



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜ. ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Μ.Π.Σ «ΑΝΑΛΥΣΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΠΑΛΑΜΩΤΗ ΔΗΜΗΤΡΑ

«Επίδραση της παγίδευσης της κυματικής ενέργειας
σε σειρές κυλίνδρων μέσα σε κανάλι»



ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Βανέσσα Κατσαρδή
Επικ. Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΒΟΛΟΣ, 2019

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	2
1. Εισαγωγή στην Γαλάζια Ενέργεια.....	3
1.1 Γαλάζια ανάπτυξη	4
1.2 Γαλάζια ενέργεια	8
1.2.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια (offshore wind energy).....	8
1.2.2 Ωκεάνια Ενέργεια	15
1.2.2.1 Μορφές της ενέργειας των ωκεανών	16
1.2.2.2 Τεχνολογίες ωκεάνιας ενέργειας	25
1.2.2.3 Χρονοδιάγραμμα για την επίτευξη της τεχνολογικής προόδου και τη δημιουργία μιας νέας βιομηχανίας ενέργειας	60
1.3 Ενεργειακό καθεστώς στην Ελλάδα – Δυνατότητα εκμετάλλευσης θαλάσσιου ενεργειακού δυναμικού.....	68
1.4 Επιπτώσεις της εκμετάλλευσης ωκεάνιας ενέργειας	79
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	85
3. Μορφοποίηση της θεωρίας αλληλεπίδρασης.....	91
3.1 Το υδροδυναμικό πρόβλημα.....	91
3.2 Επίλυση σε όρους ελλειπτικών αρμονικών.....	92
3.3 Γενικός σχηματισμός του δυναμικού της ταχύτητας για τον προσπίπτων και τον περιθλώμενο κυματισμό.....	95
3.4 Υδροδυναμική αλληλεπίδραση συστοιχιών πολλαπλών ελλειπτικών κυλίνδρων	97
3.5 Υδροδυναμική φόρτιση	104
3.6 Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (run up).....	105
4. Αποτελέσματα υδροδυναμικής φόρτισης	106
4.1 Ασκούμενες δυνάμεις και ροπές	110
4.2 Βρεχόμενη επιφάνεια (wave run up).....	150
4.3 Συγκριτικά διαγράμματα	168
5. Συμπεράσματα	177
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	180
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	185

Πρόλογος

Η ωκεάνια ενέργεια αποτελεί έναν σημαντικό πόρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που αν αξιοποιηθεί εκτεταμένα, μπορεί να συμβάλλει καίρια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χώρες με θαλάσσιες ακτές, περιορίζοντας δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που επιβαρύνουν τον πλανήτη μας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας τα οφέλη και τη συμβολή στη βιώσιμη ανάπτυξη που μπορεί να παρέχει η εκμετάλλευση της ωκεάνιας ενέργειας, την έχει συμπεριλάβει στο στρατηγικό πρόγραμμα "γαλάζια ανάπτυξη".

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση περαιτέρω δεδομένων σχετικά με τα υδροδυναμικά φαινόμενα σε περίπτωση εγκατάστασης πολλαπλών συσκευών WEC, δεδομένου ότι η κατανόηση και η λύση ενός τέτοιου προβλήματος έχει άμεσες επιπτώσεις στις προκλήσεις της τεχνολογίας αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, παρέχονται βασικές πληροφορίες για τις μορφές της ωκεάνιας ενέργειας, το δυναμικό τους, θεωρητικό και εκμεταλλεύσιμο, και τις τεχνολογίες που έχουν προταθεί, μελετηθεί και, σε ορισμένες περιπτώσεις, δοκιμαστεί σε πλήρες μέγεθος σε πραγματικές συνθήκες θάλασσας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κυματική ενέργεια και στην ευρεία ποικιλία τεχνολογιών (WEC) που έχει αναπτυχθεί για την αξιοποίηση της. Σημαντική κατηγορία WEC αποτελούν και οι συσκευές ταλαντούμενης-στήλης νερού (OWC), σταθερές ή πλωτές, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην Ελλάδα, αξιοποιώντας το μεγάλο μήκος ακτογραμμών και το πλεονέκτημα των ισχυρών ανέμων για ταυτόχρονη εκμετάλλευση των πηγών ενέργειας ανέμου και κυματισμών.

Ωστόσο, σε περίπτωση τοποθέτησης πολλαπλών συσκευών WEC, για λεπτομερέστερη ανάλυση της δυνατότητας παραγωγής, απαιτείται μελέτη της υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης κύματος/συστοιχίας συσκευών. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα μελέτη διερευνά την αλληλεπίδραση επίπεδων, γραμμικών κυματισμών με συστοιχίες σταθερών ελλειπτικών κυλίνδρων, δηλαδή τα υδροδυναμικά φαινόμενα που προκαλούνται λόγω της περίθλασης και ανάκλασης των κυμάτων μεταξύ γειτονικών στοιχείων σε μια δομή ανοικτής θαλάσσης.

Η μεθοδολογία επίλυσης αποτελεί την υπάρχουσα λύση των Chatjigeorgiou & Mavrakos (2009, 2010a), η οποία χρησιμοποιώντας τη γραμμική θεωρία δυναμικού παρέχει εκφράσεις για όλες τις υδροδυναμικές παραμέτρους, δηλαδή το δυναμικό της ταχύτητας, την υδροδυναμική φόρτιση και τη βρεχόμενη επιφάνεια των κυλίνδρων «wave run-up», παράμετροι που έχουν κρίσιμη σημασία για το σχεδιασμό παράκτιων δομών που υπόκεινται στη δράση των κυμάτων.

Στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, εντοπίζονται απότομες ενισχύσεις σε όλες τις συνιστώσες της υδροδυναμικής φόρτισης (δυνάμεις-ροπές) και ισχυρές αυξήσεις της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο των εξεταζόμενων κυλίνδρων. Τα παραπάνω συνδέονται με φαινόμενα παγίδευσης κυμάτων «wave trapping», και επαληθεύουν ότι, οποιαδήποτε συστοιχία ελλειπτικών κυλίνδρων, κατ' αντιστοιχία με τις συστοιχίες κυκλικών κυλίνδρων, είναι δυνατικά μια διαμόρφωση παγίδευσης κύματος.

1. Εισαγωγή στην Γαλάζια Ενέργεια

Το θέμα της ανανεώσιμης ενέργειας είναι ένα αειθαλές θέμα, ειδικά, σε έναν κόσμο που κυριαρχείται από ορυκτά καύσιμα. Η παραγωγή ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα, η οποία χρησιμοποιείται για ηλεκτρισμό, θέρμανση και μεταφορές, έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από κάθε άλλη ανθρώπινη δραστηριότητα. Είναι πιθανό μελλοντικά ο ρυθμός κατανάλωσης να είναι τόσο γρήγορος που οι γεωτρήσεις και οι εξορύξεις να μην επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης.

Η ανανεώσιμη ενέργεια συζητείται ευρέως στον σύγχρονο κόσμο, διότι είναι απεριόριστη, που σημαίνει ότι είναι βιώσιμη, και δεν προκαλεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (<https://www.conserve-energy-future.com/>). Ένα κλασικό παράδειγμα ανανεώσιμης ενέργειας είναι η ωκεάνια ενέργεια.

Η θάλασσα ανέκαθεν αποτελούσε πηγή ζωής για το ανθρώπινο είδος, από τη βασική ανάγκη της τροφής έως την εμπορική ανάπτυξη και την πολιτισμική εξέλιξη των λαών. Επιπλέον, έχει αποτελέσει από καιρό πηγή ενέργειας, όπως για παράδειγμα κατά τον Μεσαίωνα όπου οι αγρότες παγίδευαν το θαλάσσιο νερό στις λίμνες μύλων, για να το χρησιμοποιήσουν στους υδρόμυλους. Ερχόμενοι στο σήμερα, κατανοούμε πως οι γνωστές και οι άγνωστες πτυχές της δυναμικής των ωκεανών είναι αυτό που πρέπει να μελετηθεί, ώστε να μεταβούμε σε ένα βιώσιμο μέλλον, καθώς η θάλασσα μπορεί να είναι αυτή που θα βγάλει την ανθρωπότητα από το ενεργειακό τέλμα.

Το ενεργειακό δυναμικό των θαλασσών και των ωκεανών μας ξεπερνά τις σημερινές μας ενεργειακές ανάγκες. Μια ποικιλία διαφορετικών τεχνολογιών αναπτύσσεται επί του παρόντος για να αξιοποιήσει αυτή την ενέργεια σε όλες τις μορφές της, όπως κύματα, παλίρροιες, βαθμίδα αλατότητας και θερμικές διαβαθμίσεις. Η ανάπτυξη είναι ακόμα περιορισμένη, αλλά ο τομέας έχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί, προωθώντας την οικονομική ανάπτυξη (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Η οικονομία των ωκεανών οδηγείται από ένα συνδυασμό αύξησης του πληθυσμού, αυξανόμενου εισοδήματος, εξασθένησης φυσικών πόρων, αντιδράσεις στην κλιματική αλλαγή και πρωτοποριακών τεχνολογιών (<http://bluegrowth.inogs.it>). Ενώ οι παραδοσιακές ναυτιλιακές βιομηχανίες συνεχίζουν να καινοτομούν με γρήγορο ρυθμό, οι αναδυόμενες ωκεάνιες βιομηχανίες προσελκύουν το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής (<http://bluegrowth.inogs.it>). Οι βιομηχανίες αυτές περιλαμβάνουν την υπεράκτια αιολική, παλιρροιακή και κυματική ενέργεια, την εξερεύνηση και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου σε υπερβολικά βαθιά νερά και εξαιρετικά εχθρικά περιβάλλοντα, την υπεράκτια υδατοκαλλιέργεια, την εξόρυξη στον πυθμένα της θάλασσας (ΟΟΣΑ, 2016).

Το 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε ανακοίνωση σχετικά με τη "γαλάζια ανάπτυξη", στην οποία παρουσιάζεται το πώς οι ακτές, οι θάλασσες και οι ωκεανοί της Ευρώπης έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν σημαντική πηγή νέων θέσεων εργασίας και ανάπτυξης που μπορούν να συμβάλουν στη στρατηγική «Ευρώπη 2020» και να βελτιώσουν τον τρόπο με τον οποίο συλλέγουμε τους πόρους του πλανήτη. Η ανακοίνωση χαρακτήρισε συγκεκριμένες αναδυόμενες βιομηχανίες ως ιδιάζουσας

προσοχής. Στην ανακοίνωσή της περιγράφει την προσέγγισή της για την αξιοποίηση του δυναμικού της ωκεάνιας ενέργειας τον Ιανουάριο του 2014 και στη συνέχεια εγκαινίασε το Φόρουμ για την ωκεάνια ενέργεια (Ocean Energy Forum) ώστε να εντοπιστούν τα σημεία που μπλοκάρουν την ανάπτυξη και να προταθούν τρόποι για την απεμπλοκή της.

Υπάρχουν νέες ευκαιρίες για θαλάσσια έρευνα σε ολόκληρο το πλαίσιο του προγράμματος «Ορίζοντας 2020» - σε τομείς όπως η επισιτιστική ασφάλεια, η ενέργεια, οι μεταφορές, τα υλικά, η τεχνολογία της πληροφορίας και η ερευνητική υποδομή. Στο πρόγραμμα αυτό η έρευνα θα επικεντρωθεί στον τρόπο με τον οποίο οι νέες τεχνολογίες μπορούν να θέσουν τους θαλάσσιους πόρους σε παραγωγική χρήση διασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι πόροι αυτοί θα μπορούν να απολαμβάνονται και από τις μελλοντικές γενιές (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Καθώς η θαλάσσια και η παράκτια οικονομία εντάσσονται στην πράσινη οικονομία, η προσέγγιση της γαλάζιας οικονομίας βασίζεται στο όραμα «της βελτίωσης της ευημερίας και της κοινωνικής δικαιοσύνης, και στη σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών κινδύνων και των οικολογικών ελλείψεων» (UNEP, 2013). Η έννοια της "γαλάζιας οικονομίας" δίνει έμφαση στη διατήρηση και την αειφόρο διαχείριση των θαλάσσιων πόρων, βασιζόμενη στην προϋπόθεση ότι τα υγιή ωκεάνια οικοσυστήματα είναι πιο παραγωγικά και αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για τις βιώσιμες οικονομίες που βασίζονται στον ωκεανό (FAO).

1.1 Γαλάζια ανάπτυξη

Η Γαλάζια ανάπτυξη είναι η μακροπρόθεσμη στρατηγική για τη στήριξη της βιώσιμης ανάπτυξης του θαλάσσιου και ναυτιλιακού τομέα. Οι θάλασσες και οι ωκεανοί είναι μοχλοί της ευρωπαϊκής οικονομίας και μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη των στόχων της στρατηγικής «Ευρώπη 2020» για έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη. Η "στρατηγική γαλάζιας ανάπτυξης" εγκρίθηκε τον Οκτώβριο του 2012 σε υπουργικό επίπεδο μέσω της Διακήρυξης της Λεμεσού. Στη συνέχεια, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέφρασε την υποστήριξή του και, ως επακόλουθο, τον Μάιο του 2014, η Επιτροπή υπέβαλε ανακοίνωση σχετικά με την καινοτομία στη γαλάζια οικονομία. Η στρατηγική "Γαλάζια Ανάπτυξη" αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/blue_growth_en

1. Ανάπτυξη τομέων που έχουν υψηλό δυναμικό για βιώσιμες θέσεις εργασίας και ανάπτυξη, όπως:

- Ωκεάνια Ενέργεια
- Υδατοκαλλιέργεια (δικτυακός τόπος αλιείας)
- Θαλάσσιος, παράκτιος τουρισμός και τουρισμός με κρουαζιερόπλοια
- Θαλάσσια βιοτεχνολογία
- Θαλάσσιοι ορυκτοί πόροι

Παράλληλα επιπλέον κρίσιμους τομείς αποτελούν η ναυπηγική και η επισκευή πλοίων, οι μεταφορές (φορτία και πορθμεία) καθώς και η παράκτια εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου.

2. Συγκεκριμένα μέτρα ολοκληρωμένης θαλάσσιας πολιτικής - Βασικά στοιχεία για την παροχή γνώσεων, ασφάλειας δικαίου και ασφάλειας στην γαλάζια οικονομία:

- Γνώσεις για τη θάλασσα ώστε να βελτιωθεί η πρόσβαση στις πληροφορίες για τη θάλασσα.
- Θαλάσσιος χωροταξικός σχεδιασμός ώστε να διασφαλιστεί η αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων
- Ολοκληρωμένη θαλάσσια επιτήρηση ώστε να δοθεί στις αρχές μια καλύτερη εικόνα για το τι συμβαίνει στη θάλασσα.

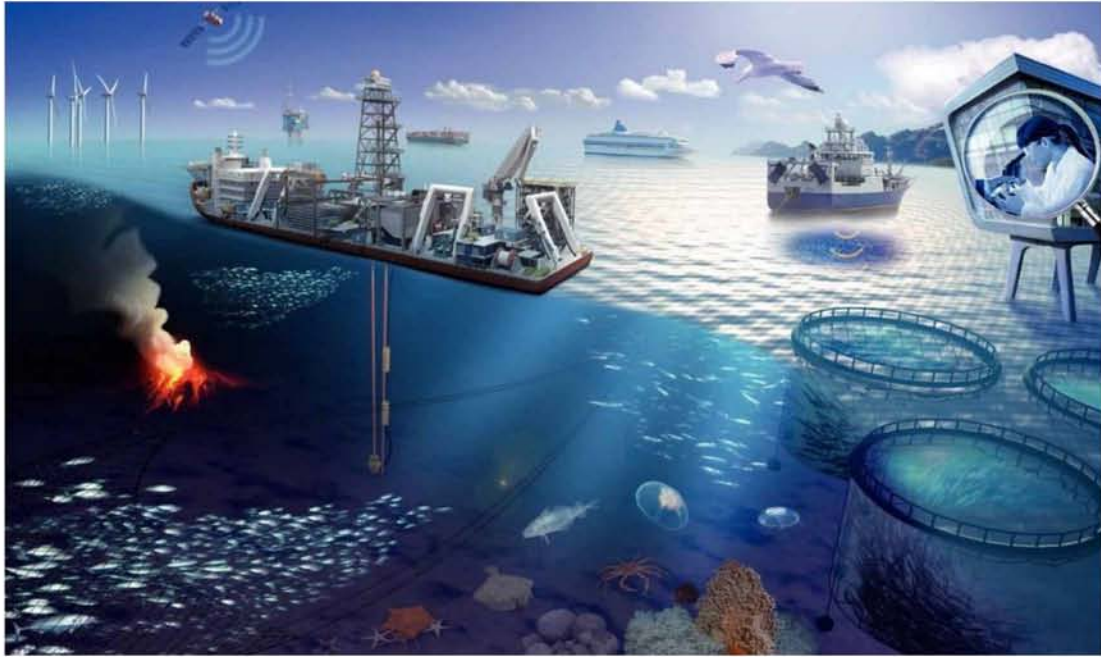
3. Στρατηγικές ώστε να διασφαλιστεί ο πλέον κατάλληλος συνδυασμός μέτρων προώθησης της βιώσιμης ανάπτυξης, λαμβάνοντας υπόψη τοπικούς, κλιματικούς, ωκεανογραφικούς, οικονομικούς, πολιτιστικούς και κοινωνικούς παράγοντες, για τις θαλάσσιες λεκάνες:

- Αδριατική θάλασσα και Ιόνιο πέλαγος
- Αρκτικός ωκεανός
- Ατλαντικός ωκεανός
- Βαλτική θάλασσα
- Μαύρη θάλασσα
- Μεσόγειος θάλασσα
- Βόρεια θάλασσα

Η καινοτομία σε όλους τους τομείς της γαλάζιας οικονομίας είναι ζωτικής σημασίας για την πραγματοποίηση των δυνατοτήτων ανάπτυξης και απασχόλησης, επιπλέον όμως μπορεί επίσης να επιφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη μέσω των "οικολογικών καινοτομιών", όπως για παράδειγμα τα καθαρότερα παραδοσιακά καύσιμα ή οι εναλλακτικές πηγές καυσίμων. Η καινοτομία μπορεί επίσης να συμβάλει στην ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών μέτρων για τη θάλασσα προστασία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

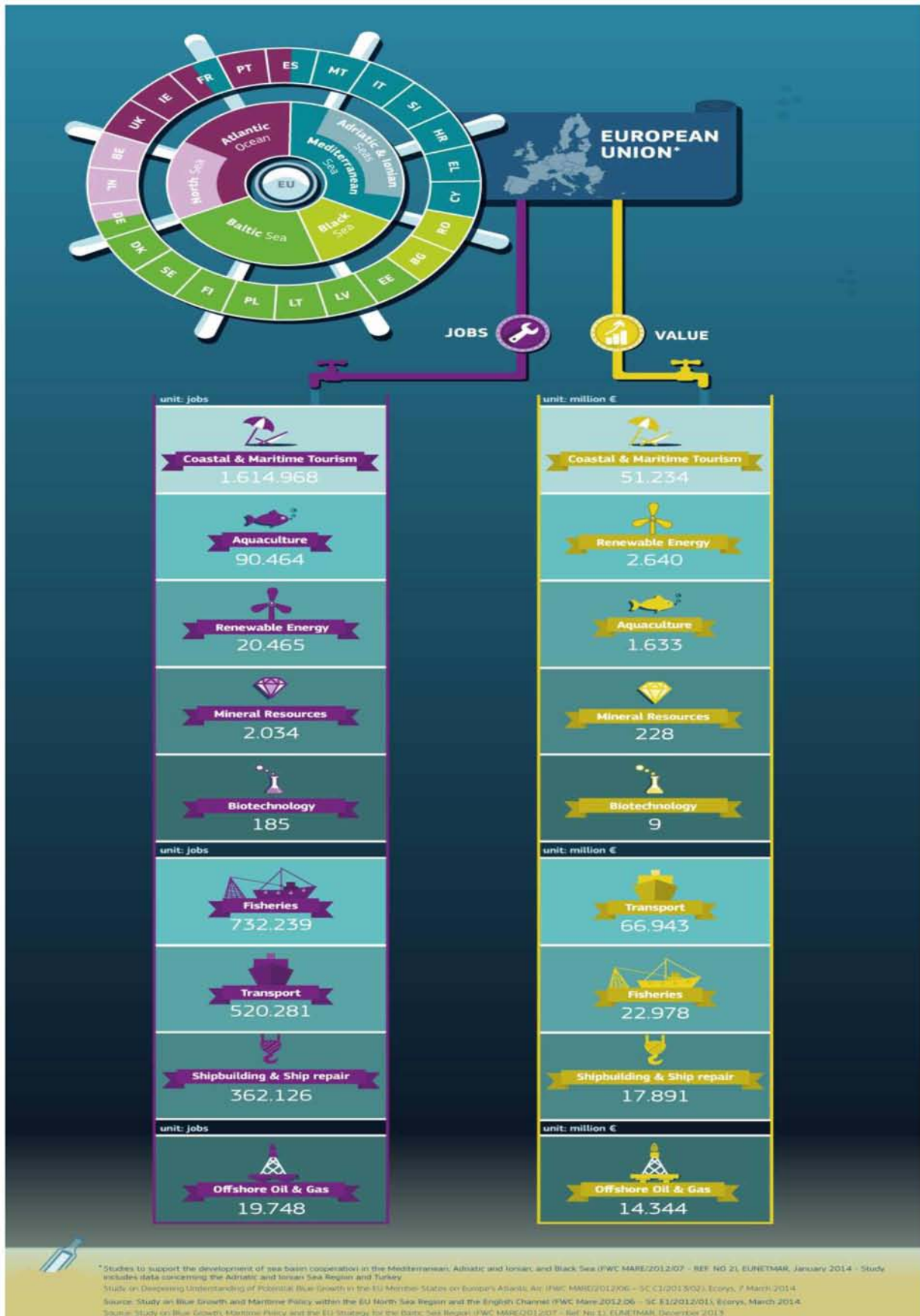
Η προώθηση της πολιτικής της επιστήμης σημαίνει ότι εστιάζεις στον τρόπο με τον οποίο μπορούν οι πολιτικές να αντανakλούν τις καλύτερες διαθέσιμες επιστημονικές γνώσεις. Αυτή είναι η θεμελιώδης πρόκληση της πράσινης και της μπλε ανάπτυξης: πώς να χρησιμοποιήσουμε τους φυσικούς πόρους μας πιο αποτελεσματικά διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα οικοσυστήματα διατηρούν τη λειτουργικότητά τους (<http://bluegrowth.inogs.it>).

Οι στρατηγικές εφαρμογής της "γαλάζιας οικονομίας" αποτελούν μέρος των Στόχων Αειφόρου Ανάπτυξης του ΟΗΕ (SDG), και συγκεκριμένα του SDG 14 "Ζωή κάτω από το νερό", το οποίο αποσκοπεί μεταξύ άλλων στην πρόληψη και τη σημαντική μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης, στη διαχείριση και προστασία των θαλάσσιων και παράκτιων οικοσυστημάτων, στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της οξίνισης των ωκεανών, στη ρύθμιση της συγκομιδή καταργώντας την υπεραλίευση και την παράνομη, λαθραία και άναρχη αλιεία, στη διατήρηση των παράκτιων και των θαλάσσιων περιοχών, στην αύξηση των επιστημονικών γνώσεων και στη μεταφορά βιώσιμων θαλάσσιων τεχνολογιών.



Εικόνα 1: Θαλάσσιοι Πόροι. (Πηγή: <http://bluegrowth.inogs.it/content/about-blue-growth>)

Εντούτοις, πρέπει να αντιμετωπιστούν ορισμένες αδυναμίες όπως η ανεπαρκής επένδυση στη γνώση, η χαμηλή πρόσβαση στη χρηματοδότηση, υψηλό κόστος δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας, η αργή πρόοδος προς την κατεύθυνση των διαλειτουργικών προτύπων, η αναποτελεσματική χρήση των δημόσιων συμβάσεων και οι αλληλεπικαλύψεις στην έρευνα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Η ετήσια επισκόπηση της ανάπτυξης της Επιτροπής της ΕΕ για το 2014 ανέφερε επίσης ότι δεν υπάρχει ακόμη επαρκής συνεργασία μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα για την καινοτομία και ότι η αδυναμία μεταφοράς των αποτελεσμάτων της έρευνας σε αγαθά και υπηρεσίες καθώς και ένα αυξανόμενο χάσμα δεξιοτήτων επηρεάζουν τους εντατικούς τομείς γνώση.



Εικόνα 2: Τα οφέλη του στρατηγικού προγράμματος Γαλάζια Ανάπτυξη (Πηγή: https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/blue_growth_en)

1.2 Γαλάζια ενέργεια

Ένας από τους 5 άξονες της λεγόμενης «Γαλάζιας Ανάπτυξης» της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τις ΑΠΕ είναι η ανάπτυξη και η εφαρμογή μεθόδων για την εκμετάλλευση ενέργειας που σχετίζονται με το θαλάσσιο χώρο. Η θαλάσσια ενέργεια μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της αποδοτικότητας όσον αφορά την εκμετάλλευση των ενεργειακών πόρων της Ευρώπης, στην ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων όσον αφορά τη χρήση γης από τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρώπη (κατά 65 Mt CO₂ περίπου έως το 2020) (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2012). Πιο συγκεκριμένα οι πηγές ενέργειας του θαλάσσιου χώρου αφορούν:

- Την υπεράκτια αιολική ενέργεια (offshore wind energy)
- Την ωκεάνια ενέργεια (ocean energy)

1.2.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια (offshore wind energy)

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αφορά τη χρήση αιολικών πάρκων που κατασκευάζονται σε υδάτινους όγκους, συνήθως στον ωκεανό της ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας, για τη συγκομιδή της αιολικής ενέργειας ώστε να παραχθεί ηλεκτρισμός. Οι ανεμογεννήτριες αυτές κατασκευάζονται πάνω σε πλωτές ή σταθερές εξέδρες. Το πλεονέκτημα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έγκειται στην διαφορά της ταχύτητας των ανέμων στη θάλασσα σε σχέση με την ξηρά.

Πιο συγκεκριμένα:

- Ο άνεμος είναι πιο σταθερός στην ανοιχτή θάλασσα, με μικρότερες διακυμάνσεις και χωρίς μεγάλες αλλαγές στην κατεύθυνση.
- Οι ταχύτητες των ανέμων είναι πολύ υψηλότερες στα ανοικτά σε σχέση με την ξηρά. Στην Ελλάδα τυπικά είναι 3 φορές μεγαλύτερες .
- Στα ανοικτά συνήθως αυξάνουν οι ταχύτητες των ανέμων κατά τη διάρκεια του απογεύματος, τότε που η ζήτηση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη νύχτα που αυξάνουν οι ταχύτητες στη ξηρά.

Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα η παραγωγή ηλεκτρισμού στην υπεράκτια αιολική ενέργεια να είναι υψηλότερη ανά εγκατεστημένη χωρητικότητα (<https://en.wikipedia.org/>).

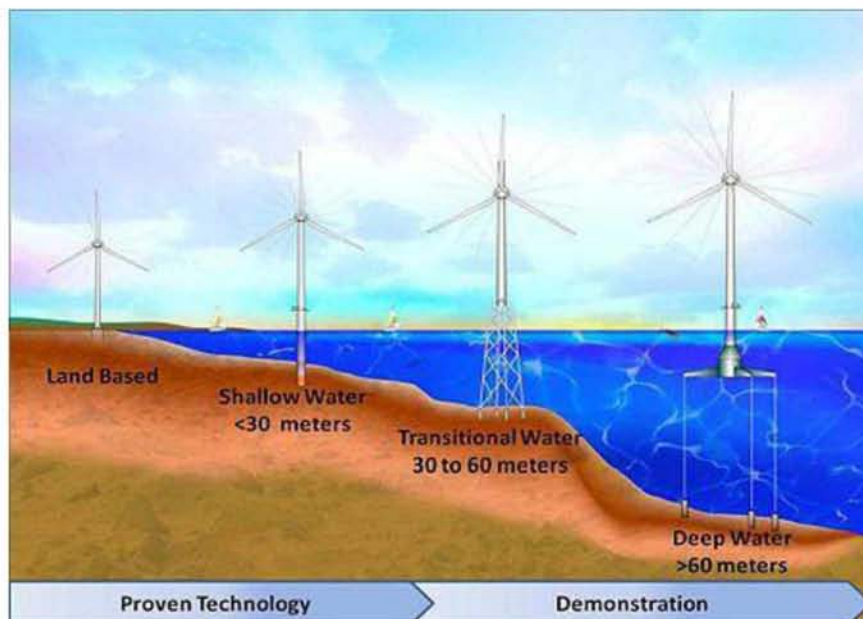
Σε αντίθεση με την τυπική χρήση του όρου "υπεράκτια" στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η υπεράκτια αιολική ενέργεια περιλαμβάνει περιοχές όπως λίμνες, φιόρδ και κλειστές παράκτιες περιοχές, χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνολογίες ανεμογεννητριών με σταθερό πυθμένα, καθώς και περιοχές βαθύτερων υδάτων όπου χρησιμοποιούνται πλωτές ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 3 : Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Block Island (ΗΠΑ) ανθίσταται επιτυχώς στη χειμερινή καταιγίδα Stella τον Μάρτιο 2017. (Πηγή: <https://www.energy.gov/eere/articles/how-do-wind-turbines-survive-severe-storms>)

❖ Υπεράκτια αιολικά πάρκα σταθερής θεμελίωσης

Τα αιολικά πάρκα με σταθερή θεμελίωση (fixed foundation) χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες με σταθερά θεμέλια στον βυθό, και η εγκατάστασή τους πραγματοποιείται σε σχετικά ρηχά νερά βάθους μέχρι 50-60 μέτρων. Σχεδόν όλα τα αιολικά πάρκα που λειτουργούν επί του παρόντος είναι σταθερού τύπου, με εξαίρεση μερικά πιλοτικά έργα (<https://en.wikipedia.org/>).



Εικόνα 4: Η πρόοδος της αναμενόμενης εξέλιξης των ανεμογεννητριών σε βαθύτερα ύδατα. (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Foundations_NREL.jpg)

Οι τύποι υποβρύχιων κατασκευών περιλαμβάνουν τη κατασκευή με ένα στύλο (monopile) , τη κατασκευή με τρίποδο (tripod) και τη κατασκευή με δικτύωμα (jacketed), με τη χρήση διαφόρων τύπων θεμελίων στον πυθμένα της θάλασσας, συμπεριλαμβανομένων των μονό-στύλων ή πολλαπλών στύλων, της βάσης βαρύτητας και των κώνων (caissons). Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες απαιτούν διαφορετικούς τύπους βάσεων για σταθερότητα, ανάλογα με το βάθος του νερού.

Πιο συγκεκριμένα μέχρι σήμερα υπάρχουν οι εξής λύσεις: (<https://en.wikipedia.org/>)

- Βάση τύπου monopile (μονού στύλου), με διάμετρο έξι μέτρα, που χρησιμοποιείται σε ύδατα βάθους μέχρι 30 μέτρα.
- Κατασκευές με βάση βαρύτητας (gravity base), για χρήση σε εκτεθειμένες στις συνθήκες περιοχές και σε ύδατα βάθους 20-80 μέτρων.
- Κατασκευές με την χρήση τρίποδων (tripod piled), σε ύδατα βάθους 20-80 μέτρων.
- Κατασκευές τύπου τρίποδων με κώνο αναρρόφησης (tripod suction caisson structures), σε ύδατα βάθους 20-80 μέτρων.
- Συμβατικές κατασκευές δικτυωμάτων από χάλυβα, όπως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετρελαίου και αερίου, σε ύδατα βάθους 20-80 μέτρων.

Μπορούν να κατασκευαστούν μονό-στύλοι (monopiles) με διάμετρο έως 11 μέτρα και μάζα 2.000 τόνων, αλλά ο μεγαλύτερος μέχρι σήμερα έχει μάζα 1.300 τόνους, κάτω από το όριο των 1.500 τόνων ορισμένων σκαφών γερανών. Τα άλλα συστατικά μέρη της ανεμογεννήτριας είναι πολύ μικρότερα.



Εικόνα 5 : α) Κατασκευές διαφόρων τύπων θεμελίωσης για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε ένα λιμάνι, (β) Κατασκευές θεμελίωσης τύπου Tripod για υπεράκτιο αιολικό πάρκο το 2008 στο Wilhelmshaven, Γερμανία. (Πηγή:

https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power#Fixed_foundation_offshore_wind_farms)

❖ Υπεράκτια πλωτά αιολικά πάρκα

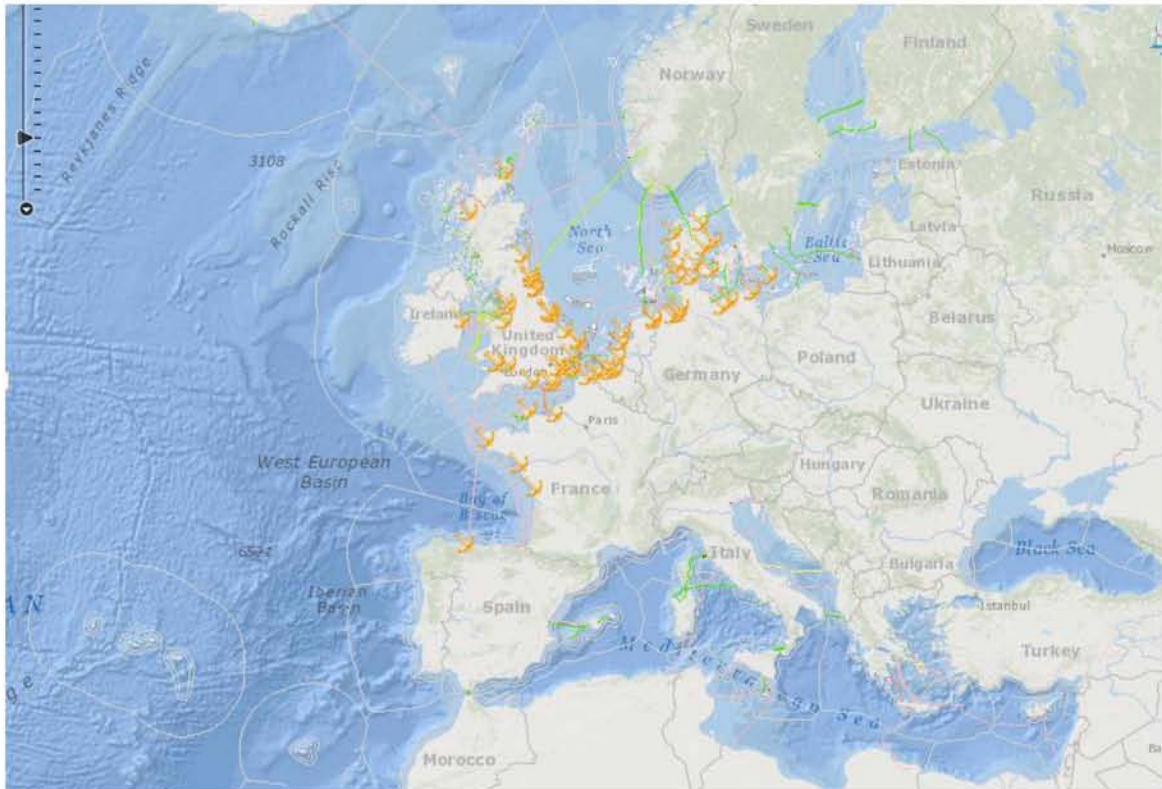
Για τοποθεσίες με βάθη άνω των 60-80 μέτρων, τα σταθερά θεμέλια είναι αντισυμβατικά ή τεχνικά ανέφικτα και απαιτούνται πλωτές ανεμογεννήτριες με αγκύρια στον πυθμένα του ωκεανού. Η Hywind είναι η πρώτη πλήρους κλίμακας πλωτή ανεμογεννήτρια στον κόσμο και εγκαταστάθηκε στη Βόρεια Θάλασσα από τη Νορβηγία το 2009, ενώ το Hywind Scotland, το οποίο ανατέθηκε τον Οκτώβριο του 2017, είναι το πρώτο πλωτό αιολικό πάρκο εκμετάλλευσης με ισχύ 30 MW. Έχουν αναπτυχθεί και άλλα είδη πλωτών ανεμογεννητριών, ενώ έχουν προγραμματιστεί περισσότερα έργα <https://en.wikipedia.org/>).



