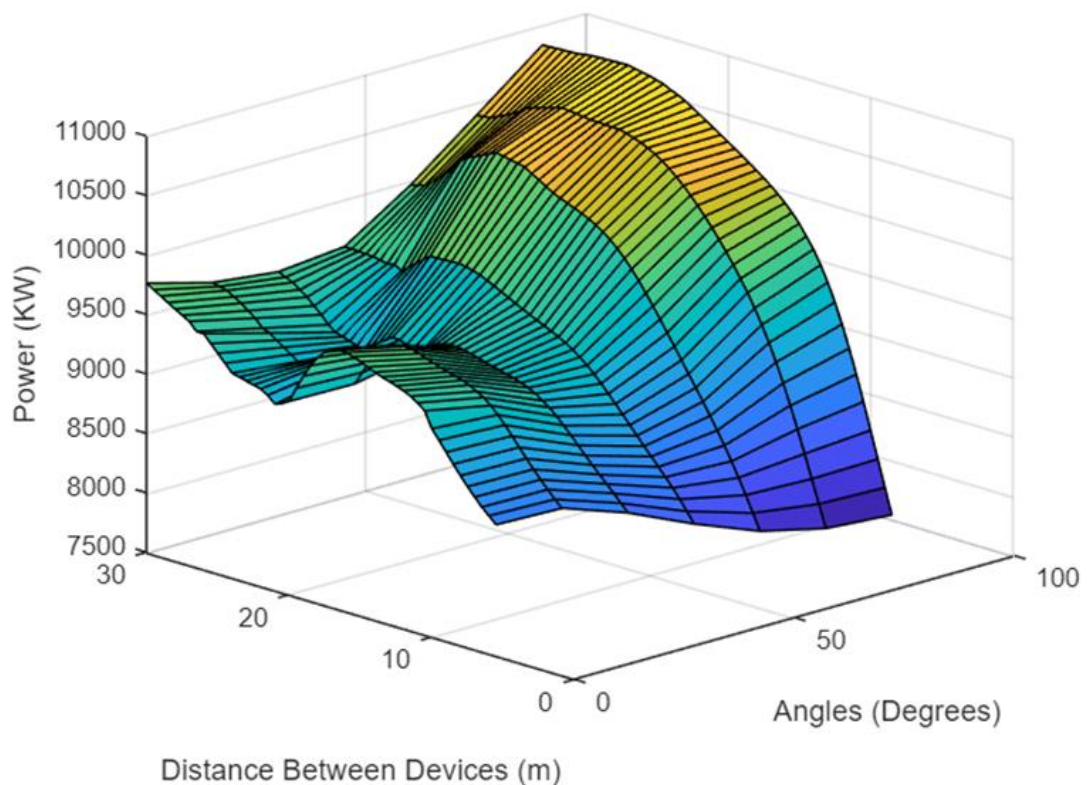
Πίνακας 7.2 Κυματική Ισχύς ανά έτος για κάθε ζεύγος τιμών (Hs,Tr) σε kWh

Tb/Hs	0 to 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	4 to 5	5 to 6	6 to 7
2 to 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 to 4	11.15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 to 5	351.02	224.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 to 6	434.31	2951.55	39.54	0.00	0.00	0.00	0.00
6 to 7	148.61	2147.33	745.58	0.93	0.00	0.00	0.00
7 to 8	8.06	391.19	964.67	154.38	1.03	0.00	0.00
8 to 9	1.35	56.36	252.57	309.90	26.00	0.00	0.00
9 to 10	0.25	5.48	19.95	62.25	42.53	6.89	0.00
10 to 11	0.00	0.67	1.65	2.02	1.98	2.72	0.00
11 to 12	0.00	0.06	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00

7.4 Μέση ετήσια απόδοση κάθε κυματικής συσκευής στις τρεις διατάξεις που εξετάστηκαν

Η πιο πάνω διαδικασία που περιγράφει την εύρεση του πίνακα της κυματικής ισχύος ανά έτος αλλά και τη συνολική ετήσια απόδοση γίνεται μέσω του κώδικα στην Python όπου παράγονται φάκελοι για κάθε διάταξη ξεχωριστά και δίνονται τα αποτελέσματα στον κάθε φάκελο υπό την μορφή `rltham.XXXXX` για όλες τις περιπτώσεις. Σε κάθε φάκελο παράγεται επίσης αρχείο excel όπου δίνεται η συνολική ισχύς για όλες τις περιπτώσεις. Πιο κάτω παρουσιάζονται 3D γραφήματα (απόστασης, γωνίας πρόσπτωσης, ισχύς) για κάθε διάταξη που έχει διερευνηθεί αλλά και οι πίνακες με τις τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε γράφημα.

Ευθεία Διάταξη (Inline configuration)



Εικόνα 24 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύος) της Ευθείας Διάταξης

Πίνακας 7.3 Πίνακας Αποτελεσμάτων Ισχύος για την Ευθεία διάταξη

Distance(m)/angle of impact(degrees)	0	15	30	45	60	75	90
5.5	8605.00	8588.06	8392.35	8143.39	7925.84	7793.18	7751.26
6	8661.79	8644.51	8455.69	8231.64	8061.07	7980.94	7962.85
6.5	8717.48	8708.90	8520.65	8315.95	8194.58	8174.39	8184.43
7	8784.21	8774.58	8582.11	8393.34	8322.41	8368.09	8409.40
7.5	8853.79	8843.59	8642.75	8465.56	8443.44	8557.02	8631.31
8	8928.28	8916.35	8704.74	8534.58	8557.95	8737.88	8844.67
8.5	9007.41	8992.63	8769.20	8603.10	8666.73	8907.93	9045.40
9	9089.98	9069.82	8835.44	8672.10	8771.04	9065.97	9229.95
9.5	9172.80	9144.63	8901.97	8742.53	8872.40	9211.65	9396.70
10	9251.87	9213.16	8966.33	8814.19	8971.89	9345.30	9544.91
10.5	9384.14	9272.99	9026.63	8885.83	9070.11	9467.59	9674.76
11	9433.48	9322.45	9080.56	8957.24	9168.13	9579.83	9787.89
11.5	9471.58	9356.18	9122.23	9024.87	9265.64	9679.37	9878.12
12	9500.32	9390.70	9164.75	9091.97	9362.45	9780.00	9969.53
12.5	9522.99	9413.23	9195.37	9153.53	9458.19	9870.72	10042.74
13	9542.91	9431.32	9219.44	9209.70	9552.01	9956.28	10106.94
13.5	9562.71	9448.11	9238.52	9260.07	9642.47	10037.74	10164.48
14	9585.05	9465.65	9254.76	9304.82	9728.84	10114.73	10216.63
14.5	9610.54	9485.88	9269.79	9343.73	9809.24	10187.88	10264.79
15	9637.24	9507.89	9285.13	9377.39	9881.93	10256.28	10310.04
15.5	9661.91	9529.87	9301.93	9407.64	9946.60	10319.93	10353.58
16	9679.04	9547.77	9319.80	9435.87	10002.73	10377.62	10395.70
16.5	9682.44	9556.85	9337.50	9463.65	10050.53	10429.51	10437.34
17	9666.63	9551.56	9352.08	9491.71	10090.68	10475.12	10478.31
17.5	9627.87	9527.95	9360.82	9520.89	10124.20	10514.22	10519.12
18	9565.05	9483.58	9360.53	9551.05	10152.95	10547.63	10559.26
18.5	9479.02	9418.10	9348.85	9582.11	10178.49	10575.32	10599.10
19	9373.50	9332.95	9324.04	9613.86	10202.40	10598.22	10638.67
19.5	9253.14	9230.99	9284.86	9644.78	10226.91	10616.93	10677.99
20	9125.90	9117.38	9230.34	9673.13	10254.14	10632.09	10717.06
20.5	9089.36	9147.23	9243.24	9725.25	10298.23	10634.65	10747.21
21	9065.31	9179.16	9255.30	9777.36	10342.33	10637.21	10771.54
21.5	9123.21	9203.25	9274.10	9829.48	10386.42	10639.26	10802.30
22	9158.46	9219.30	9280.48	9881.60	10430.52	10641.30	10819.56
22.5	9173.93	9204.72	9235.77	9844.94	10439.97	10648.88	10835.20
23	9189.40	9190.14	9191.06	9808.27	10449.43	10656.45	10848.30
23.5	9204.86	9175.56	9146.35	9771.61	10458.89	10664.03	10860.13
24	9220.33	9160.98	9101.64	9734.95	10468.35	10671.60	10874.33
24.5	9285.46	9203.04	9121.19	9691.88	10434.95	10653.79	10872.14
25	9350.58	9245.11	9140.73	9648.82	10401.55	10635.99	10869.40
25.5	9415.71	9287.17	9160.27	9605.75	10368.15	10618.18	10867.30
26	9480.84	9329.23	9179.81	9562.69	10334.74	10600.37	10866.31
26.5	9481.95	9353.26	9226.28	9590.79	10290.89	10575.74	10861.80
27	9548.19	9419.35	9292.29	9575.82	10213.63	10533.31	10854.60
27.5	9581.87	9464.41	9348.53	9582.38	10153.07	10499.78	10845.30
28	9615.55	9509.47	9404.77	9588.95	10092.51	10466.25	10840.07
28.5	9652.20	9545.04	9448.44	9593.14	10044.37	10437.75	10838.04
29	9688.85	9580.60	9492.12	9597.34	9996.23	10409.24	10835.24
29.5	9725.49	9595.90	9519.25	9599.29	9979.30	10400.96	10831.40
30	9762.14	9611.20	9546.37	9601.23	9962.37	10392.67	10828.29