Εικόνα 6: Πρόταση πλωτού συστήματος ανεμογεννητριών σε εξαγωνική βάση. (Πηγή: <https://ecofriend.com/hexicon-s-hexagonal-floating-wind-platform-could-reduce-maintenance-costs.html>)

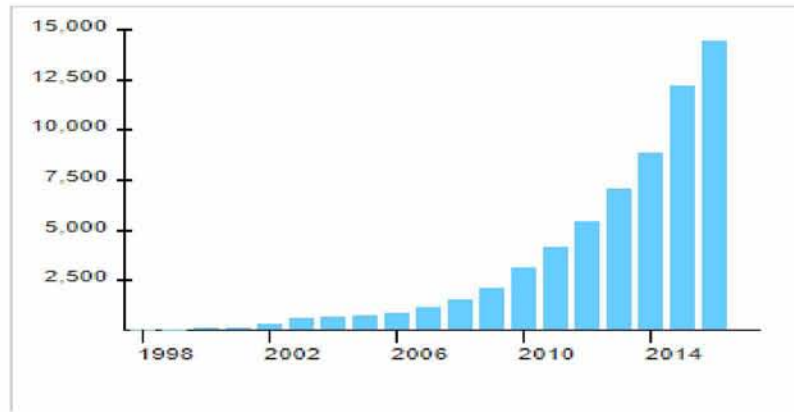
Εκτιμάται ότι το 80% των αιολικών πόρων της ΕΕ βρίσκεται σε υπερβολικά βαθιά νερά για τις παραδοσιακές ανεμογεννήτριες σταθερής θεμελίωσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Οι πλωτές ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να επεκτείνουν την ανάπτυξη σε βαθύτερα νερά όπως εκείνα στα ανοιχτά των ακτών της Ιβηρικής στον Ατλαντικό ή στην Μεσόγειο. Ένα πιλοτικό πρόγραμμα (Windfloat) ισχύος 2 MW στην Πορτογαλία έχει ήδη αποδείξει την ιδέα και ένα δεύτερο αιολικό πάρκο με τρεις ανεμογεννήτριες των 8 MW βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο. Η χρηματοδότηση συνεισφέρεται από τα όργανα της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένου του προγράμματος NER300 για καινοτόμα έργα με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, του στρατηγικού προγράμματος Horizon 2020, τη Κοινότητα Γνώσης Καινοτομίας «InnoEnergy» και την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Χάρη στους στόχους της ΕΕ όσον αφορά την ανανεώσιμη ενέργεια και τα κίνητρα για επενδύσεις, η παραγωγή αιολικής ενέργειας ανοικτής θαλάσσης άρχισε να εξαπλώνεται ραγδαία στην Ευρώπη. Το 2011, η αιολική ενέργεια ανοικτής θαλάσσης ανερχόταν σε ποσοστό 10% της εγκατεστημένης ισχύος, ενώ ως τα τέλη του 2011 η συνολική ισχύς που παραγόταν στην ανοικτή θάλασσα ανερχόταν σε 3,8 GW (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2012).



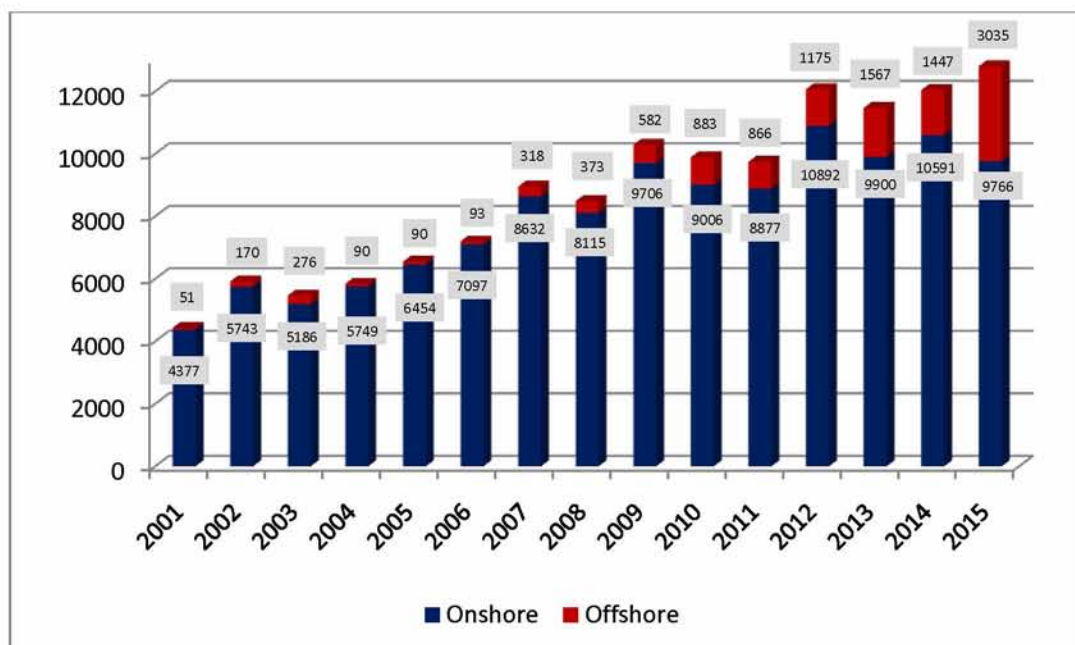
Εικόνα 7 : Θαλάσσια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη. (Πηγή: Κατσαρδή Β., 2017)

Από τον Ιανουάριο του 2017, ισχύς 12.631 MW συνδέθηκε με το δίκτυο της ΕΕ (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Στο τέλος του 2017, η συνολική παγκόσμια ικανότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας στην ανοικτή θάλασσα ήταν 18.814 (MW) (<https://en.wikipedia.org>). Η ΕΕ είναι παγκόσμιος ηγέτης κατέχοντας περίπου το 90% των πρόσφατα ολοκληρωμένων έργων στον κόσμο (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Όλα τα μεγαλύτερα υπερράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται σήμερα στη βόρεια Ευρώπη, ιδιαίτερα στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Γερμανία, όπου μαζί αντιπροσωπεύουν πάνω από τα δύο τρίτα της συνολικής υπερράκτης αιολικής ενέργειας που έχει εγκατασταθεί παγκοσμίως (<https://en.wikipedia.org>). Το αιολικό πάρκο Horns Rev που είναι υπό κατασκευή στο Ηνωμένο Βασίλειο θα γίνει το μεγαλύτερο όταν ολοκληρωθεί, με παραγωγή στα 1.200 MW. Άλλα έργα που βρίσκονται στο στάδιο του σχεδιασμού είναι το Dogger Bank στο Ηνωμένο Βασίλειο στα 4.800 MW, και το Greater Changhua στην Ταϊβάν στα 2.400 MW.



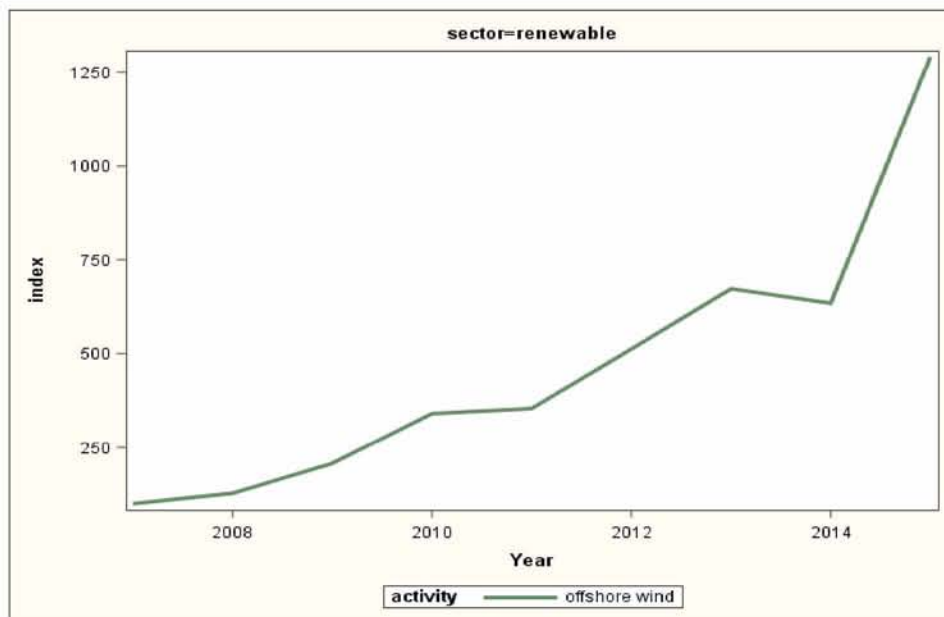
Διάγραμμα 1: Παγκόσμια ικανότητα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας MW(αθροιστικά). (Πηγή: GWEC (2011-2016) & EWEA (1998-2010))

Οι προβλέψεις για το 2020 εκτιμούν χωρητικότητα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ισχύος 40 GW στα ευρωπαϊκά ύδατα και η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας - EWEA έχει θέσει στόχο 150 GW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2030. Η αιολική ενέργεια στην ανοικτή θάλασσα μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό 4% της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια στην ΕΕ έως το 2020 και σε ποσοστό 14% έως το 2030 (<https://en.wikipedia.org>). Έως το 2030 στην ΕΕ η ετήσια εγκατάσταση ισχύος στην ανοικτή θάλασσα μπορεί να υπερβαίνει εκείνη που παράγεται στην ξηρά (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Η χωρητικότητα της ισχύος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας αναμένεται να φθάσει συνολικά σε 75 GW παγκοσμίως έως το 2020, με σημαντικά έργα να πραγματοποιούνται από την Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες (<https://en.wikipedia.org>).



Διάγραμμα 2: Ετήσια παραγωγή εγκαταστάσεων σε ξηρά και θάλασσα (MW). (Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή)

Ο αριθμός των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται στη θάλασσα αυξάνεται σε απόλυτες τιμές και επίσης αυξάνεται ως ποσοστό του συνολικού αριθμού των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Η απασχόληση στην κατασκευή, την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους αναπτύσσεται πολύ έντονα. Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) προέβλεψε για το 2016 ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα φθάσει το 8% ωκεάνια οικονομία μέχρι το 2030 και ότι η βιομηχανία της θα απασχολήσει 435.000 ανθρώπους προσθέτοντας αξία 230 δισεκατομμυρίων δολαρίων.



Διάγραμμα 3: Η απασχόληση εκφρασμένη ως δείκτης. (Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή)

Οι κύριες προκλήσεις είναι πρώτον να μειωθεί περαιτέρω το κόστος και δεύτερον να σχεδιαστούν - αναπτυχθούν αξιόπιστες πλωτές ανεμογεννήτριες (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Το κόστος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ήταν ιστορικά υψηλότερο από εκείνο της παραγωγής αιολικής ενέργειας στην ξηρά, ωστόσο το κόστος μειώνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Οι δημοπρασίες το 2016 ανήλθαν σε 54,50€ / MWh στο έργο Borssele ισχύος 700 MW και 49,90€ / MWh (χωρίς μετάδοση) στο έργο Kriegers Flak ισχύος 600 MW (<https://en.wikipedia.org>).

Είναι απαραίτητο να υπάρξει συντονισμός με άλλους τομείς, όπως η αλιεία, οι μεταφορές, η εξαγωγή ορυκτών πηγών ενέργειας κ.λπ., και να μειωθούν τα διοικητικά εμπόδια στην ανάπτυξη των ανεμογεννητριών σε διασυνοριακές περιοχές. Οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις απαιτούνται όχι μόνο για την εξασφάλιση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας αλλά και για την εξασφάλιση της συμμόρφωσης με τα περιβαλλοντικά πρότυπα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017).

1.2.2 Ωκεάνια Ενέργεια

Η θαλάσσια ενέργεια (που μερικές φορές αναφέρεται και ως ωκεάνια ενέργεια ή θαλάσσια και υδροκινητική ενέργεια) αναφέρεται στην ενέργεια που μεταφέρουν τα κύματα των ωκεανών, η παλίρροια, και οι διαβαθμίσεις στην αλατότητα και στη θερμοκρασία των ωκεανών. Η κίνηση των υδάτων στους ωκεανούς δημιουργεί μια τεράστια αποθήκη κινητικής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να παραχθεί υδροηλεκτρική ενέργεια για να ηλεκτροδοτηθούν κατοικίες, μεταφορές και βιομηχανίες. Η ενέργεια του ωκεανού είναι γεωγραφικά ποικίλη, ανανεώσιμη και προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από τη δύναμη των ρευμάτων, των παλιρροιών και των κυμάτων και σε μικρότερο βαθμό από τη βαθμίδα της θερμοκρασίας και της αλατότητας σε ορισμένες τοποθεσίες.

Οι πόροι είναι άφθονοι και η τακτική φύση της παροχής της ενέργειας τους συμπληρώνει πιο μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς οι ενεργειακοί πόροι των ωκεανών είναι λιγότερο μεταβλητοί από ορισμένους άλλους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Επιπλέον, η ενέργεια των ωκεανών κυμαίνεται σε διαφορετικά πρότυπα από την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην εξομάλυνση της καμπύλης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και στη διευκόλυνση της εξισορρόπησης των δικτύων. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι ενεργειακές εγκαταστάσεις στους ωκεανούς ενδέχεται να αντιμετωπίσουν πολύ λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς για την εγκατάσταση σε σύγκριση με τις χερσαίες τεχνολογίες των ΑΠΕ.

Οι ωκεανοί έχουν μια τεράστια ποσότητα ενέργειας και μπορούν να παρέχουν ένα σημαντικό αριθμό νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Το παγκόσμιο θεωρητικό δυναμικό των τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας εκτιμάται ότι είναι 7400EJ/έτος, το οποίο υπερβαίνει κατά πολύ τις σημερινές και τις μελλοντικές απαιτήσεις του ανθρώπινου είδους για ενέργεια (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Στην Ευρώπη, το θεωρητικό δυναμικό μόνο της κυματικής ενέργειας υπολογίζεται ότι είναι τουλάχιστον 2800 TWh/έτος (που ισοδυναμεί με περίπου το 80% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ το 2010) (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Επιπλέον, οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι η ενέργεια των ωκεανών θα μπορούσε να καλύψει το 10% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ έως το 2050 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017).

Πίνακας 1: Παγκόσμιο δυναμικό ωκεάνιας ενέργειας (Πηγή: IEA-OES, Annual Report 2007)

Μορφή Ενέργειας	Annual generation
Παλιρροϊκή (Tidal energy)	>300 TWh
Θαλάσσιων ρευμάτων (Marine current power)	> 800 TWh
Ωσμωτική – Βαθμίδα αλατότητας (Salinity gradient)	2,000 TWh
Ωκεάνια θερμική ενέργεια - Θερμική βαθμίδα (Thermal gradient)	10,000 TWh
Κυματική (Wave energy)	8,000 – 80,000 TWh

Η Ευρώπη είναι σήμερα ο ηγέτης αυτής της τεχνολογίας σε αυτήν την αναδυόμενη αγορά, ωστόσο και άλλα έθνη, συμπεριλαμβανομένης της Κίνας, πρόκειται να κατακτήσουν την αγορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Το εφικτό τεχνικά δυναμικό της ωκεάνιας ενέργειας είναι πολύ πιο περιορισμένο σε σύγκριση με το θεωρητικό δυναμικό, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο σημερινό υψηλό κόστος της τεχνολογίας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Οι εκτιμήσεις ποικίλλουν ευρέως, η παγκόσμια αγορά της ενέργειας των ωκεανών προβλέπει την εγκατεστημένη δυναμικότητα στα 337GW έως το 2050, το ένα τρίτο θα είναι στην Ευρώπη (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

1.2.2.1 Μορφές της ενέργειας των ωκεανών

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο που βρίσκονται κάτω από τον πυθμένα των ωκεανών μερικές φορές θεωρούνται μια μορφή ενέργειας των ωκεανών (<https://en.wikipedia.org>). Η ανακάλυψη, η εξαγωγή και η παράδοση του υπεράκτιου πετρελαίου (μέσω πετρελαιοφόρων και αγωγών), αποτελούν ένα πολύπλοκο και απαιτητικό έργο. Επίσης, πολύ σημαντική είναι η ανάπτυξη νέων μεθόδων για την προστασία της άγριας πανίδας και των παράκτιων περιοχών από τις ανεπιθύμητες παρενέργειες της υπεράκτιας εξόρυξης πετρελαίου.

Ωστόσο, αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι οι ανανεώσιμες μορφές της ενέργειας των ωκεανών όπως αυτές αναλύονται παρακάτω και πιο συγκεκριμένα η κυματική ενέργεια.

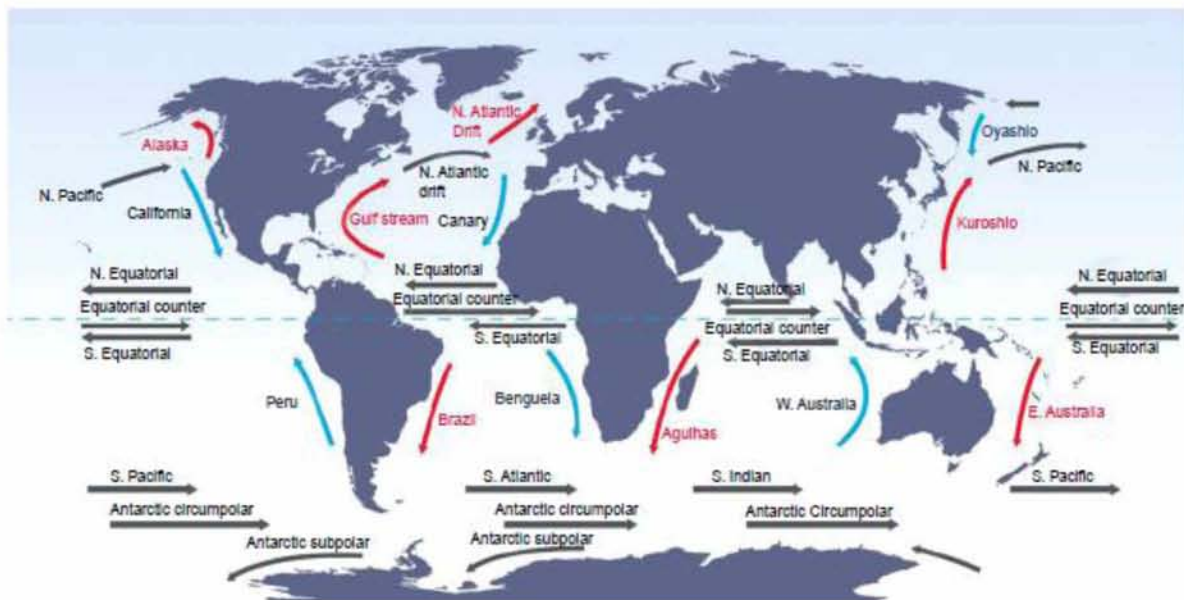
❖ Ενέργεια θαλάσσιων ρευμάτων

Τα ρεύματα ορίζονται ως η συνεχής και κατευθυνόμενη κίνηση του θαλασσινού νερού. Η κινητική ενέργεια στα ρεύματα των ωκεανών και τα παλιρροιακά ρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ισχυρά ωκεάνια ρεύματα παράγονται από ένα συνδυασμό θερμοκρασίας, ανέμου, αλατότητας, βαθυμετρίας, διαφοράς πυκνότητας στο υδάτινο σώμα και της περιστροφής της Γης. Ο ήλιος ενεργεί ως η κύρια κινητήρια δύναμη, προκαλώντας ανέμους και διαφορές θερμοκρασίας. Ο άνεμος που πνέει στον ωκεανό προκαλεί τα επιφανειακά ρεύματα ενώ επηρεάζει τα ρεύματα βαθέων υδάτων, τα βαθύτερα ρεύματα προκαλούνται από τις διαφορές θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας. Άνεμοι που φυσούν συνεχώς για 10 ώρες μπορούν να προκαλέσουν ρεύμα με ταχύτητα 2% της ταχύτητας του ανέμου, ενώ ορισμένα γρήγορα επιφανειακά ρεύματα μπορούν να φτάσουν ταχύτητες των 9 χλμ/ώρα (Sang Y. et al, 2018). Τα ρεύματα των βαθέων υδάτων κινούνται πολύ πιο αργά, περίπου 0,02-0,10 cm/s. Ωστόσο, δεδομένου ότι το νερό των ωκεανών έχει περίπου 800 φορές την πυκνότητα του αέρα, η ενεργειακή του πυκνότητα είναι πολύ υψηλότερη (Sang Y. et al, 2018).

Τα ωκεάνια ρεύματα συνήθως κινούνται προς μία κατεύθυνση, ενώ τα παλιρροιακά ρεύματα κινούνται προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Επειδή υπάρχουν μόνο μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας και της θέσης της ροής του ρεύματος χωρίς αλλαγές στην κατεύθυνση, τα ωκεάνια ρεύματα μπορεί να είναι κατάλληλες θέσεις για την ανάπτυξη συσκευών εξαγωγής ενέργειας όπως οι στρόβιλοι.

Τα ρεύματα του ωκεανού έχουν καθοριστική σημασία για τον προσδιορισμό του κλίματος σε όλο τον κόσμο. Παρόλο που, λίγα είναι γνωστά για τις επιπτώσεις της απομάκρυνσης της ενέργειας των θαλάσσιων ρευμάτων, οι επιπτώσεις της απομάκρυνσης της από το περιβάλλον μακροπρόθεσμα μπορεί να είναι μια σημαντική περιβαλλοντική ανησυχία. Τα τυπικά ζητήματα των στροβίλων, που αφορούν τα χτυπήματα των λεπίδων, την εμπλοκή θαλάσσιων οργανισμών σε αυτούς και τις επιπτώσεις των ακουστικών φαινομένων, εξακολουθούν να υπάρχουν. Ωστόσο, αυτά τα ζητήματα μπορούν να μεγεθυνθούν λόγω της παρουσίας ποικίλων πληθυσμών θαλάσσιων οργανισμών που χρησιμοποιούν τα ρεύματα για μεταναστευτικούς σκοπούς. Οι τοποθεσίες μπορεί να είναι ακόμη πιο πολύ μέσα στην ανοιχτή θάλασσα και συνεπώς να απαιτούνται μακρύτερα καλώδια ισχύος που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το θαλάσσιο περιβάλλον με τον ηλεκτρομαγνητισμό που αποβάλλουν (<https://tethys.pnnl.gov>).

Η κατανομή των παγκόσμιων επιφανειακών ρευμάτων των ωκεανών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8: Ωκεάνια επιφανειακά ρεύματα, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα θερμά συστήματα ενώ με μπλε τα ψυχρά. (Πηγή: International Renewable Energy Agency)

❖ Όσμωτική ισχύς

Η όσμωση εμφανίζεται ευρέως στη φύση και είναι ισχυρή. Για παράδειγμα, η όσμωση είναι αυτή που οδηγεί το νερό από τις ρίζες ενός δέντρου σε όλα τα κλαδιά και στα άκρα κάθε φύλλου του (Sang Y. et al, 2018). Αυτή η πηγή ενέργειας δεν είναι εύκολο να κατανοηθεί, καθώς δεν εμφανίζεται άμεσα στη φύση με τη μορφή θερμότητας, καταρρακτών, ανέμου, κυμάτων ή ακτινοβολίας (<https://www.oceanenergy-europe.eu>).

Ομοίως, στις εκβολές των ποταμών όπου το γλυκό νερό αναμειγνύεται με το θαλασσινό νερό, η βαθμίδα της αλατότητας υπάρχει σε μια τεράστια περιοχή, περιέχοντας τεράστια ποσότητα οσμωτικής ενέργειας, διαθέσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η ενέργεια της βαθμίδα αλατότητας είναι η ενέργεια που διατίθεται από τη διαφορά στη συγκέντρωση άλατος μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού και αυτή η ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη διαδικασία αντίστροφης όσμωσης με επιβράδυνση πίεσης (pressure-retarded reverse osmosis process) και συναφείς τεχνολογίες μετατροπής. Η Ευρώπη υπήρξε ηγετική δύναμη στην ανάπτυξη τεχνικών παραγωγής οσμωτικής ενέργειας, ενώ υπάρχει ακόμη μεγαλύτερο δυναμικό σε άλλες ηπείρους (Sang Y. et al, 2018). Η οσμωτική ισχύς έχει μεγάλο δυναμικό, αλλά η τεχνολογία είναι ακόμα ακριβή.

❖ Ωκεάνια θερμική ενέργεια

Η πηγή της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας είναι η θερμότητα που αποθηκεύεται στην επιφάνεια των ωκεανών λόγω της τεράστιας ηλιακής ακτινοβολίας που διεισδύει στην ατμόσφαιρα της Γης. Η θερμοκρασία του νερού συνήθως διαφέρει στην επιφάνεια, όπου θερμαίνεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, και σε μεγαλύτερα βάθη, όπου η ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να διεισδύσει. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να φτάσει μέχρι και 20-25° C, οδηγώντας σε μια τεράστια θερμική μάζα, διαθέσιμη ελεύθερα στον ωκεανό. Μια θερμική μηχανή, που μπορεί να εκμεταλλευτεί τη διαφορά θερμοκρασίας των υδάτων του ωκεανού, μπορεί να σχεδιαστεί για να μετατρέψει αυτή την ενέργεια σε ηλεκτρισμό.

Παγκοσμίως, οι πηγές ωκεάνιας θερμικής ενέργειας είναι πραγματικά τεράστιες, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη παραγωγή δισεκατομμυρίων βατ ηλεκτρικής ενέργειας όταν γίνουν ανταγωνιστικές όσον αφορά το κόστος (Sang Y. et al, 2018). Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας ως ανανεώσιμης πηγής είναι ότι δεν είναι διακοπτόμενη και επομένως δεν απαιτείται inverter και πρόσθετο σύστημα αποθήκευσης (Sang Y. et al, 2018). Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι μονάδες μετατροπής ωκεάνιας θερμικής ενέργειας μέχρι στιγμής απαιτούν έναν αγωγό μεγάλης διαμέτρου, ο οποίος είναι βυθισμένος σε απόσταση ενός μιλίου ή και περισσότερο, ώστε να φέρει κρύο ωκεάνιο νερό στην επιφάνεια, για να βελτιώσει την απόδοση μέσω ενός συστήματος εναλλάκτη θερμότητας (Sang Y. et al, 2018).

Η διαφορά θερμοκρασίας των υδάτων είναι μεγαλύτερη στα τροπικά νερά, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή πιο εφαρμόσιμη σε αυτές τις τοποθεσίες, λόγω της μεγάλης θερμικής κλίσης μεταξύ των επιφανειακών και των κάτω στρωμάτων του νερού. Επομένως, μπορεί να αποτελέσει εφικτή επιλογή για τα υπερπόντια εδάφη της ΕΕ στην Καραϊβική και στον Ινδικό Ωκεανό (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Παλίρροϊκή ισχύς

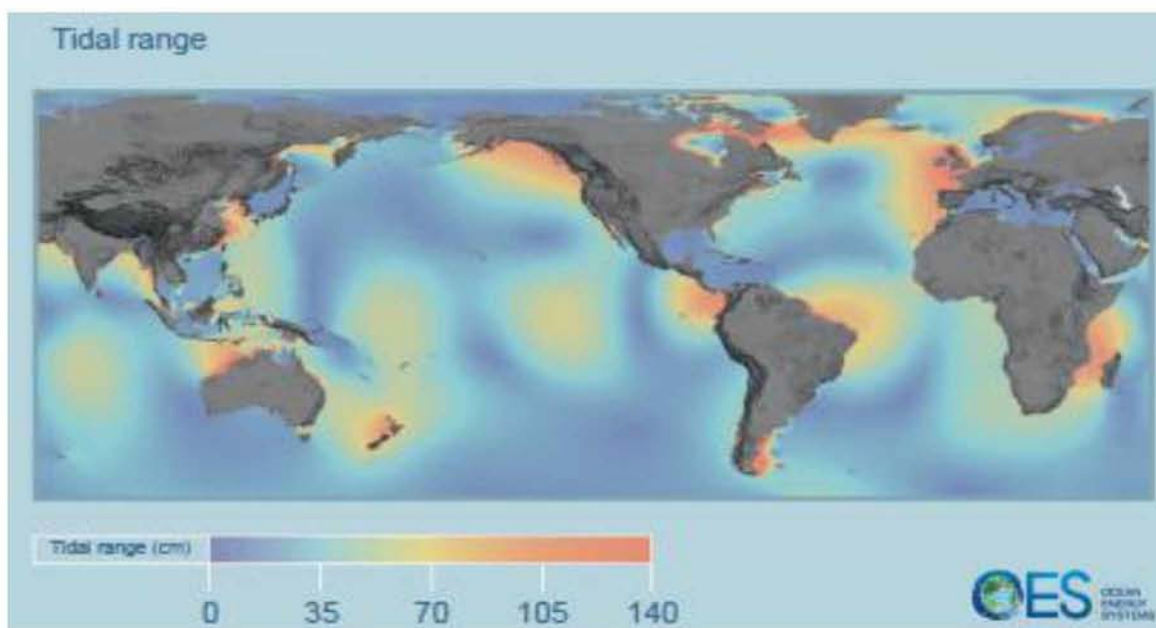
Οι παλίρροιες ορίζονται ως το φυσικό φαινόμενο της ανόδου και της καθόδου της στάθμης της θάλασσας που προκαλείται από τη βαρυτική έλξη της Σελήνης, του Ήλιου και την περιστροφή της Γης. Οι παλίρροιες μπορεί να είναι ημερήσιες (24-ώρες) ή ήμι-ημερήσιες(12+ώρες), καθιστώντας έτσι τα παλίρροιακά ρεύματα εξαιρετικά προβλέψιμα, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά τον προγραμματισμό της παραγωγής και συντήρησης. Ο κύριος περιορισμός είναι ότι πολύ

λίγες τοποθεσίες είναι κατάλληλες για μεγάλες μονάδες παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας (<https://en.wikipedia.org/>).

Η παλιρροϊκή ενέργεια χρησιμοποιεί τη διαφορά στην στάθμη του ύδατος μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής φάσης της παλίρροιας (πλημμυρίδα και άμπωτη), καθώς και τα ρεύματα που δημιουργούνται από τις παλίρροιας στους κόλπους ή κατά μήκος των ακτών. Πρόκειται για ενέργεια από κινούμενες μάζες νερού - μια δημοφιλής μορφή της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η παλιρροϊκή ενέργεια μπορεί να χωριστεί σε:

- Ενέργεια εύρους παλίρροιας, η οποία εκμεταλλεύεται τη δυναμική ενέργεια της μάζας του νερού στην φάση της πλημμυρίδας.
- Ενέργεια παλιρροιακού ρεύματος, που εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των ρευμάτων που προκαλούνται από τις παλίρροιας.

Παρόλο που η παλιρροϊκή ενέργεια λαμβάνει μόνο ένα μικρό ποσοστό θαλάσσιας ενέργειας, με παγκόσμιο δυναμικό άνω των 300 TWh ετησίως, η τεχνολογία για την εκμετάλλευση της ενέργειας εύρους παλίρροιας είναι μία από τις πλέον ώριμες μεταξύ όλων των τεχνολογιών εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας (Sang Y. et al, 2018). Η παγκόσμια κατανομή παλιρροϊκής ενέργειας παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 9: Παγκόσμια κατανομή παλιρροϊκής ενέργειας. (Πηγή: International Renewable Energy Agency)

❖ Κυματική ενέργεια

Η κυματική ενέργεια αφορά τη σύλληψη της ισχύος των ανεμογενών κυματισμών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας ενδιαφέρων τρόπος για να εξετάσουμε τα κύματα είναι να τα δούμε ως μια συμπυκνωμένη μορφή ηλιακής ενέργειας (<https://renewablegreenenergypower.com>). Η ηλιακή ενέργεια δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας που έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία των

ανέμων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του ανέμου και της επιφάνειας του νερού στους ωκεανούς και τις λίμνες δημιουργεί κύματα, διαταράσσοντας την επιφάνεια, προκαλώντας κορυφές και κοιλάδες που διαδίδονται κατά την διεύθυνση πνοής του ανέμου.

Όσο τα κύματα διαδίδονται πιο αργά από την ταχύτητα του ανέμου ακριβώς πάνω από τα κύματα, υπάρχει μια μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στα κύματα. Οι διαφορές πίεσης του αέρα μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς της κορυφής του κύματος, καθώς και η τριβή στην επιφάνεια του νερού από τον άνεμο, προκαλούν την ανάπτυξη διαμηθικών τάσεων στο νερό με αποτέλεσμα την ανάπτυξη των κυμάτων. Τα κύματα περιέχουν τεράστια ενέργεια και διασχίζουν τους ωκεανούς με μεγάλες ταχύτητες και για μεγάλες αποστάσεις μέχρι να χτυπήσουν μια ακτογραμμή. Το δυναμικό της κυματικής ενέργειας είναι μεγαλύτερο μεταξύ 30 ° και 60 ° γεωγραφικού πλάτους στις δυτικές ακτές και των δύο ημισφαιρίων της γης, λόγω της παγκόσμιας κατεύθυνσης του ανέμου.

Αναλυτικότερα, το ύψος κύματος καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου, τη διάρκεια που πνέει ο άνεμος, την απόσταση από την οποία ο άνεμος διεγείρει τα κύματα και τέλος, από το βάθος και την μορφολογία του θαλάσσιου πυθμένα (που μπορεί να συγκεντρώσει ή να διασκορπίσει την ενέργεια των κυμάτων). Μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου έχει ένα πρακτικό όριο, πέρα από το οποίο ο χρόνος ή η απόσταση δεν θα παράγει μεγαλύτερα κύματα. Όταν έρθει αυτό το όριο, η θάλασσα λέγεται ότι είναι "πλήρως ανεπτυγμένη".

Η ισχύς των κυμάτων δεν πρέπει να συγχέεται με την παλιρροιακή ισχύ, η οποία αφορά την ενέργεια των ρευμάτων που προκαλούνται από την βαρυτική έλξη του ήλιου και της σελήνης. Τα κύματα και οι παλίρροιες διαχωρίζονται επίσης από τα ωκεάνια ρεύματα, τα οποία προκαλούνται από άλλες δυνάμεις, ο άνεμος, το φαινόμενο Coriolis, το cabbeling και τις διαφορές θερμοκρασίας και αλατότητας. Γενικά, τα μεγαλύτερα κύματα είναι πιο ισχυρά αλλά η ισχύς των κυμάτων καθορίζεται επίσης από την ταχύτητα του κύματος, το μήκος κύματος και την πυκνότητα του νερού.

Τα ωκεάνια κύματα είναι εγκάρσια κύματα, συνεπώς έχουν σημείο χαμηλής και υψηλής ενέργειας. Το σημείο υψηλής ενέργειας είναι γνωστό ως η κορυφή του κύματος ενώ το σημείο χαμηλής ενέργειας είναι γνωστό ως κοιλία. Η ενέργεια των κυμάτων παράγεται από την ταλάντωσή τους στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η ταλαντωτική κίνηση των σωματιδίων του νερού είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια και μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Ωστόσο, για τα στάσιμα κύματα (clapotis) κοντά σε μια ανακλαστική ακτή, η κυματική ενέργεια εμφανίζεται ως ταλαντώσεις πίεσης σε μεγάλο βάθος, δημιουργώντας μικροδονήσεις (microseisms). Αυτές οι διακυμάνσεις πίεσης σε μεγαλύτερο βάθος είναι πολύ μικρές για να είναι ενδιαφέρουσες από την άποψη κυματικής ενέργειας.

Τα κύματα διαδίδονται στην επιφάνεια του ωκεανού και η ενέργεια των κυμάτων μεταφέρεται επίσης οριζόντια με την ομαδική ταχύτητα ($u_g = \partial\omega / \partial k$). Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας του κύματος μέσα από ένα κατακόρυφο επίπεδο μοναδιαίου πλάτους, παράλληλο με την κορυφή του κύματος, ονομάζεται ροή ενέργειας κύματος (ή κυματική ισχύς, η οποία δεν πρέπει να συγχέεται με την πραγματική ισχύ που παράγεται από μια συσκευή μετατροπής κυματικής ισχύος).

Σε βαθιά νερά όπου το βάθος είναι μεγαλύτερο από το ήμισυ του μήκους κύματος, η ροή ενέργειας κύματος (ρυθμός μεταφοράς) είναι:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3s}\right) H_{m0}^2 T_e ,$$

όπου ,

P: η ροή κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους κορυφής του κύματος

H_{m0}: το σημαντικό ύψος κύματος,

T_e: η περίοδος της κυματικής ενέργειας,

ρ: η πυκνότητα νερού

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ο παραπάνω τύπος δηλώνει ότι η ισχύς των κυμάτων είναι ανάλογη της περιόδου της κυματικής ενέργειας και του τετραγώνου του ύψους κύματος. Όταν το σημαντικό ύψος κύματος δίνεται σε μέτρα και η περίοδος κύματος σε δευτερόλεπτα, το αποτέλεσμα της κυματική ισχύς είναι σε κιλοβάτ (kW) ανά μέτρο μετώπου κύματος.

Σε μεγάλες καταιγίδες, τα μεγαλύτερα κύματα στα ανοικτά είναι περίπου 15 μέτρα ύψος και έχουν περίοδο περίπου 15 δευτερολέπτων. Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, τέτοια κύματα φέρουν περίπου 1,7 MW ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος (<https://en.wikipedia.org/>). Η ενέργεια των κυμάτων έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, η οποία είναι συνήθως 30 kW/m, δηλαδή δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή της ηλιακής και πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή του ανέμου (Sang Y. et al, 2018).

Μια αποτελεσματική συσκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας συλλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερο τη ροή της ενέργειας του κύματος. Ως αποτέλεσμα, τα κύματα θα είναι χαμηλότερου ύψους στην περιοχή πίσω από τη συσκευή. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την συλλογή της κυματικής ενέργειας και τη μετατροπή της ηλεκτρισμό καλούνται Wave Energy Converters, WECs.

Η μέση πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας κυμάτων στην επιφάνεια του νερού είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ύψους κύματος, σύμφωνα με τη θεωρία των γραμμικών κυματισμών:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_{m0}^2$$

όπου,

E: η μέση πυκνότητα ενέργειας των κυμάτων ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας (J/m²),
το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής πυκνότητας ενέργειας ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας.

Η δυναμική πυκνότητα ενέργειας είναι ίση με την κινητική πυκνότητα ενέργειας, και η κάθε μία συνεισφέρει κατά το ήμισυ στην πυκνότητα ενέργειας κύματος E , όπως αναμένεται από το θεώρημα εξισορρόπησης. Στα κύματα των ωκεανών, τα φαινόμενα επιφανειακής τάσης είναι αμελητέα για μήκη κύματος πάνω από μερικά δεκάδες εκατοστά.