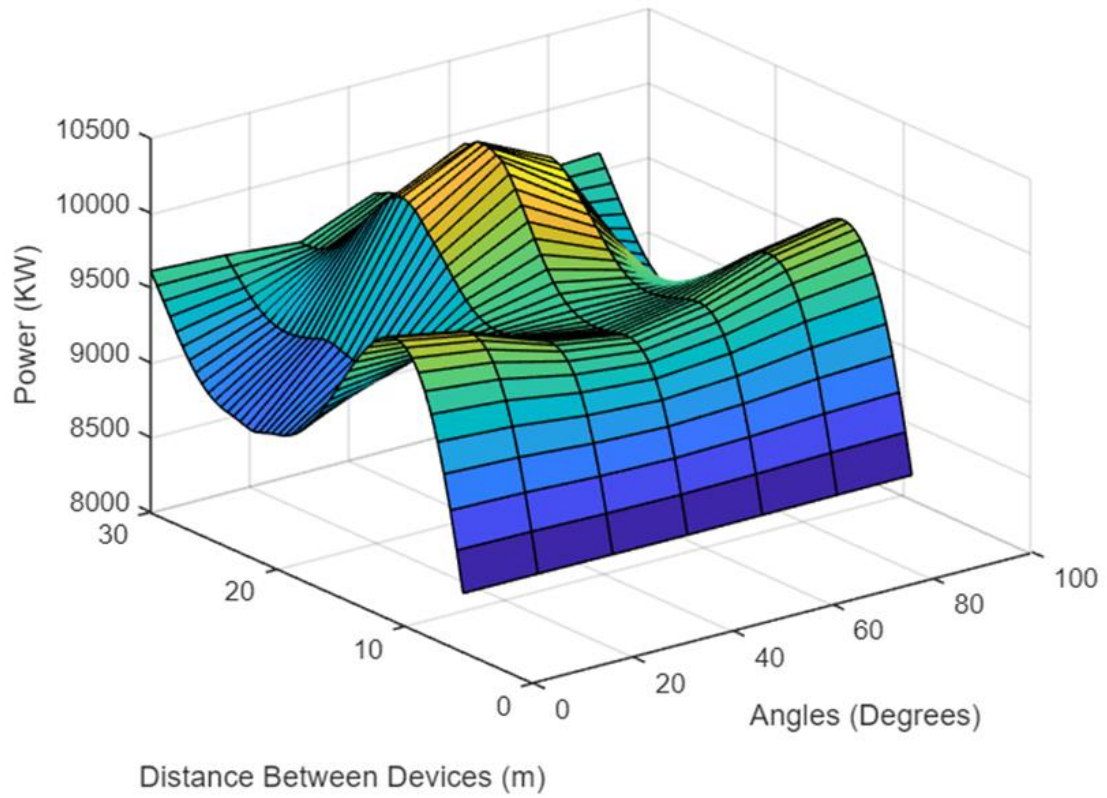
Όπως βλέπουμε στο πιο πάνω γράφημα (Εικόνα 24) η βέλτιστη περίπτωση για την ευθεία διάταξη βρίσκεται στο σημείο όπου παρουσιάζεται μέγιστο στο γράφημα. Η τιμή της ισχύος στο μέγιστο του γραφήματος είναι 10874,33KWh/έτος όπως μπορούμε να δούμε και από τον πίνακα 7.3. Η διάταξη αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι συσκευές ισαπέχουν μεταξύ τους 24m και η γωνιά πρόσπτωσης του κύματος είναι στις 90°.

Πίνακας 7.4 Απόδοση κυματικής συσκευής [kW/έτος]: *Inline conf*

	H _s [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T _p [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		8.49	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		427.71	259.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		579.23	4333.38	42.45	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		172.48	2093.17	743.97	0.96	0.00	0.00	0.00
7-8		8.50	421.45	859.19	153.96	1.07	0.00	0.00
8-9		1.42	59.00	238.45	291.70	23.98	0.00	0.00
9-10		0.26	5.70	26.75	56.68	48.90	6.38	0.00
10-11		0.00	0.69	1.71	2.07	1.88	2.64	0.00
11-12		0.00	0.06	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς 10874,33 KWh/έτος

Διάταξη Ρόμβου (Rhombus configuration)



Εικόνα 25 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύος) της Διάταξης Ρόμβου

Πίνακας 7.5 Πίνακας Αποτελεσμάτων Ισχύος για την διάταξη Ρόμβου

Distance(m)/angle of impact(degrees)	0	15	30	45	60	75	90
5.5	8391.419	8390.098	8387.671	8386.285	8387.671	8390.098	8391.419
6	8659.538	8653.857	8642.735	8637.462	8642.735	8653.857	8659.538
6.5	8908.051	8896.189	8873.151	8861.869	8873.151	8896.189	8908.051
7	9132.2	9112.623	9073.9	9054.775	9073.9	9112.623	9132.2
7.5	9328.182	9299.224	9241.701	9213.28	9241.701	9299.224	9328.185
8	9493.7	9453.798	9375.125	9336.556	9375.125	9453.798	9493.7
8.5	9628.754	9577.233	9475.877	9425.787	9475.877	9577.233	9628.752
9	9734.639	9671.436	9547.246	9486.251	9547.246	9671.438	9734.639
9.5	9812.557	9738.261	9592.694	9521.377	9592.694	9738.263	9812.557
10	9863.46	9779.885	9616.114	9536.498	9616.114	9779.885	9863.492
10.5	9889.602	9798.619	9622.224	9536.408	9622.224	9798.619	9889.634
11	9893.57	9798.97	9616.169	9527.802	9616.169	9798.97	9893.57
11.5	9878.919	9784.617	9603.749	9516.847	9603.749	9784.726	9878.919
12	9848.766	9759.521	9588.748	9507.371	9588.748	9759.521	9848.766
12.5	9805.627	9725.617	9574.049	9502.223	9574.049	9725.616	9805.627
13	9750.911	9684.747	9560.528	9502.39	9560.525	9684.747	9750.929
13.5	9686.244	9638.021	9549.347	9508.393	9549.347	9638.021	9686.243
14	9612.695	9586.873	9541.18	9521.307	9541.087	9586.875	9612.695
14.5	9533.473	9533.15	9538.049	9542.67	9538.049	9533.15	9533.473
15	9449.582	9479.144	9541.458	9574.301	9541.544	9479.099	9449.582
15.5	9364.627	9427.073	9553.794	9618.038	9553.794	9427.073	9364.627
16	9281.401	9379.267	9575.986	9674.592	9575.986	9379.267	9281.401
16.5	9202.404	9338.077	9608.698	9743.66	9608.698	9338.077	9202.405
17	9129.571	9304.265	9651.336	9823.891	9651.305	9304.265	9129.571
17.5	9065.633	9279.008	9702.533	9912.271	9702.634	9279.007	9065.636
18	9011.389	9262.46	9759.468	10005.4	9759.468	9262.46	9011.389
18.5	8967.536	9253.697	9819.589	10098.29	9819.589	9253.697	8967.536
19	8934.238	9252.427	9879.441	10186.62	9879.441	9252.427	8934.238
19.5	8910.978	9257.436	9936.386	10266.41	9936.386	9257.436	8910.978
20	8898.002	9268.115	9987.88	10333.74	9987.88	9268.029	8898
20.5	8887.21	9280.15	10040.23	10356.82	10040.23	9280.15	8887.21
21	8872.12	9296.21	10140	10388.34	10140	9296.21	8872.12
21.5	8856.7	9315.2	10190.23	10388.92	10190.23	9315.2	8856.7
22	8841.03	9380.3	10199.03	10389.27	10199.03	9380.3	8841.03
22.5	8856.7	9315.2	10190.23	10351.47	10190.23	9315.2	8856.7
23	8872.12	9296.21	10140	10335.98	10140	9296.21	8872.12
23.5	8887.21	9280.15	10040.23	10280.2	10040.23	9280.15	8887.21
24	8898.002	9268.115	9987.88	10239.36	9987.88	9268.029	8898
24.5	8910.978	9257.436	9936.386	10172.4	9936.386	9257.436	8910.978
25	8934.238	9252.427	9879.441	10103.2	9879.441	9252.427	8934.238
25.5	8967.536	9253.697	9819.589	10042.7	9819.589	9253.697	8967.536
26	9011.389	9262.46	9759.468	9987.34	9759.468	9262.46	9011.389
26.5	9065.633	9279.008	9702.533	9924.31	9702.634	9279.007	9065.636
27	9129.571	9304.265	9651.336	9901.41	9651.305	9304.265	9129.571
27.5	9202.404	9338.077	9608.698	9840.2	9608.698	9338.077	9202.405
28	9281.401	9379.267	9575.986	9807.956	9575.986	9379.267	9281.401
28.5	9364.627	9427.073	9553.794	9794.1	9553.794	9427.073	9364.627
29	9449.582	9479.144	9541.458	9780.674	9541.544	9479.099	9449.582
29.5	9533.473	9533.15	9538.049	9755.7	9538.049	9533.15	9533.473
30	9612.695	9586.873	9541.18	9739.062	9541.087	9586.875	9612.695

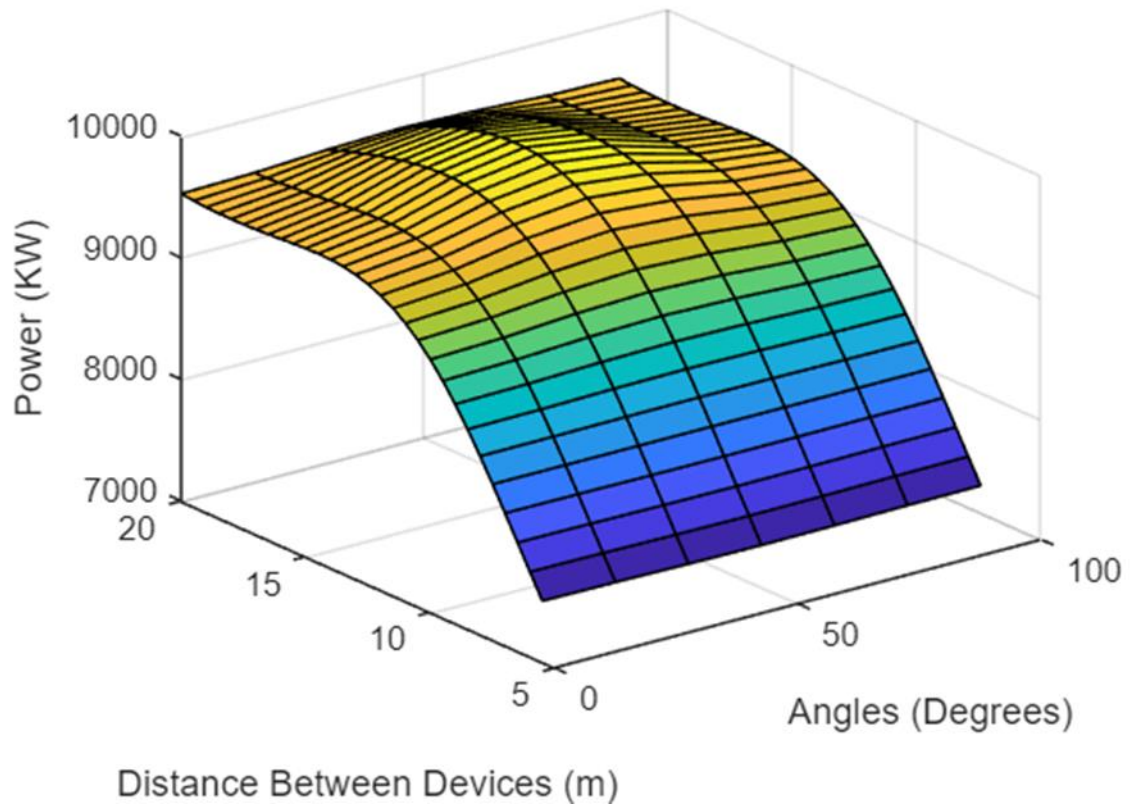
Όπως βλέπουμε από το γράφημα (εικόνα 25) αλλά και από τον πίνακα 7.5 η μέγιστη ισχύς είναι 10389.3KWh/έτος. Η διάταξη που αντιστοιχεί σε αυτή την περίπτωση είναι με ισαποστάσεις 22m από σταθερό σημείο που σχηματίζουν ρόμβο και με γωνία πρόσπτωσης κύματος 45°.