Καθώς τα κύματα διαδίδονται, η ενέργεια τους μεταφέρεται. Η ταχύτητα μεταφοράς ενέργειας είναι η ομαδική ταχύτητα u_g . Ως αποτέλεσμα, η ροή κυματικής ενέργειας (wave energy flux), μέσω ενός κατακόρυφου επιπέδου μοναδιαίου πλάτους κάθετο προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, ισούται με:

$$P = E u_g$$

όπου ,

u_g : η ομαδική ταχύτητα (m/s)

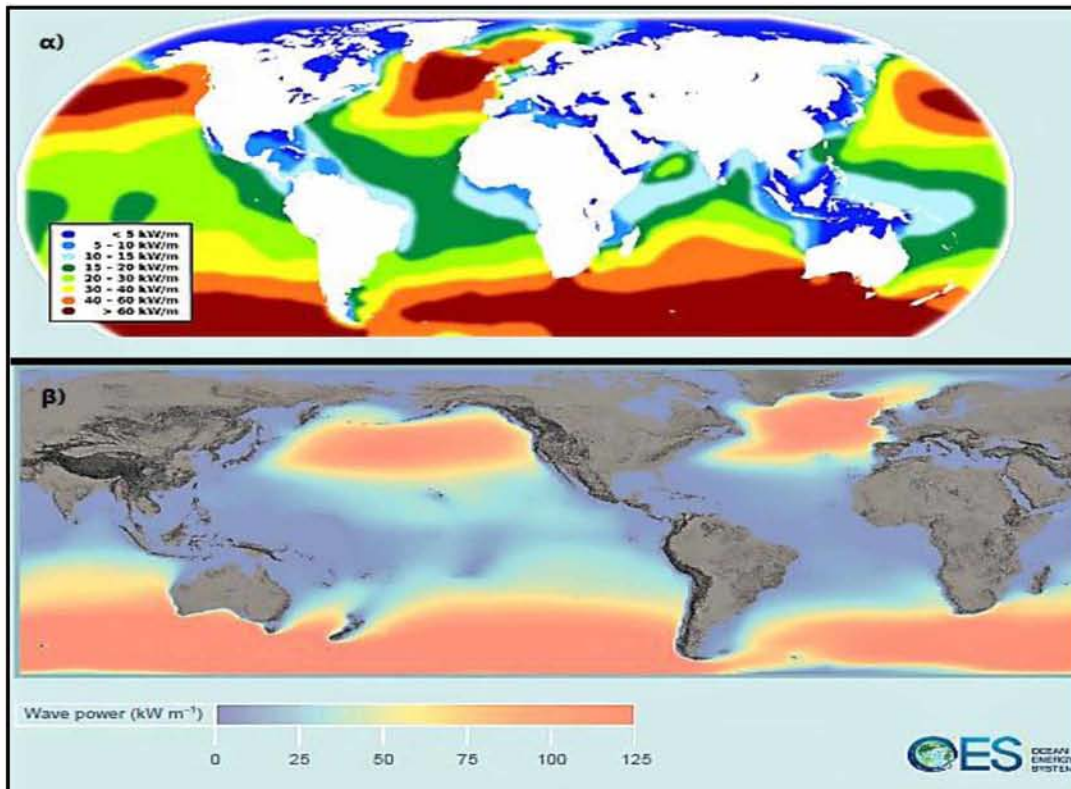
Λόγω της εξίσωσης διασποράς για υδάτινα κύματα υπό τη δράση της βαρύτητας, η ομαδική ταχύτητα εξαρτάται από το μήκος κύματος λ ή ισοδύναμα από την περίοδο T . Επιπλέον, η εξίσωση διασποράς είναι συνάρτηση του βάθους h , με αποτέλεσμα, η ομαδική ταχύτητα να συμπεριφέρεται διαφορετικά στα όρια των βαθιών και ρηχών νερών, καθώς και στα ενδιάμεσα βάθη.

Οι σταθμοί παραγωγής κυματικής ενέργειας πρέπει να είναι σε θέση να παράγουν μια λογική ποσότητα ενέργειας όταν οι άνεμοι είναι ήπιοι και τα κύματα μικρά, αλλά και σε θεμελιώδεις καιρικές συνθήκες με θαλασσοταραχή. Πρέπει επίσης να είναι σε θέση να αντέξουν τη φυσική καταπόνηση λόγω της έκθεσης τους στις συνθήκες των ωκεανών, αλλά και πρέπει να έχουν ελάχιστη επίδραση στη ζωή των ζώων και των φυτών. Σε ένα απλοποιημένο επίπεδο, οι συσκευές κυματικής ενέργειας μπορεί να βρίσκονται κοντά στην ξηρά ή και στην ανοικτή θάλασσα, και μπορούν επίσης να σχεδιαστούν για λειτουργία σε συγκεκριμένες συνθήκες βάθους νερού: βαθιά νερά, ενδιάμεσα νερά ή ρηχά νερά. Ο βασικός σχεδιασμός της συσκευής θα εξαρτάται από τη θέση της συσκευής και τα χαρακτηριστικά των πόρων για τα οποία προορίζεται.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι εύκολο να αξιοποιήσουμε την ισχύ των κυμάτων και αυτός είναι ο λόγος που δεν βλέπουμε πάρα πολλούς σταθμούς κυματικής ενέργειας. Ωστόσο, αυτό λειτουργεί ως κινητήριος μοχλός της καινοτομίας και επιτρέπει να σχεδιάζονται και να εισέρχονται στην παραγωγή πιο καινοτόμες συσκευές, WECS (<https://renewablegreenenergypower.com>).

Ο τομέας της κυματικής ενέργειας φθάνει σε ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη της βιομηχανίας, με θετικά βήματα προς την εμπορική βιωσιμότητα (<https://en.wikipedia.org>). Οι πιο προηγμένοι δημιουργοί συσκευών προχώρησαν πέρα από τη μονάδα επίδειξης μιας συσκευής, στην ανάπτυξη έργων συστοιχίας για την παραγωγή ισχύος πολλών μεγαβάτ (<https://www.oceanenergy-europe.eu/>). Η υποστήριξη μεγάλων εταιρειών κοινής ωφέλειας εκδηλώνεται τώρα μέσω εταιρικών σχέσεων στο πλαίσιο της αναπτυξιακής διαδικασίας, απελευθερώνοντας περαιτέρω επενδύσεις και, σε ορισμένες περιπτώσεις, διεθνή συνεργασία (<https://en.wikipedia.org>).

Η κυματική ενέργεια λαμβάνει ένα μερίδιο έως και 80% της θαλάσσιας ενέργειας και είναι η πλέον ελπιδοφόρος μορφή της θαλάσσιας ενέργειας, καθώς είναι ευρέως διαθέσιμη σχεδόν σε όλο τον κόσμο. Μια κατανομή της κυματικής ενέργειας φαίνεται στην εικ. 10 (Sang Y. et al, 2018). Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν πολυάριθμες πρωτοβουλίες για την τόνωση του ενδιαφέροντος για τους ωκεανούς παγκοσμίως, και στην Ευρώπη το επίκεντρο είναι κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο, όπου έχουν τεθεί σε εφαρμογή προγράμματα επιδοτήσεων για την τόνωση της έρευνας και της ανάπτυξης σχετικά με την ωκεάνια ενέργεια. Σημειώνεται πρόοδος και εκπονούνται προγράμματα τόσο σε επίπεδο ΕΕ όσο και σε εθνικό επίπεδο για την περαιτέρω στήριξη των ερευνητικών έργων.



Εικόνα 10: Παγκόσμιος χάρτης κατανομής πόρων κυματικής ενέργειας. (Πηγή: α) Wikipedia, by Ingvald Straume, β) International Renewable Energy Agency)

Η ισχύς των κυμάτων ποικίλλει σημαντικά σε διάφορα μέρη του κόσμου (Sang Y. et al, 2018). Οι περιοχές με άφθονη κυματική ενέργεια περιλαμβάνουν τις δυτικές ακτές της Σκωτίας, το βόρειο τμήμα του Καναδά, το νότιο μέρος της Αφρικής, την Αυστραλία και τις βορειοδυτικές ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών, ιδιαίτερα της Αλάσκας. Το θεωρητικό ετήσιο ενεργειακό δυναμικό των κυμάτων στις ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών εκτιμάται σε 2,64 τρισεκατομμύρια κιλοβατώρες, που ισούται περίπου με το 65% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ το 2015 (<https://www.eia.gov/>). Οι δυτικές ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών και της Ευρώπης καθώς και οι ακτές της Ιαπωνίας και της Νέας Ζηλανδίας, έχουν πιθανές τοποθεσίες για την αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων (<https://www.eia.gov/>). Για παράδειγμα, στην Ευρώπη 290GW κυματικής ενέργειας μπορούν δυνητικά να αξιοποιηθούν στην δυτική ακτή της Ευρώπης και επιπλέον άλλα 30GW δυναμικού κυματικής ενέργειας, υπάρχουν κατά μήκος των ευρωπαϊκών ακτών στη Μεσόγειο (Clement A. et al., 2002). Αναλυτικότερα, η ροή

κυματικής ενέργειας είναι περίπου 25kW/m κοντά στα Κανάρια νησιά, 75kW/m στα ανοικτά των ακτών της Ιρλανδίας και της Σκωτίας, 30kW/m στα ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας, 10-21 kW/m στη Βόρεια Θάλασσα, και 4-11 kW/m στη Μεσόγειο (Clement A. et al., 2002).

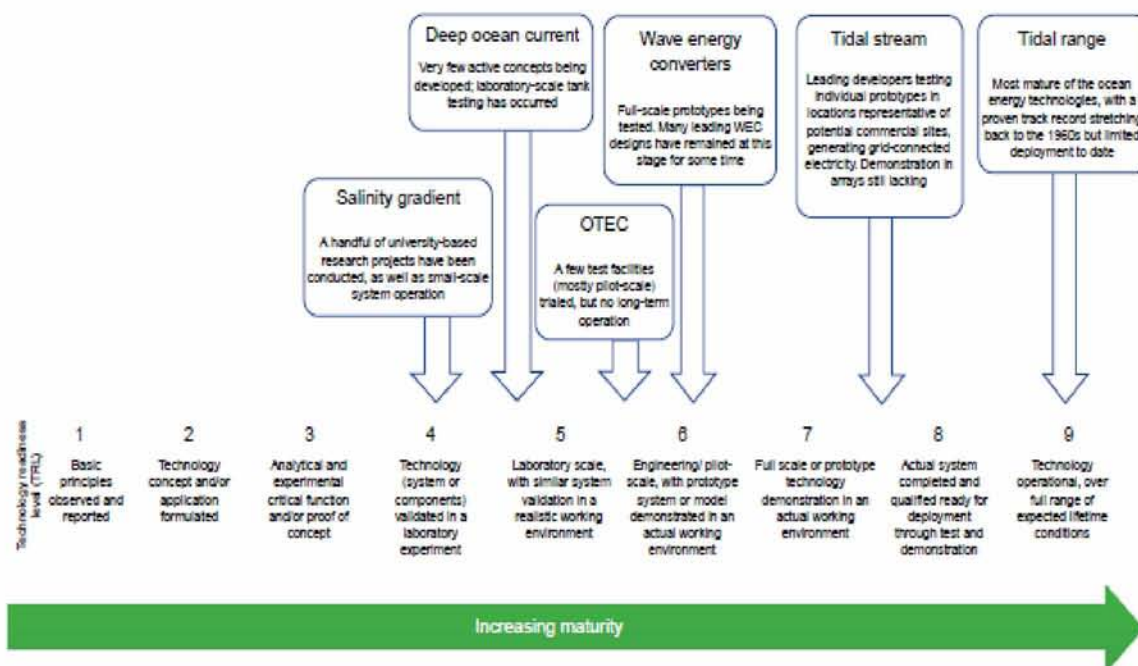
Στην Ευρώπη, το SETIS (2011) εκτιμά ότι η μέγιστη δυνητική ικανότητα της κυματικής ενέργειας θα είναι μέχρι 10GW εγκατεστημένης ισχύος έως το 2020 και 16GW έως το 2030, η οποία θα ισοδυναμεί με το 0,8% και το 1,1% της προβλεπόμενης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ₂₇ για το 2020 και το 2030 αντίστοιχα. Ενδεικτικά, η Μ. Βρετανία υπολογίζεται ότι έχει δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από κυματισμούς 7-10GW με αιχμή ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος 65GW. Στην Ελλάδα αντίστοιχα η αιχμή ζήτησης είναι 10.1GW. Ορισμένες από τις εκτιμήσεις πρέπει να εξεταστούν με κάποια σύνεση, όμως η γενική εικόνα που προκύπτει από ανεξάρτητες αξιολογήσεις είναι ότι οι επενδύσεις στην ενέργεια των ωκεανών είναι πιθανό να οδηγήσουν σε σημαντική ανάπτυξη του τομέα μετά το 2020.

Όσον αφορά την Ελλάδα, το δυναμικό της ενέργειας των κυμάτων στα ανοικτά των ελληνικών ακτών υπήρξε ένας ενεργός τομέας μελέτης τα τελευταία χρόνια. Η Ελλάδα έχει 16.000 χιλιόμετρα ακτογραμμών κατά μήκος της Μεσογείου, και η πυκνότητα ενέργειας από τα κύματα στα ανοικτά των ελληνικών ακτών είναι περίπου 4-11 kW/m (Clement A. et al., 2002). Είναι ευρέως αποδεκτό ότι, η κυματική ενέργεια σε συνδυασμό με την αιολική ενέργεια, είναι ιδιαίτερα κατάλληλο πλάνο για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα Ελληνικά νησιά, όπου η ηλεκτρική ενέργεια είναι σχετικά ακριβή (Emmanouil G. et al., 2016).

Τέλος, η κυματική ενέργεια πιστεύεται ότι είναι ένας από τους πιο ευεργετικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρισμού, δεδομένου ότι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ακουστική – οπτική όχληση, επιπτώσεις σε χλωρίδα – πανίδα) από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας θεωρούνται ήπιες (<https://renewablegreenenergypower.com>). Επιπλέον, ο κυματισμός στην ανοιχτή θάλασσα μπορεί να προβλεφθεί σχετικά ικανοποιητικά και ακόμη όταν ο άνεμος σταματήσει και οι ανεμογεννήτριες πάψουν να λειτουργούν, ο κυματισμός της θάλασσας μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ακόμη ώρες (Γκριζαρη Ν., 2012). Ένα βασικό μειονέκτημα όμως είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

1.2.2.2 Τεχνολογίες ωκεάνιας ενέργειας

Η θαλάσσια ενέργεια είναι μία από τις πιο ευρέως διαθέσιμες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως, αν σκεφτεί κανείς ότι το 71% της Γης καλύπτεται από ωκεανούς. Εκτιμάται ότι με αποτελεσματικά συστήματα μετατροπής ενέργειας μπορούν να παραχθούν από 20.000 έως 80.000 TWh ετησίως από την θαλάσσια ενέργεια (<http://www.irena.org>), επαρκή για την κάλυψη της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, η οποία ήταν 20.567 TWh το 2015. Αν και οι τεχνολογίες θαλάσσιων πηγών ενέργειας βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και δεν αναμένεται να είναι ανταγωνιστικές πριν από το 2020, έχουν προσελκύσει παγκόσμιο ενδιαφέρον από ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς ερευνητές και φορείς χάραξης πολιτικής (Sang Y. et al, 2018). Η θαλάσσια ενέργεια υπάρχει σε μια σειρά από μορφές (που απαριθμούνται από την μορφή με την υψηλότερη τεχνολογική εξέλιξη προς τη μικρότερη): παλιρροϊκή ενέργεια, κυματική ενέργεια, ωκεάνια θερμική ενέργεια, ενέργεια ωκεάνιων ρευμάτων και βαθμίδα αλατότητας/οσμωτική ενέργεια. Με την πλήρη ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας και της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας και την πρόοδο στην ανάπτυξη άλλων μορφών ενέργειας, αναμένεται ότι η θαλάσσια ενέργεια θα αποτελέσει σημαντική πηγή ενέργειας κατά την επόμενη δεκαετία (Sang Y. et al, 2018). Στο σχήμα που ακολουθεί συνοψίζονται τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας των διαφόρων πηγών θαλάσσιας ενέργειας.



Σχήμα 1: Τεχνολογική ετοιμότητα της θαλάσσιας ενέργειας . (Πηγή: www.irena.org)

Διάφορα κέντρα δοκιμών λειτουργούν ή αναπτύσσονται στην ΕΕ. Το πιο προηγμένο είναι το Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC) στο Orkney, του Ηνωμένου Βασιλείου. Άλλα κέντρα αποτελούν το Wave Hub στην Κορνουάλλη στο Ηνωμένο Βασίλειο, το Biscay Marine Energy Platform (BIMEP) στην Ισπανία, το SEMREV στη Γαλλία, τα Atlantic Marine Energy Test Site (AMETS) και Galway Bay Test Site στην Ιρλανδία, το Ocean Plug στην Πορτογαλία, το Wave Power Project στο

Lysekil της Σουηδίας, τα Wave Energy Centre (DanWEC) και Nissum Bredning Test Station για κυματική ενέργεια στη Δανία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Μια ποικιλία τεχνολογιών είναι υπό ανάπτυξη για την εκμετάλλευση της ενέργειας των ωκεανών. Η θαλάσσια και υδροκινητική (ΜΗΚ) ή θαλάσσια ενεργειακή ανάπτυξη περιλαμβάνει έργα που χρησιμοποιούν τις ακόλουθες συσκευές:

- Μετατροπείς ωκεάνιας θερμικής ενέργειας σε βαθιά τροπικά νερά.
- Τεχνολογίες εκμετάλλευσης ωσμωτικής ενέργειας
- Τουρμπίνες για την εκμετάλλευση της ενέργειας των ωκεάνιων ρευμάτων σε περιοχές ισχυρών θαλάσσιων ρευμάτων.
- Τουρμπίνες για την εκμετάλλευση παλιρροϊκής ενέργειας τοποθετημένες σε παράκτιες περιοχές και σε εκβολές ποταμών.
- Μετατροπείς κυματικής ενέργειας (WEC) σε ανοικτές παράκτιες περιοχές με σημαντικά κύματα.

Οι τεχνολογίες μετατροπής θερμικής ωκεάνιας ενέργειας «ΟΤΕC» χρησιμοποιούν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειακών και των κάτω στρωμάτων των υδάτων για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μορφή ενέργειας έχει το μεγαλύτερο δυναμικό σε τροπικές περιοχές.

Οι σημερινές μέθοδοι μετατροπής ωκεάνιας θερμικής ενέργειας βασίζονται κυρίως στις γνωστές αρχές της θερμοδυναμικής (Sang Y. et al, 2018). Σε αυτές τις προσεγγίσεις, παράγεται ατμός χαμηλής πίεσης για την περιστροφή των στροβίλων μιας ηλεκτρικής γεννήτριας χρησιμοποιώντας τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Επίσης, ο κύκλος Rankine χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα παραγωγής θερμικής ενέργειας όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια. Σε έναν ιδανικό κύκλο Rankine, υπάρχουν τέσσερα βασικά στάδια:

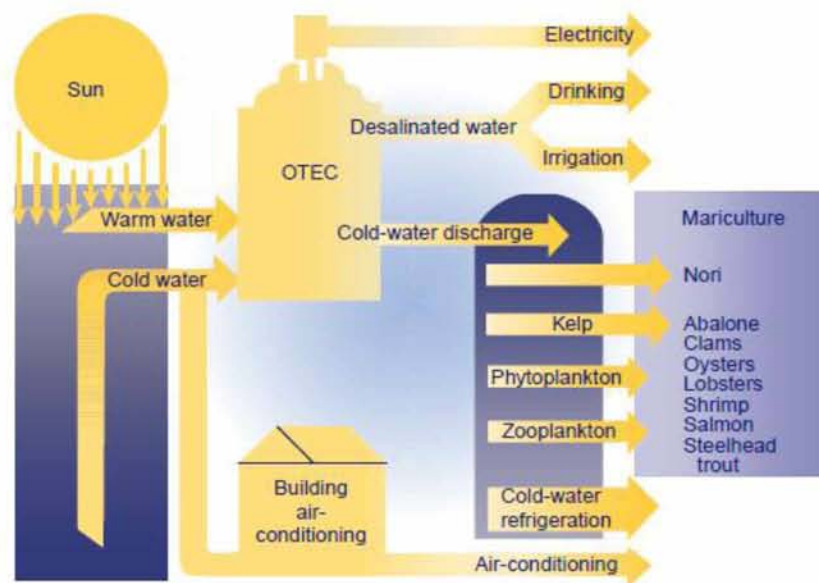
1. Συμπύεση του υγρού/ρευστού (pump stage),
2. Εξάτμιση του υγρού/ρευστού μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας/λέβητα (heat in stage),
3. Διόγκωση του ατμού μέσω του στροβίλου (mechanical work stage),
4. Υγροποίηση του ατμού μέσω ενός άλλου εναλλάκτη θερμότητας/συμπυκνωτή (heat out stage)

Επί του παρόντος, χρησιμοποιούνται τρεις κύριες τεχνολογίες **ΟΤΕC**: συστήματα κλειστού κύκλου, συστήματα ανοιχτού κύκλου και υβριδικά συστήματα (Sang Y. et al, 2018). Αν και η απόδοση της μετατροπής είναι γενικά χαμηλή, υποπροϊόντα από αυτή τη διαδικασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για να εξυπηρετήσουν διάφορες καθημερινές ανάγκες, όπως:

- Αφαλατωμένο νερό. Το φρέσκο αφαλατωμένο νερό από τα συστήματα ανοιχτού κύκλου ή τα υβριδικά συστήματα ΟΤΕC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση οικισμών ή καλλιέργειες.
- Κλιματισμός. Το ψυχρό θαλασσινό νερό που επιστρέφει από τα συστήματα ΟΤΕC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον κλιματισμό με απευθείας ροή του νερού μέσω ενός συστήματος ψύξης. Επί του παρόντος, αυτό εφαρμόζεται στο Ωκεάνιο Επιστημονικό και Τεχνολογικό Πάρκο της Χαβάης (HOST), το οποίο λειτουργεί υπό το Εργαστήριο Φυσικής Ενέργειας της Χαβάης.

- Γεωργία. Το κρύο θαλασσινό νερό μπορεί επίσης να στηρίξει τη γεωργία με ψύξη του περιβάλλοντος εδάφους. Ένας κήπος επίδειξης διατηρείται επί του παρόντος στη Χαβάη από το Εργαστήριο Φυσικής Ενέργειας.
- Υδατοκαλλιέργεια. Ο σολομός, ο αστακός και οι μικροάλγες που αναπτύσσονται κανονικά σε κρύα νερά μπορούν να καλλιεργηθούν χρησιμοποιώντας ψυχρό ωκεάνιο νερό από τα συστήματα OTEC.

Το σχήμα 2 δείχνει τη σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος μετατροπής ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (OTEC).



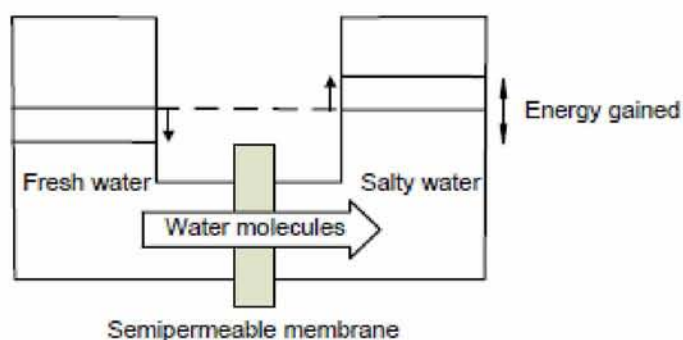
Σχήμα 2 : Σύστημα OTEC και τα υποπροϊόντα που παράγονται. (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion)

Προς το παρόν, η υψηλότερη ονομαστική ισχύς ενός συστήματος OTEC σε λειτουργία είναι 105 kW, και αφορά ένα σύστημα που σχεδιάστηκε και λειτουργεί από την Makai Engineering στη Χαβάη. Η εταιρεία σχεδιάζει επίσης να εγκαταστήσει μια μονάδα 1 MW στην Ιαπωνία και άλλη μια μονάδα των 100 MW σε συνεργασία με τη Lockheed Martin Corporation στη Χαβάη ή στο Γκουάμ. Σύμφωνα με τη Makai, ένας σταθμός ισχύος 100 MW μπορεί να παράγει ενέργεια για την τροφοδοσία περίπου 100.000 κατοικιών στη Χαβάη (Sang Y. et al, 2018). Στα υπερπόντια εδάφη της ΕΕ αναπτύσσονται ορισμένες εγκαταστάσεις επίδειξης, ανοίγοντας ευκαιρίες εξαγωγής (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).



Εικόνα 11: Σταθμοί εκμετάλλευσης ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion)

Η ισχύς βαθμίδας αλατότητας (ή «οσμωτική ισχύς») βασίζεται στη διαφορά της αλατότητας μεταξύ του αλμυρού και του γλυκού νερού, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Η οσμωτική ενέργεια παράγεται από τη βαθμίδα σε μια διαλυμένη ουσία (όπως το αλάτι) καθώς η βαθμίδα της πυκνότητας της ουσίας περιέχει δυνητική ενέργεια που πάντα τείνει να αλλάζει την κατάσταση του διαλύματος για να έχει ομοιόμορφη πυκνότητα. Η μετάβαση του διαλύματος από τη κατάσταση με διαβάθμιση στην κατάσταση με ομοιόμορφη πυκνότητα απελευθερώνει ενέργεια, η οποία μπορεί να συλλεχθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η όσμωση συμβαίνει όταν τα μόρια του νερού μετακινούνται αυθόρμητα κατά μήκος μιας ημιπερατής μεμβράνης από ένα υγρό με χαμηλή συγκέντρωση διαλυτής ουσίας και ως εκ τούτου με υψηλή συγκέντρωση νερού, όπως το γλυκό νερό, σε υψηλή συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας και συνεπώς χαμηλή συγκέντρωση νερού, όπως το αλμυρό νερό.



Σχήμα 3: Σύστημα οσμωτικής ενέργειας. (Πηγή: 2004 International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, 2004)

Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες οσμωτικής ενέργειας είναι: η όσμωση με επιβράδυνση της πίεσης (*pressure retarded osmosis - PRO*) και η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση (*reverse electrodialysis - RED*). Υπάρχει επίσης μια νέα τεχνολογία που έχει δοκιμαστεί σε επιστημονικά εργαστήρια αλλά δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμη: χωρητική ανάμειξη (*capacitive*

mixing - CapMix) (Sang Y. et al, 2018). Ένα άλλο σύστημα βασίζεται στην άνοδο (αναρρίχηση) γλυκού νερού μέσω μιας τουρμπίνας βυθισμένης στο θαλασσινό νερό, καθώς και ένα άλλο σύστημα που χρησιμοποιεί ηλεκτροχημικές αντιδράσεις βρίσκεται υπό ανάπτυξη (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

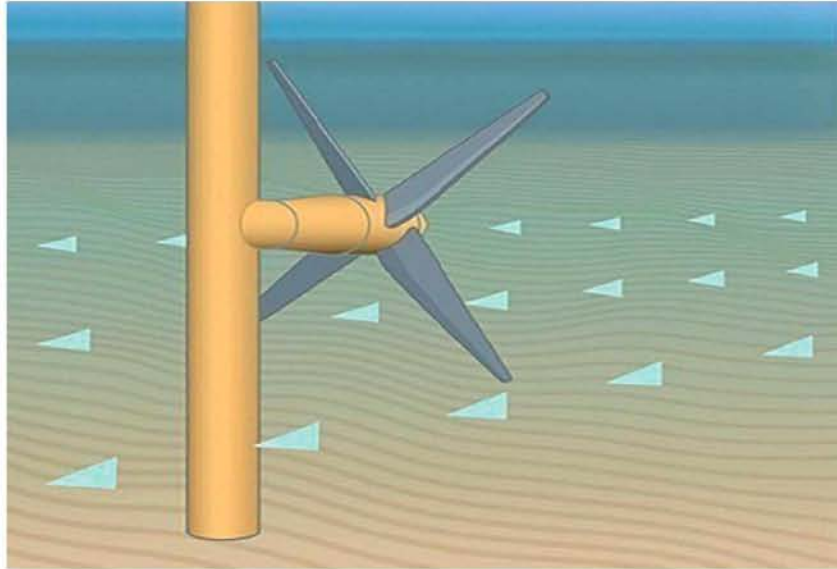
Σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε από το 1975 έως το 1985 και έδωσε διάφορα αποτελέσματα όσον αφορά την οικονομία των εγκαταστάσεων *PRO* και *RED*. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε άλλες χώρες, όπως η Ιαπωνία, το Ισραήλ και οι Ηνωμένες Πολιτείες, διεξάγονται μικρής κλίμακας έρευνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βαθμίδα αλατότητας, ενώ στην Ευρώπη η έρευνα επικεντρώνεται στα φιόρδ της Νορβηγίας και στην Ολλανδία, όπου δοκιμάζονται μικρά πιλοτικά έργα. Το δυναμικό της ανάπτυξης της βαθμίδας αλατότητας είναι σημαντικό σε όλη την Ευρώπη, ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας για να επιφέρει την ωρίμανση (Ocean Energy Forum, 2016).

Οι τεχνολογίες *OTEC* και βαθμίδας αλατότητας είναι πολύ λιγότερο ανεπτυγμένες σε σχέση με τις τεχνολογίες για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων και των παλιρροιών. Οι υβριδικές λύσεις παρουσιάζουν πρόσθετο δυναμικό και μπορούν να περιλαμβάνουν υπεράκτια αιολικά πάρκα που ενσωματώνουν συσκευές ωκεάνιας ενέργειας, εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας συνδυασμένες με τεχνολογίες για την εκμετάλλευση θαλάσσιας ενέργειας καθώς και την αφαλάτωση θαλασσινού νερού σε συνδυασμό με τεχνολογία ωσμωτικής ισχύος (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Οι τεχνολογίες αξιοποίησης ενέργειας θαλάσσιων ρευμάτων είναι σχετικά μη αναπτυγμένες σε σχέση με άλλους τύπους τεχνολογιών θαλάσσιας ενέργειας και εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια των ρευμάτων των ωκεανών (Sang Y. et al, 2018). Προς το παρόν, οι πιλοτικές συσκευές αξιοποίησης ωκεάνιων ρευμάτων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

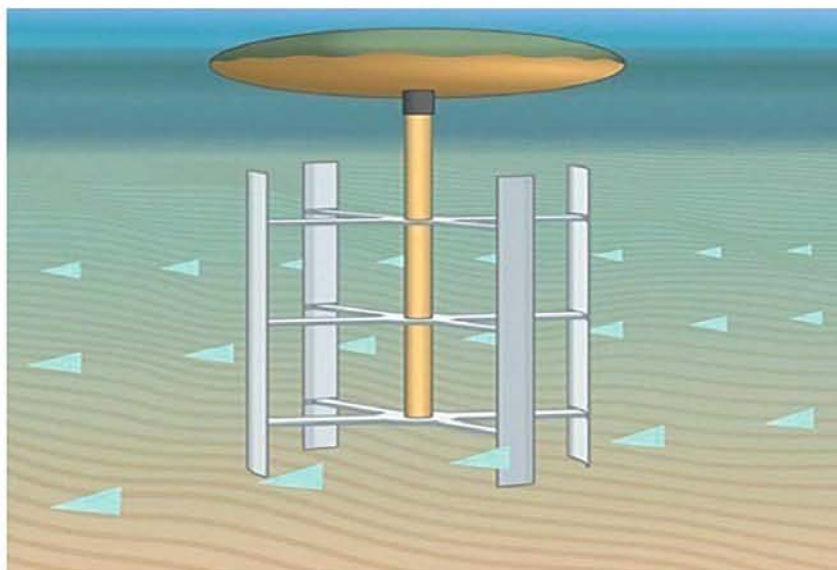
- Στρόβιλοι αξονικής ροής - Axial flow turbines
- Στρόβιλοι διασταυρούμενης ροής - Cross flow turbines
- Παλινδρομικές συσκευές - Reciprocating devices

Οι στρόβιλοι αξονικής ροής, ή αλλιώς στρόβιλοι οριζόντιου άξονα, μοιάζουν πολύ με τις τυπικές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Οι ρότορες των στροβίλων αξονικής ροής, με πτερύγια στο ένα άκρο, τοποθετούνται σε μια κάθετη δοκό που είναι στερεωμένη στον πυθμένα. Καθώς η ροή του ρεύματος γυρίζει τα πτερύγια, ο στρόβιλος αρχίζει να περιστρέφεται και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή ενέργειας μπορεί να μεγιστοποιηθεί όταν η περιοχή σάρωσης των πτερυγίων είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση της ροής ρεύματος. Έτσι, σε ορισμένους στρόβιλους αξονικής ροής, ο ρότορας μπορεί να στρέφεται σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος, ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις υιοθετούνται ακόμα ρότορες που δεν στρέφονται με την τρέχουσα ροή, προκειμένου να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός (Εικόνα 12).



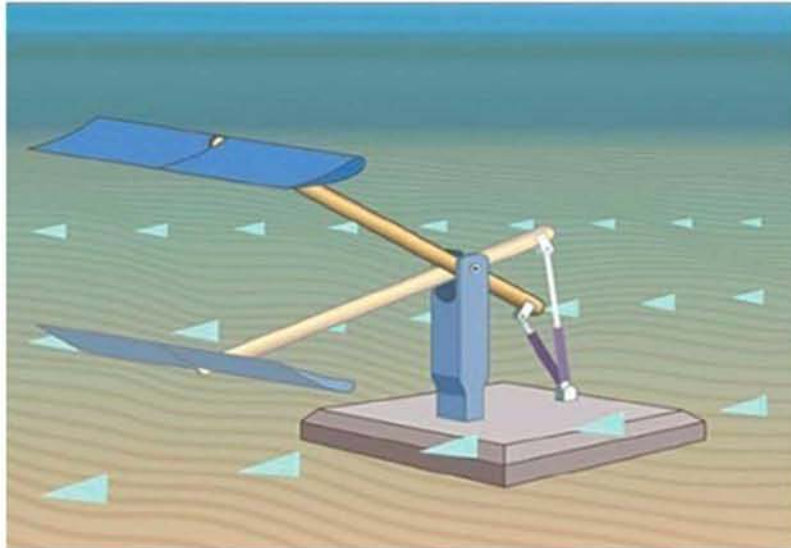
Εικόνα 12: Στρόβιλος αξονικής ροής – Axial flow turbine. (Πηγή: www.irena.org)

Οι στρόβιλοι διασταυρούμενης ροής ή αλλιώς στρόβιλοι κάθετου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα που είναι κάθετος προς την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Ο άξονας αυτός μπορεί να είναι κάθετος ή παράλληλος προς τον πυθμένα. Τα πτερύγια είναι παράλληλα προς τον άξονα του ρότορα και καθώς το ρεύμα ρέει κατά μήκος του άξονα, τα πτερύγια στρέφουν τον στρόβιλο για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι στρόβιλοι διασταυρούμενης ροής είναι πιο ευέλικτοι με τα ρεύματα διπλής κατεύθυνσης, δηλαδή παλιρροιακά ρεύματα, επειδή είναι συνήθως ικανά να λειτουργούν αμφίδρομα και δεν χρειάζεται να στρέφονται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες κατευθύνσεις (Εικόνα 13).



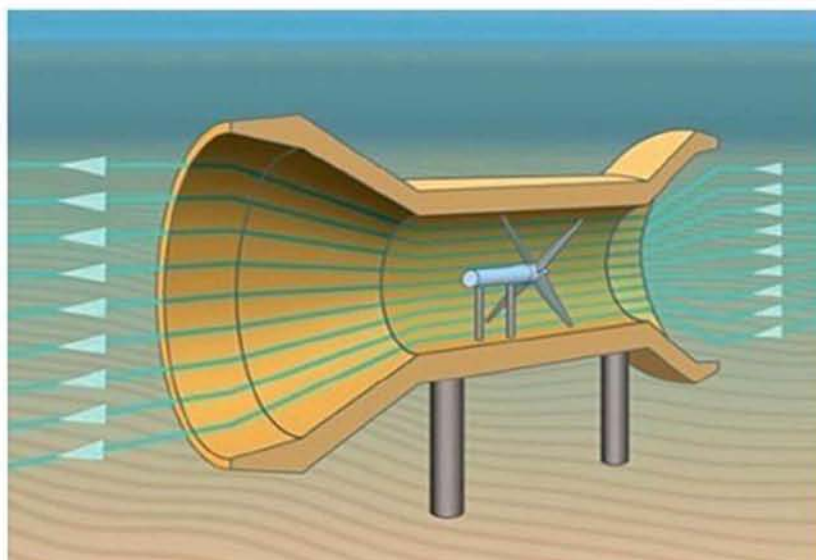
Εικόνα 13: Στρόβιλοι διασταυρούμενης ροής - Cross flow turbines. (Πηγή: www.irena.org)

Οι παλινδρομικές συσκευές χρησιμοποιούν εξαρτήματα που ταλαντεύονται προς τα πάνω και προς τα κάτω με τη ροή του ρεύματος και η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα παράδειγμα μιας παλινδρομικής συσκευής είναι μια συσκευή που μοιάζει με πτέρυγα, η γωνία προσβολής μεταξύ της ροής του ρεύματος και του υδροπτερύγου μπορεί να ρυθμιστεί για να ελέγχεται η ταλάντωση των υδροπτερύγων (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Παλινδρομικές συσκευές - Reciprocating devices. (Πηγή: www.irena.org)

Οι παραπάνω διατάξεις μπορούν συνδυαστούν με τη λεγόμενη σήραγγα *Venturi*, η οποία μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της δέσμησης ενέργειας (Sang Y. et al, 2018). Μια σήραγγα *Venturi* έχει μεγάλα ανοίγματα και στα δύο άκρα και ένα συσφιγμένο λαιμό στη μέση. Καθώς το ρέυμα ρέει μέσω της σήραγγας, η ταχύτητα της ροής αυξάνεται στο λαιμό και με την εγκατάσταση των συσκευών σε αυτό το σημείο της σήραγγας, αυξάνεται η απόδοση της διάταξης. Οι σήραγγες *Venturi* μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα είδη συσκευών σύλληψης ωκεάνιας ενέργειας (Εικόνα 15).



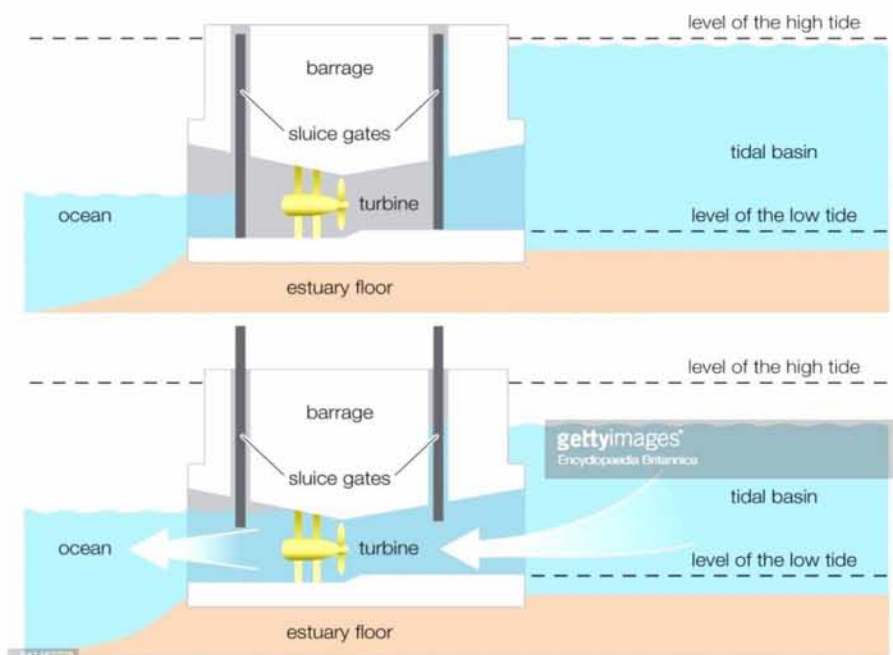
Εικόνα 15: Σήραγγα *Venturi* – Venturi channel. (Πηγή: www.irena.org)

Προς το παρόν, δεν υπάρχουν εμπορικά εκμεταλλεύσιμες ενεργειακές εγκαταστάσεις παλιρροιακών/ωκεάνιων ρευμάτων, όμως αρκετά πιλοτικά προγράμματα είναι υπό ανάπτυξη και ένα πρόγραμμα – επίδειξη έχει συνδεθεί με το ηλεκτρικό δίκτυο (Sang Y. et al, 2018).

Η αξιοποίηση της **παλιρροιακής ενέργειας** περιλαμβάνει δύο κύριες μορφές, πιο συγκεκριμένα:

- Παλιρροϊκή ενέργεια με φράγμα – Tidal barrage power
- Ενέργεια παλιρροιακής ροής – Tidal stream power

Οι τεχνολογίες εύρους παλίρροιας (ή «παλιρροϊκά φράγματα») λειτουργούν με αρχές παρόμοιες με αυτές των συμβατικών υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων (Sang Y. et al, 2018). Τα παλιρροϊκά φράγματα συλλέγουν την ενέργεια του νερού καθώς αυτό κινείται μέσα και έξω από όρμους και εκβολές ποταμών. Το νερό συλλαμβάνεται σε ένα φράγμα κατά μήκος μιας εκβολής ή ενός κόλπου και κατόπιν εξαναγκάζεται να διέλθει μέσω ενός υδροστρόβιλου κατά τη διάρκεια της άμπωτης. Αυτή η μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατάλληλη για περιοχές όπου υπάρχει σημαντική διαφορά εύρους μεταξύ πλημμυρίδας και άμπωτης.



Σχήμα 4: Σύστημα εύρους παλίρροιας ή παλιρροϊκού φράγματος. (Πηγή: <https://www.britannica.com/science/tidal-power>)

Τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος παλιρροιακού φράγματος είναι το ανάχωμα, τα θυροφράγματα, και οι στρόβιλοι. Το φράγμα παγιδεύει το νερό όταν η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει, ενώ τα θυροφράγματα και οι στρόβιλοι τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις κατά μήκος του φράγματος. Όταν η διαφορά της στάθμης των υδάτων και στις δύο πλευρές του φράγματος είναι αρκετή, οι πύλες ανοίγουν και το νερό ρέει μέσα από τις πύλες στρέφει τους στρόβιλους, ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων παλιρροϊκού φράγματος, τα συστήματα με ενιαία λεκάνη και τα συστήματα διπλής λεκάνης.

Η τεχνολογία ενέργειας παλιρροϊκού εύρους με φράγμα (tidal range barrage) είναι ώριμη και αποτελεί την πιο καθιερωμένη τεχνολογία ενέργειας στον ωκεανό, με πολλά έργα που παράγουν ενέργεια σε όλο τον κόσμο (Ocean Energy Forum, 2016). Τα ακόλουθα είναι τέσσερα από τα πιο γνωστά παλιρροϊκά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας μεγάλης ισχύος (Sang Y. et al, 2018).

- Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας La Rance, Γαλλία
 - Άρχισε να λειτουργεί το 1966
 - Η ικανότητά του είναι 240MW
 - Ετήσια παραγωγή περίπου 600GWh

- Σταθμός παραγωγής ενέργειας στη λίμνη Sihwa, Νότια Κορέα
 - Ο μεγαλύτερος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο
 - Άρχισε να λειτουργεί το 2011
 - Η ικανότητά του είναι 254MW
 - Ετήσια παραγωγή 550 GWh

- Σταθμός παραγωγής παλιρροϊκής ενέργειας στον κόλπο Fundy, Καναδάς
 - Άρχισε να λειτουργεί το 1984
 - Η ικανότητά του είναι 20MW
 - Ημερήσια παραγωγή 80-100 MWWh

- Σταθμός παραγωγής παλιρροϊκής ενέργειας Jiangxia, Κίνα
 - Άρχισε να λειτουργεί το 1980
 - Η ικανότητά του είναι 3,9 MW
 - Ετήσια παραγωγή 7,20 GWh

Λόγω του μεγάλου κόστους της επένδυσης για την κατασκευή, οι μονάδες παραγωγής παλιρροϊκής ενέργειας μεγάλης κλίμακας παραμένουν ακόμα μη δημοφιλής πηγή ανανεώσιμης ενέργειας (Sang Y. et al, 2018). Ωστόσο, η επιτυχής λειτουργία των υφιστάμενων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής που εκμεταλλεύονται το παλιρροϊκό εύρος αύξησε την εμπιστοσύνη των επενδυτών, και πλέον βρίσκονται σε εξέλιξη αρκετοί νέοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένου του παλιρροϊκού σταθμού Swansea Bay στο Ηνωμένο Βασίλειο (Sang Y. et al, 2018). Έλαβε τη συγκατάθεση για προγραμματισμό το 2015 και η προγραμματισμένη ικανότητα είναι 320MW, καθιστώντας το μεγαλύτερο εργοστάσιο παραγωγής παλιρροϊκών εγκαταστάσεων στον κόσμο.



Εικόνα 16: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας La Rance, Γαλλία. (Πηγή: <https://theecologist.org/2010/nov/10/how-france-eclipsed-uk-brittany-tidal-success-story>)

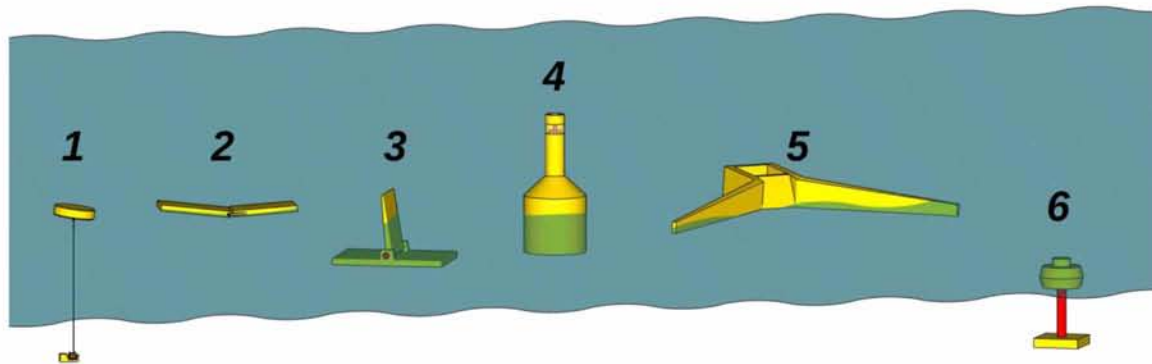
Οι τεχνολογίες ενέργειας παλιρροιακής ροής είναι παρόμοιες στις αρχές και στον σχεδιασμό με τις ανεμογεννήτριες και μοιράζονται πολλές ομοιότητες με την ενέργεια των ωκεάνιων ρευμάτων που παρουσιάστηκαν ανωτέρω (Sang Y. et al, 2018). Οι στρόβιλοι παλιρροιακού ρεύματος (tidal current turbines) εκμεταλλεύονται τη κινητική ενέργεια της υδάτινης μάζας κατά την παλίρροια, δηλαδή αξιοποιεί τα ισχυρά ρεύματα που δημιουργούνται λόγω της διαφοράς της στάθμης μεταξύ πλημμυρίδας και άμπωτης, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, οι συσκευές αυτές εγκαθίστανται σε τοποθεσίες με αξιόλογη παλιρροϊκή ταχύτητα ή στενά κανάλια με ρεύματα υψηλής ταχύτητας. Οι στρόβιλοι μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας στο βυθό και να στερεωθούν στον πυθμένα, ή να προσδεθούν στον πυθμένα και να βρίσκονται στα μέσα του νερού ή να επιπλέουν στην επιφάνεια. Το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιρλανδία, η Γαλλία, η Ελλάδα και η Ιταλία έχουν μεγάλο δυναμικό ενέργειας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Επί του παρόντος, τα έργα ενέργειας παλιρροιακής ροής δεν είναι αρκετά επικερδή (Melikoglu M., 2018).



Εικόνα 17: Στρόβιλοι παλιρροϊκής ροής – Tidal stream turbines. (Πηγή: <https://marineenergy.biz/2017/04/13/france-green-lights-normandie-hydro-tidal-pilot/>)

Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας πραγματοποιείται με τη βοήθεια των **μετατροπέων κυματικής ενέργειας**, τους λεγόμενους **WECs**. Πρόκειται για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που συλλαμβάνουν την ισχύ των κυμάτων και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα. Παρόλο που, οι προσπάθειες για την αξιοποίηση του συγκεκριμένου πόρου χρονολογούνται τουλάχιστον στο 1890, η ισχύς των κυμάτων ακόμα και σήμερα δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Ωστόσο, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες μια πληθώρα καινοτόμων ιδεών για μετατροπή της κυματικής ενέργειας έχει αναπτυχθεί, με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια περίπου είκοσι προτάσεις να έχουν υλοποιηθεί τουλάχιστον σε επίπεδο έρευνας σχετικά με το μετασχηματισμό της ενέργειας από κυματισμούς (Κατσαρδή Β.,2017).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι γενικοί τύποι συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας WEC που έχουν ερευνηθεί.



Εικόνα 18: Γενικοί τύποι συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας WEC : 1.Σημειακοί απορροφητές ενέργειας , 2. Επιφανειακοί εξασθενητές 3. Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης, 4. Ταλαντούμενη στήλη ύδατος, 5. Συσκευές υπερπηδησης, 6. Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης.

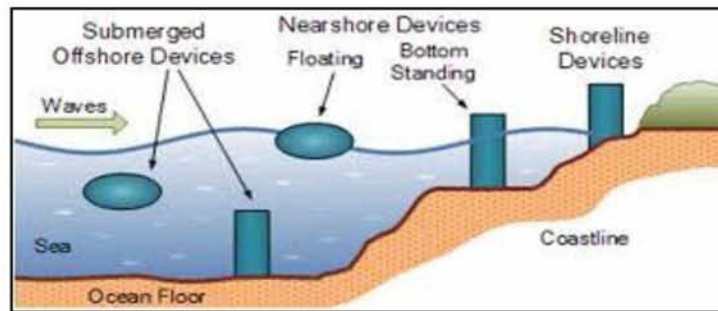
(Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power)

Αυτοί είναι διαφορετικοί τύποι μετατροπέων κυμάτων ενέργειας και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης, την αρχή λειτουργίας τους - το σύστημα ανάκτησης ενέργειας και τα χαρακτηριστικά της κατεύθυνση τους (www.wikipedia.org) . Η θέση εγκατάστασης μπορεί να είναι πάνω στην ακτογραμμή, κοντά στην ακτογραμμή και στα ανοικτά. Τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας περιλαμβάνουν: υδραυλικό έμβολο, αντλία ελαστομερούς σωλήνα, άντληση στην ακτή (rip-rap-to-shore), υδροηλεκτρικό στρόβιλο, αεροστρόβιλο και γραμμική ηλεκτρογεννήτρια. Ένας άλλος τύπος κατηγοριοποίησης που χρησιμοποιείται από ορισμένες εταιρείες και επιστήμονες αφορά το μέγεθος της συσκευής WEC σε σχέση με το μήκος του προσπίπτοντος κύματος (<http://www.renewablegreenenergypower.com>) .

Η ενέργεια που παράγεται από τους WEC εξαρτάται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του ύψους και της περιόδου των κυμάτων. Αρκετές συσκευές συσχετίζονται με τις τοποθεσίες εγκατάστασης, μέσω πινάκων ισχύος (power matrices), που βρίσκονται σε διάφορες μελέτες. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται για την ενδεικτική εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης διαφόρων WEC για αρκετές παράκτιες τοποθεσίες, όπως προσδιορίζονται από την αξιολόγηση των πόρων (Lavidas G., Venugopal V., 2017).

Θέση εγκατάστασης WEC

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας WEC αναπτύχθηκαν σταδιακά σε φάσεις καθώς η τεχνολογία ωρίμαζε και δοκιμαζόταν στα κύματα. Η πρώτη γενιά WEC εγκαταστάθηκε στην ακτογραμμή και έτσι ονομάστηκαν μετατροπείς κυματικής ενέργειας ακτογραμμής. Οι συσκευές WEC δεύτερης γενιάς εγκαθίστανται σε τοποθεσίες πλησίον της ακτογραμμής και είναι γνωστοί ως μετατροπείς κυματικής ενέργειας πλησίον της ακτογραμμής ή αγκυροβολημένες WEC επειδή είναι αγκυροβολημένες κοντά στις ακτές. Οι WEC τρίτης γενιάς είναι οι υπεράκτιοι μετατροπείς κυματικής ενέργειας και, όπως υποδεικνύει η ονομασία τους, αυτοί εγκαθίστανται στην ανοικτή θάλασσα, υπό σκληρότερες και δυσκολότερες συνθήκες με αποτέλεσμα η εγκατάσταση και η λειτουργία τους να ανεβαίνουν σε υψηλότερα επίπεδα από τους υπόλοιπους WEC. Οι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν στην επιλογή μιας από τις τρεις επιλογές τοποθεσίας εγκατάστασης είναι συγκεκριμένοι όσον αφορά τη διαθεσιμότητα του προϋπολογισμού και τις απαιτήσεις ή τους περιορισμούς που ορίζονται από τους κατόχους των έργων.

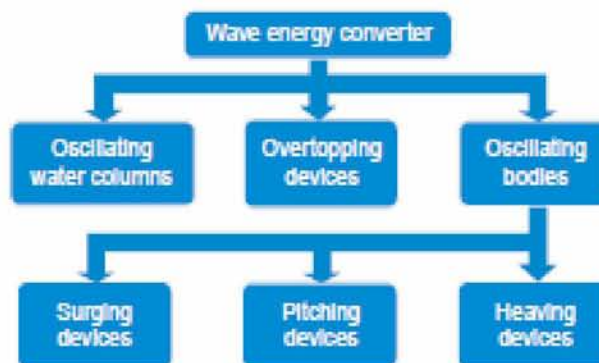


Εικόνα 19: Θέσεις εγκατάστασης συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας. (Πηγή: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy.html>)

Λειτουργία WEC

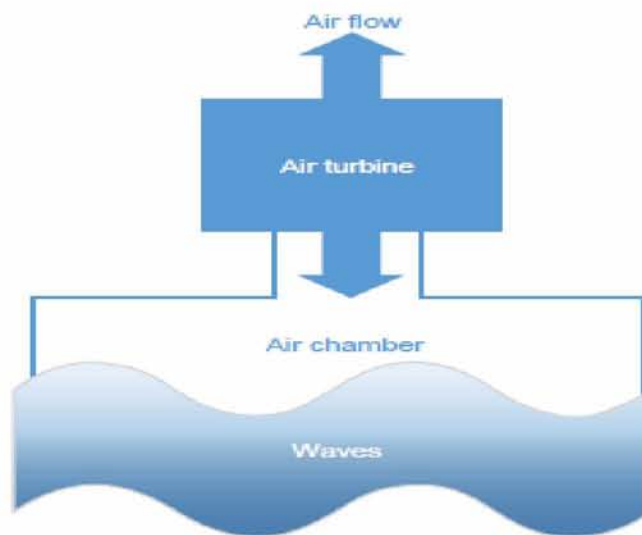
Η αρχή λειτουργίας αναφέρεται στη μέθοδο εξαγωγής ενέργειας. Οι βασικές αρχές λειτουργίας των WEC χωρίζονται σε τρεις κύριους τομείς:

- Η ταλαντούμενη στήλη νερού (Oscillating Water Column – OWC)
- Οι συσκευές υπερπήδησης νερού (Overtopping Devices – OTD),
- Ταλαντούμενα σώματα (Oscillating bodies)



Σχήμα 5: Διάκριση WEC βάσει της αρχής λειτουργίας τους. (Πηγή: Sang Y. et al, 2018)

Η **ταλαντούμενη στήλη νερού, OWC**, χρησιμοποιεί τα κύματα για να συμπιέσει και να διαστείλει τον αέρα έτσι ώστε να περιστραφεί μια τουρμπίνα αέρος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας αυτού του σταθμού είναι απλή και έξυπνη. Η συσκευή αποτελείται από ένα μερικώς βυθισμένο θάλαμο με ένα μεγάλο άνοιγμα στον πυθμένα του, κάτω από τη επιφάνεια του νερού, που επιτρέπει την ροή ισχυρών θαλάσσιων κυμάτων εντός και εκτός του θαλάμου, και με ένα μικρό άνοιγμα στην κορυφή όπου βρίσκεται ο στρόβιλος, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6. Η ημιτονοειδής ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας μέσα στο θάλαμο συμπιέζει και αποσυμπιέζει την υπερκείμενη στήλη αέρα εντός του θαλάμου, δημιουργώντας έτσι μια παλινδρομική ροή αέρα με αρκετή ισχύ που στρέφει τους στρόβιλους. Όταν η στήλη νερού ανέρχεται ο εγκλωβισμένος αέρας οδηγείται προς την ατμόσφαιρα ενώ όταν η στήλη νερού κατέρχεται, αναρροφάται αέρας από την ατμόσφαιρα μέσω του αεροστροβίλου, που γενικά στρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την φορά κίνησης του αέρα. Υπάρχουν δύο επιλογές για τον διαχωρισμό της αμφίδρομης ροής: ενός στρόβιλου Wells για τη δημιουργία αναρρόφησης ή εναλλακτικά βαλβίδων παραγωγής πίεσης (<http://www.coastalwiki.org>). Η κίνηση του στρόβιλου στρέφει έναν άξονα συνδεδεμένο σε μια γεννήτρια, με αποτέλεσμα να παράγεται ηλεκτρισμός.



Σχήμα 6: Μηχανισμός λειτουργίας συσκευής ταλαντούμενης στήλης ύδατος, OWC. (Πηγή: Sang Y. et al, 2018)

Οι συσκευές OWC μπορούν να τοποθετηθούν στην ανοιχτή θάλασσα ή να είναι ενσωματωμένες σε κυματοθραύστες, ενώ κάθε συσκευή μπορεί να λειτουργεί μόνη της ή στην ίδια κατασκευή με άλλες μονάδες. Οι συσκευές OWC είναι από τους πιο διερευνημένους μετατροπείς κυματικής ενέργειας και ανήκουν στους λίγους μετατροπείς που έχουν φτάσει στο στάδιο της κατασκευής και εγκατάστασης μονάδων πλήρους κλίμακας. Με τα χρόνια, πολλά λειτουργικά πρωτότυπα κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε τοποθεσίες κοντά στις ακτές. Παραδείγματα συσκευών OWC είναι οι Limpet, Oceanlinx, Ocean Energy Buoy και Sperboy. Αυτές οι συσκευές γενικά έχουν ισχύ από 500 kW έως 2 MW, ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες και τις διαστάσεις της συσκευής.

Η εγκατάσταση Islay LIMPET (Land Installed Marine Power Transmitter) αναπτύχθηκε και λειτούργησε το 2000 από τη Wavegen σε συνεργασία με το Queen's University Belfast και αποτελεί τη πρώτη εμπορική συσκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας στην παγκόσμια αγορά, καθώς συνδέεται με το Εθνικό Δίκτυο ηλεκτρισμού του Ηνωμένου Βασιλείου. (https://en.wikipedia.org/wiki/Islay_LIMPET)

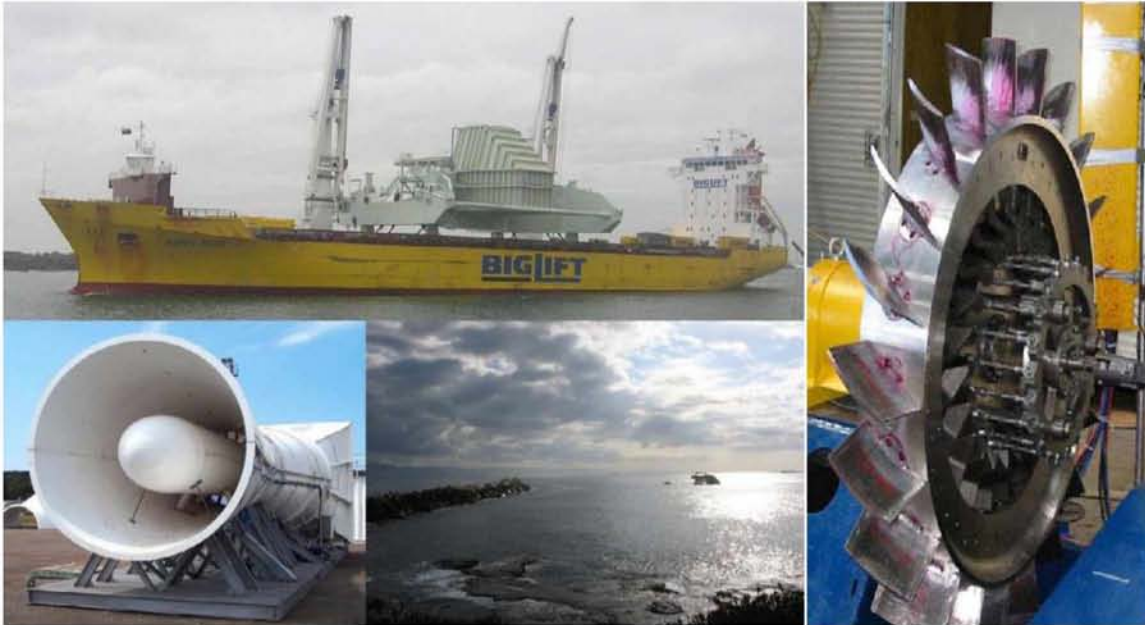


Εικόνα 20: Συσκευή Limpet. (Πηγή: www.wavegen.co.uk)

Η Islay LIMPET είναι μια συσκευή ακτογραμμής που χρησιμοποιεί τρεις στήλες ύδατος που ταλαντώνονται μέσα σε κεκλιμένους θαλάμους από μπετόν για να οδηγεί αέρα μέσα και έξω από ένα θάλαμο πίεσης μέσω ενός στρόβιλου. Το άνοιγμα των θαλάμων βρίσκεται κάτω από την στάθμη του νερού, ενώ το επάνω τμήμα των θαλάμων είναι εσωτερικά συνδεδεμένο και η μετατροπή της ενέργειας πραγματοποιείται από μία μόνο στρόβιλο-γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στον μεσαίο αγωγό. Ο θάλαμος του LIMPET είναι ένας κεκλιμένος σωλήνας σκυροδέματος με εσωτερικές διαστάσεις 6m επί 6m και σε κλίση 40° ως προς τον οριζόντιο επίπεδο. Οι στήλες ύδατος έχουν εξωτερικό πλάτος 21 m και βρίσκονται 17 m εσωτερικά της φυσικής ακτογραμμής σε ένα προκατασκευασμένο όρυγμα με βάθος νερών 6 m. Οι πλευρές του ορύγματος είναι ουσιαστικά παράλληλες και κάθετες ως προς την επιφάνεια της θάλασσας. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο Wells αντίστροφης περιστροφής, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο της πτερωτής του 2,6 m. Κάθε επίπεδη επιφάνεια με πτερύγια του στρόβιλου Wells είναι ενσωματωμένη απευθείας στον άξονα μιας τροποποιημένης επαγωγικής γεννήτριας των 250 kW, δίνοντας έτσι συνολική εγκατεστημένη ισχύ 500 kW.

Η συσκευή Oceanlinx αποσπά την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και να την μετατρέπει είτε σε ηλεκτρισμό ή την χρησιμοποιεί για να παράγει αφρατωμένο νερό από το θαλασσινό. Ο θάλαμος OWC της συσκευής έχει κωνοειδές σχήμα και στενεύει, έτσι ο αέρας επιταχύνεται και έχει τη μέγιστη ταχύτητα του καθώς διέρχεται μέσα από τον στρόβιλο, επιτρέποντας τη μέγιστη απόσπαση της ενέργειας από τη θάλασσα. Ο θάλαμος και ο στρόβιλος αποτελούν την «καρδιά» του μετατροπέα Oceanlinx. Το βασικότερο τμήμα του Oceanlinx είναι ο καινοτόμος στρόβιλος Denniss-Auld, ο οποίος χρησιμοποιεί μια διαφορετική μέθοδο που στηρίζεται σε πτερύγια μεταβλητής κλίσης που, με την πιο αργή περιστροφική κίνηση και τη μεγαλύτερη ροπή του στρόβιλου, βελτιώνουν την απόδοση και την αξιοπιστία, ενώ μειώνουν τις απαιτήσεις συντήρησης. Ο στρόβιλος χρησιμοποιεί ένα σύστημα αισθητήρων με μετατροπέα πίεσης που μετράει τη πίεση που ασκείται στον ωκεάνιο βυθό από κάθε

κύμα, καθώς αυτό πλησιάζει το θάλαμο σύλληψης. Ο μετατροπέας πίεσης στέλνει ένα παλμό τάσης ανάλογο της πίεσης που προσδιορίζει το ύψος, τη διάρκεια και το σχήμα του κάθε κύματος.



Εικόνα 21: Συσκευή Oceanlinx. (Πηγή: <http://www.oceanlinx.com/default.asp>)

Το σύστημα βαθμονομείται κατάλληλα ώστε να προλαμβάνεται η ενεργοποίηση του συστήματος από θορύβους μικρής κλίμακας. Ο παλμός στέλνεται σε ένα Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (PLC) που ρυθμίζει διάφορες παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο, όπως τη γωνία των πτερυγίων και την ταχύτητα του στροβίλου. Αυτά βαθμονομούνται σε αλγόριθμο που βασίζεται στις συγκεκριμένες συνθήκες και περιεχόμενο ενέργειας της τοποθεσίας εγκατάστασης, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Μία μονάδα ισχύος Oceanlinx μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από 100 kW έως και 1,5 MW, ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του τοπικού πληθυσμού. Η χωρητικότητα της κάθε μονάδας μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να εξυπηρετεί τις ανεξάρτητες ανάγκες της κοινότητας ή το δίκτυο διανομής. Ένα μέσο σπίτι καταναλώνει καθημερινά 20 kWh ηλεκτρισμό και 350 λίτρα νερό. Έτσι κατ' αντιστοιχία μία μονάδα Oceanlinx αναμένεται να παράγει αρκετή ισχύ για 1.500 σπίτια ή αρκετό νερό για 9.000 σπίτια. Όταν είναι αναγκαία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερης από 1,5 MW, είναι δυνατή η εγκατάσταση πολλαπλών μονάδων στην ίδια τοποθεσία, συνδεδεμένων στην ακτή μέσω ενός ηλεκτρικού υποθαλάσσιου καλωδίου. Δεν υπάρχει θεωρητικός περιορισμός στον αριθμό των μονάδων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μία τοποθεσία. Οι μονάδες μπορούν να χωριστούν κατά διαστήματα σε κοντινή μεταξύ τους απόσταση για τη μείωση της πρόσκρουσης των κυμάτων στην ακτή (κυματοθραυστική λειτουργία) ή σε μεγαλύτερη μεταξύ τους απόσταση ώστε να μην επηρεάζουν την παλιρροιακή ζώνη. Επιπροσθέτως, η ευελιξία της καινοτόμου ηλεκτρικής γεννήτριας και του συστήματος ελέγχου με μικροεπεξεργαστή, επιτρέπουν στη συσκευή να ενεργεί ως κάποιου είδους απομονωτή έναντι ανεπιθύμητων αιχμών σε δίκτυα μικρής κλίμακας. Αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερο βαθμό σταθερότητας του δικτύου σε απομακρυσμένες κοινότητες. Όσον

αφορά την αφαλάτωση του νερού, μια τυπική μονάδα Oceanlinx μπορεί να παρέχει πάνω από 3 εκατομμύρια λίτρα γλυκού νερού την ημέρα .

Ένα παράδειγμα μιας υπεράκτιας συσκευής OWC είναι η "Sperboy", η οποία αναπτύχθηκε από την Embley Energy LTD. Είναι κυκλική και επομένως ανεξάρτητη από την κατεύθυνση του κύματος (Εικ. 22). Το μέγεθός της ποικίλλει ανάλογα με τις θαλάσσιες συνθήκες στη θέση τοποθέτησης, αλλά οι μέγιστες διαστάσεις ορίζονται σε διάμετρο 30m, ύψος 50m και βύθισμα 35m. Είναι σχεδιασμένο για τοποθέτηση σε μεγάλες σειρές σε απόσταση 13 με 19 χλμ από την ακτή και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα και με ανταγωνιστικό κόστος. Λόγω των ελάχιστων κινούμενων τμημάτων που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, οι απαιτήσεις συντήρησης ελαχιστοποιούνται και η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με ανταγωνιστικά υψηλό βαθμό απόδοσης. Η μέση ετήσια παραγωγή μπορεί να είναι έως και 450 kW. Η απουσία μεγάλων ποσοτήτων από ρυπογόνα προϊόντα όπως πετρέλαια και λιπαντικά σε συνδυασμό με τον ελάχιστο αντίκτυπο που έχει το Sperboy στα οικοσυστήματα του βυθού της θάλασσας, το καθιστούν φιλικό προς το περιβάλλον (<http://www.coastalwiki.org>) .



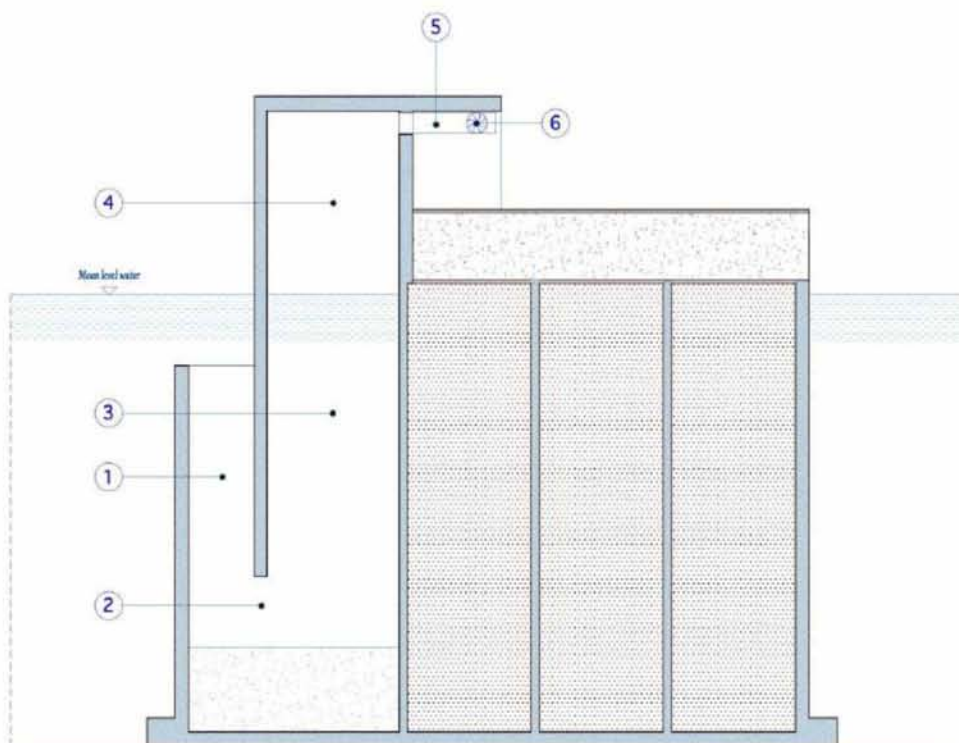
Εικόνα 22: Συσκευή Sperboy. (Πηγή: <http://www.sperboy.com/>)

Η ιδιοπερίοδος των ταλαντώσεων μέσα στα OWCs είναι τυπικά μικρότερη από την περίοδο των προσπιπτόντων κυμάτων, και δεν δύναται να τροποποιηθεί κατάλληλα αυτή η ιδιοπερίοδος. Ως εκ τούτου, προτάθηκαν ορισμένες σύνθετες συσκευές για τον έλεγχο φάσης σε κάθε μεμονωμένο κύμα ώστε να επιτευχθεί η συνθήκη συντονισμού. Για τις συσκευές OWC που λειτουργούν υπό τυχαίους ανεμογενείς κυματισμούς προτάθηκε να χρησιμοποιηθεί έλεγχος ανάδρασης ώστε να φτιαχτεί ένας χαρακτηριστικός «μιμούμενος» συντονισμός στην απόκριση της ταχύτητας. Γενικότερα, ο έλεγχος φάσης αν και θεωρείται απαραίτητος, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να εκτελεστεί, για οποιοδήποτε είδος μετατροπέα που αλληλεπιδρά με τυχαία κύματα που παράγονται από τον άνεμο (Arena F. et al, 2013). Μια ευρεία οπτική σχετικά με το θέμα δόθηκε από τους *Falcão, A. & Henriques, J., 2015* .

Μια αυξανόμενη προσοχή έχει εστιαστεί σε συσκευές που μπορούν να ενσωματωθούν στις δομές λιμένων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η οικονομική αποδοτικότητα στην εφαρμογή τους. Ορισμένες συσκευές OWC που ενσωματώθηκαν σε κυματοθραύστες είναι κατασκευασμένες στο λιμάνι Sakata,

στην Ιαπωνία, στην Ινδία, στο Islay στη Σκωτία, στις Αζόρες στην Πορτογαλία και στο Mutriku στην Ισπανία.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, ο Boccotti πρότεινε ένα νέο είδος συσκευής OWC για ενσωμάτωση σε κυματοθραύστη, τη U-OWC ή αλλιώς REWEC3 (Resonant Wave Energy Converter 3). Τα βασικά στοιχεία της είναι τα ίδια με τις κλασσικές συσκευές OWC, αλλά επιπρόσθετα, η U-OWC έχει έναν μικρό κάθετο αγωγό σχήματος U που συνδέει τη στήλη νερού με την προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, δηλαδή το ανοιχτό κυματικό πεδίο. Αυτή η συγκεκριμένη γεωμετρική διαμόρφωση επάγει σημαντικές τροποποιήσεις στην υδροδυναμική συμπεριφορά της μονάδας (Arena F. et al, 2015). Η ιδιαιτερότητα της U-OWC σχετίζεται με την ικανότητά της να επιτυγχάνει φυσικά τη συνθήκη συντονισμού, χωρίς να χρειάζονται συσκευές ελέγχου φάσης, επιτρέποντας έτσι την απορρόφηση ενός υψηλού ποσοστού ενέργειας των προσπιπτόντων κυμάτων, τόσο για καθαρά κύματα ανεμογενή κύματα όσο και για τα επιφανειακά κύματα βαρύτητας (φουσκοθαλασσιά).



Εικόνα 23: Συσκευή REWEC3 ή U-OWC, ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη από οπλισμένο σκυρόδεμα. (1) κάθετος αγωγός U, (2) κάτω άνοιγμα, (3) μάζα ύδατος, (4) θύλακας αέρα στο άνω τμήμα, (5) αγωγός αέρα, (6) στρόβιλος ή αεροτουρμπίνα. (Πηγή: Arena F. et al, 2013).