Πίνακας 7.6 Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: *Rhombus conf*

	H _s [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T _p [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		6.78	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		359.30	214.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		555.99	4231.83	41.28	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		151.60	2012.42	723.49	0.93	0.00	0.00	0.00
7-8		8.20	378.13	837.13	140.24	1.04	0.00	0.00
8-9		1.37	57.24	231.79	277.62	23.43	0.00	0.00
9-10		0.26	5.56	20.22	55.31	38.02	6.24	0.00
10-11		0.00	0.68	1.67	2.02	1.84	2.59	0.00
11-12		0.00	0.06	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική Ισχύς 10389.3KWh/έτος

Τετράγωνη διάταξη (Square configuration)



Εικόνα 26 Γράφημα (Απόστασης, Γωνίας, Ισχύος) της Τετραγωνικής Διάταξης

Πίνακας 7.7 Πίνακας Αποτελεσμάτων Ισχύος για την τετραγωνική διάταξη

Distance(m)/angle of impact(degrees)	0	15	30	45	60	75	90
5.5	7504.87	7501.11	7493.56	7489.68	7493.56	7501.11	7504.87
6	7699.30	7695.69	7688.84	7685.52	7688.84	7695.69	7699.27
6.5	7894.43	7891.48	7885.97	7883.21	7885.97	7891.48	7894.43
7	8090.28	8088.53	8085.18	8083.75	8085.18	8088.53	8090.28
7.5	8282.65	8282.68	8282.68	8282.85	8282.68	8282.68	8282.65
8	8467.55	8469.85	8474.73	8477.32	8474.73	8469.85	8467.55
8.5	8642.13	8647.74	8659.22	8664.87	8659.22	8647.74	8642.13
9	8803.62	8813.30	8832.70	8842.59	8832.70	8813.30	8803.62
9.5	8949.64	8964.44	8993.83	9008.84	8993.83	8964.44	8949.64
10	9079.66	9099.74	9141.08	9161.81	9141.08	9099.74	9079.66
10.5	9191.66	9218.62	9272.95	9300.65	9272.95	9218.62	9191.66
11	9285.98	9320.07	9389.16	9424.28	9389.16	9320.07	9285.98
11.5	9363.10	9404.69	9489.26	9532.20	9489.26	9404.69	9363.10
12	9423.76	9473.31	9574.13	9625.23	9574.17	9473.31	9423.76
12.5	9469.73	9527.20	9644.14	9703.68	9644.14	9527.20	9469.73
13	9502.56	9567.60	9700.24	9767.91	9700.24	9567.60	9502.56
13.5	9523.57	9595.72	9743.08	9818.50	9743.08	9595.75	9523.57
14	9534.71	9613.11	9773.30	9855.54	9773.30	9613.11	9534.71
14.5	9537.75	9621.00	9792.13	9879.85	9792.13	9621.00	9537.75
15	9534.89	9621.69	9800.14	9892.07	9800.14	9621.69	9534.89
15.5	9528.54	9616.91	9799.58	9893.99	9799.58	9616.91	9528.54
16	9520.94	9608.76	9791.59	9886.04	9791.59	9608.76	9520.94
16.5	9513.17	9598.79	9777.27	9870.35	9777.27	9598.79	9513.17
17	9507.11	9588.32	9758.21	9847.21	9758.21	9588.32	9507.11
17.5	9503.04	9577.71	9734.92	9817.50	9734.92	9577.71	9503.04
18	9501.74	9567.75	9707.75	9782.04	9707.75	9567.75	9501.74
18.5	9503.03	9558.62	9677.47	9741.18	9677.47	9558.62	9503.03
19	9507.38	9550.54	9644.30	9695.09	9644.30	9550.54	9507.38
19.5	9514.94	9544.03	9608.96	9644.82	9608.96	9544.03	9514.94
20	9526.59	9539.75	9571.91	9590.88	9571.91	9539.77	9526.59

Η μέγιστη τιμή ισχύος για την τετραγωνική διάταξη όπως φαίνεται από το γράφημα (Εικόνα 26) αλλά και από τον πίνακα 7.7 είναι 9893.995KWh/έτος. Η διάταξη αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι συσκευές σχηματίζουν τετράγωνο και οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων τους είναι στα 15.50m και η γωνία πρόσπτωσης του κύματος είναι στις 45°.

Πίνακας 7.8 Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Square conf

	H _s [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T _p [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		6.52	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		344.90	208.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		523.81	3980.52	39.02	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		145.38	1934.31	692.63	0.91	0.00	0.00	0.00
7-8		7.90	364.50	807.04	136.03	1.01	0.00	0.00
8-9		1.33	55.33	224.43	266.55	22.79	0.00	0.00
9-10		0.25	5.39	19.62	53.73	36.99	6.08	0.00
10-11		0.00	0.66	1.62	1.97	1.80	2.53	0.00
11-12		0.00	0.06	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς 9893.995KWh/έτος

Μεμονωμένο σώμα (Isolated Body)

Ο πιο κάτω πίνακας περιέχει την απορροφούμενη κυματική ισχύ για κάθε ζεύγος περιβαλλοντικών συνθηκών που απορρόφησε μια μεμονωμένη συσκευή μόνη της στο χώρο εκτεθειμένη στους φυσικούς κυματισμούς χωρίς να υπάρχει κάποια άλλη συσκευή ή αντικείμενο να βοηθάει μέσω των ανακλάσεων.

Πίνακας 7.9 Απόδοση κυματική συσκευής [kW/έτος]: Isolated body

	H _s [m]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
T _p [sec]								
2-3		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3-4		11.15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4-5		351.02	224.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5-6		434.31	2951.55	39.54	0.00	0.00	0.00	0.00
6-7		148.61	2147.33	745.58	0.93	0.00	0.00	0.00
7-8		8.06	391.19	964.67	154.38	1.03	0.00	0.00
8-9		1.35	56.36	252.57	309.90	26.00	0.00	0.00
9-10		0.25	5.48	19.95	62.25	42.53	6.89	0.00
10-11		0.00	0.67	1.65	2.02	1.98	2.72	0.00
11-12		0.00	0.06	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολική ισχύς 9366.413KWh/έτος

8 Συμπεράσματα και προτάσεις

Η κυματική ενέργεια αποτελεί μια ολοένα και πιο ελκυστική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και η βέλτιστη διάταξη τοποθέτησης των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοποίηση αυτού του πόρου. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να διερευνηθεί τη βέλτιστη διαμόρφωση για συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας τύπου σημειακού απορροφητή ενέργειας (Point absorber) με έμφαση σε τρεις σχεδιασμούς: διατάξεις σε σειρά, διατάξεις ρόμβου και τετράγωνες διατάξεις. Πραγματοποιώντας μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και εκτελώντας υπολογισμούς, αποκτήσαμε πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την ενεργειακή απόδοση κάθε διάταξης, οδηγώντας τελικά στον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας. Το παρόν κείμενο ερμηνεύει τα αποτελέσματα, συνοψίζει τα ευρήματα και εξάγει συμπεράσματα με βάση τα δεδομένα και την ανάλυση.

Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς για τις τρεις διαμορφώσεις παρέχουν βασικές πληροφορίες για την κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης αυτών των συσκευών. Ας αναλύσουμε τα βασικά ευρήματα:

1. Ευθεία Διάταξη: Η διαμόρφωση inline επιδεικνύει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, παράγοντας 10.874,33 kWh/έτος. Αυτή η διαμόρφωση ευθυγραμμίζει τις τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε ευθεία γραμμή. Αυτή η υψηλή παραγωγή ενέργειας μπορεί να αποδοθεί στην ευθυγράμμιση της διάταξης με την κυρίαρχη κατεύθυνση των κυμάτων η οποία είναι 90° με βάση τους υπολογισμούς, επιτρέποντας τη βέλτιστη απορρόφηση ενέργειας.
2. Διάταξη Ρόμβου: Η διάταξη ρόμβου, με ετήσια παραγωγή ενέργειας 10.389,3 kWh/έτος, έχει επίσης καλές επιδόσεις. Αυτός ο σχεδιασμός διαμορφώνει τους τέσσερις σημειακούς απορροφητές σε σχήμα ρόμβου. Αν και δεν είναι τόσο αποδοτική όσο η διάταξη σε σειρά, ο ρόμβος προσφέρει μια καλή ισορροπία μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και έκτασης τοποθέτησης. Είναι αξιοσημείωτο ότι υπερτερεί της τετράγωνης διάταξης.
3. Τετράγωνη Διάταξη: Η τετράγωνη διάταξη παράγει τη χαμηλότερη ποσότητα ενέργειας, με ετήσια παραγωγή 9.893,995 kWh/έτος. Σε αυτόν τον σχεδιασμό, οι σημειακοί απορροφητές είναι τοποθετημένοι σε τετράγωνο σχηματισμό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτή η διαμόρφωση είναι λιγότερο αποτελεσματική στη απορρόφηση της κυματικής ενέργειας, ενδεχομένως λόγω της λιγότερο ευνοϊκής ευθυγράμμισής της με την επικρατούσα κατεύθυνση των κυμάτων.
4. Μεμονωμένο σώμα: Είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθεί ότι η ετήσια ενέργεια που παράγεται από ένα μεμονωμένο σώμα είναι 9.366,413 kWh/έτος. Αυτό χρησιμεύει ως πολύτιμο σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των επιδόσεων των διατάξεων. Και οι τρεις διατάξεις υπερτερούν έναντι του μεμονωμένου σώματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι διατάξεις συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν σημαντικά την παραγωγή ενέργειας.

Συμπέρασμα

Εν κατακλείδι, η μελέτη των διατάξεων των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας παρείχε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον βέλτιστο σχεδιασμό για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Η διαμόρφωση inline, με την ευθυγράμμιση της κάθετα με την κυρίαρχη κατεύθυνση των κυμάτων, αναδεικνύεται ως η κορυφαία, παράγοντας 10.874,33 kWh/έτος. Η διαμόρφωση ρόμβου προσφέρει επίσης μια ανταγωνιστική επιλογή με ετήσια παραγωγή ενέργειας 10.389,3 kWh/έτος. Από την άλλη πλευρά, η τετράγωνη διαμόρφωση υστερεί με παραγωγή 9.893,995 kWh/έτος.

Τα ευρήματα αυτά μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις για την ανάπτυξη και την εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Η επιλογή της διαμόρφωσης είναι απαραίτητη για την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής ενεργειακής απόδοσης και η διαμόρφωση σε σειρά θα πρέπει να είναι η προτιμώμενη επιλογή σε περιπτώσεις όπου η βέλτιστη απορρόφηση ενέργειας είναι ο πρωταρχικός στόχος. Επομένως για την περίπτωση της Κάσου με γνώμονα την μέγιστη απορροφούμενη ισχύ χωρίς περιορισμούς στην έκταση εγκατάστασης, επιλέγουμε την διάταξη σε ευθεία γραμμή.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες κατά την επιλογή μιας διαμόρφωσης, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών συνθηκών, της δομικής σταθερότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας. Η διαμόρφωση ρόμβου θα μπορούσε να είναι ένας κατάλληλος συμβιβασμός σε περιπτώσεις όπου ο εν σειρά σχεδιασμός είναι ανέφικτος λόγω αυτών των παραγόντων.

Συνοπτικά, η παρούσα έρευνα συμβάλλει στον τομέα της κυματικής ενέργειας παρέχοντας σαφή κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης των διαφόρων διαμορφώσεων. Είναι ζωτικής σημασίας για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους μηχανικούς και τους επενδυτές να λάβουν υπόψη τους αυτά τα ευρήματα όταν παίρνουν αποφάσεις σχετικά με έργα ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Αξιοποιώντας το δυναμικό της κυματικής ενέργειας και επιλέγοντας την καταλληλότερη διαμόρφωση, μπορούμε να προχωρήσουμε προς ένα πιο βιώσιμο και ανανεώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δύναται να επεκταθεί :

- a) Με τη διερεύνηση βέλτιστης διάταξης για περισσότερες κυματικές συσκευές έχοντας τον περιορισμό σε θαλάσσια έκταση.
- b) Επίσης θα μπορούσε να αναπτυχθεί ο ήδη υπάρχων κώδικας της Python με σκοπό την αυτόματη αναπαραγωγή διατάξεων και επιλογή της βέλτιστης.

Βιβλιογραφία

1. Hangfei Li, Xiwen Sun, Hui Zhou. *Wave energy: history, implementations, environmental impacts, and economics*. 2022.
2. Smooth, Grace. [Online] <https://impactful.ninja/the-history-of-wave-energy/>.
3. Falcao, A.F.O. *Renewable Energy*. Lisbon, Portugal : Univercity of Lisbon, 2016. Vols. 1049-001.
4. *DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. s.l. : Official Journal of the European Parliament.
5. Wordpress. *Renewable energy. Salter's Nodding Duck*. [Online] <https://baonguyen1994.wordpress.com/introduction-to-wave-energy/ocean-wave-technologies/terminators/salters-nodding-duck/>.
6. Falnes, Johannes. *Research and development in ocean-wave energy in Norway*. Japan : s.n., 1993. Vols. 1, 27-37.
7. Wave Energy. *WavEC*. [Online] 2004. <https://www.wavec.org/en/business-scope/wave-energy>.
8. Vincenzo Ferrante, Enrico Di Lauro. *Prototype Overtopping Breakwater for Wave Energy Conversion at Port of Naples*. Aversa, Italy : s.n., 2016.
9. Energy.gov. *energy sources*. [Online] <https://www.energy.gov/energy-sources>.
10. Wikipedia. "*Deepwater Horizon oil spill*". [Online] 2021. https://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon_oil_spill.
11. MET Group. [Online] 18 January 2021. <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out>.
12. REN21. "*REN21's Renewables 2022 Global Status Report*". [Online] <https://www.ren21.net/gsr-2022/pages/keymessages/keymessages/#key-power>.
13. Europe, Wind. *Wind Europe*. [Online] 3 August 2022. <https://windeurope.org/newsroom/news/first-greek-offshore-wind-law-seeks-2-gw-by-2030/>.
14. Europe, Ocean Energy. *Wave Energy. Ocean Energy Europe*. [Ηλεκτρονικό] <https://www.oceanenergy-europe.eu/ocean-energy/wave-energy/>.
15. Clément, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, B.-O., Sjöström, P., Sørensen, H.C., and Thorpe, T. "Wave energy in Europe: current status and perspectives". 2002. Vols. 6, No. 5, p. 405–431.
16. Corsatea, T.D., Magagna, D.,. "*Overview of European innovate on activities in marine energy technology*". Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013.
17. "Movements of waves". *Alternative energy tutorials*. [Online] 2018. <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/movements-of-waves.html>.
18. Nielsen, K., Smed, P.F. "*Point absorber—optimization and survival testing*". s.l. : 3rd European Wave Energy Conference, 1998.
19. Waters, R, Stalberg, M, Danielsson, O, Svensson, O, Gustafsson, S, Stromstedt,. "Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system". s.l. : Applied Physical Letters, 2007. Vols. 90, No. 3.
20. Falnes, J. "Wave-energy conversion through relative motion between two - single mode oscillating bodies". *J Offshore Mech Arctic Eng* : s.n., 1999.
21. Mavrakos, S. A. "Hydrodynamic coefficients in heave of two concentric surface-piercing truncated circular cylinders". *Applied Ocean Research*. 2004. Vols. 26, No. 3-4, p. 84-97.
22. Mavrakos, S.A., Katsaounis, G. "Effects of floater's Hydrodynamics on the performance of tightly moored wave energy converters". 2010.
23. Mavrakos, S., Chatjigeorgiou, I., Mazarakos, T., Konispoliatis D., Maron, A.,. "Hydrodynamic forces and wave run-up on concentric vertical cylinders forming piston- like arrangements". *26th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Ath*.
24. Mavrakos, S.A., Chatjigeorgiou, I.K. "Second-order hydrodynamic effects on an arrangement of