Από άποψη σχεδιασμού, το κύριο χαρακτηριστικό του REWEC3 είναι το γεγονός ότι η φυσική περίοδος της στήλης ύδατος μέσα στη μονάδα προσδιορίζεται στο προκαταρκτικό στάδιο του σχεδιασμού με τη κατάλληλη γεωμετρική διαμόρφωση του συστήματος (Arena F. et al, 2017). Επομένως, αυτή η νέα συσκευή U-OWC έχει το πλεονέκτημα, η ιδιοπερίοδος της μονάδας να

“ταιριάζει” με την επιθυμητή περίοδο ενός κύματος (Arena F. et al, 2015), προσφέροντας καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με αυτές μιας συμβατικής OWC, είτε με μικρά ανεμογενή κύματα είτε με υψηλά μεγάλα κύματα (Arena F. et al, 2013). Κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας, πειράματα πεδίου μικρής κλίμακας επιβεβαίωσαν τις άριστες επιδόσεις των συσκευών REWEC3 και απέδειξαν επίσης, ότι το θεωρητικό μοντέλο που πρότεινε ο Boccotti είναι σε θέση να περιγράψει την υδροδυναμική απόκριση του συστήματος REWEC3 σε μια σειρά προσπίπτόντων επίπεδων κυματισμών (Arena F. et al, 2017).

Επί του παρόντος, ένα πρωτότυπο σύστημα REWEC3 πλήρους κλίμακας λειτουργεί στο λιμάνι Civitàvecchia (Ρώμη, Ιταλία), το οποίο κατασκευάστηκε στο πλαίσιο μιας μεγάλης διεύρυνσης του λιμένα. Το συνολικό μήκος του κυματοθραύστη REWEC3 είναι 578 μέτρα. Κατά τη μελέτη λήφθηκαν υπόψη οι ειδικές κυματικές συνθήκες στη περιοχή του λιμένα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της μέσης ετήσιας ενέργειας που απορροφάται από τους μετατροπείς.



Εικόνα 24: Η θέση των συσκευών REWEC3 στους κυματοθραύστες που προστατεύουν τις νέες αποβάθρες (κόκκινοι κύκλοι). (Πηγή: Arena F. et al, 2017).

Ένα πρόγραμμα παρακολούθησης ενός ζεύγους θαλάμων REWEC3 διεξάγεται από τον Νοέμβριο του 2015, στο πλαίσιο του έργου «Μελέτη για την ανάπτυξη της πράσινης κινητικότητας στον λιμένα Civitàvecchia μέσω της εφαρμογής της πιλοτικής τεχνολογίας REWEC3 - 2013-IT-92050-S».

Συνοπτικά, δύο ειδικοί θάλαμοι REWEC3 είναι εξοπλισμένοι με μετρητές κυματικών δεδομένων για τη καταγραφή των σχετικών στάθμεων ύδατος και πιέσεων, ώστε να διερευνηθεί η δυναμική των REWEC3 και να αποκτηθούν όλες οι βασικές πληροφορίες για την εκτίμηση των ενεργειακών επιδόσεων του συστήματος, που αποτελείται από έναν παραδοσιακό στρόβιλο Wells, χωρίς καμία βελτιστοποίηση για τη συγκεκριμένη θέση.

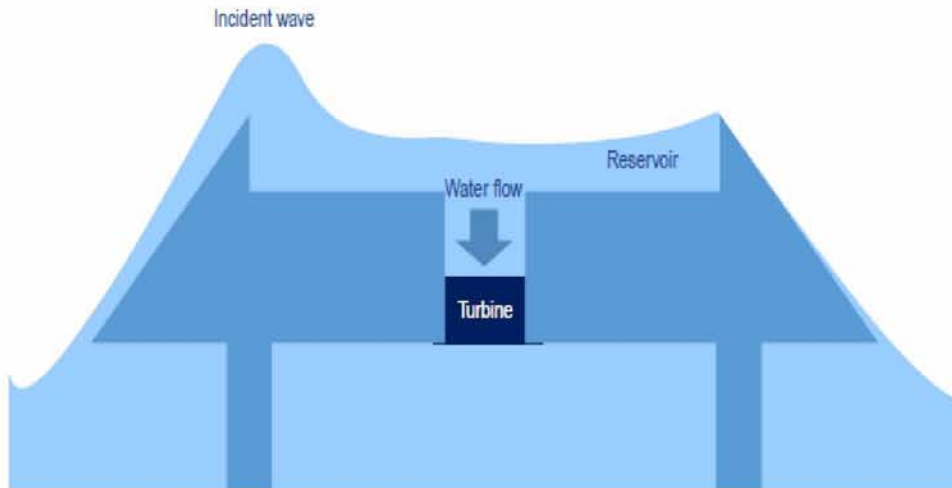
Οι μετρήσεις που έγιναν επιβεβαίωσαν τη συμπεριφορά του μετατροπέα ενέργειας κυμάτων REWEC3 υπό διάφορες καταστάσεις θαλάσσης, ενώ η απόδοση του REWEC3 διερευνήθηκε με βάση τον συντελεστή δέσμησης (*capture factor*), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της μέσης απορροφούμενης ισχύος κύματος και της μέσης ισχύος προσπίπτοντος κύματος (Arena F. et al, 2017). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μετατροπέας REWEC3 απορρόφησε (κατά μέσο όρο) από 50% έως 70% της ισχύος του προσπίπτοντος κύματος, με μέγιστο το 70-90% (Arena F. et al, 2017). Η καλύτερη απόδοση παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης θαλάσσης πολύ κοντά στην κατάσταση σχεδιασμού, στην οποία ο REWEC3 έχει σχεδιαστεί για να φτάσει στην κατάσταση συντονισμού, όπου η απορροφούμενη κυματική ενέργεια (πρώτο βήμα της αλυσίδας μετατροπής κυματικής ενέργειας) είναι μεταξύ 75% και 90% της ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος (Arena F. et al, 2017). Ο μετατροπέας REWEC3 συνδέθηκε τελικά με το δίκτυο το καλοκαίρι του 2016.

Προφανώς, η τυχαία φύση των κυμάτων συνεπάγεται τη συμπερίληψη στρατηγικών, που στοχεύουν στη μεγιστοποίηση των επιδόσεων του συστήματος σε ποικίλες συνθήκες κύματος (Arena F. et al, 2015). Από αυτή την άποψη, η βέλτιστη απόδοση του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες κύματος θα μπορούσε να επιτευχθεί με τον κατάλληλο έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του στρόβιλου (Falcão A., 2002). Συνεπώς, ο σχεδιασμός και η επιλογή της κατάλληλης αερο-τουρμπίνας μπορεί να αποβεί καθοριστικός για τις αποδόσεις των διατάξεων αυτών (Κατσαρδή Β., 2017).

Σε όλες αυτές τις εφαρμογές πρέπει να δίδεται βαρύτητα στην υπερφόρτωση του δικτύου από ακραίες συνθήκες, π.χ. μία καταιγίδα που προκαλεί μεγάλο κυματισμό, δεν πρέπει να προκαλεί υπερφόρτωση στο δίκτυο. Η βέλτιστη διανομή της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι σημαντική. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μόλις ~ 20% της ενέργειας από τον προσπίπτοντα κυματισμό, παρόλο που π.χ. οι συσκευές τύπου U απορροφούν το 75% της ενέργειάς του (Κατσαρδή Β., 2017). Συμπερασματικά, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης των συσκευών/ κατασκευών αυτών μέσω διερεύνησης των παραπάνω και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των OWC σε συνδυασμό με τις ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες που επικρατούν στην αντίστοιχη περιοχή που μας ενδιαφέρει (Κατσαρδή Β., 2017).

Τέλος, από περιβαλλοντική σκοπιά υπάρχει ανησυχία για τους θαλάσσιους οργανισμούς που παγιδεύονται ή εμπλέκονται εντός των θαλάμων αέρα των OWC, ενώ ένα επιπλέον θέμα αποτελεί ο σημαντικός θόρυβος που παράγεται καθώς ο αέρας ωθείται μέσω των στρόβιλων, επηρεάζοντας ενδεχομένως τα πιτηνά και άλλους θαλάσσιους οργανισμούς κοντά στην συσκευή (<https://tethys.pnnl.gov>).

Οι συσκευές υπερπήδησης νερού (Overtopping Devices – OTD), πρόκειται για κατασκευές με μεγάλο μήκος που χρησιμοποιούν τη ταχύτητα των κυμάτων για να συλλέξουν το νερό από προσπίπτοντα κύματα σε μια υπερυψωμένη δεξαμενή πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Το νερό επιστρέφει στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροστροβίλου, μικρού ύψους πτώσης, ο οποίος μέσω γεννήτριας, παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια παράγεται με χρήση της δυναμικής ενέργειας του νερού, που βρίσκεται στην ανοικτή δεξαμενή ψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας.



Σχήμα 7: Μηχανισμός λειτουργίας συσκευής υπερπήδησης κύματος, OTD. (Πηγή: Sang Y. et al, 2018)

Οι συσκευές μπορούν να είναι, είτε πλωτές στην επιφάνεια της θάλασσας, είτε στην ακτή ως τμήμα των κυματοθραυστών ή μπροστά από αυτούς. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν οι μετατροπείς: Wave Dragon, Waveplane και Seawave Slot-Cone.



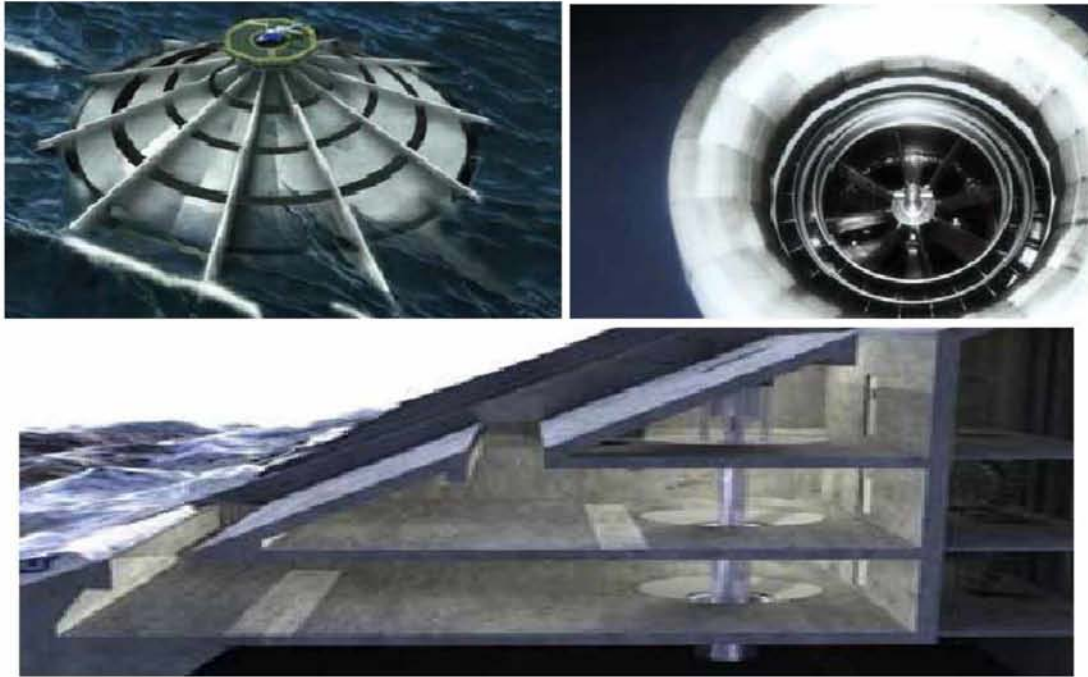
Εικόνα 25: Συσκευή WavePlane. (Πηγή: https://openei.org/wiki/MHK_Technologies/WavePlane)

Η συσκευή Wave Dragon είναι ένας άλλος τύπος τεχνολογίας overtopping και πρόκειται για μια πλωτή συσκευή που συνήθως αγκυροβολείται σε βαθιά νερά. Έχει μια δεξαμενή στην κορυφή για τη συλλογή θαλασσινού νερού και το νερό επιστρέφει στον ωκεανό μέσω ενός ή περισσοτέρων στροβίλων. Η τεχνολογία Wave Dragon δοκιμάστηκε σε διάφορες τοποθεσίες. Ο προτεινόμενος βέλτιστος σχεδιασμός μεγέθους της συσκευής είναι: πλάτος 260 μέτρα και μήκος 150m ώστε να παράγει 4 MW. Σε κυματικές συνθήκες άνω των 33 kW / m, αυτή η τεχνολογία αναμένεται να είναι οικονομικά ανταγωνιστική με την υπεράκτια αιολική ενέργεια στο εγγύς μέλλον (<http://www.coastalwiki.org>).



Εικόνα 26: Συσκευή Wave Dragon. (Πηγή:www.wavedragon.net)

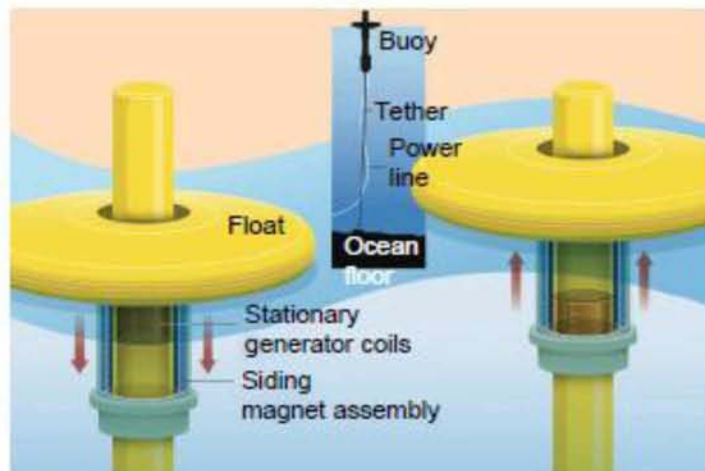
Μία άλλη πολύ γνωστή συσκευή overtopping είναι η Sea Wave Slot-Cone Generator, η οποία αναπτύχθηκε από Νορβηγούς ερευνητές και έχει το πλεονέκτημα της συγκομιδής σε αρκετές δεξαμενές, η μια πάνω από την άλλη, με τη μορφή κλίμακας, προκειμένου να βελτιωθεί η υψηλή υδραυλική απόδοση στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων. Η χωρητικότητα της δεξαμενής εξομαλύνει την ανομοιομορφία των εισερχόμενων κυμάτων, παρέχοντας μια σταθερή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο. Επιπλέον, με τον άξονα του στροβίλου και τα θυροφράγματα που ελέγχουν τη ροή του νερού, η SSG είναι μια ανθεκτική κατασκευή σκυροδέματος με λίγα κινούμενα μέρη στο μηχανικό σύστημα. Αυτό τη καθιστά ως ένα σύστημα χαμηλής συντήρησης και ανθεκτικό. Άλλα σχέδια SSG μπορούν να αναπτυχθούν σε χερσαίες ή υπεράκτιες περιοχές.



Εικόνα 27: Συσκευή Seawave Slot-Cone. (Πηγή:
https://openei.org/wiki/MHK_Technologies/Sea_wave_Slot_cone_Generator_SSG)

Υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τις πλωτές συσκευές, που αφορούν την επιρροή του συστήματος πρόσδεσης στους βενθικούς οργανισμούς, οργανισμούς που μπλέκονται σε αυτό, ή τα φαινόμενα EMF που παράγονται από υποθαλάσσια καλώδια. Υπάρχουν επίσης κάποιες ανησυχίες σχετικά με τα χαμηλά επίπεδα θορύβου από τους στροβίλους καθώς επίδραση της απορρόφησης της κυματικής ενέργειας από στον εγγύς βιότοπο (www.wikipedia.org) .

Τα ταλαντούμενα σώματα, είναι συσκευές που ταλαντεύονται λόγω της δράσης των κυμάτων και πολλές από αυτές χρησιμοποιούν ένα υδραυλικό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα ταλαντευόμενα σώματα είναι διατάξεις κατασκευών που κινούνται με τα κύματα και συλλέγουν την κινητική τους ενέργεια, η οποία μετατρέπεται έπειτα σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας συστήματα ανάκτησης (Power Take Off). Αυτές οι συσκευές συνήθως, έχουν ένα τμήμα στερεωμένο σε μια κατασκευή ή στον βυθό και ένα άλλο τμήμα τους είναι ελεύθερο να κινηθεί με αποτέλεσμα η ενέργεια να συλλέγεται από τη σχετική κίνηση του σώματος σε σύγκριση με το σταθερό τμήμα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί βαθμοί ελευθερίας κινήσεων των κυμάτων. Έτσι, υπάρχουν συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης (surging devices), οι οποίες εκμεταλλεύονται τη διαμήκη κίνηση των κυμάτων , τις συσκευές λικνίσματος (pitching devices), που εκμεταλλεύονται την κλίση της κίνησης και τις συσκευές κατακόρυφης κυματικής παλινδρόμησης (heaving devices) που εκμεταλλεύονται την κίνηση πάνω-κάτω. Αυτές είναι ικανές να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια των κυμάτων απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια και είναι τα πιο δημοφιλή είδη WEC στην έρευνα . Ένα παράδειγμα συσκευής ταλαντωμένου σώματος (heaving), είναι ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας L-10, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8: Συσσκευή L-10, αναπτύχθηκε στο Oregon State University. (Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/224258615_From_Blue_to_Green_Ask_the_Experts/)

Όσον αφορά τις συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης, αυτές εμφανίζονται συχνά υπό μορφή πλωτήρων, πτερυγίων ή μεμβρανών. Μερικά από αυτά τα σχέδια ενσωματώνουν παραβολικούς ανακλαστήρες ως μέσο αύξησης της ενέργειας των κυμάτων στο σημείο σύλληψης. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν οι μετατροπείς: Oyster, Waveroller, Langlee System, και Neptune Triton.



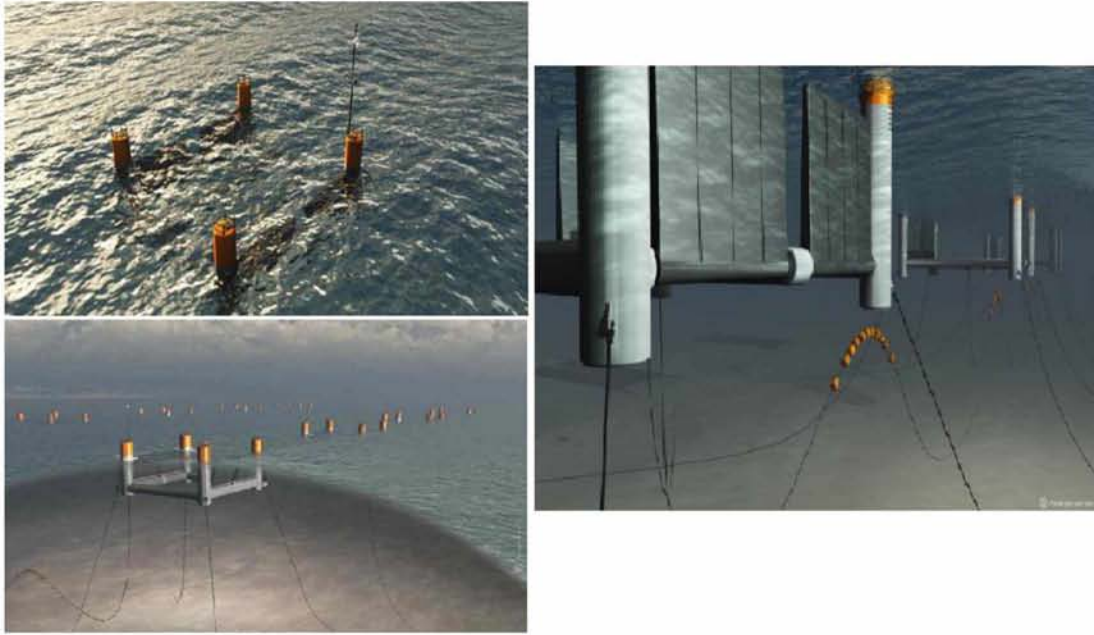
Εικόνα 28: Συσσκευή οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης Oyster. (Πηγή: www.aquamarinepower.com)

Η συσκευή Oyster εγκαθίσταται στον πυθμένα της θάλασσας, σε κοντινή απόσταση από την ακτή και είναι σχεδιασμένη να αλληλεπιδρά αποδοτικά με τις δυνάμεις των κυμάτων στα ρηχά νερά. Η εγκατάσταση σε ρηχά νερά κοντά στην ακτή δίνει το πλεονέκτημα της ευκολότερης πρόσβασης και επιπλέον αποφεύγονται τα επικίνδυνα μεγάλα κύματα που υπάρχουν στην ανοιχτή θάλασσα. Το σύστημα Oyster είναι σχεδιασμένο με έμφαση στην απλότητα και στις ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Γι' αυτό και είναι πολύ ελαφρύ και αποτελείται από πολύ λίγα τμήματα. Η συσκευή αποτελείται βασικά από μια μικρή βάση που σταθεροποιείται στο βυθό της θάλασσας και από το πτερύγιο ταλάντωσης με τις αντλίες εμβόλου. Το αποτύπωμα της στον βυθό είναι πολύ μικρό, ενώ η μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της εξόδου της σε σχέση με το μέγεθος της, την καθιστά οικονομικά αποδοτική. Η αρχή λειτουργίας της είναι απλή και η συσκευή αποτελείται από ένα είδος πτερυγίου ταλάντωσης εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 12 m. Αυτή η συσκευή αποσπά την ενέργεια των διερχόμενων θαλάσσιων κυμάτων και τη διαβιβάζει ως υδραυλική ισχύ θαλασσινού νερού σε μία υδροηλεκτρική μονάδα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αιχμής της κάθε μονάδας Oyster είναι μεταξύ 300 και 600 kW ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της. Έτσι, μια εγκατάσταση παραγωγής εμπορικής κλίμακας αποτελούμενη από 10 μονάδες Oyster σε σειρές θα παράγει μέχρι και 6 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Η συσκευή ταλαντεύεται μακριά από μεγάλα κύματα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια αδιάλειπτα ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Αλληλεπιδρά απευθείας με την ενισχυμένη ορμητική κίνηση των κυμάτων κοντά στην ακτή, παράγοντας αποδοτικά ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και στις μικρότερες και ηπιότερες θάλασσες. Τέλος, το Oyster αποτελεί μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική πηγή ηλεκτρισμού.



Σχήμα 9: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος Oyster. (Πηγή: www.aquamarinepower.com)

Προκειμένου να είναι πιο αποδοτικές αυτές οι συσκευές, οι κινούμενες ενώσεις πρέπει να είναι μικρές σε σύγκριση με το μήκος κύματος και κατά προτίμηση να τοποθετούνται σε απόσταση μισού μήκους κύματος (<http://www.coastalwiki.org>). Για τους λόγους αυτούς, τα ταλαντούμενα σώματα είναι συνήθως πολύ συμπαγή και ελαφρά. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του τύπου των μετατροπών κυματικής ενέργειας είναι το υψηλό κόστος της γεννήτριας ισχύος που απαιτείται για τη μετατροπή της ακανόνιστης ταλαντωτικής ροής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 29: Μετατροπέας κυματικής ενέργειας Langlee System. (Πηγή: Παναγιωτόπουλος Μ., 2010)

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες περιλαμβάνουν μικρό κίνδυνο σύγκρουσης, επιπτώσεις EMF από υποθαλάσσια καλώδια καθώς και επίδραση στις μεταφορές ιζημάτων λόγω της απομάκρυνσης ενέργειας από τα κύματα (<https://tethys.pnnl.gov>).

Χαρακτηριστικά κατεύθυνσης

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι WEC που προσδιορίζονται από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή την κατεύθυνση που εκμεταλλεύονται τα κύματα.

Οι σημειακοί απορροφητές ενέργειας (point absorber buoys) είναι πλωτές κατασκευές, που συγκροτούνται με καλώδια που συνδέονται με τον πυθμένα, και αποτελούνται από στοιχεία που κινούνται σε σχέση μεταξύ τους λόγω της δράσης των κυμάτων (π.χ., ένας πλωτός σημαντήρας μέσα σε έναν σταθερό κύλινδρο). Γενικά, οι συσκευές αυτές τοποθετούνται σε διατάξεις με μεγάλες σειρές, καθώς είναι μικρές σε σύγκριση με το προσπίπτον κύμα. Χρησιμοποιούν την ημιτονοειδή κίνηση των κυμάτων, κινούμενες πάνω - κάτω στην ελεύθερη επιφάνεια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με διάφορους τρόπους, μεταξύ άλλων απευθείας μέσω γραμμικών γεννητριών ή μέσω γεννητριών με γραμμικό προς περιστροφικό σύστημα μηχανικών μετατροπών ή υδραυλικές αντλίες. Επομένως το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (PTO) μπορεί να παίρνει διάφορες μορφές ανάλογα με τη διαμόρφωση της αντίδρασης στην κίνηση του πλωτήρα. Τοποθετούνται στην ανοικτή θάλασσα σε/ή κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού και λόγω της διάταξής τους μπορούν μέσω ενός κατακόρυφου βυθισμένου floater να απορροφούν την ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις. Παραδείγματα αυτής της προσέγγισης είναι το Powerbuoy (OPT), το Wave Star, το Wavebob, το FO3 (Fred Olsen), και το Manchester bobber .



Εικόνα 30: Συσκευή Fred Olsen - FO3. (Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/319666012_STATISTICAL_ASSESSMENT_OF_THE_EFFECT_OF_A_WAVE_ENERGY_CONVERTER_IN_FALMOUTH_BAY_UK/)

Η συσκευή FO3 αποτελείται από αρκετούς (12 ή 21) πλωτήρες κατακόρυφης κίνησης που είναι προσαρτημένοι σε εξέδρα 36x36 μέτρα. Μέσω ενός υδραυλικού συστήματος, η κατακόρυφη κίνηση μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση που κινεί τον υδραυλικό κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτεί τη γεννήτρια που μπορεί να παράγει μέχρι και 2,52 MW .



Εικόνα 31: Σύστημα μετατροπής κυματικής ενέργειας Wave Star. (Πηγή: www.wavestarenergy.com)

Η συσκευή "Wave Star", έχει έναν αριθμό πλωτήρων στους κινητούς βραχίονες, που είναι σε θέση να ανυψώσουν ολόκληρη την εγκατάσταση κατά μήκος των πυλώνων της, και έτσι το σύστημα αυτό έχει μεγάλη αντοχή σε συνθήκες δυσχερής καταιγίδας. Μέχρι στιγμής, αυτή η μέθοδος δεν έχει αναπτυχθεί σε πλήρη κλίμακα. Μια πιλοτική εγκατάσταση με κλίμακα 1:2 έχει κατασκευαστεί στο Hanstholm, το οποίο αποδίδει 600 kW. Ωστόσο, η παραγωγή θεωρείται ότι είναι ικανή να φτάσει τα 6 MW (<http://www.coastalwiki.org>). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ελάχιστη επαφή με το νερό, και έτσι τα ευαίσθητα μηχανήματα είναι προστατευμένα από την διάβρωση και τα φορτία των κυμάτων.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από τα ηλεκτρικά καλώδια και ο θόρυβος αυτών των συσκευών αποτελούν μια ανησυχία για τους θαλάσσιους οργανισμούς, ενώ η παρουσία των σημαντήρων μπορεί να επηρεάσει τα ψάρια, τα θαλάσσια θηλαστικά και τα πτηνά. Η ενέργεια που απομακρύνεται από τα κύματα μπορεί επίσης να επηρεάσει την ακτογραμμή, με αποτέλεσμα να συστήνεται οι τοποθεσίες εγκατάστασης να παραμένουν σε σημαντική απόσταση από την ακτή (<https://tethys.pnnl.gov>).

Η CETO είναι μια τεχνολογία κυματικής ενέργειας που μετατρέπει την κινητική ενέργεια από τα ωκεάνια κύματα σε ηλεκτρική ενέργεια και επιπλέον το σύστημα CETO 5 μπορεί ταυτόχρονα να παράγει απευθείας γλυκό νερό μέσω της αντίστροφης ώσμωσης. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε στην ξηρά και στην ανοικτή θάλασσα στη Δυτική Αυστραλία και έχει σχεδιαστεί για να είναι μια απλή αλλά στιβαρή τεχνολογία κυματικής ενέργειας. Στις αρχές του 2015 τέθηκε σε λειτουργία μια εγκατάσταση παραγωγής CETO 5 και συνδέθηκε με το δίκτυο, ενώ από τον Ιανουάριο του 2016 όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αγοράζεται για να συμβάλει στην κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος της ναυτικής βάσης HMAS Stirling στη Δυτική Αυστραλία. Κάποιο ποσοστό της ενέργειας που παράγεται θα χρησιμοποιηθεί επίσης άμεσα για την αφαλάτωση του νερού.



Εικόνα 32: Συσκευή Ceto. (Πηγή: <https://www.carnegiece.com/wave/what-is-ceto/>)

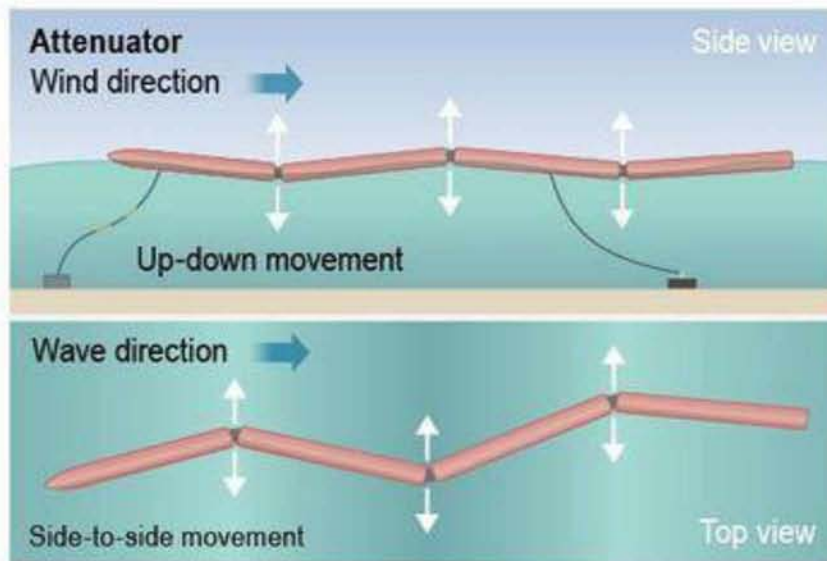
Το σύστημα του μετατροπέα CETO 5 από τον Ιανουάριο του 2016 διακρίνεται από τις άλλες συσκευές WEC που είναι πλήρως βυθισμένες. Οι βυθισμένες «βαλβίδες - σημαντήρες - buoys» κινούνται από τη φουσκοθαλασσιά στους ωκεανούς, με αποτέλεσμα να λειτουργούν αντλίες που παραδίδουν στην ξηρά θαλασσινό νερό με υψηλή πίεση μέσω ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Στην ξηρά, το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για την κίνηση υδροηλεκτρικών στροβίλων, που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, για την παράγωγη γλυκού νερού. Ορισμένες παλαιές συμβατικές μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού είναι παραγωγοί σημαντικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς το δίκτυο αντλιών τους, που μεταφέρει το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης στις μονάδες αντίστροφης ώσμωσης για την απομάκρυνση του αλατιού, απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας.



Εικόνα 33: Συσκευές Ceto 5 & Ceto 6. (Πηγή: <https://www.carnegiece.com/wave/what-is-ceto/>)

Η CETO ισχυρίζεται ότι είναι η μόνη τεχνολογία κυματικής ενέργειας παγκοσμίως, που έχει δοκιμαστεί στον ωκεανό, η οποία είναι πλήρως βυθισμένη και παράγει ενέργεια και αφαλατωμένο νερό στην ξηρά. Η τεχνολογία CETO επαληθεύτηκε ανεξάρτητα από την Energies Nouvelles (EDF EN) και τη γαλλική ναυπηγική εταιρεία DCNS. Το όνομα είναι εμπνευσμένο από την ελληνική μυθολογία και αναφέρεται στη θεά της θάλασσας, τη Κητώ

Επιφανειακοί Εξασθενητές (surface attenuator). Πρόκειται για πλωτές επιμήκεις κατασκευές με μικρή μετωπική επιφάνεια, που βρίσκονται σε παράλληλη θέση με τους κυματισμούς και κινούνται στην επιφάνεια του κύματος. Οι συσκευές αυτές δρουν παρόμοια με τους σημειακούς απορροφητές ενέργειας, και αποτελούνται από πολλά πλωτά τμήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Οι εξασθενητές καβαλούν τα κύματα όπως τα πλοία και εξαγάγουν την ενέργεια χρησιμοποιώντας συστήματα συγκράτησης στη πλώρη της συσκευής και κατά μήκος της. Τα διαφορετικά ύψη των κυμάτων κατά μήκος της συσκευής προκαλούν κάμψη στα σημεία που τα τμήματα συνδέονται. Τα τμήματα συνδέονται με υδραυλικές αντλίες ή άλλους μετατροπείς για να παράγουν ενέργεια καθώς τα κύματα κινούνται. Λόγω της μικρής μετωπικής επιφάνειας προς το κύμα, σε σύγκριση με άλλες συσκευές, η συσκευή καταπονείται από μικρότερες δυνάμεις.



Σχήμα 10: Επιφανειακός Εξασθενητής. (Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/292527041_Ocean_Energy_For_Electricity_Generation_And_Its_Potential_In_India/)

Παραδείγματα τέτοιων συσκευών αποτελούν οι Pelamis, OceanTech, και Dexawave. Η Pelamis Wave Power δοκίμασε το πρώτο πρωτότυπο πλήρους κλίμακας στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας στο Orkney της Σκωτίας από το 2004 έως το 2007. Η μηχανή, η οποία είχε ονομαστική ισχύ στα 750 kW, ήταν το πρώτο υπεράκτιο μηχάνημα παραγωγής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Η πιλοτική συσκευή είχε μήκος 120 μέτρα και διάμετρο 3,5 μέτρα και αποτελούνταν από τέσσερα τμήματα σωλήνων που συνδέονταν με τρεις μικρότερες μονάδες μετατροπής ισχύος.



Εικόνα 34: Η πιλοτική συσκευή Pelamis στο EMEC, Orkney, Scotland, 2007. (Πηγή: EMEC)

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι παρόμοιες με εκείνες των σημειακών απορροφητών, με την επιπλέον ανησυχία ότι οι οργανισμοί θα μπορούσαν να σφηνωθούν στις αρθρώσεις (<https://tethys.pnnl.gov>).

Οι συσκευές τερματισμού (Terminators), είναι προσανατολισμένες κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος και ουσιαστικά, με τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται, τερματίζουν το δρόμο του κύματος. Αυτοί οι μετατροπείς περιλαμβάνουν ένα σταθερό στοιχείο και ένα στοιχείο που κινείται σε απόκριση με το κύμα. Το "στατικό" τμήμα μπορεί να στερεωθεί στον πυθμένα ή στην ακτή και πρέπει να παραμείνει σταθερό, σε αντίθεση με το κινητό μέρος. Το κινούμενο μέρος λειτουργεί σαν ένα έμβολο σε αυτοκίνητο – που κινείται πάνω και κάτω. Αυτή η κίνηση πιέζει τον αέρα ή κάποιο λάδι για να κινήσει έναν στρόβιλο. Τέτοιου είδους συσκευές είναι οι συσκευές υπερπήδησης κύματος OTD και ορισμένες από τις συσκευές ταλαντούμενης στήλης ύδατος OWC.

Βάζοντας τα παραπάνω χαρακτηριστικά τοποθεσίας και κατεύθυνσης σε έναν πίνακα μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται WECs.

Πίνακας 2: Αντιστοίχιση αρχής λειτουργίας συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας με θέση τοποθέτησης και χαρακτηριστικά κατεύθυνσης

Principal Location	Directional Characteristics		
		Point Absorber	Terminator
Shoreline	-	OWC, OTD	-
Nearshore	Oscillating bodies	OWC, OTD, OB	Oscillating bodies
Offshore	Oscillating bodies	OWC, OTD, OB	Oscillating bodies

Οι συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας WEC μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μετατρέπουν την ενέργεια των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια και συγκεκριμένα εάν χρησιμοποιούν τη δυναμική ή κινητική ενέργεια για να παράγουν ηλεκτρισμό.

Επιπλέον, υπάρχουν συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας που δεν κατατάσσονται σε κάποια από τις ανωτέρω κατηγορίες, όπως αυτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

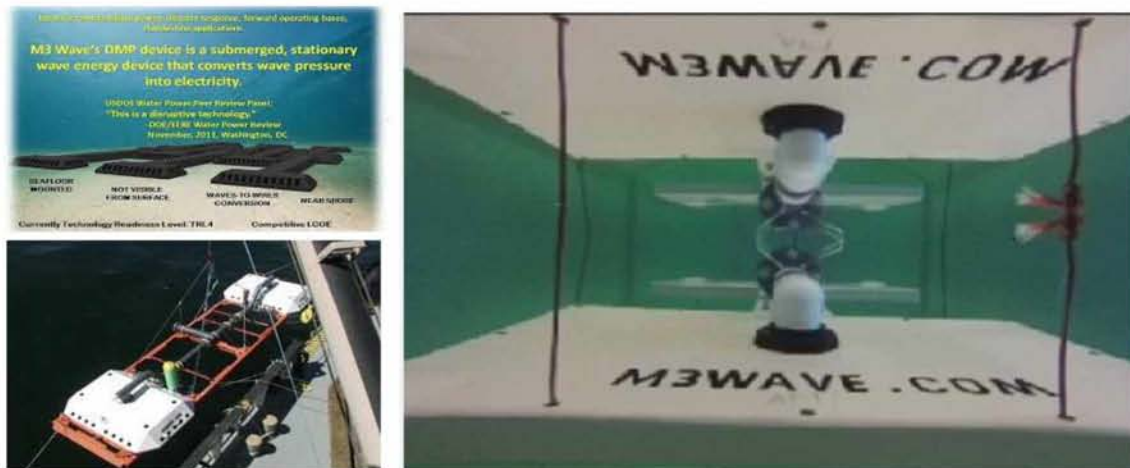
Βυθισμένες συσκευές διαφοράς πίεσης (Submerged pressure differential). Είναι υποβρύχιοι μετατροπείς που στηρίζονται στο βυθό και η λειτουργία τους βασίζεται στην διαφοροποίηση της υποκείμενης πίεσης, λόγω της κίνηση του κύματος στην επιφάνεια, η οποία μεταφέρεται κατάλληλα στο μηχανισμό παραγωγής ενέργειας. Πρόκειται για μια συγκριτικά νεότερη τεχνολογία που χρησιμοποιεί εύκαμπτες (συνήθως ενισχυμένες με καουτσούκ) μεμβράνες για την εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούν τη διαφορά πίεσης σε διαφορετικές θέσεις κάτω από ένα κύμα για να παράγουν μια διαφορά πίεσης σε ένα ρευστό μέσα σε ένα κλειστό σύστημα ανάκτησης ισχύος. Η διαφορά πίεσης στο σύστημα χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή ροής, η οποία κινεί ένα στρόβιλο και μια ηλεκτρική γεννήτρια. Οι βυθισμένοι μετατροπείς διαφοράς πίεσης χρησιμοποιούν συχνά εύκαμπτες μεμβράνες ως διεπιφάνεια μεταξύ του ωκεανού και του συστήματος ανάκτησης ενέργειας, καθώς οι μεμβράνες, σε σχέση με τις άκαμπτες κατασκευές, προσφέρουν το πλεονέκτημα της συμμόρφωσης και της χαμηλής μάζας και έτσι, δημιουργούν πιο άμεση σύζευξη με την ενέργεια των κυμάτων. Η ευκαμψία τους επιτρέπει επίσης μεγάλες αλλαγές στη γεωμετρία της διεπιφάνειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συντονίσει την απόκριση του μετατροπέα για συγκεκριμένες συνθήκες κυμάτων και να τον προστατέψει από υπερβολικά φορτία σε ακραίες συνθήκες.