- two concentric truncated vertical cylinders". *Marine Structures*. 2009.
25. Weber, J, Mouwen, F., Parish, A., Robertson, D.,. "Wavebob—research & development network and tools in the context of system engineering". Uppsala : s.n., 2009. 8th European Wave Tidal Energy Conference.
26. McIver, P. "Hydrodynamic aspects of arrays of wave-energy devices". 1994. Vols. 16, p. 61-69, Applied Ocean Research.
27. Mavrakos, S.A., McIver, P.,. "Comparison of methods for computing hydrodynamic characteristics of arrays of wave power devices". 1998. Vols. 19, p. 283- 291, Applied Ocean Research.
28. Mavrakos, S.A., Kalofonos, A. "Power absorption by arrays of interacting vertical axisymmetric wave-energy devices". s.l. : Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,, 1997. Vol. 119, p. 244-251,.
29. Fitzgerald, C., Tomas, G. "A preliminary study on the optimal formation of an array of wave power devices". Porto : 7th European Wave and Tidal Energy Conference, 2007.
30. EMEC. [Online] The European Marine Energy Centre LTD. <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>.
31. Konispoliatis, D.N., Mavrakos, A.S., Mavrakos, S.A, Chatjigeorgiou, I.K. "Effect of moorings on the efficiency of a floating Oscillating Water Column Device". *EWTEC*. Plymouth, U.K : s.n., 2021. 14th European Wave and Tidal Energy Conference Series.
32. HCMR. *Hellenic Centre for Marine Research*. [Online] <http://www.poseidon.hcmr.gr>.
33. Nielsen, K. "Ocean Energy Technology Study". *The Alliance for Offshore Renewables*. [Online] 2012.
34. Soukissian, T.H. Blue Energy in the Medirerranean Sea. *Interreg PELAGOS*. [Online] 2017.
35. Cruz, J. "Ocean wave energy". Berlin, Heidelberg, Germany : s.n., 2010.
36. Ovi, Sara and. "Advantages and Disadvantages of Wave Energy". *GreenTumble*. [Online] 4 JANUARY 2023. <https://greentumble.com/advantages-and-disadvantages-of-wave-power>.
37. Konispoliatis, D.N, Mavrakos, S.A.,. "Hydrodynamic analysis of an array of interacting". *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 111, pp. 179 - 197.
38. Vlachou, Chrysa. "Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των φορτίσεων σε τριγωνική εξέδρα στήριξης πλωτής ανεμογεννήτριας". 2013. Τόμ. 1, 81-91.
39. REFOS Project. [Online] European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme, 2020. [Cited: 10 octomber 2023.] www.refos-project.eu.
40. DNV-GL. "Environmental conditions and environmental loads, Recommended Practice". 2010.
41. W, Vijfhuizen. "Design of wind and wave power barge". 2006. Master Thesis.
42. Energy, Center for Renewable. "*Ocean Energy Conversion in Europe*". Athens : s.n., 2006.
43. Drew, B., Plummer, A.R., Sahinkaya, M.N. "A review of wave energy converter technology". *Power and Energy*. 2009. Vols. 223 Part A, p. 887-902.
44. Kokkinowrachos K., Mavrakos, S.A, Asorakos, S. "Behavior of vertical bodies of revolution in waves", *Ocean Engineering*". 1986. Vols. 13 ,No. 6, p.505-538.
45. Ocean Energy Europe. *Powered by Ocean*. [Online] <https://www.oceanenergy-europe.eu/ocean-energy/>.
46. Taveira-Pinto, F., Silva, R., Pais – Barbosa, J. Coastal Erosion Along the Portuguese Northwest Coast Due to Changing Sediment Discharges from Rivers and Climate Change. [Online]
47. Yu, Y.H., Li, Y.,. "Simulation of the Heave Response of a Two-Body Floating-Point Wave Absorber". Hawaii : s.n., 2011.
48. Βικιπαίδεια. *Ενέργεια των ωκεανών*. [Online] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CF%84%CF%89%CE%BD_%CF%89%CE%BA%CE%B5%CE%B1%CE%BD%CF%8E%CE%BD.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα 1: Αρχείο εισόδου τετραγωνικής διάταξης

```
HYDRODYNAMIC ANALYSIS. DRIFT FLOATING BODIES
.TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE. .TRUE.
50.00  04 30 7 15.000
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
2.500  2.500  2.500  2.500
0.000  05.50  00.00  05.50
0.000  0.000  05.50  05.50
 7 19 7 1 1 0 0
 02.500
0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000
1.100 1.200 1.300 1.400 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900 2.000
2.100 2.200 2.300 2.400 2.500 2.600 2.700 2.800 2.900 3.000
 1 1 1 1 1
2.500  2.500  2.500  2.500
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER
2.500
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 0 0
45.00
 49
2.500
50.00 -2.430 1235.79 100.629
```

Παράρτημα 2: Αρχείο εισόδου ευθείας διάταξης

```
HYDRODYNAMIC ANALYSIS. DRIFT FLOATING BODIES
.TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE. .TRUE.
50.00  04 30 7 00.000
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
 1 1 1 1 1
2.500  2.500  2.500  2.500
0.000  08.00  16.00  24.00
0.000  0.000  0.000  0.000
 7 19 7 1 1 0 0
 02.500
0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000
1.100 1.200 1.300 1.400 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900 2.000
2.100 2.200 2.300 2.400 2.500 2.600 2.700 2.800 2.900 3.000
 1 1 1 1 1
2.500  2.500  2.500  2.500
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER
2.500
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
 0 0
```

45.00
49
2.500
50.00 -2.430 1235.79 100.629

Παράρτημα 3: Αρχείο εισόδου διάταξης ρόμβου

HYDRODYNAMIC ANALYSIS. DRIFT FLOATING BODIES

.TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE. .TRUE.

50.00 04 30 7 00.000

1 1 1 1 1

1 1 1 1 1

1 1 1 1 1

1 1 1 1 1

2.500 2.500 2.500 2.500

0.000 07.00 07.00 14.00

0.000 07.00 -7.00 0.000

7 19 7 1 1 0 0

02.500

0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000

1.100 1.200 1.300 1.400 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900 2.000

2.100 2.200 2.300 2.400 2.500 2.600 2.700 2.800 2.900 3.000

1 1 1 1 1

2.500 2.500 2.500 2.500

GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER

2.500

.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.

0 0

45.00

49

2.500

50.00 -2.430 1235.79 100.629

Παράρτημα 4: Αρχείο εισόδου isolated body

HYDRODYNAMIC ANALYSIS. DRIFT FLOATING BODIES

.TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE. .TRUE.

50.00 01 30 7 00.000

1 1 1 1 1

2.500

0.000

0.000

7 19 7 1 1 0 0

02.500

0.100 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.700 0.800 0.900 1.000

1.100 1.200 1.300 1.400 1.500 1.600 1.700 1.800 1.900 2.000

2.100 2.200 2.300 2.400 2.500 2.600 2.700 2.800 2.900 3.000

1 1

2.500

GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER

2.500

.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.

0 0

45.00

49

2.500

50.00 -2.430 1235.79 100.629

Παράρτημα 5: Παραγόμενο αρχείο αποτελεσμάτων

```
*****FIRST ORDER MOTIONS*****
0      TRANSLAT. MOTIONS/(H/2)  RESP ROTATIONAL MOTIONS/(H/2)
body:  1
0.10000E+00 0.11385E-01 0.11507E+01 0.15713E+01 0.42939E+01 0.15708E+01 0.10003E+01 0.76544E-02 0.10264E+01 0.15708E+01 0.27503E+00 -0.15695E+01
0.20000E+00 0.23373E-01 0.58074E+00 0.15718E+01 0.21659E+01 0.15708E+01 0.10014E+01 0.15651E-01 0.12603E+01 0.15707E+01 0.33781E+00 -0.15681E+01
0.30000E+00 0.36681E-01 0.38745E+00 0.15723E+01 0.14438E+01 0.15707E+01 0.10035E+01 0.24366E-01 0.19858E+01 0.15707E+01 0.53245E+00 -0.15665E+01
0.40000E+00 0.52273E-01 0.21147E+00 0.15715E+01 0.78687E+00 0.15708E+01 0.10073E+01 0.34248E-01 0.83838E+01 0.15708E+01 0.22418E+01 -0.15647E+01
0.50000E+00 0.71463E-01 0.32653E+00 0.15759E+01 0.12104E+01 0.15706E+01 0.10143E+01 0.46050E-01 0.29260E+01 -0.15711E+01 0.78930E+00 0.15800E+01
0.60000E+00 0.95806E-01 0.27697E+00 0.15788E+01 0.10240E+01 0.15705E+01 0.10275E+01 0.60474E-01 0.11598E+01 -0.15712E+01 0.31330E+00 0.15846E+01
0.70000E+00 0.12647E+00 0.25698E+00 0.15845E+01 0.94656E+00 0.15703E+01 0.10529E+01 0.78973E-01 0.70044E+00 -0.15714E+01 0.18971E+00 0.15921E+01
0.80000E+00 0.16357E+00 0.24501E+00 0.15943E+01 0.89901E+00 0.15700E+01 0.11014E+01 0.10450E+00 0.49318E+00 -0.15717E+01 0.13389E+00 0.16040E+01
0.90000E+00 0.20653E+00 0.23512E+00 0.16105E+01 0.85995E+00 0.15696E+01 0.11941E+01 0.14415E+00 0.37646E+00 -0.15720E+01 0.10230E+00 0.16231E+01
0.10000E+01 0.25486E+00 0.22468E+00 0.16385E+01 0.82218E+00 0.15693E+01 0.13799E+01 0.21686E+00 0.30200E+00 -0.15723E+01 0.81705E-01 0.16552E+01
0.11000E+01 0.30836E+00 0.21117E+00 0.16838E+01 0.78373E+00 0.15691E+01 0.17951E+01 0.38829E+00 0.25034E+00 -0.15725E+01 0.66164E-01 0.17064E+01
0.12000E+01 0.36697E+00 0.19596E+00 0.17720E+01 0.74422E+00 0.15691E+01 0.26532E+01 0.93620E+00 0.21222E+00 -0.15725E+01 0.53290E-01 0.17937E+01
0.13000E+01 0.43068E+00 0.13230E+00 0.18404E+01 0.70376E+00 0.15691E+01 0.20436E+01 0.20083E+01 0.18270E+00 -0.15724E+01 0.32347E-01 0.17994E+01
0.14000E+01 0.49949E+00 0.10445E+00 0.15300E+01 0.66266E+00 0.15695E+01 0.93743E+00 0.24868E+01 0.15897E+00 -0.15719E+01 0.24921E-01 0.14850E+01
0.15000E+01 0.57339E+00 0.11088E+00 0.11534E+01 0.62096E+00 0.15708E+01 0.48589E+00 0.26722E+01 0.13924E+00 -0.15706E+01 0.25112E-01 0.11308E+01
0.16000E+01 0.65240E+00 0.14249E+00 0.10691E+01 0.57830E+00 0.15732E+01 0.26805E+00 0.27532E+01 0.12227E+00 -0.15682E+01 0.30334E-01 0.10585E+01
0.17000E+01 0.73649E+00 0.15098E+00 0.11629E+01 0.53464E+00 0.15754E+01 0.15707E+00 0.27488E+01 0.10731E+00 -0.15659E+01 0.30424E-01 0.11557E+01
0.18000E+01 0.82569E+00 0.14241E+00 0.10769E+01 0.49103E+00 0.15770E+01 0.99526E-01 0.27504E+01 0.94036E-01 -0.15642E+01 0.27363E-01 0.10714E+01
0.19000E+01 0.91998E+00 0.19206E+00 0.92749E+00 0.44734E+00 0.15815E+01 0.59745E-01 0.28476E+01 0.82052E-01 -0.15596E+01 0.35310E-01 0.92407E+00
0.20000E+01 0.10194E+01 0.26728E+00 0.12706E+01 0.39950E+00 0.15876E+01 0.26411E-01 0.28217E+01 0.70383E-01 -0.15535E+01 0.47133E-01 0.12678E+01
0.21000E+01 0.11239E+01 0.27829E+00 0.18560E+01 0.34793E+00 0.15719E+01 0.14649E-01 0.20195E+01 0.58993E-01 -0.15691E+01 0.47185E-01 0.18531E+01
0.22000E+01 0.12334E+01 0.19410E+00 0.24742E+01 0.30622E+00 0.15180E+01 0.17573E-01 0.18361E+01 0.50035E-01 -0.16230E+01 0.31691E-01 0.24704E+01
0.23000E+01 0.13481E+01 0.79837E-01 0.30375E+01 0.27871E+00 0.14730E+01 0.14636E-01 0.20122E+01 0.43925E-01 -0.16679E+01 0.12558E-01 0.30301E+01
0.24000E+01 0.14679E+01 0.24109E-01 0.24642E+01 0.24859E+00 0.14546E+01 0.92712E-02 0.20771E+01 0.37804E-01 -0.16863E+01 0.37141E-02 0.24547E+01
0.25000E+01 0.15928E+01 0.13535E-01 -0.30470E+01 0.21753E+00 0.14120E+01 0.64432E-02 0.20028E+01 0.31925E-01 -0.17289E+01 0.20013E-02 -0.30601E+01
0.26000E+01 0.17227E+01 0.36948E-01 0.27222E+00 0.19233E+00 0.13746E+01 0.39449E-02 0.21189E+01 0.27240E-01 -0.17663E+01 0.52099E-02 0.27381E+00
0.27000E+01 0.18578E+01 0.49840E-01 0.49064E+00 0.16452E+00 0.13304E+01 0.22177E-02 0.20673E+01 0.22481E-01 -0.18105E+01 0.68028E-02 0.48860E+00
0.28000E+01 0.19980E+01 0.48863E-01 0.44472E+00 0.14350E+00 0.12660E+01 0.13418E-02 0.19356E+01 0.18912E-01 -0.18750E+01 0.64442E-02 0.44216E+00
0.29000E+01 0.21432E+01 0.34839E-01 0.97363E-01 0.11931E+00 0.12452E+01 0.88323E-03 0.17315E+01 0.15163E-01 -0.18958E+01 0.44406E-02 0.92961E-01
0.30000E+01 0.22936E+01 0.38323E-01 0.67730E+00 0.91764E-01 0.10879E+01 0.48456E-03 0.12350E+01 0.11240E-01 -0.20532E+01 0.47093E-02 0.67256E+00
```