Ένας βυθισμένος μετατροπέας μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο πυθμένα της θάλασσας είτε σε κάποιο ενδιάμεσο βάθος. Και στις δύο περιπτώσεις, ο μετατροπέας προστατεύεται από τα φορτία πρόσκρουσης των κυμάτων που μπορεί να προκύψουν στην ελεύθερη επιφάνεια. Δεδομένου ότι, τα φορτία των κυμάτων μειώνονται μη γραμμικά ανάλογα με την απόσταση κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, βελτιστοποιώντας το βάθος της βύθισης για έναν τέτοιο μετατροπέα, μπορεί να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ προστασίας από ακραία φορτία και ποσότητας κυματικής ενέργειας.

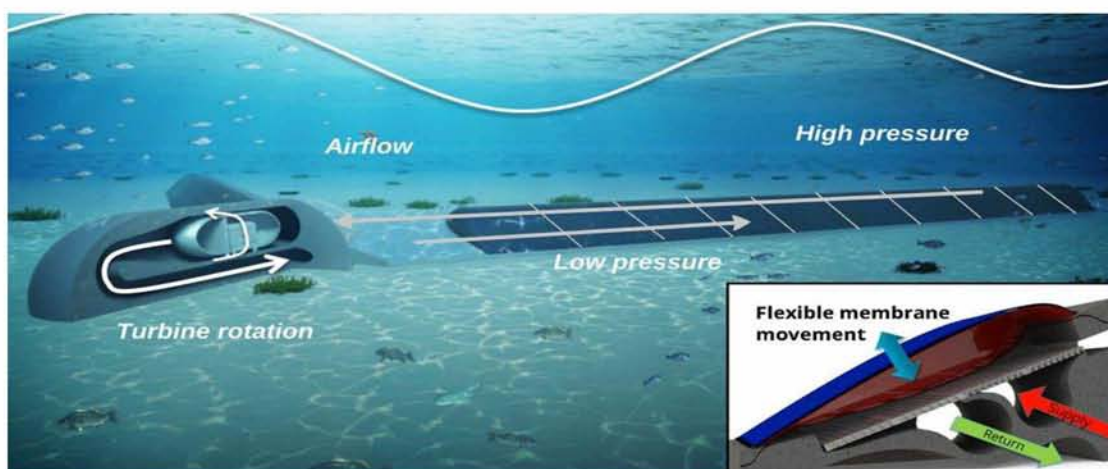


Εικόνα 35: Archimedes Waveswing. (Πηγή: <http://www.awsocean.com/technology.html>)

Οι βυθισμένες WEC έχουν επίσης τη δυνατότητα να μειώσουν τον αντίκτυπο στην θαλάσσια αναψυχή και τη ναυσιπλοΐα, καθώς δεν βρίσκονται στην επιφάνεια. Τα παραδείγματα βυθισμένων διαφορικών μετατροπέων πίεσης περιλαμβάνουν το M3 Wave και το Bombora Wave Power της mWave.

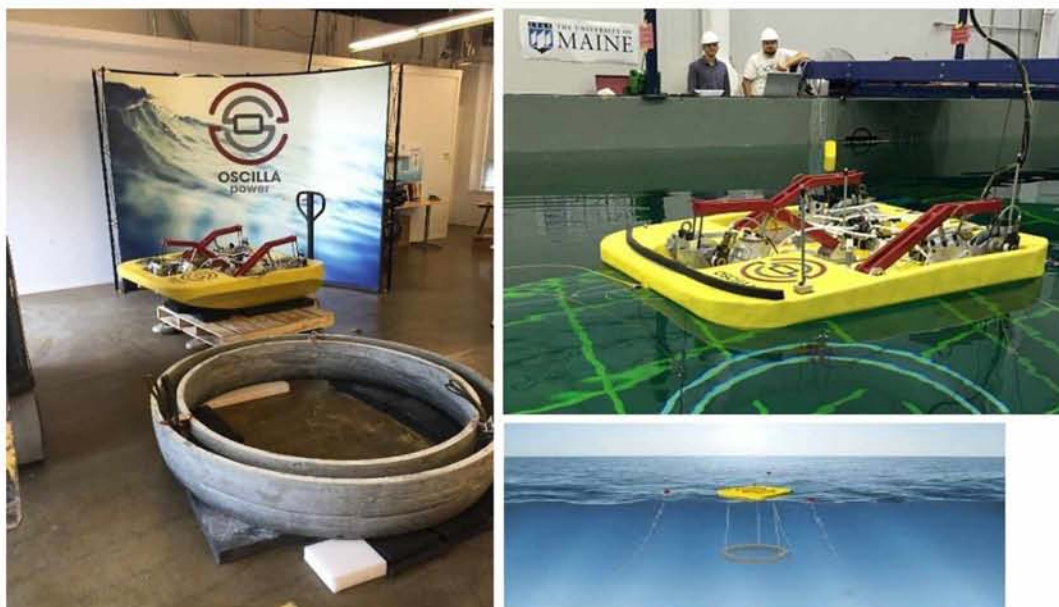


Εικόνα 36: Βυθισμένος μετατροπέας M3 Wave. (Πηγή: <https://www.m3wave.com/>)



Εικόνα 37: Βυθισμένος μετατροπέας Bombora Wave Power. (Πηγή: <http://www.bomborawave.com/mwave>)

Η συσκευή Triton είναι μια «μηχανική μέδουσα» που μπορεί να μας επιτρέψει να συλλέξουμε σημαντικά ποσά ενέργειας από τον ωκεανό, καθώς παράγει ισχύ με πρωτοφανή ρυθμό, εκμεταλλεύομενη την ενέργεια από τα κύματα. Πρόκειται για νέα συσκευή που εφευρέθηκε από την Oscilla Power, η οποία αξιοποιεί την κινητική ενέργεια των κυμάτων του ωκεανού. Η συσκευή δεν έχει κινητήρες ή κινούμενα στοιχεία, κάτι που είναι σημαντικό στην περίπτωση ενός πραγματικά τραχύ κυματισμού. Υπάρχει μόνο μια σειρά γεννητριών και μια πλάκα κατακόρυφης κίνησης που λειτουργούν μαζί, και όλα μαζί επιπλέουν και μένουν σταθερά μέσω των υποβρύχιων καλωδίων. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής είναι πολύ απλή, καθώς τα κύματα αλληλεπιδρούν με τη συσκευή, μια εναλλασσόμενη μαγνητική πολικότητα δημιουργείται στο μέταλλο, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η Oscilla Power περιγράφει ότι η ενέργεια συλλαμβάνεται με τη χρήση ευλύγιστων ιμάντων, οι οποίοι με τη δυνατότητα μιας ασύμμετρης πλάκας κατακόρυφης κίνησης που συλλαμβάνει μοναδικά την ενέργεια από τις κινήσεις (heave, pitch, sway & roll) της συσκευής.



Εικόνα 38: Συσκευή Triton. (Πηγή: <https://oscillapower.com/triton-wec/>)

Η συσκευή Triton έχει να περάσει μια σειρά δοκιμών μικρής κλίμακας για να βεβαιωθεί ότι είναι έτοιμη για τον τεράστιο ωκεανό. Εάν επιτύχει, θα μπορεί να προμηθεύσει τις ΗΠΑ με το ένα τρίτο της ανάγκης της σε ισχύ και επιπλέον, εκτιμάται ότι θα καλυφθεί το 15% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (<https://futurism.com>). Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας Triton μπορεί να παράγει ισχύ έως 600kW, ενώ το μέσο νοικοκυριό χρησιμοποιεί περίπου 1,26kW μηνιαίως. Δηλαδή δύναται να παρέχει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε 500 σπίτια σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια (<https://futurism.com>).

Κάθε τύπος προσέγγισης για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας εμφανίζεται με διάφορες εφαρμογές και σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν ενδεικτικά κάποιες από τις εφαρμογές των WEC σύμφωνα με τις προσεγγίσεις που περιγράφηκαν ανωτέρω .

Ταλαντούμενη στήλη νερού - OWC

Ο Yoshio Masuda, δημιουργός της αρχής λειτουργίας των OWC, ανέπτυξε τη θεωρία του στη δεκαετία του 1940, και στη συνέχεια οι εφαρμογές OWC αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν σε όλο τον κόσμο (Sang Y. et al, 2018).

- Το 1984, εγκαταστάθηκε και δοκιμάστηκε ένας μετατροπέας OWC των 40 kW, στο Sanze της Ιαπωνίας.
- Λίγο αργότερα, το 1985, στη Νορβηγία κατασκευάστηκαν δύο WEC στην ανοικτή θάλασσα σε απόσταση 40 χλμ. από την ακτή του Μπέργκεν. Η μία από τις δύο ήταν μια συσκευή OWC των 500kW, που μέχρι το τέλος του 1988 είχε παραδώσει 29 MWh στο τοπικό δίκτυο.
- Το 1995, σχεδιάστηκε η εγκατάσταση μιας μεγάλης μονάδας OWC με ισχύ 2MW, κοντά στο Douneay της Σκωτίας. Το έργο ονομάστηκε OSPREY, ωστόσο δεν τέθηκε ποτέ σε λειτουργία, καθώς η συσκευή υπέστη βλάβη από τα μεγάλα κύματα ενός τυφώνα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της.
- Το 1999 πρωτοξεκίνησε η λειτουργία της συσκευής Pico OWC στην πειραματική δομή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας «Pico Wave Power Plant», στο νησί Pico των Αζόρων (Πορτογαλία). Το έργο έχει εγκατεστημένη ισχύ 400 kW, και είναι η πρώτη μονάδα που χρησιμοποιεί την τεχνολογία OWC που συνδέεται με την turbine Wells. Ωστόσο, λόγω του υψηλού λειτουργικού κόστους και της έλλειψης χρηματοδότησης, το πιλοτικό αυτό εγκαταλείφθηκε στα τέλη Ιουνίου του 2016.
- Την άνοιξη του 2001, στα ανοικτά των ακτών της Σκωτίας, εγκαταστάθηκε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συσκευές OWC των 500 kW, με την ονομασία LIMPET. Ο σταθμός συνδέθηκε με το δίκτυο, και παράγει επιτυχώς ηλεκτρική ενέργεια για τους πελάτες του Ηνωμένου Βασιλείου. Ωστόσο, η παραγόμενη ισχύς ήταν χαμηλότερη από την αναμενόμενη.
- Το 2006, εγκαταστάθηκε σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με συσκευές OWC, στο Mutriku της Ισπανίας, ο οποίος περιλάμβανε 16 μονάδες, ικανότητας 18,5 kW η καθεμία. Κατά τα πρώτα 5 χρόνια λειτουργίας, παράγαγε περισσότερη από 1.3GWh ισχύ και ήταν σε θέση να καλύψει την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από εκατό νοικοκυριά.

Επιπλέον, από το 2008 έως το 2011, υλοποιήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το πρόγραμμα "Στοιχεία για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον ωκεανό - Components for Ocean Renewable Energy Systems " (CORES), το οποίο αποσκοπούσε στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τις WEC. Στο πρόγραμμα αυτό, αναπτύχθηκε μια συσκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας OWC, στο χώρο δοκιμών στον κόλπο Galway στην Ιρλανδία, και συλλέχθηκαν πολύτιμα δεδομένα σε θαλάσσιες δοκιμές για περαιτέρω μελέτη.

Συσκευές υπερπήδησης κύματος - OTD

Η μια από τις δύο συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας που κατασκευάστηκαν στη Νορβηγία το 1985, ήταν μια συσκευή overtopping με ισχύ 350 kW, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μια τεχνολογία που ονομάζεται κωνικό κανάλι (TapChan). Αυτή η συσκευή είχε ένα κεκλιμένο κανάλι, στο οποίο αναρριχόταν το νερό της θάλασσας και στη συνέχεια συλλεγόταν σε μια δεξαμενή πάνω από τη

στάθμη της θάλασσας. Όταν το νερό απελευθερωνόταν στον ωκεανό, γύριζε τον στρόβιλο. Μέχρι τα τέλη του 1991, είχε παράγει 691 MWh ηλεκτρικής ενέργειας για το τοπικό δίκτυο (Sang Y. et al, 2018).

- Μια συσκευή τεχνολογίας Wave Dragon τοποθετήθηκε στη θαλάσσια περιοχή Nissum Bredning, της Δανίας, με ικανότητα από 4 έως 7 MW, ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες. Το έργο ξεκίνησε το 2003 και βοήθησε τους ερευνητές να συγκεντρώσουν τις απαραίτητες γνώσεις που απαιτούνται για την κατασκευή ενός πλήρους εμπορικού χώρου.
- Το 2013, ξεκίνησε η κατασκευή του έργου Milla Fjord Site, μιας εμπορικής εγκατάστασης για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιεί την τεχνολογία Wave Dragon, νοτιοδυτικά της Ουαλίας, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η εγκατάσταση έχει ικανότητα για 112 MW, αποτελούμενη από 4 μονάδες των 28 MW.

Ενεργοποιούμενα με κύματα σώματα, WAB – Ταλαντούμενα σώματα

Οι συσκευές οριζόντιας παλινδρόμησης (surging devices) χρησιμοποιούν μεθόδους που εκμεταλλεύονται την οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων του κύματος. Ένα παράδειγμα τέτοιων συσκευών είναι η συσκευή Oyster, η οποία αναπτύχθηκε από την Aquamarine Power Ltd. Περιλαμβάνει έναν ταλαντωτή αρθρωτό στον πυθμένα, ο οποίος παλινδρομεί υπό την επίδραση των κυμάτων. Ο ταλαντωτής αντλεί θαλασσινό νερό μέσω μιας σήραγγας σε μια συσκευή PTO στην ακτή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια πιλοτική συσκευή Oyster των 800 kW εγκαταστάθηκε και συνδέθηκε με το δίκτυο στο Orkney της Σκωτίας τον Ιούνιο του 2002.

- Οι συσκευές λικνίσματος (pitching devices) αποτελούνται από έναν αριθμό επιπλέοντων σωμάτων αρθρωμένων μεταξύ τους κατά μήκος του άξονά τους. Η σχετική κίνηση μεταξύ των διασυνδεδεμένων σωμάτων χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Η WEC που αναπτύχθηκε από την Pelamis Wave Power το 2004 αποτελεί ένα παράδειγμα συσκευής pitching. Αποτελείται από μια σειρά σηματοδύρων κυλινδρικού σχήματος που λικνίζονται με το κύμα. Το μοντέλο παρέδωσε με επιτυχία τροφοδοσία στο δίκτυο κατά τη δοκιμή της λειτουργίας του. Το 2008 η Pelamis δοκίμασε τρεις συσκευές πρώτης γενιάς (P1 Pelamis), στην εγκατάσταση εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας Aguçadoura στην Πορτογαλία. Ο σταθμός παραγωγής είχε εγκατεστημένη ικανότητα 2.25MW και ήταν το πρώτο έργο πολλαπλών συσκευών μετατροπής στον κόσμο. Η εγκατάσταση παρήγαγε για πρώτη φορά ηλεκτρική ενέργεια τον Ιούλιο του 2008, αλλά τέθηκε εκτός λειτουργίας τον Νοέμβριο του ίδιου έτους, καθώς η χρηματοδότης εταιρία αντιμετώπισε οικονομικές δυσκολίες

https://en.wikipedia.org/wiki/Pelamis_Wave_Energy_Converter .

- Οι συσκευές κατακόρυφης παλινδρόμησης (heaving devices), επιπλέουσες ή βυθισμένες, αξιοποιούν την κατακόρυφη κίνηση, η οποία μετατρέπεται από μηχανικά και / ή υδραυλικά συστήματα σε γραμμική ή περιστροφική κίνηση για την λειτουργία ηλεκτρικών γεννητριών. Η συσκευή Power Buoy, που αναπτύχθηκε από την Ocean Power Technologies, είναι ένα παράδειγμα αυτού του είδους, η οποία περιλαμβάνει μια πλάκα κατακόρυφης κίνησης, μια ράβδο και έναν πλωτήρα. Η πλάκα κατακόρυφης κίνησης κρατάει τη ράβδο ακίνητη και η γραμμική κίνηση του πλωτήρα σε σχέση με την ράβδο μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση μέσω μηχανικών

δομών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από το 2016, πολλά μοντέλα της συσκευής τοποθετήθηκαν στις όχθες του Όρεγκον και του Νιου Τζέρσεϋ, στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Κατά την αξιολόγηση της ενέργειας των κυμάτων ως τύπου τεχνολογίας, είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ των τεσσάρων πιο κοινών προσεγγίσεων (www.wikipedia.org) :

- Σημειακοί απορροφητές ενέργειας - Point Absorber Buoys
- Επιφανειακοί εξασθενητές - Surface Attenuators
- Ταλαντούμενη στήλη ύδατος - Oscillating Water Column
- Συσκευές υπερπήδησης νερού - Overtopping Devices

Τα WEC είναι συσκευές που μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτική και αποτελεσματική εκμετάλλευση των κυμάτων και στη μετατροπή της ενέργειας τους σε ηλεκτρική ενέργεια που συνδέεται με το δίκτυο. Οι WEC πρέπει να βελτιστοποιηθούν όσον αφορά τις επιδόσεις και να είναι σε θέση να διαχειρίζονται και να ελέγχονται καλύτερα. (<http://www.coastalwiki.org>)

1.2.2.3 Χρονοδιάγραμμα για την επίτευξη της τεχνολογικής προόδου και τη δημιουργία μιας νέας βιομηχανίας ενέργειας

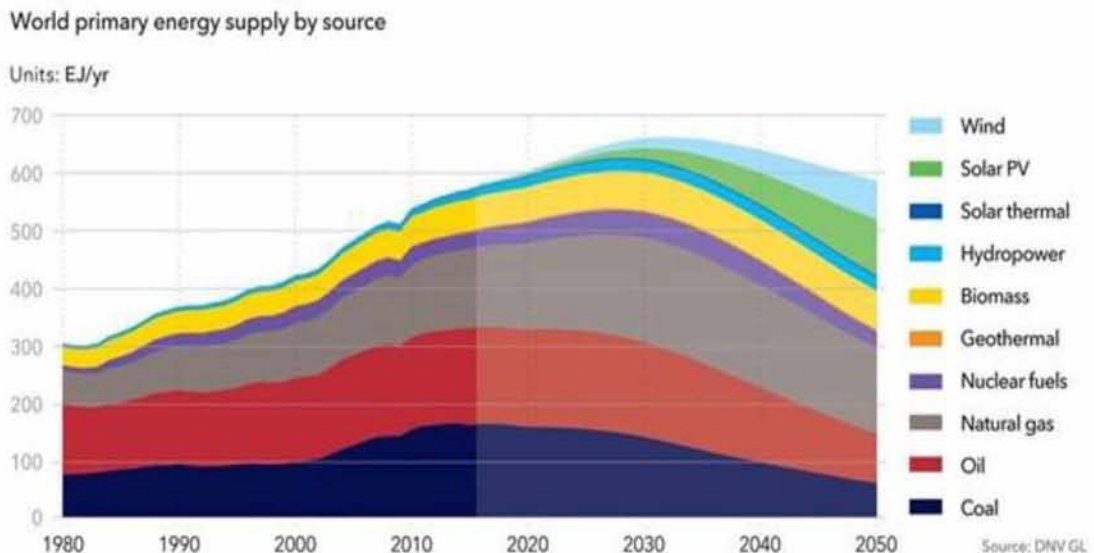
Ένας από τους μεγαλύτερους Νηογνώμονες στο κόσμο, ο DNV GL προβλέπει μια αδιαμφισβήτητη μετάβαση στον χώρο της ενέργειας για τις επόμενες δεκαετίες, ενώ ταυτόχρονα κρούει τον κώδωνα του κινδύνου για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται, είναι αναγκαίο να χρηματοδοτηθεί η δυνατότητα της ενεργειακής μετάβασης και να ληφθούν έκτακτα μέτρα ώστε να επιτύχουμε ένα βιώσιμο μέλλον (<https://www.naftemporiki.gr>).

Σύμφωνα με το DNV GL Energy Transition Outlook, που έχει εξελιχθεί σε κορυφαία, αμερόληπτη φωνή για το μέλλον της ενέργειας, τα κυριότερα σημεία αναφορικά με τις εξελίξεις στο τομέα της ενέργειας είναι :

- Η ευρύτερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και η έμφυτη αποδοτικότητά της, θα συνεισφέρουν στη μείωση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας από τα μέσα του 2030 και έπειτα.
- Τα παγκόσμια έξοδα σε ενέργεια, ως ποσοστό του ΑΕΠ, θα πέσουν κατά 44% μέχρι το 2050.
- Η παραγωγή ενέργειας απελευθερώνεται ταχέως από τον άνθρακα και οι δαπάνες για τα ορυκτά καύσιμα θα μειωθούν περίπου στο ένα τρίτο.
- Αυτό θα εξισορροπηθεί με τον τριπλασιασμό των δαπανών, τόσο για τις ανανεώσιμες πηγές όσο και για το ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η φύση των επενδύσεων επίσης θα τροποποιηθεί, μιας και τα αιολικά και φωτοβολταϊκά έργα απαιτούν μεγαλύτερο αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο και λιγότερες λειτουργικές δαπάνες, σε αντίθεση με τα gas & oil projects.
- Η ραγδαία μετάβαση που προβλέπεται, δεν θα επαρκέσει για να προλάβει τον κλιματικό στόχο των 2 °C για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Προκειμένου να επιτευχθούν οι

φιλοδοξίες της Συμφωνίας των Παρισίων, θα χρειαστεί ένας δυνατός συνδυασμός διαφορετικών μέτρων.

- Η ενεργειακή αποδοτικότητα, οι ανανεώσιμες πηγές, και η τεχνολογία δέσμευσης ρύπων άνθρακα και αποθήκευσής του (CCS), θα πρέπει να ενισχυθούν για να καταπολεμηθεί η κλιματική αλλαγή.



Διάγραμμα 4: Χρονοδιάγραμμα τις εξέλιξης των πηγών παροχής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. (Πηγή: <https://www.dnvgl.com/>)

Τα ορυκτά καύσιμα θα παίξουν καθοριστικό, αν και μειωμένο ρόλο, στο ενεργειακό μας μέλλον, με το μερίδιό τους στη συνολική ενέργεια να πέφτει από το 80% που είναι σήμερα, στο 50% περίπου στο μέσο του αιώνα, με το άλλο 50% να παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές. Το κάρβουνο έχει φτάσει στην κορύφωσή του, το πετρέλαιο θα κορυφωθεί το 2023 και το φυσικό αέριο θα γίνει η μεγαλύτερη πηγή παροχής ενέργειας το 2026 και θα αγγίξει το 25% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης το 2050. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (16% της παγκόσμιας παροχής ενέργειας) και η αιολική ενέργεια (12%) θα εξελιχθούν στους πιο σημαντικούς «παίκτες» μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τον τελευταίο χρόνο, προστέθηκαν περισσότερα GW ανανεώσιμης ενέργειας από ο,τι ορυκτών καυσίμων και αυτό αντικατοπτρίζεται στο πού επενδύονται τα περισσότερα χρήματα (<https://www.naftemporiki.gr>).

Η ωκεάνια ενέργεια, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, έχει πολλά να προσφέρει σε αυτή τη δραματική ενεργειακή μετάβαση που εκτυλίσσεται. Ωστόσο, η μετάβαση μιας νέας τεχνολογίας ενέργειας στη βιομηχανική πραγματικότητα και η τροφοδοσία σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο απαιτεί δεκαετίες επενδύσεων, καινοτομίας και εφαρμοσμένης έρευνας. Η ανάπτυξη της ωκεάνιας ενέργειας έχει προχωρήσει σημαντικά και ακολουθεί παρόμοιο χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης με εκείνο των άλλων ενεργειακών βιομηχανιών (Ocean Energy Forum, 2016).

Μέχρι πρόσφατα ο τομέας της ωκεάνιας ενέργειας αποτελούνταν από ένα μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων, καινοτόμων μικρομεσαίων επιχειρήσεων και πανεπιστημιακών κοινοπραξιών. Πλέον, μεγαλύτερες εταιρείες όπως επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και κατασκευαστικές εταιρίες (π.χ. EDF, ESB, Iberdrola, Scottish Power, SSE, Vattenfall, RWE, Alstom, GdF, DCNS, Siemens κλπ.) εμπλέκονται όλο και περισσότερο στην ανάπτυξη συσκευών, με τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να διαδραματίζουν βασικό ρόλο, δεδομένου ότι παρέχουν οικονομική υποστήριξη για την επίδειξη τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας. Ωστόσο, οι επενδύσεις από τον χρηματοπιστωτικό τομέα είναι περιορισμένες (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Πάνω από 100 διαφορετικές τεχνολογίες ωκεάνιας ενέργειας βρίσκονται τα τελευταία χρόνια σε εξέλιξη σε περισσότερες από 30 χώρες, με τους περισσότερους τύπους τεχνολογιών να βρίσκονται επί του παρόντος σε φάση επίδειξης ή στο αρχικό στάδιο της εμπορικής εκμετάλλευσης. Η SETIS εκτιμά ότι τα ολοκληρωμένα εμπορικά συστήματα θα είναι διαθέσιμα έως και το έτος 2025 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Προκειμένου να στηρίξει την ανάπτυξη και την εξέλιξη του τομέα της ωκεάνιας ενέργειας, τον Ιανουάριο του 2014, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή λάνσαρε την Ανακοίνωση για την «Γαλάζια Ενέργεια», η οποία επισήμανε την αναμενόμενη συμβολή της ωκεάνιας ενέργειας στην Ευρώπη, αλλά και καθόριζε το πλαίσιο για την ανάπτυξη και την υιοθέτηση των τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας μέχρι το 2020 και μετά. Η ανακοίνωση περιλάμβανε ένα σχέδιο εφαρμογής δύο φάσεων, το οποίο ξεκίνησε με τη δημιουργία του Φόρουμ Ωκεάνιας Ενέργειας (Ocean Energy Forum), μια πλατφόρμα για τη συγκέντρωση των παραγόντων της ωκεάνιας ενέργειας και των ενδιαφερομένων για τη συζήτηση κοινών θεμάτων και τον εντοπισμό βιώσιμων λύσεων για τον τομέα. Το κύριο αποτέλεσμα που αναμενόταν από το Φόρουμ Ωκεάνιας Ενέργειας ήταν να τροφοδοτήσει την ανάπτυξη ενός Στρατηγικού Χάρτη (Strategic Roadmap) που θα όριζε τους στόχους για τη βιομηχανική ανάπτυξη του τομέα και ένα σαφές χρονικό πλαίσιο για την εφαρμογή του. Ο Στρατηγικός Χάρτης Ωκεάνιας Ενέργειας, που ολοκληρώθηκε από το Φόρουμ τον Νοέμβριο του 2016, δίνει μια σαφέστερη εικόνα των εναπομενουσών προκλήσεων και των απαραίτητων βημάτων. Η δεύτερη φάση (2017-2020) του σχεδίου δράσης προβλέπει ενδεχομένως τη δημιουργία μιας Ευρωπαϊκής Βιομηχανικής Πρωτοβουλίας (EII) για την Ωκεάνια Ενέργεια, όπως έχει ήδη τεθεί σε εφαρμογή για άλλους τομείς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. αιολική ενέργεια) (Magagna, D., Uihlein, A., 2015). Στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού, στις ΗΠΑ, παρόμοια πρωτοβουλία περιλάμβανε την ίδρυση του Γραφείου Διοίκησης Ενέργειας Ωκεάνιας BOEM το έτος 2010, το οποίο ήταν έτοιμο να λειτουργήσει το έτος 2013, σύμφωνα με τα άρθρα του για την ίδρυση του.

Διεθνείς πρωτοβουλίες που υποστηρίζουν τη βιομηχανία έχουν ανακύψει. Το 2011, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας προώθησε την τεχνολογική πρωτοβουλία Ocean Energy Systems (IEA-OES). Στόχος του είναι ο συντονισμός των παραγόντων και η ανάπτυξη της βιομηχανίας. Δέκα από τα 20 μέλη είναι ευρωπαϊκά κράτη. Η Ευρωπαϊκή Οργάνωση για την Ενέργεια των Ωκεανών (EU OEA) είναι μια βιομηχανική ένωση, η οποία αριθμεί πάνω από 70 μέλη και εκπροσωπεί τις εθνικές κυβερνητικές υπηρεσίες, τις μεγάλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τις βιομηχανικές επιχειρήσεις, τις εθνικές εμπορικές ενώσεις και τα πανεπιστήμια. Μετά από τεράστια προσπάθεια, τα τελευταία

χρόνια από την Ευρωπαϊκή Ένωση, τις εθνικές κυβερνήσεις και την αναπτυσσόμενη βιομηχανία ωκεάνιας ενέργειας, μια νέα γενιά επιχειρήσεων επιχειρεί να αναπτυχθεί εμπορικά (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Παρά το αυξημένο ενδιαφέρον, που αποδεικνύεται από τις πολιτικές πρωτοβουλίες, όπως η ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με τίτλο «Γαλάζια Ενέργεια - Δράση που απαιτείται για την αξιοποίηση του δυναμικού της ωκεάνιας ενέργειας στις ευρωπαϊκές θάλασσες και ωκεανούς μέχρι το 2020 και μετά», η ανάπτυξη της ενέργειας των ωκεανών προχωρεί με χαμηλότερο ρυθμό από ό, τι αναμενόταν και η αγορά του τομέα δεν έχει ακόμη καθοριστεί. Η αργή ανάπτυξη του τομέα και οι καθυστερήσεις στη διαμόρφωση της αγοράς ανάγκασαν τους βασικούς παράγοντες και τον OEM είτε να μειώσουν, ή ακόμα και να εγκαταλείψουν το ενδιαφέρον τους για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της ωκεάνιας ενέργειας (Magagna, D., Uihlein, A., 2015).

Η αγορά της ωκεάνιας ενέργειας είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο και ο τομέας πρέπει να ξεπεράσει έναν αριθμό προκλήσεων ώστε να αποδείξει την αξιοπιστία και την οικονομική προσιτότητα των τεχνολογιών του. Οι τεχνολογίες της ωκεάνιας ενέργειας αντιμετωπίζουν τέσσερα βασικά εμπόδια (Magagna, D., Uihlein, A., 2015):

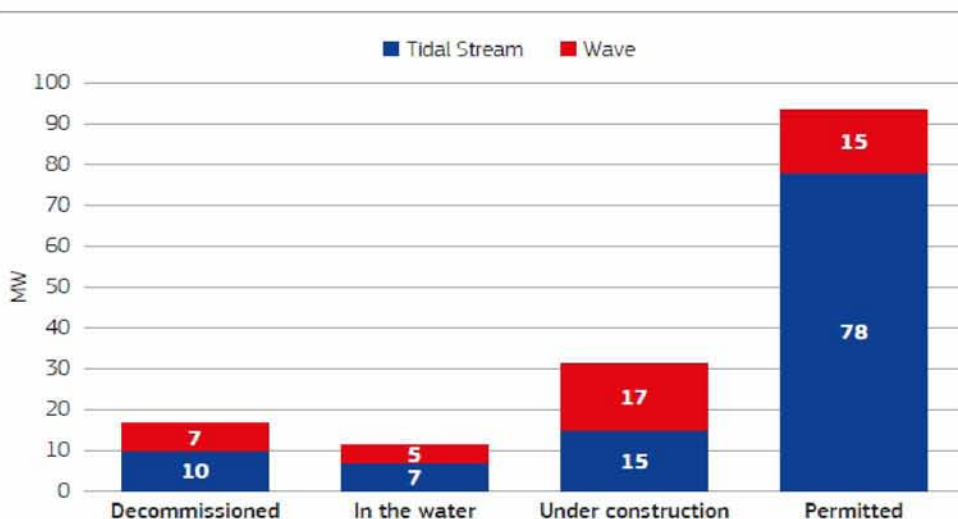
- τεχνολογική ανάπτυξη
- χρηματοδότηση και εμπορικοποίηση
- διοικητικά και περιβαλλοντικά ζητήματα
- παραγωγή ενέργειας και διαθεσιμότητα δικτύου

Αυτές οι πτυχές, που σχετίζονται με την απόδοση και τη μείωση του κόστους, πρέπει να αντιμετωπιστούν, μέσω συνεχούς έρευνας, δοκιμών και μοντελοποίησης, ώστε να επέλθει αξιοπιστία και βιωσιμότητα στον τομέα.

Η υπέρβαση των τεχνολογικών προκλήσεων είναι θεμελιώδους σημασίας για τον εντοπισμό λύσεων στους λοιπούς φραγμούς που επιβραδύνουν την ανάπτυξη του τομέα, και ιδιαίτερα τα οικονομικά εμπόδια (Magagna, D., Uihlein, A., 2015). Τα τεχνολογικά εμπόδια, αντιπροσωπεύουν το πιο σημαντικό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπίσει ο τομέας της ωκεάνιας ενέργειας βραχυπρόθεσμα. Ορισμένα τεχνολογικά εμπόδια είναι ίδια σε ολόκληρο τον τομέα της ωκεάνιας ενέργειας, ενώ άλλα αφορούν μεμονωμένα συγκεκριμένες τεχνολογίες ωκεάνιας ενέργειας (Ocean Energy Forum, 2016) .

Τα τελευταία 10 χρόνια, η βιομηχανία ωκεάνιας ενέργειας έχει επενδύσει κατ'επίσημο ένα κεφάλαιο ύψους 1 δισ. Ευρώ για να μεταφέρει τα πρότζεκτ από το σχεδιαστικό συμβούλιο στην πραγματική ανάπτυξη τους στα ύδατα της ΕΕ (Ocean Energy Forum, 2016). Οκτώ χώρες της ΕΕ έχουν συμπεριλάβει την ωκεάνια ενέργεια στα εθνικά σχέδια δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (NREAP) - Ηνωμένο Βασίλειο, Ιρλανδία, Γαλλία, Πορτογαλία, Ισπανία, Φινλανδία, Ιταλία και Ολλανδία. Το Ηνωμένο Βασίλειο είναι επί του παρόντος ο ευρωπαϊκός αλλά και διεθνής ηγέτης όσον αφορά την ανάπτυξη και την εξέλιξη των τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Η πρόοδος που έχουν σημειώσει τα κράτη μέλη για την επίτευξη των στόχων τους ποικίλλει

σημαντικά, καθώς ορισμένα κράτη μέλη προτίθενται να εγκαταστήσουν μια μέτρια μόνον ισχύ έως το 2020 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Πάνω από 2GW των έργων ωκεάνιας ενέργειας βρίσκονται επί προγραμματισμού στην Ευρώπη (Ocean Energy Forum, 2016). Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη κατανομή των επί του παρόντος λειτουργικών εγκαταστάσεων αλλά και των εγκαταστάσεων υπό κατασκευή, όσον αφορά τους τομείς της κυματικής και παλιρροϊκής ενέργειας.



Διάγραμμα 5: Λειτουργικές εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας και ενέργειας παλιρροϊκής ροής στην Ευρώπη τον Ιούνιο του έτους 2016. (Πηγή: Ocean Energy Forum)

Μέχρι τα μέσα του 2016, αναπτύχθηκαν 17MW εγκαταστάσεων ενέργειας παλιρροϊακού ρεύματος και 12MW εγκαταστάσεων κυματικής ενέργειας, με αποτέλεσμα η αθροιστική ανεπτυγμένη ικανότητα να αγγίζει τα 269MW. Εάν εξαιρέσουμε τις συσκευές που έχουν παροπλιστεί (17MW), δεδομένου ότι αναπτύχθηκαν κυρίως για δοκιμές και σκοπούς επικύρωσης, η σωρευτική ικανότητα είναι 252MW. Ωστόσο, οι γνώσεις που αποκομίστηκαν από αυτά τα έργα είναι σημαντικές για τη βελτίωση των μελλοντικών συσκευών και για την προώθηση ολόκληρου του τομέα (Ocean Energy Forum, 2016).