Παράρτημα 6: Script του run.py

```
from find_max_power_scenario import lookup, find_maxP_and_scName
```

```
INLINE_PATH = "Inline"
lookup(INLINE_PATH)
print("MAX POWER IN INLINE SET-UP", find_maxP_and_scName(INLINE_PATH))
```

```
SQUARE_PATH = "Square"
lookup(SQUARE_PATH)
print("MAX POWER IN SQUARE SET-UP", find_maxP_and_scName(SQUARE_PATH))
```

```
RHOMBUS_PATH = "Rhombus"
lookup(RHOMBUS_PATH)
print("MAX POWER IN RHOMBUS SET-UP", find_maxP_and_scName(RHOMBUS_PATH))
```


Παράρτημα 7: Script του utilities.py

```
import numpy as np
from scipy.integrate import simps
import math

def calculate_alpha(w, wp, sigma):
    return np.exp(-0.5 * ((w - wp) / (sigma * wp))**2)

def calculate_gamma(Tp, Hs):
    Hs += 1
    if Tp / np.sqrt(Hs) <= 3.6:
        return 5.0
    elif 3.6 < Tp / np.sqrt(Hs) <= 5.0:
        return np.exp(5.75 - 1.15 * (Tp / np.sqrt(Hs)))
    else:
        return 1.0

def jonswap_spectrum(w, Hs, Tp):
    wp = 2 * np.pi / Tp # Peak angular frequency (rad/s)

    gamma = calculate_gamma(Tp, Hs)

    spectra = []
    for angular_frequency in w:
        sigma = 0.07 if angular_frequency < wp else 0.09
        alpha = calculate_alpha(angular_frequency, wp, sigma)
        A = 1 - 0.287 * math.log(gamma)
        B = ((5 / 16) * (Hs ** 2) * (wp ** 4)) / (angular_frequency ** 5)
        C = np.exp(-1.25 * ((wp ** 4) / (angular_frequency ** 4))) * (gamma ** alpha)
        spectra.append(A * B * C)

    return spectra

def calculate_zero_degrees(angular_frequencies, power):
    h_values = np.arange(0.5, 7.5, 1)
    t_values = np.arange(2.5, 12.5, 1)

    Zero_degrees = np.zeros((len(t_values), len(h_values)))
    c = np.array([1, 4, 2, 4, 1])

    for t_index, t in enumerate(t_values):
        for h_index, h in enumerate(h_values):
            # Calculate the JONSWAP spectrum for the current h and t
            spectrum = jonswap_spectrum(angular_frequencies, h, t)

            # Convert power and spectrum to NumPy arrays
            power_np = np.array(power)
            spectrum_np = np.array(spectrum)

            # Perform element-wise multiplication
            multiplied = 2 * power_np * spectrum_np
```

```

# Integrate using Simpson's rule
integral_simps = simps(multiplied, angular_frequencies)

# Store the result in Zero_degrees
Zero_degrees[t_index][h_index] = integral_simps

return Zero_degrees

def calculate_yearly_power(angular_frequencies, power):
    freq_occurrence = np.array([
        221, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        6702, 7, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        24291, 1634, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        18937, 11619, 41, 0, 0, 0, 0, 0,
        6869, 11028, 1498, 1, 0, 0, 0, 0,
        462, 2492, 2328, 223, 1, 0, 0, 0,
        100, 463, 747, 517, 30, 0, 0, 0,
        24, 58, 76, 121, 57, 7, 0, 0,
        0, 9, 8, 5, 3, 3, 0, 0,
        0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0
    ])

    zero_degrees = calculate_zero_degrees(angular_frequencies, power).flatten()

    return (freq_occurrence * zero_degrees * 3 / 31)

```

Παράρτημα 8: Script find_max_power_scenario.py

```
import os
import pandas as pd
import csv
import numpy as np
from utilities import calculate_yearly_power

def find_maxP_and_scName(folder_path):
    RESULTS_FOLDER = os.path.join("results", os.path.basename(folder_path))
    max_power = float('-inf') # Initialize max_power with negative infinity
    max_power_filename = None

    file_path = RESULTS_FOLDER + '/results.csv'

    try:
        with open(file_path, mode='r') as file:
            csv_reader = csv.DictReader(file)
            for row in csv_reader:
                filename = row['filename']
                power = float(row['power'])
                if power > max_power:
                    max_power = power
                    max_power_filename = filename

        if max_power_filename is not None:
            return max_power, max_power_filename
        else:
            return None # If no data was found in the file

    except FileNotFoundError:
        print(f"The file '{file_path}' was not found.")
        return None
    except Exception as e:
        print(f"An error occurred: {str(e)}")
        return None

# Loop through files in the current directory
def lookup(folder_path):
    RESULTS_FOLDER = os.path.join("results", os.path.basename(folder_path))

    # Create the results folder if it doesn't exist
    os.makedirs(RESULTS_FOLDER, exist_ok=True)

    # Loop through files in the specified folder
    for filename in os.listdir(folder_path):
        if filename.startswith("plthamv.") and filename[8:].isdigit():
            # Construct the full file path
            file_path = os.path.join(folder_path, filename)

            # Read the contents of the file
```

```

with open(file_path, 'r') as file:
    text = file.read()

# Split the text into sections based on the section headers
sections = text.split("*****")

# Find the sections of interest
first_order_motions_section = None

for i in range(1, len(sections), 2):
    if "FIRST ORDER MOTIONS" in sections[i]:
        first_order_motions_section = sections[i + 1]

# Processing the data in the "First Order Motions" section
if first_order_motions_section:
    # Remove "-----" from the section
    first_order_motions_section = first_order_motions_section.replace("-----", "")

    # Split the section into lines
    lines = first_order_motions_section.strip().split("\n")

    # Extract data for each body
    bodies = []
    current_body = None

    for line in lines:
        if line.strip().startswith("body:"):
            if current_body:
                bodies.append(current_body)
                current_body = {"body": line.strip().split()[-1], "data": []}
            else:
                data_values = line.split()
                if current_body:
                    # Check if there are at least 7 columns before extracting the 7th column
                    if len(data_values) > 6:
                        seventh_column = float(data_values[6])
                        current_body["data"].append(seventh_column)

    # Append the last body
    if current_body:
        bodies.append(current_body)
    else:
        print(f"No data available for First Order Motions in {filename}")

# Calculate the avg power for every w
DUMPING_COEFF = 5.0091

w = [x / 10.0 for x in range(1, 31)]
avgPperW = []
for i_index, wi in enumerate(w):

```

```

        ith_bodyPower_perW = [0.5 * (wi ** 2) * DUMPING_COEFF * (body_data['data'][i_index]
** 2) for body_data in bodies]
        avgBodiesPowerSum = sum(ith_bodyPower_perW) / 4
        avgPperW.append(avgBodiesPowerSum)

# Calculate zero degrees
angular_frequencies = np.arange(0.1, 3.1, 0.1)

yearly_power = calculate_yearly_power(angular_frequencies, avgPperW)

# Calculate yearly power and store it in a file
yearly_power_file = os.path.join(RESULTS_FOLDER, filename)
np.savetxt(yearly_power_file, yearly_power.reshape(10, 7))

# Calculate and store the power sum
power_sum = np.sum(yearly_power)

# Write the power sum to the results CSV file
results_csv = os.path.join(RESULTS_FOLDER, "results.csv")
if not os.path.exists(results_csv):
    df = pd.DataFrame(columns=["filename", "power"])
else:
    df = pd.read_csv(results_csv)

df = pd.concat([df, pd.DataFrame({"filename": [filename], "power": [power_sum]}),
ignore_index=True)
df.to_csv(results_csv, index=False)

```