Επιπλέον, εγκαταστάσεις ικανότητας 32MW αυτών των μορφών ενέργειας είναι υπό κατασκευή (Σχήμα 11). Αναμένεται ότι, οι περισσότερες από αυτές τις νέες συσκευές και έργα θα ολοκληρωθούν τα επόμενα δύο χρόνια, με αποτέλεσμα η συνολική ανάπτυξη των εγκαταστάσεων να υπερβαίνει τα 270MW. Με επιπλέον 93MW παλιρροϊκής και κυματικής ικανότητας που έχουν πάρει άδεια, και την ολοκλήρωση της μονάδας παλιρροϊκού εύρους (320MW) στο Swansea Bay (UK) μέχρι το 2021, η ικανότητα παραγωγής θα αυξηθεί σημαντικά. Τέλος, γίνονται δοκιμές και προγραμματίζονται πάνω από 20MW ικανότητας για εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης ωκεάνιας θερμικής ενέργειας και ενέργειας βαθμίδας αλατότητας για τα επόμενα χρόνια (Ocean Energy Forum, 2016).

Η παγκόσμια θέση της Ευρώπης στην ενέργεια των ωκεανών είναι ισχυρή και σύμφωνα με το OES, για το έτος 2011, το μερίδιό της (συμπεριλαμβανομένων των σταθμών που βρίσκονται υπό εγκατάσταση) ήταν σχεδόν 50% παγκοσμίως. Το μερίδιο της Ευρώπης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ωκεανό αναμένεται να παραμείνει πολύ ισχυρό τα επόμενα 20 χρόνια, με μερίδιο

άνω του 55-65% παγκοσμίως (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Για την διατήρηση της ισχυρής θέσης που κατέχει η ΕΕ στον τομέα, θα πρέπει να ακολουθηθεί πιστά ο παρακάτω αναπτυξιακός σχεδιασμός, σύμφωνα με τον Στρατηγικό Χάρτη Ωκεάνιας Ενέργειας.

- **Κυματική ενέργεια: Καινοτομία για την ανάπτυξη μεγάλων ενεργειακών εγκαταστάσεων μέχρι το 2030**

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας (WEC) σημείωσαν σημαντική πρόοδο κατά την τελευταία δεκαετία, από δοκιμές υπό κλίμακα σε πιλοτικές συσκευές πλήρους κλίμακας. Οι επιδείξεις πεδίου έδειξαν τη σημασία της περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης, με επίκεντρο τα υποσυστήματα και τα επί μέρους στοιχεία, με έναν αυξανόμενο αριθμό καινοτόμων ιδεών.

Μέχρι το έτος 2020 θα πρέπει να αναπτυχθούν τουλάχιστον 10MW πιλοτικών WEC πλήρους κλίμακας. Η γνώση από αυτή τη φάση θα επιτρέψει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων κυματικής ενέργειας, μέσω βελτιώσεων στα υποσυστήματα και στα επί μέρους στοιχεία. Στη συνέχεια, οι πλέον ελπιδοφόρες και ισχυρές ιδέες θα πρέπει να επιδειχθούν με εγκαταστάσεις για επιπλέον άλλα 100MW συνολικά έως τα μέσα της δεκαετίας του 2020 .

- **Ενέργεια παλιρροϊκού ρεύματος: Ανταγωνιστική από το 2030, ενισχύοντας την παγκόσμια ηγεσία της ΕΕ**

Η τεχνολογία της ενέργειας παλιρροϊκών ροών βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης, όπου απαιτούνται έργα επίδειξης πλήρους κλίμακας υποστηριζόμενα από τις σωστές πολιτικές και οικονομικές συνθήκες. Αναμένεται ότι η φάση των εγκαταστάσεων επίδειξης θα είναι σε εξέλιξη έως το 2020, οπότε περίπου 100MW εγκατεστημένης δυναμικότητας θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στην Ευρώπη. Ως εκ τούτου, ο κλάδος της ενέργειας παλιρροϊκής ροής θα πρέπει να προσπαθήσει να αναπτύξει δέκα εγκαταστάσεις των 20-30MW, με συσκευές σε διάφορες θέσεις σε ολόκληρη την Ευρώπη, έως τα μέσα της δεκαετίας του 2020.

- **Ενέργεια παλιρροϊκού εύρους: Έτοιμο προς ανάπτυξη στην Ευρώπη**

Η κύρια πρόκληση της ενέργειας παλιρροϊκού εύρους δεν είναι οι τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, αλλά περισσότερο πώς συνδυάζονται οι επιμέρους πτυχές για την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου, αλλά και η συνολική οικονομία των εκ των προτέρων δαπανών κεφαλαίου με τη μακροπρόθεσμη αποπληρωμή που φθάνει έως και τα πενήντα έτη.

Με τη συσσωρευμένη τεχνογνωσία από τα προηγούμενα έργα και το επιτυχημένο έργο Swansea Bay Tidal Lagoon (320MW), που αναμένεται να λειτουργήσει το 2021, θα τεθεί το πρότυπο για τη μελλοντική ανάπτυξη σε έργα παλιρροϊκού εύρους και έτσι αυτή η τεχνολογία θα είναι έτοιμη για το βιομηχανικό λανσάρισμα. Ένα επιπλέον έργο πλήρους κλίμακας δυναμικότητας από 1GW έως 2GW θα βάλει την ενέργεια παλιρροϊκού εύρους στην πορεία προς σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους. Υπάρχουν επίσης συναινετικές προκλήσεις που απαιτούν καινοτόμες προσεγγίσεις για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης των έργων.

➤ Ωκεάνια θερμική ενέργεια (OTEC): Εξαγωγή ευρωπαϊκής τεχνολογίας

Ο τομέας OTEC θα πρέπει να συνδέσει έως και 20MW πιλοτικών συσκευών υπό κλίμακα έως τις αρχές της δεκαετίας του 2020, ώστε να επιτευχθεί η επίδειξη εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής πλήρους κλίμακας με ικανότητα 100MW. Στη συνέχεια, η τεχνολογία OTEC θα μπορούσε να αναπτυχθεί βιομηχανικά εκμεταλλευόμενη την εξαγωγή τεχνογνωσίας.

Η κατασκευή ενός έργου OTEC (NEMO) ικανότητας 14 MW στη Μαρτινίκα της Γαλλίας αποδεικνύει τη δυνατότητα της ΕΕ να αναπτύξει τεχνολογία και τεχνογνωσία για εξαγωγές σε όλο τον κόσμο. Επιπλέον, οι δυνατότητες για υψηλούς μέσους συντελεστές διαθεσιμότητας θα μπορούσαν γρήγορα να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους της ενέργειας.

➤ Βαθμίδα αλατότητας: Πρώτη μεγάλη μονάδα έως το 2030, αποδεικνύοντας την κορυφαία τεχνολογία της ΕΕ

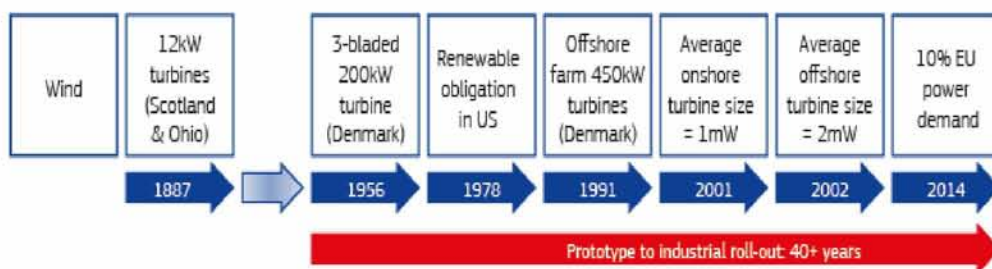
Η βαθμίδα αλατότητας βρίσκεται στη φάση της έρευνας και ανάπτυξης, αναμένοντας να αναπτυχθούν πιλοτικές συσκευές ικανότητας MW περίπου στο 2020. Ενώ η έρευνα συνεχίζεται, η τεχνολογία θα μπορούσε να αναπτυχθεί ταχύτατα και να γίνει ολοένα και πιο εμπορική.

Η ανάπτυξη ενός σταθμού επίδειξης ικανότητας 50MW έως τα μέσα της δεκαετίας του 2020 είναι ένα απαραίτητο βήμα για τη μελλοντική ανάπτυξη μιας πρώτης μονάδας πλήρους κλίμακας ικανότητας 200MW. Εάν είναι επιτυχής, μονάδες εκμετάλλευσης της βαθμίδας αλατότητας θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν παγκοσμίως, σε συνδυασμό με άλλα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μέχρι το 2030.

Αυτή η διαδικασία θα απαιτήσει χρόνο και επενδύσεις για την προώθηση της τεχνολογίας, καθώς και μια προσέγγιση πολιτικής και νομοθεσίας ώστε να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια στην ανάπτυξη, για να εξελιχθεί και να επεκταθεί η νέα δυναμική.

Οι συνθήκες δοκιμής για τις τεχνολογίες θαλάσσιας ενέργειας είναι πολύ πιο δύσκολες από πολλές πλευρές σε σχέση με την αιολική ενέργεια. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα και να αξιοποιηθούν βιώσιμα διαφορετικοί πόροι, η βιομηχανία της ωκεάνιας ενέργειας αναπτύσσει μια σειρά από πρότζεκτ, όπως: συσκευές μικρών κυμάτων για πιο ήρεμες θάλασσες σαν τη Μεσόγειο, μικρότερους παλιρροϊκούς στροβίλους για ρεύματα χαμηλής ταχύτητας ή για περιοχές κοντά στην ακτή, και συσκευές που μπορούν να εφαρμοστούν σε λιμενικούς τοίχους, φράγματα, γέφυρες και άλλες υπάρχουσες υποδομές. Πρέπει να αναπτυχθεί μια σειρά συσκευών ωκεάνιας ενέργειας για να ληφθεί υπόψη το φάσμα των διαφόρων θαλάσσιων συνθηκών (Ocean Energy Forum, 2016) .

Το χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη (Σχήμα 12) των πέντε τεχνολογιών ωκεάνιας ενέργειας σε όλες αυτές τις φάσεις παρέχει καθοδήγηση σχετικά με το πού βρίσκονται σήμερα οι τεχνολογίες και πότε θα φτάσουν στην επόμενη φάση ανάπτυξης. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι το χρονοδιάγραμμα αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υπέρβαση των εμποδίων που αντιμετωπίζουν οι φορείς ανάπτυξης της ενέργειας των ωκεανών, το επίπεδο δημόσιας στήριξης που προσφέρεται βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα από την ΕΕ, τα κράτη μέλη και τις περιφερειακές αρχές (Ocean Energy Forum, 2016) .



Σχήμα 11: Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας από τα πρώτα πειράματα μέχρι την πλήρη βιομηχανική ανάπτυξη (Πηγή: Ocean Energy Europe)



Σχήμα 12: Εκτίμηση χρονοδιαγράμματος της ανάπτυξης σε φάσεις για τις τεχνολογίες ωκεάνιας ενέργειας. (Πηγή: Ocean Energy Forum)

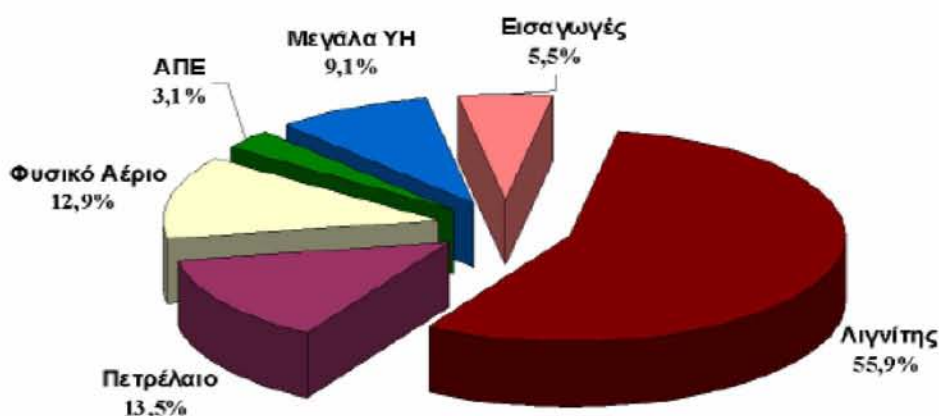
Έρευνες έχουν δείξει ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στον θαλάσσιο χώρο μπορεί να είναι χαμηλότερο από οποιαδήποτε άλλη πηγή, αλλά λόγω των δύσκολων συνθηκών στους ωκεανούς, η συντήρηση και η λειτουργία των εγκαταστάσεων ωκεάνιας ενέργειας παραμένει δαπανηρή (<https://renewablegreenenergypower.com>). Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι, στην Ευρώπη, η τιμή κατασκευής εγκαταστάσεων υπεράκτιων αιολικών πάρκων μειώθηκε κατά 46% τα τελευταία 5 χρόνια και 22% μόνο κατά το τελευταίο έτος.

(<https://www.utilities-me.com/11545-news-analysis-windmills-of-fortune>)

Μια τεχνολογική και εμπορική πρόκληση παραμένει ώστε να ολοκληρωθούν τα τελευταία βήματα για την κατασκευή αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών συσκευών σε ένα δύσκολο θαλάσσιο περιβάλλον και την αποπληρωμή της κεφαλαιακής επένδυσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017). Η πρόκληση συνίσταται στο να επιτευχθεί η εμπορική εκμετάλλευση της ενέργειας από τον ωκεανό μέσω μειώσεων στις δαπάνες της τεχνολογίας, καθώς η ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο αναμένεται να διπλασιαστεί κοντινό μέλλον (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

1.3 Ενεργειακό καθεστώς στην Ελλάδα – Δυνατότητα εκμετάλλευσης θαλάσσιου ενεργειακού δυναμικού

Στην Ελλάδα η παραγωγή ηλεκτρισμού πραγματοποιείται κυρίως από καύση ορυκτών καυσίμων και σε ένα μικρό ποσοστό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (διάγραμμα 6). Η μοναδική πηγή ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιείται στον ελλαδικό χώρο για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι ο ελληνικός λιγνίτης, οποίος αποτελεί φτωχής ποιότητας καύσιμο. Ορυχεία λιγνίτη βρίσκονται στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, Αμύνταιου, Φλώρινας, Μεγαλόπολης, Ελασσόνας, Αλιβέρι Εύβοιας και Δράμας. Τα βιομηχανικά αξιοποιήσιμα κοιτάσματα λιγνίτη υπολογίζονται σε 3,2 δισεκατομμύρια τόνους ή 450 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Τα συνολικά γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα ανέρχονται σε πέντε δισεκατομμύρια τόνους και υπολογίζεται ότι επαρκούν για περισσότερο από 40 χρόνια (www.dei.gr).



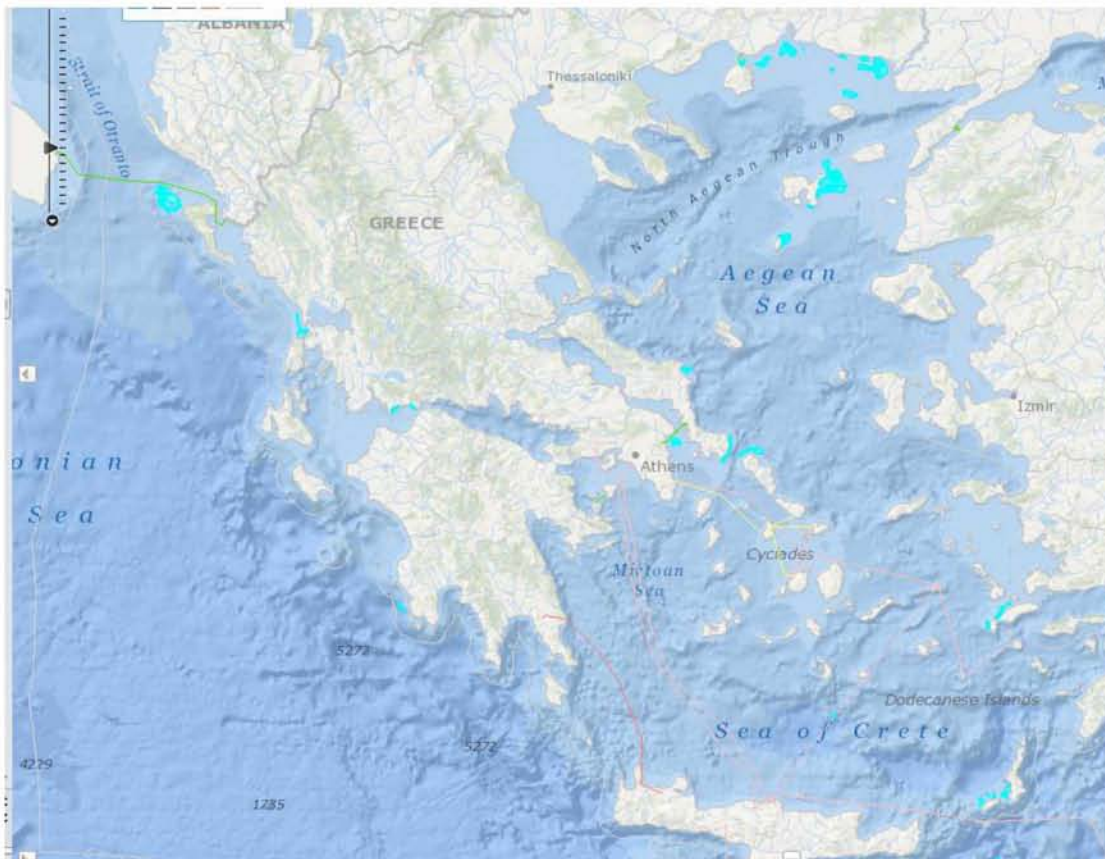
Διάγραμμα 6: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα ανά τύπο μονάδων (2005). (Πηγή: www.allaboutenergy.gr)

Το 2008, οι ευρωπαϊκοί ηγέτες συμφώνησαν ότι μέχρι το 2020 θα πρέπει να έχουν μειώσει την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, το 20% της ενέργειας των κρατών τους να παράγεται από Α.Π.Ε. και να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων τουλάχιστον κατά 20% σε σχέση με το 1990 (www.ypeka.gr). Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και 18% διείσδυση των Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη εθνική κατανάλωση (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007). Η ελληνική κυβέρνηση τον Ιούνιο του 2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των Α.Π.Ε. στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20% , ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των Α.Π.Ε. στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης – ψύξης και 10% στις μεταφορές (www.ypeka.gr).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι διαθέσιμες στη χώρα σε αφθονία μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Την ενέργεια από τους θαλάσσιους κυματισμούς και την

αιολική ενέργεια. Ενώ με το τελευταίο σχετίζονται οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάζονται πάνω σε πλωτές ή σταθερές εξέδρες, με το πρώτο σχετίζονται διάφορα είδη μετασχηματισμών κυματικής ενέργειας (Κατσαρδή Β.,2017). Σύμφωνα με τον πρόεδρο της ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή, το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο νησιωτικό χώρο του Αιγαίου (χερσαίο και υπεράκτιο), ξεπερνά τα 10.000 MW (<http://www.insider.gr>) .

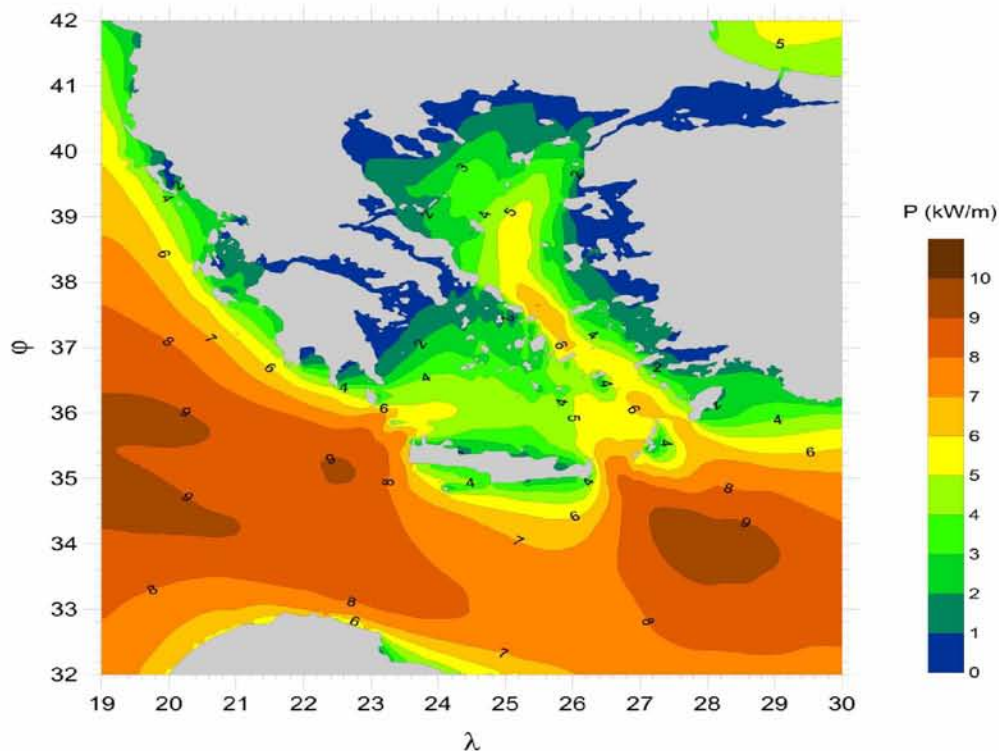
Στην Ελλάδα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στη ξηρά προχωράει την τελευταία δεκαετία, με τον αριθμό των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών να πληθαίνει σταδιακά, αυξάνοντας έτσι το σύνολο της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, το οποίο στα τέλη του 2016 ήταν 2.374,27 MW, αυξημένο κατά 11,2% σε σχέση με το προηγούμενο έτος (<http://www.insider.gr>). Αντίθετα, στον κλάδο της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, όπου η Ευρωπαϊκή Ένωση κατέχει ηγετική θέση, στα ανοιχτά των ελληνικών θαλασσών δεν έχει υλοποιηθεί κάποιο έργο εκμετάλλευσης αυτής της Α.Π.Ε.. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θέσεις όπου έχουν υλοποιηθεί μελέτες για την κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων στη χώρα μας. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στην μελέτη για την θαλάσσια περιοχή βορειοανατολικά της Λήμνου, η μονάδα θα ήταν συνολικής ισχύος 500MW, περιλαμβάνοντας 100 ανεμογεννήτριες ισχύος 5MW η κάθε μία, δηλαδή όσο ένα θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο, ικανό να τροφοδοτήσει μία πόλη σαν τη Θεσσαλονίκη, ενώ η λειτουργία του θα συνέβαλε στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 1.730.976 τόνους ετησίως. Ωστόσο, η μεγάλη επένδυση συνολικού προϋπολογισμού 2 δισ. ευρώ ναυάγησε (<http://worldenergynews.gr>).



Εικόνα 39: Θέσεις θαλάσσιων αιολικών πάρκων υπό μελέτη στην Ελλάδα. (Πηγή: Κατσαρδή Β., 2017)

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις χώρες με αξιοποιήσιμους πόρους κυματικής ενέργειας και σύμφωνα με πρόσφατα επιστημονικά ευρήματα, η περιοχή του αιγαίου πελάγους παρουσιάζει από τα υψηλότερα επίπεδα κυματικού δυναμικού στη Μεσόγειο, ενέργεια που μέχρι σήμερα παραμένει ανεκμετάλλευτη. Το δυναμικό της ενέργειας των κυμάτων στα ανοικτά των ελληνικών ακτών υπήρξε ένας ενεργός τομέας μελέτης τα τελευταία χρόνια και υπολογίζεται ότι η πυκνότητα κυματικής ενέργειας στα ανοικτά των ελληνικών ακτών είναι περίπου 4-11 kW/m (Clement A. et al., 2002).

Αναλυτικότερα, με βάση τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας της Γκριζαρη Ν. για το ΕΜΠ, για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού από δεδομένα hindcast, το πιο έντονο κυματικό δυναμικό εμφανίζεται κατά τους χειμερινούς μήνες με τη μέση ροή της ενέργειας των κυμάτων να ξεπερνά τα 7 kW/m. Την υπόλοιπη περίοδο του έτους το κυματικό πεδίο είναι πιο ήπιο αν και υψηλές εντάσεις εμφανίζονται σε ορισμένες περιοχές σε σχέση με την εποχή. Τέτοια περίπτωση αποτελεί τους θερινούς μήνες η επίδραση των «ετήσιων» ανέμων (μελέμια) που πνέουν από Β-ΒΔ προς Ν-ΝΑ στο Αιγαίο πέλαγος. Στο βόρειο Αιγαίο η ενέργεια των κυμάτων είναι περίπου 3-5 kW/m, ενώ στο βόρειο-κεντρικό Αιγαίο, μέχρι το σύμπλεγμα των Κυκλάδων η κυματική ενέργεια φτάνει μέχρι τα 6 kW/m, εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ανάμεσα στα νησιά η τιμή του ενεργειακού δυναμικού μειώνεται. Στο νοτιοδυτικό Αιγαίο, η κυματική ενέργεια είναι χαμηλότερη, 4-5 kW/m. Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ενέργειας, 6-8 kW/m παρουσιάζονται στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κύθηρα και Κρήτης-Κάσου. Στο στενό μεταξύ Κρήτης-Καρπάθου και Καρπάθου-Ρόδου η κυματική ενέργεια είναι περίπου 6 kW/m ενώ τέλος στο Ιόνιο πέλαγος η κυματική ενέργεια σε ετήσια βάση κυμαίνεται σε ένα εύρος 4-8 kW/m.



Σχήμα 13: Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις Ελληνικές θάλασσες. (Πηγή: Γκριζαρη Ν., 2012)

Με βάση το παραπάνω σχήμα η περιοχή η οποία θα μπορούσε να είναι ένα υποψήφιο σημείο για εγκατάσταση εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας, είναι τα στενά μεταξύ Κάσου-Καρπάθου με μέση ετήσια κυματική ενέργεια στα 6,4 kW/m (Γκριζαρη Ν., 2012).

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι, από το καλοκαίρι του έτους 2018 λειτουργεί πιλοτικά, στο λιμάνι του Ηρακλείου, μια εγκατάσταση για την αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας, η οποία εκτιμάται ότι το 2023-2024 θα είναι εμπορικά διαθέσιμη και το σύστημα αυτό θα είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ (<https://energypress.gr>). Το έργο βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά του λιμενοβραχίονα, στο άκρο του, κοντά στη πύλη εισόδου-εξόδου του λιμανιού και αποτελείται από δύο συσκευές WEC. Πρόκειται για δύο ίδιους μετατροπείς οι οποίοι μεταφέρουν την ενέργεια των κυμάτων στο πλωτήρα ο οποίος ανυψώνει μια ράβδο που διέρχεται από μια σειρά γεννητριών. Οι συσκευές WEC είναι στερεωμένες με μεταλλικές βάσεις στο λιμενοβραχίονα (κυματοθραύστη), ενώ δίπλα τους υπάρχει και η βάση στερέωσης της πρώτης μονάδας που λειτουργήσε για 2,5 περίπου έτη από το 2015. Οι μετατροπείς αυτοί είναι ευέλικτοι ως προς την τοποθέτησή τους και προσφέρουν ευκολία στην υλοποίηση συστημάτων μεγαλύτερης ισχύος.



Εικόνα 40: Οι δύο μετατροπείς κυματικής ενέργειας στο λιμενοβραχίονα του Ηρακλείου Κρήτης.
(Πηγή: <https://energypress.gr>)

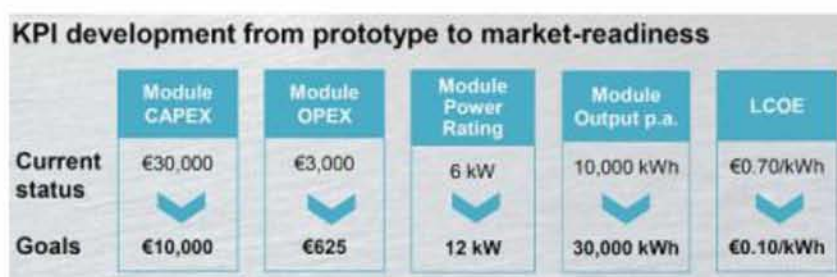
Στη παρούσα φάση του έργου, ελέγχεται η λειτουργικότητα των μετατροπέων, η αντοχή στη διάβρωση και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε διαφορετικές κυματικές συνθήκες, ώστε να συλλεχθούν χρήσιμα δεδομένα για την απόκτηση μεγαλύτερης λειτουργικής εμπειρίας και τεχνογνωσίας αναφορικά με τη συντήρηση και τη λειτουργία τέτοιων μονάδων, συμβάλλοντας στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής. Στόχος της σημερινής εγκατάστασης είναι η δοκιμή της βελτιωμένη έκδοσης των κυματικών μετατροπέων έτσι ώστε να εγκατασταθούν άλλοι τρεις (πέντε στο σύνολο ως το 2020), δίπλα στους δύο υπάρχοντες.

Επιπλέον, πρόκειται να εγκατασταθεί στη θαλάσσια περιοχή σε μικρή απόσταση από τον λιμενοβραχίονα μια συστάδα 18 μετατροπών.



Εικόνα 41: Προοπτική άποψη των πέντε κυματικών μετατροπών στο λιμενοβραχίονα του Ηρακλείου Κρήτης. (Πηγή: <https://www.sinnpower.com>)

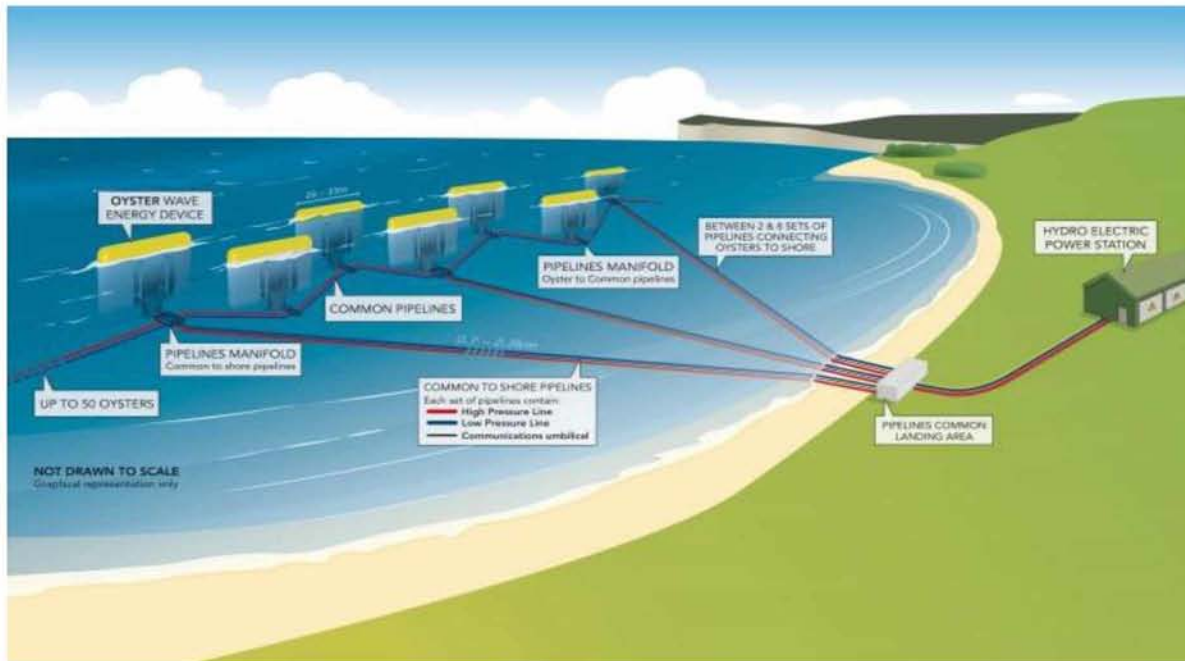
Η εγκατάσταση ανήκει στη γερμανική εταιρεία SINNPOWER, και υφίσταται συνεργασία με τον Οργανισμό Λιμένος Ηρακλείου, το Πολυτεχνείο Μονάχου, το Πανεπιστήμιο Αμβούργου, το Πολυτεχνείο Κρήτης, το ΤΕΙ Κρήτης και το Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Έρευνας (ΙΤΕ) της Κρήτης. Η εταιρεία προσδοκά ότι αυτό το σύστημα WEC, που εγκαθίσταται σε παράκτιες περιοχές, θα αποτελέσει μια μαζική λύση με υψηλή ενεργειακή απόδοση και χαμηλό κόστος ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με τη χρήση ηλεκτροπαραγωγών ζευγών (<https://energypress.gr>). Ανάλογα με την ισχύ του κύματος, την τοποθεσία και τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πελάτη, ο αριθμός και το μέγεθος των μονάδων διαστασιοποιείται κατάλληλα, ώστε να είναι δυνατή πάντα η βέλτιστη παροχή ενέργειας με το χαμηλότερο κόστος. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εκτιμώμενη πρόοδος του παρόντος συστήματος σύμφωνα με τη κατασκευάστρια εταιρεία.



Διάγραμμα 7: Σημερινή κατάσταση και στόχος της εταιρείας αναφορικά με το κόστος έργου, συντήρησης-λειτουργίας, ισχύος μονάδας, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συνολικού κόστους παραγωγής. (Πηγή: <https://www.sinnpower.com>)

Στο τέλος του παρόντος πιλοτικού προγράμματος το 2020 που φιλοξενείται αποκλειστικά στο Ηράκλειο Κρήτης, σκοπός της εταιρείας είναι να παρέχει τη παρούσα ενεργειακή λύση και σε άλλα σημεία της νησιωτικής Ελλάδας (<https://energypress.gr>).

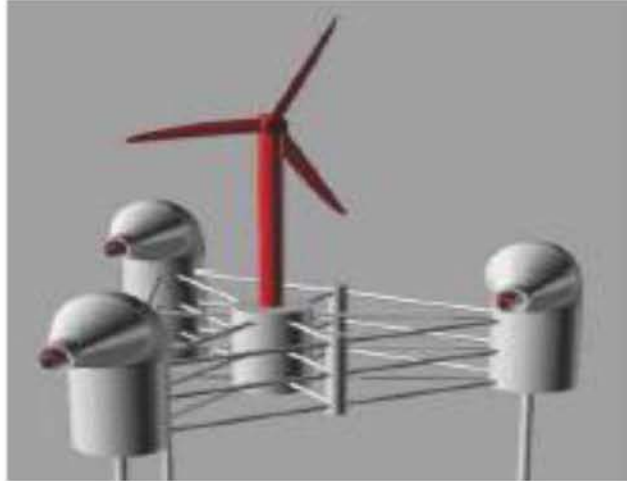
Μία άλλη ιδέα, που θα μπορούσε να εφαρμοστεί στη χώρα μας, είναι η χρήση ενός αρθρωτού στον πυθμένα ταλαντωτή, ο οποίος ταλαντώνεται μέσω των κυματισμών που προελαύνουν. Παράδειγμα τέτοιου ταλαντωτή, αποτελεί η συσκευή οριζόντιας παλινδρόμησης Oyster, που είναι σχεδιασμένη για τοποθέτηση σε κοντινή απόσταση από την ακτή, σε ρηχά νερά.



Εικόνα 42: Lewis Wave Power - Εγκατάσταση συστοιχίας συσκευών οριζόντιας παλινδρόμησης Oyster. (Πηγή:https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Lewis_Wave_Array_ES.pdf)

Ωστόσο, η γεωμετρία της διάταξης παίζει καθοριστικό ρόλο και δεν έχει ακόμη βελτιστοποιηθεί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, η απόδοση της ενέργειας του προσπίπτοντα κυματισμού μπορεί να διαφοροποιείται αισθητά ανάλογα με την αρχική κλίση του ταλαντωτή ως προς τον προσπίπτοντα κυματισμό.

Επιπλέον, όσον αφορά τις τεχνολογίες κυματικής ενέργειας, στην Ελλάδα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η πολλά υποσχόμενη λύση της ταλαντούμενης στήλης νερού (Oscillating Water Columns - OWC). Στην περίπτωση των πλωτών κατασκευών, μπορεί να παραχθεί 500kW/συσκευή, ενώ ιδιαίτερα ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να συνδυαστεί και η παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο μέσω αυτών των κατασκευών όπως φαίνεται για παράδειγμα στην Εικ. 43 (Κατσαρδής Β., 2017).



Εικόνα 43: Παράδειγμα υβριδικής συσκευής - Πλωτή πλατφόρμα για την αξιοποίηση αιολικής και κυματικής ενέργειας, αποτελούμενη από τρεις συσκευές OWC. (Πηγή: D.N. Konispoliatis, T.P. Mazarakos, S.A. Mavrakos, 2016)

Στη περίπτωση των σταθερών κατασκευών OWC, είναι ενδιαφέρον και χρήσιμο, ότι οι συσκευές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν πάνω σε ήδη υπάρχοντες κυματοθραύστες ή/και με την αντίστοιχη επέκτασή τους στις πολλές λιμενικές εγκαταστάσεις που έχει η χώρα, οι οποίες ξεπερνούν τις 1300 (Εικ.44.) Σε πρόσφατη αποτύπωση της αποτελεσματικότητας του παραδείγματος των σταθερών κατασκευών OWC στην Ιταλία, παράχθηκε ενέργεια έως 20kW/m κατασκευής σε συνήθεις και όχι ακραίες καιρικές συνθήκες και αντίστοιχες συνθήκες κυματισμών. (Κατσαρδή Β.,2017).



Εικόνα 44: Σταθερή συσκευή OWC – Islay Limpet. (Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Islay_LIMPET)

Τα οφέλη που προκύπτουν από την ενσωμάτωση της συσκευής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστες ή λιμενικές εγκαταστάσεις έχουν ως εξής:

- Προσφέρει οφέλη από την κατανομή του κόστους, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης.
- Παρέχει ταυτόχρονα τη δυνατότητα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας και την προστασία των ακτών.
- Περιορίζει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τη χρήση της υπάρχουσας δομής των κυματοθραυστών ως πλατφόρμα για την ενσωμάτωση της συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.
- Παρέχει πρόσθετη δύναμη στη συσκευή, ώστε να λειτουργεί και να αντέχει σε οποιαδήποτε θυελλώδη κατάσταση.
- Βελτιώνει την αξιοπιστία της συσκευής WEC, επιτρέποντας την παραγωγή ενέργειας και κατά τη διάρκεια ισχυρών κυμάτων, σε αντίθεση με τις αυτόνομες υπεράκτιες συσκευές που πρέπει να αποσύρονται για λόγους ασφαλείας.
- Βελτιώνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Αυτό μπορεί να βελτιωθεί με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των εξαρτημάτων με κινούμενα μέρη ή για παράδειγμα ο στρόβιλος που μπορεί να τοποθετηθεί στο πίσω μέρος της σταθερής δομής του κυματοθραύστη, μακριά από την περιοχή δράσης των κυμάτων (Mustapa M.A. et al., 2017).

Ωστόσο παρά την ικανότητα να προσφέρει μεγάλα οφέλη, πρέπει να εξεταστούν ορισμένες προκλήσεις. Η κύρια πρόκληση είναι να βρεθεί η κατάλληλη θέση κυματοθραύστη διότι η θέση λειτουργίας της συσκευής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα της παραγόμενης ενέργειας (Mustapa M.A. et al., 2017). Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά, η συσκευή WEC πρέπει να τοποθετηθεί στην κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος, με χαμηλά φαινόμενα ανακλάσεως.

Όσον αφορά το θέμα της προστασίας των ακτών, ο σχεδιασμός των παράκτιων “αμυντικών” WEC θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί ιδανικά ώστε να αντανakλά ή/και να απορροφά ένα σημαντικό μέρος της κυματικής ενέργειας των προσπιπτόντων κυμάτων υπό όλες τις κυματικές συνθήκες, και ειδικά σε δύσκολες συνθήκες. Δυστυχώς, η γεωμετρία της διάταξης που μεγιστοποιεί την εξασθένηση των κυμάτων δεν έχει ακόμη προσδιοριστεί. Οι υπάρχουσες πολύ-δοκιμασμένες WEC, όπως οι συσκευές Wave Dragon και DEXA, ερευνώνται ως μέτρα προστασίας των ακτών. Οι συσκευές DEXA είναι μικρές και συνεπώς μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικές (Kofoed, 2009). Η τοποθέτηση σε ρηχά νερά μπορεί να μειώσει τη μεταδιδόμενη ενέργεια με διαφορεικό τρόπο, ο οποίος θα μπορούσε να μεταβάλει την παράκτια μορφολογία (Ruol, 2010, Zanuttigh, 2010). Το Wave Dragon επιλέχθηκε για τις μεγάλες δυνατότητες απορρόφησης ενέργειας και ανάκλασης. Σύμφωνα με τις αριθμητικές προσομοιώσεις, το κλίμα των κυμάτων πίσω από μονό μια συσκευή Wave Dragon αλλά και μια συστοιχία έχει σημαντικά μειωμένα ύψη κυμάτων (Beels, 2009). Ωστόσο, το μοντέλο δεν βασίστηκε σε έγκυρες επιδόσεις απορρόφησης και αντανάκλασης. Απαιτούνται λεπτομερέστερες γνώσεις σχετικά με την απόδοση μιας μόνο συσκευής για να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο το οποίο, τελικά, θα συμβάλει στη βελτιστοποίηση της διάταξης της συστοιχίας.

Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνολογίες συσκευών WEC, δεν είναι όλες κατάλληλες για κάθε κυματικό περιβάλλον. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η εφαρμογή των WEC πρέπει πάντα να λαμβάνει υπόψη τις κυματικές συνθήκες των τοποθεσιών εγκατάστασης. Για παράδειγμα στις περιοχές με ηπιότερο κυματισμό, όπως οι μεσογειακές χώρες, προτείνονται υδροδυναμικών κλιμακωτών συσκευών (hydrodynamically scaling) καθώς είναι συμβατές με το τοπικό κυματικό περιβάλλον (Lavidas, G., Venugopal, V., 2017).

Εκτεταμένη έρευνα για την καταλληλότητα συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας με βάση τα κλιματικά-κυματικά δεδομένα των ελληνικών θαλασσών πραγματοποιήθηκε από τους Lavidas G., & Venugopal V., (2017), με τίτλο "A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea". Στη μελέτη αυτή εξετάστηκαν οι κυματικές συνθήκες της Μεσογείου και του Αιγαίου για μια περίοδο 35 ετών (1980-2014) και υπολογίστηκε το ενεργειακό δυναμικό (kW/m). Ακολούθως, το σύνολο δεδομένων που προέκυψε συνδυάστηκε με τους διαθέσιμους δημοσιευμένους πίνακες ισχύος (power matrices), παρέχοντας για πρώτη φορά μια λεπτομερή αξιολόγηση της παραγωγής και των επιδόσεων των WEC για τις ελληνικές θάλασσες. Ωστόσο, σε περίπτωση εγκατάστασης πολλαπλών συσκευών WEC, για λεπτομερέστερη ανάλυση της δυνατότητας παραγωγής, απαιτείται μελέτη της υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης κύματος /συστοιχίας συσκευών.

Συμπερασματικά, με βάση τα παραπάνω στην Ελλάδα μπορούμε να εκμεταλλευτούμε (Κατσαρδής Β., 2017) :

- το μεγάλο μήκος ακτογραμμών και να παράγουμε ενέργεια από τους κυματισμούς μέσω των σταθερών διατάξεων OWC, ή με άλλες διατάξεις συσκευών WEC που δεν είναι συνδεδεμένες με κάποια κατασκευή όπως παρουσιάστηκαν πρωτίτερα. Μάλιστα, με τις σχετικές τροποποιήσεις που μπορούν να προταθούν μπορούν οι νέες διατάξεις να αποτελέσουν μία νέα λύση με καλύτερη απόδοση,
- το πλεονέκτημα των ισχυρών ανέμων σε όλη τη διάρκεια του έτους στο Αιγαίο πέλαγος και να σχεδιαστούν αιολικά πάρκα με την πιο φθηνή και εύκολη στην συντήρησή της λύση, της κατασκευής ανεμογεννητριών πάνω σε βάρθρα τύπου jacket,
- την δυνατότητα ταυτόχρονης εκμετάλλευσης των πηγών ενέργειας ανέμου και κυματισμών με διατάξεις που το επιτρέπουν όπως εκείνες της Εικ. 43

Στην Ελλάδα ισχύει από το 2008 το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού (ΦΕΚ 2464/3-12-2008) «Σχεδιασμός για Α.Π.Ε», στο οποίο περιλαμβάνονται όροι και προϋποθέσεις για την εκμετάλλευση υπεράκτιων σταθμών αιολικής ενέργειας όχι όμως για σταθμούς εκμετάλλευσης θαλάσσιας ενέργειας, για τους οποίους αναμένεται έκδοση σχετικής μελέτης (www.ecocrete.gr). Στις πιθανές περιοχές εγκατάστασης κυματικής συσκευής, σύμφωνα με (Nobre et al, 2007), θα πρέπει να εξετάζονται οι σταθμισμένοι παράγοντες που ακολουθούν:

- Απόσταση από την ακτογραμμή
- Απόσταση από λιμένες
- Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο σε σημεία σύνδεσης

- Τύπος θαλάσσιου βυθού
- Κυματικό κλίμα

Οι ακόλουθες περιοχές αποτελούν μη εκτελεστικές περιοχές λόγω διαφόρων περιορισμών στη χρήση τους:

- Περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων
- Θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές
- Περιοχές 500m γύρω από τα υποβρύχια καλώδια
- Περιοχές κυματικής σκίασης
- Εισόδους λιμένων και πλοήγηση καναλιών
- Περιοχές με βάθος νερού κάτω από τα 30 μέτρα και μεγαλύτερο από τα 200 μέτρα

Οι δραστηριότητες που σχετίζονται άμεσα με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, αφορούν κυρίως πανεπιστημιακού επιπέδου έρευνα, δραστηριότητες του τμήματος ναυπηγών μηχανολόγων μηχανικών του ΕΜΠ και του ΕΛΚΕΘΕ κυρίως για την μοντελοποίηση ή τη μέτρηση του κυματικού κλίματος σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Επιπλέον, υπάρχουν και μεμονωμένες δραστηριότητες διαφόρων ιδιωτών (Γκριζαρη Ν., 2012).

Η εκμετάλλευση του δυναμικού της Γαλάζιας Ενέργειας στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο (κυματική, υπεράκτια αιολική ή υβριδικά συστήματα), μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή ανεξαρτησία νησιωτικών περιοχών, που συχνά είναι αντιμέτωπες με την ενεργειακή φτώχεια, ή να λειτουργήσει σαν κίνητρο για την ενίσχυση της ηλεκτροκίνησης και την αξιοποίηση της αποδοτικότητας της. Με τον θεσμό των Ενεργειακών Κοινοτήτων, που έχει ως στόχο να ενισχύσει την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών, δίνεται η δυνατότητα σε φορείς της τοπικής αυτοδιοίκησης, επιχειρήσεις, και ιδιώτες, ώστε εκτός από απλοί καταναλωτές να γίνουν ταυτοχρόνως καταναλωτές και παραγωγοί ενέργειας δικτύου (netprosumers). Η προοπτική αυτή γίνεται εφικτή χάρη στη δυνατότητα για αποκεντρωμένη παραγωγή ρεύματος που δίνουν οι ΑΠΕ, αλλά και τα ενεργειακά εργαλεία, όπως ο ενεργειακός συμψηφισμός (net metering) και ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός (virtual net metering).

Έτσι, μία Ενεργειακή Κοινότητα θα μπορεί να απολαμβάνει ενεργειακά και οικονομικά οφέλη, μέσω της δραστηριοποίησης της στους τομείς της παραγωγής και συμψηφισμού ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ, όπως αιολικά και φωτοβολταϊκά έργα, ή μονάδες βιοαερίου και βιομάζας, της ενεργειακής τροφοδότησης μονάδων αφαλάτωσης ή άλλων παρεμφερών χρήσεων, της εγκατάστασης συστημάτων τηλεθέρμανσης, των βιώσιμων μεταφορών και της ηλεκτροκίνησης, της εξοικονόμησης ενέργειας, της διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής, καθώς και των δραστηριοτήτων διανομής και προμήθειας ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, συμπεριλαμβανομένου και του φυσικού αερίου (www.naftemporiki.gr), (www.amna.gr).

Σημαντικό στοιχείο είναι όμως η εντοπιότητα της πλειοψηφίας των μελών της Ενεργειακής Κοινότητας, καθώς τουλάχιστον το 51% των μελών πρέπει να σχετίζονται με τον τόπο στον οποίο βρίσκεται η έδρα της, ώστε οι τοπικές κοινωνίες να είναι αυτές που απολαμβάνουν τα οφέλη. Μάλιστα,

για να αποφευχθούν τάσεις συγκεντροποίησης, εκτός από την υποχρεωτική συνεταιριστική μερίδα, έχει οριστεί ανώτατο όριο 20% στο συνεταιριστικό κεφάλαιο που μπορεί να αποκτήσει κάθε μέλος - με μόνη εξαίρεση τους ΟΤΑ, για τους οποίους το «πλαφόν» είναι το 40%. Επομένως, αυτός ο ελπιδοφόρος θεσμός αποτελεί ένα μεγάλο βήμα για την δυνατότητα χάραξης τοπικής ενεργειακής πολιτικής σε Δήμους και Περιφέρειες για την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας. Σε κάθε περίπτωση, στόχος είναι οι Ε.Κοιν. να έχουν κατά κανόνα μη κερδοσκοπικό χαρακτήρα. Επομένως, τα κέρδη δεν θα διανέμονται στα μέλη, αλλά θα αξιοποιούνται για τη χρηματοδότηση νέων έργων που θα εγκρίνει η γενική συνέλευση της κοινότητας. Γνωστοί και ως ενεργειακοί συνεταιρισμοί, οι Ε.Κοιν. αποτελούν έναν αρκετά διαδεδομένο θεσμό σε χώρες όπως το Βέλγιο, η Γερμανία, η Ισπανία και η Δανία. Μάλιστα, οι δέκα από τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου Middelgrunden στην Κοπεγχάγη ανήκουν στην ενεργειακή κοινότητα Middelgrunden, που διαθέτει περισσότερα από 8.000 μέλη.

Η θέσπιση των Ενεργειακών Κοινοτήτων στην χώρα μας είχε ανταπόκριση, με το Δήμο Φούρνων Κορσεών (Ικαρίας) να ιδρύει την πρώτη Ενεργειακή Κοινότητα στη Νησιωτική Ελλάδα. Στόχος της πρωτοβουλίας είναι να αναδειχθεί σε αυτόνομο ενεργειακό νησί, με την εφαρμογή επιτυχημένων τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και «έξυπνης» διαχείρισης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, προς όφελος του δήμου και των κατοίκων (<http://www.amna.gr/>). Στην «Ενεργειακή Κοινότητα Φούρνων Κορσεών» συμμετέχουν ο Δήμος Φούρνων Κορσεών, μεγάλος αριθμός κατοίκων του νησιού, με προοπτική πάνδημης συμμετοχής, καθώς προβλέπεται η δυνατότητα συμμετοχής ως εταίρων όλων των πολιτών και επιχειρήσεων, με κατοικία ή έδρα δραστηριότητας στους Φούρνους Κορσεών και η εταιρεία «EUNICELABORATORIESA.AE», η οποία συμμετέχει στο σχήμα σε μη κερδοσκοπική βάση, με πλαίσιο συμφωνίας τεχνολογικής και αναπτυξιακής υποστήριξης της Ενεργειακής Κοινότητας και αποτελεί θυγατρική του ελληνικού ενεργειακού Ομίλου «EUNICE ENERGY GROUP». Πρόκειται για την εταιρεία ανάπτυξης και λειτουργίας του «TILOS Project», του διεθνώς αναγνωρισμένου έργου αυτονομίας και έξυπνης διαχείρισης ενέργειας από ΑΠΕ, στο νησί της Τήλου.

Χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό προσβλέπουν στην κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από τους σταθμούς κυματικής ενέργειας, ενώ χώρες με μέτριας στάθμης αλλά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό θα μπορούσαν να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά ή να εκμεταλλευτούν αυτό το είδος ενέργειας συμπληρωματικά προς συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ. Από την έρευνα προκύπτει ότι, το κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, οι ιδιαίτερες συνθήκες και η τοπογραφία του Αιγαίου συμβάλλουν στην ανάπτυξη αξιοποιήσιμων κυματισμών (Clement A. et al., 2002). Επιπλέον, με βάση τις εκτιμήσεις ανέμου-κύματος, η διαθέσιμη ενέργεια μπορεί να καλύψει τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό που υπερβαίνει το 85-90% στις περιοχές κοντά στα νησιά του Αιγαίου πελάγους (Οικονομου Ε. et al., 2008). Επομένως, η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στη χώρα (Γκριζαρη Ν., 2012).

1.4 Επιπτώσεις της εκμετάλλευσης ωκεάνιας ενέργειας

Η ωκεάνια ενέργεια αφορά την εκμετάλλευση των κυμάτων για την παραγωγή ενέργειας και μπορεί να προσφέρει ατελείωτα πλεονεκτήματα για τους ανθρώπους. Ένας μεγάλος πληθυσμός ανθρώπων ζει σε παράκτιες περιοχές και μπορεί να επωφεληθεί από αυτή τη πηγή ενέργειας με πολλούς τρόπους, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το πόσιμο νερό. Επιπλέον, η εκμετάλλευση της ενέργειας των ωκεανών μπορεί να είναι ευεργετική για το περιβάλλον, καθώς αυτό θα σήμαινε τεράστια μείωση της ρύπανσης.

Κοινωνικές επιπτώσεις

❖ Δημιουργία θέσεων απασχόλησης

Η εμπορευματοποίηση της ωκεάνιας ενέργειας είναι πιθανό να προσφέρει θέσεις εργασίας υψηλής ποιότητας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Σύμφωνα με την EU-OEA (πλέον Ocean Energy Europe), η βιομηχανία της ωκεάνιας ενέργειας θα μπορούσε να δημιουργήσει περίπου 314.000 άμεσες θέσεις εργασίας, ενώ πιο αισιόδοξες ακαδημαϊκές πηγές υποστηρίζουν ότι 1 εκατομμύριο θέσεις εργασίας θα μπορούσαν να δημιουργηθούν παγκοσμίως. Η κατασκευαστική διαδικασία για την δημιουργία μιας εγκατάστασης εκμετάλλευσης ωκεάνιας ενέργειας θα απαιτήσει πλήθος ανθρώπινου δυναμικού. Η εγκατάσταση θα χρειαστεί επίσης άτομα που θα εργάζονται κατά τη λειτουργία της. Το μεγαλύτερο μέρος της δημιουργίας θέσεων απασχόλησης είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί στις περιοχές όπου θα αναπτυχθεί η ωκεάνια ενέργεια, αν και άλλες ευκαιρίες είναι πιθανόν να υπάρξουν στον τομέα της μεταποίησης και στην αλυσίδα εφοδιασμού (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Έτσι, ανοίγει ένα νέο πεδίο σταδιοδρομίας για πολλούς ανθρώπους καθώς θα υπάρξουν περισσότερες ευκαιρίες απασχόλησης.

❖ Αύξηση εκπαίδευσης

Η εκμετάλλευση της ενέργειας των ωκεανών μπορεί επίσης να αυξήσει το ποσοστό εκπαίδευσης σε μια περιοχή. Θα προσφερθεί στους ανθρώπους περισσότερη γνώση σχετικά με την τεχνολογική πρόοδο που τους παρέχει την ανανεώσιμη ενέργεια. Όσοι εργάζονται στη μονάδα μπορούν επίσης να αποκτήσουν νέες χρήσιμες δεξιότητες. Οι άνθρωποι θα είναι πιο ενημερωμένοι σχετικά με τη σημασία της βιωσιμότητας στη ζωή και την πρόκληση ελάχιστης βλάβης στο περιβάλλον. Αυτό θα μπορούσε να φέρει την ευαισθητοποίηση σε άλλες περιοχές για την εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επίσης (<https://deepoceanfacts.com>).

Επιπλέον, καθώς ο τομέας αναπτύσσεται, η ζήτηση για εργασία υψηλής ειδίκευσης θα αυξηθεί, έτσι αυτή η αύξηση της ζήτησης ειδικευμένων μηχανικών μπορεί να ενισχύσει τον ανταγωνισμό με την υπεράκτια αιολική ενέργεια ειδικότερα και ενδεχομένως ακόμη με τους τομείς του πετρελαίου και του φυσικού αερίου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Θέματα δημόσιας αποδοχής

Η αύξηση της ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας καθώς, η γρήγορη εξάπλωση της μπορεί αναλογικά να αυξήσει την ευκαιρία για διαμάχες με άλλους χρήστες του θαλάσσιου χώρου. Ωστόσο, ο

αντίκτυπος αυτός θα μπορούσε να μετριαστεί μέσω της έγκαιρης συμμετοχής όλων των ενδιαφερομένων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Πηγή όχλησης για τα ιδιωτικά και εμπορικά σκάφη

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που συγκεντρώνουν θαλάσσια ενέργεια μερικές φορές πρέπει να τοποθετούνται κοντά στην ακτογραμμή. Αυτά τα μέρη αποτελούν μεγάλες αρτηρίες για τα φορτηγά πλοία, τα κρουαζιερόπλοια, τα οχήματα αναψυχής και η παρουσία ενεργειακών σταθμών μπορεί να αποτελεί εμπόδιο στις κινήσεις τους (<https://deepoceanfacts.com>).

❖ Διατήρηση του Παραδοσιακού Επαγγέλματος της Αλιείας

Οι αλιείς ή άλλα άτομα που εξαρτώνται από τον ωκεανό για εισόδημα μπορούν να συνεχίσουν να εργάζονται. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ωκεανού δεν θα προκαλέσει διαταραχές στον τομέα της αλιείας, δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις είναι συνήθως κατασκευασμένες μακριά από τις ακτές. Επιπλέον, εκλείπει ο κίνδυνος ατυχημάτων με διαρροή τοξικών ουσιών που μπορεί να βλάψει πολλά θαλάσσια πλάσματα (<https://deepoceanfacts.com>).

Οικονομικές επιπτώσεις

Ως βιομηχανία υψηλής έντασης κεφαλαίου αλλά και σχετικής έντασης εργασίας, η ωκεάνια ενέργεια έχει υψηλό οικονομικό δυναμικό. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ανάπτυξη μιας κορυφαίας βιομηχανίας ωκεάνιας ενέργειας στην ΕΕ μπορεί να εξυπηρετήσει μια διεθνή αγορά η οποία μπορεί να επεκταθεί δραματικά τα επόμενα χρόνια. Το Carbon Trust εκτιμά ότι η συνολική αξία του θα είναι περίπου 575 δισεκατομμύρια ευρώ, σωρευτικά και μη, μεταξύ του 2010 και του 2050.

❖ Μείωση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας

Η ωκεάνια ενέργεια συμβάλει προς το παρόν μόνο οριακά στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ, επομένως η μείωση του επιπέδου κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά αργή. Ωστόσο η αυξημένη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων ενδιαφερομένων μερών θα μπορούσε να ενισχύσει τον αντίκτυπο των δημόσιων και ιδιωτικών επενδύσεων στον τομέα και να οδηγήσει σε μείωση του κόστους. Ως εκ τούτου, η απορρόφηση από την αγορά θα είναι πιθανόν μεγαλύτερη αλλά το εύρος της είναι αβέβαιο (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

Η αναγνώριση της ενέργειας των ωκεανών ως στρατηγικής ενεργειακής τεχνολογίας και η δημιουργία μιας ευρωπαϊκής βιομηχανικής πρωτοβουλίας, είναι πιθανό να διευκολύνει την πρόσβαση των αναπτυξιακών φορέων στη χρηματοδότηση και να ενθαρρύνει την καινοτομία. Τα προτεινόμενα έγγραφα καθοδήγησης θα μπορούσαν να αποφέρουν περαιτέρω εξοικονομήσεις μέσω της αποφυγής του κόστους συναλλαγών. Ωστόσο μια τέτοια στρατηγική είναι πιθανό να συνδέεται με αναλογικά υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και να εμπεριέχει έναν ορισμένο βαθμό διοικητικής επιβάρυνσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Μείωση εισαγωγών ενέργειας

Η εκμετάλλευση της ωκεάνιας ενέργειας μπορεί να μειώσει σημαντικά την ανάγκη εισαγωγής ενέργειας. Η εισαγόμενη ενέργεια είναι δαπανηρή, η τιμή της μπορεί να αυξηθεί και μπορεί επίσης να αποδειχθεί ασταθής. Με την πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας των ωκεανών, οι άνθρωποι θα μπορούν να εξαρτώνται σημαντικά λιγότερο στην εισαγωγή ενέργειας.

Η ΕΕ βρίσκεται σε επισφαλή ενεργειακή θέση καθώς εξακολουθεί να βασίζεται στις εισαγωγές για το 53% των ενεργειακών αναγκών της, που κοστίζουν 400 δισ. Ευρώ ετησίως. Η εξάρτηση από τις λίγες χώρες εξαγωγής γίνεται όλο και πιο προβληματική. Οι ανανεώσιμες πηγές είναι η μόνη βιώσιμη πηγή για να τροφοδοτήσει την Ευρώπη τις επόμενες δεκαετίες. Με βάση τις προβλέψεις, η ενέργεια των ωκεανών έχει τη δυνατότητα να παράγει μέχρι το 10% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη έως το 2050 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού - ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα

Η πλήρης αξιοποίηση μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, όπως η δημιουργία μιας ισχυρής θαλάσσιας ενεργειακής υποδομής μπορεί να συμβάλει σε μεγάλο βαθμό ώστε μια χώρα να μην εξαρτάται υπερβολικά από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας. Χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό προσβλέπουν στην κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από τους σταθμούς κυματικής ενέργειας, ενώ χώρες με μέτριας στάθμης αλλά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό θα μπορούσαν να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά ή να εκμεταλλευτούν αυτό το είδος ενέργειας συμπληρωματικά προς συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ.

Επιπλέον, η αγορά ορυκτών καυσίμων είναι σε μεγάλο βαθμό ασταθής και η τιμή των ορυκτών καυσίμων μπορεί συχνά να είναι απρόβλεπτη, εμφανίζοντας αυξήσεις ή μειώσεις κάθε τόσο. Οι αυξήσεις επιβαρύνουν τις χώρες που δεν παράγουν ορυκτά καύσιμα, ενώ αντίστοιχα, οι μειώσεις μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τις χώρες που βασίζονται σημαντικά στις εξαγωγές ορυκτών καυσίμων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, συχνά οι οικονομίες πολλών χωρών να πλήττονται.

❖ Επενδυτική Ευκαιρία

Η οικονομία μιας περιοχή μπορεί να βελτιωθεί. Η ύπαρξη επενδύσεων για την εγκατάσταση μονάδων παραγωγής ενέργειας, μπορεί να φέρει ανάπτυξη στην περιοχή, να βελτιωθούν οι υποδομές και η τοπική κοινωνία να ευημερήσει (<https://deepoceanfacts.com>). Επιπλέον, ο θεσμός των ενεργειακών συνεταιρισμών, ή των ενεργειακών κοινοτήτων στις ευρωπαϊκές χώρες προσφέρει στις επιχειρήσεις μιας περιοχής τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά το ενεργειακό τους κόστος, ενώ ακόμη και απλοί ιδιώτες θα έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν δραστικά τους λογαριασμούς ρεύματος, αν επενδύσουν στο ενεργειακό σχήμα.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης ωκεάνιας ενέργειας έχουν ένα ευρύ φάσμα τοπικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες μπορεί να είναι είτε θετικές, είτε αρνητικές. Αναλογικά, μια σχετικά μικρή έκταση εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας θα έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλό αρνητικό τοπικό αντίκτυπο ενώ, μια ευρύτερη περιοχή για εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης ωκεάνιας ενέργειας συνεπάγεται αντίστοιχα υψηλότερο αρνητικό αντίκτυπο. Ωστόσο, αυτό θα μπορούσε να αντισταθμιστεί από το γεγονός ότι με την αύξηση της εγκατεστημένης δυναμικότητας, η συσσωρευμένη εμπειρία θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη αποτελεσματικών μέσων και πρακτικών διαχείρισης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014).

❖ Καθαρή πηγή ενέργειας - Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Δεδομένου ότι, η ωκεάνια ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, είναι σίγουρα καθαρότερη πηγή ενέργειας από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και δεν προκαλεί υπερβολική ρύπανση. Μια καθαρότερη πηγή ενέργειας, σημαίνει ένα ασφαλέστερο περιβάλλον για όλη τη βιοποικιλότητα του πλανήτη. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η παραγωγή ηλεκτρισμού από την ενέργεια των ωκεανών, δεν δημιουργεί επιβλαβή υποπροϊόντα όπως τοξικά αέρια, απόβλητα και ρύπανση (<https://www.conserve-energy-future.com/>).

Η ανάπτυξη της ωκεάνιας ενέργειας έχει τη δυνατότητα να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως διοξείδιο του άνθρακα, οξειδίο του αζώτου και μεθάνιο. Υποθέτοντας λοιπόν, ότι με κάθε μονάδα που θα εγκατασταθεί μια ισοδύναμη μονάδα συμβατικής παραγωγής θα εκτοπιστεί, ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής θα ωφεληθεί (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2014). Ο ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας της ωκεάνιας ενέργειας θα μπορούσε να βοηθήσει την ΕΕ να επιτύχει τους στόχους μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% έως το 2020 και κατά 80 έως 95% έως το 2050 (<http://ec.europa.eu>).

Επιπλέον, οι εργαζόμενοι στις ενεργειακές μονάδες θα εκτίθενται λιγότερο σε επιβλαβείς χημικές ουσίες και ρύπους με αποτέλεσμα μακροπρόθεσμα, να μην έχουν να αντιμετωπίσουν πάρα πολλές ασθένειες εξαιτίας της εργασίας τους (<https://deepoceanfacts.com>).

❖ Ανησυχίες σχετικά με τη θαλάσσια άγρια ζωή και το θαλάσσιο περιβάλλον

Η φυσική παρουσία των συσκευών για την εκμετάλλευση της ωκεάνιας ενέργειας μπορεί να μεταβάλει τη συμπεριφορά των θαλάσσιων θηλαστικών, των ψαριών και των θαλάσσιων πτηνών με διάθεση για έλξη ή αποφυγή προς αυτές ([https://en.wikipedia.org/wiki/Wave power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power)). Τα υπεράκτια ενεργειακά έργα είναι πολύ πιο εξελιγμένα από ό, τι τα χερσαία. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν πλατφόρμες, καλώδια, διασυνδέσεις στροβίλων, και πολλά άλλα. Ελλοχεύει ο κίνδυνος να χτυπήσουν τα θαλάσσια θηλαστικά και τα ψάρια στα πτερύγια των τουρμπίνων κάποιων συσκευών. Κατά τη λειτουργία τους οι συσκευές μετατροπής θαλάσσιας ενέργειας διαταράσσουν τον θαλάσσιο πυθμένα και μπορεί να επηρεάσουν την άγρια φύση της θάλασσας με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και υποβρύχιο θόρυβο. Από οικολογική σκοπιά, τα ρηχά νερά είναι εύφοροι τόποι αναπαραγωγής και

ανάπαυσης για την περισσότερη θαλάσσια ζωή. Έτσι, οι δραστηριότητες από την κατασκευή και τη λειτουργία του ενεργειακού σταθμού επηρεάζουν σημαντικά το θαλάσσιο οικολογικό σύστημα. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος, οι τοξικές χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις πλατφόρμες για την εκμετάλλευση της ωκεάνιας ενέργειας να διαχυθούν και να ρυπάνουν το νερό (<https://www.conserve-energy-future.com/>).

Υπάρχουν επίσης ανησυχίες σχετικά με τη δυνητική επίδραση στο θαλάσσιο περιβάλλον τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, αλλά και σε διαδικασίες όπως η μεταφορά ιζημάτων και η ποιότητα των υδάτων. Η βάση δεδομένων Tethys παρέχει πρόσβαση στην επιστημονική βιβλιογραφία και σε γενικές πληροφορίες σχετικά με τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της θαλάσσιας ενέργειας ([https://en.wikipedia.org/wiki/Wave power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power)).

❖ Παροχή ποιοτικού πόσιμου ύδατος

Η ωκεάνια ενέργεια, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί επίσης να παρέχει καθαρό πόσιμο νερό, αποτρέποντας την λειψυδρία ή το μολυσμένο και μη ασφαλές νερό. Η καλή ποιότητα νερού είναι σημαντική για τους ανθρώπους και τις καθημερινές τους δραστηριότητες, ενώ επιπλέον, μπορεί να ενισχύσει επίσης τις οικονομίες τους, και ιδίως τους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων (<https://deepoceanfacts.com>).

❖ Δεν δεσμεύει χερσαίες εκτάσεις – προκαλεί λιγότερη οπτική διαταραχή

Η εξόρυξη ορυκτών καυσίμων απαιτεί υψηλά επίπεδα εκσκαφής που προκαλούν τεράστιες ζημιές στη γη, καθώς μπορούν να αφήσουν μεγάλες τρύπες στο έδαφος και το φυσικό τοπίο. Η ωκεάνια ενέργεια δεν προκαλεί καμία ζημιά στη γη επειδή, γιατί σε αντίθεση με τις περισσότερες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η εκμετάλλευση της ωκεάνιας ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μακριά από τις χερσαίες εκτάσεις, όπως για παράδειγμα στη μέση του ωκεανού. Έτσι, οι παράκτιες περιοχές, οι παραλίες καθώς και, οι υπόλοιπες εκτάσεις μπορούν ακόμα να παραμείνουν διαθέσιμες για τους ανθρώπους.

Ωστόσο, η παρουσία των ενεργειακών εγκαταστάσεων στον ωκεανό μπορεί να είναι δυσάρεστη για τους ανθρώπους που ζουν κοντά στις παράκτιες περιοχές, επειδή αυτά τα μηχανήματα καταστρέφουν την ομορφιά του ωκεανού. Παράγουν επίσης ηχητική ρύπανση, αλλά συχνά αυτός καλύπτεται από το θόρυβο των κυμάτων (<https://www.conserve-energy-future.com/>).

Τέλος υπάρχουν επιπλέον πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα που αφορούν την κυματική ενέργεια που δεν μπορούν να ενσωματωθούν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες αλλά αξίζει να αναφερθούν:

❖ Είναι εξαιρετικά προβλέψιμη - Αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια

Η κυματική ενέργεια είναι μια αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της κυματικής ενέργειας σε σχέση με τις περισσότερες εναλλακτικές πηγές ενέργειας είναι ότι η ενέργεια που παρέχει είναι προβλέψιμη. Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι εξαιρετικά απρόβλεπτες. Οι ταχύτητες των ανέμων μπορούν να πέσουν απροσδόκητα, γεγονός που επηρεάζει την παραγωγή

ηλεκτρισμού, ενώ η ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από την ηλιοφάνεια, πράγμα που σημαίνει ότι η κάλυψη της νέφωσης και οι νυχτερινές ώρες μειώνουν σημαντικά την έκθεση στον ήλιο και οδηγούν σε χαμηλότερη απόδοση. Η ενέργεια των κυμάτων είναι συνεχής και τα κύματα διαθέτουν περισσότερη ενέργεια από τις άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια.

❖ **Κατάλληλη σε συγκεκριμένες τοποθεσίες**

Το μειονέκτημα της κυματικής ενέργειας είναι ότι η πηγή ενέργειας των κυμάτων περιορίζεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες, και συνεπώς δεν αποτελεί βιώσιμη πηγή ενέργειας για όλους. Ωστόσο, πολλές μεγάλες πολυπληθείς πόλεις – λιμάνια που βρίσκονται δίπλα στον ωκεανό μπορούν να αξιοποιήσουν τη δύναμη των κυμάτων και να επωφεληθούν από την κυματική ενέργεια.

❖ **Αποτρέπει τη φθορά των ακτογραμμών**

Τα κύματα συχνά προκαλούν φθορές στην ακτογραμμή, και με τον καιρό αυτό μπορεί να προκαλέσει καταστροφές στις κατασκευές που βρίσκονται κοντά στις ακτές. Με την ενσωμάτωση της συσκευής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστες ή λιμενικές εγκαταστάσεις προκαλείται λιγότερη διάβρωση των ακτών. Επιπλέον, η τοποθέτηση συσκευών WEC κοντά στην ακτή μπορεί λειτουργήσει ευεργετικά στην προστασία των ακτών, μέσω της απορρόφησης μέρους της κυματικής ενέργειας.

❖ **Η μεταβλητότητα στο μέγεθος των κυμάτων μπορεί να επηρεάσει την απόδοση και τον εξοπλισμό των σταθμών παραγωγής**

Η ισχύς των κυμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος. Οι συσκευές απαιτούν συνεχή ροή ισχυρών κυμάτων για τη δημιουργία σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Σε ορισμένες περιοχές η “συμπεριφορά” των κυμάτων είναι απρόβλεπτη άρα και η πρόβλεψη της ακριβούς ισχύος της κυματικής ενέργειας. Μερικές φορές τα κύματα είναι άγρια και μπορούν να προκαλέσουν έντονη φθορά στους στροβίλους των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η ζημιά σε αυτόν τον εξοπλισμό μπορεί να είναι δαπανηρή όσον αφορά την επισκευή. Θα σήμαινε επίσης διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι η απόδοση των σταθμών πέφτει σημαντικά κατά τη διάρκεια του άγριου καιρού (<https://www.conserve-energy-future.com/>).

Από τη μελέτη όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης της αλληλεπίδρασης των κυμάτων με συστοιχίες συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας. Στην συνέχεια ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος της σκέδασης των κυμάτων καθώς και της αλληλεπίδρασης κύματος – κατασκευής/ων, καθώς και διεξοδική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου, που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Ακολουθεί η παρουσίαση των διατάξεων της συστοιχίας σωμάτων που θα διερευνηθεί. Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα – συμπεράσματα της παρούσης μελέτης καθώς και προτάσεις για νέα έρευνα.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Καθώς οι υπεράκτιες κατασκευές συνεχίζουν να επεκτείνονται σε όλο τον κόσμο, η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των κυμάτων σε αυτές γίνεται όλο και πιο εμφανής. Τέτοιου είδους προβλήματα έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για αρκετές δεκαετίες, με αποτέλεσμα να υπάρχει τεράστια βιβλιογραφία για τη σκέδαση (scattering) των κυμάτων καθώς και για το πρόβλημα αλληλεπίδρασης κύματος/κατασκευής.

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν ως αποτέλεσμα της κίνησης των κυμάτων μεταξύ γειτονικών στοιχείων σε μια σειρά δομών ανοικτής θαλάσσης (McIver P., 2002). Πράγματι, διατάξεις με πολλαπλά στοιχεία/σώματα υπάρχουν σε μια σειρά σχεδίων μηχανικής, όπως για παράδειγμα, τα βάρη των θαλάσσιων γεφυρών είναι μια συστοιχία συνήθως κυκλικών σωμάτων. Μια άλλη εφαρμογή είναι τα "πλωτά νησιά" (floating islands), τα οποία είναι σχεδιασμένα ως πλάκες που στηρίζονται πάνω από την επιφάνεια του νερού από πολλά πλωτά σώματα, και χρησιμοποιούνται για παράδειγμα ως αεροδρόμια. Ωστόσο, το πιο συνηθισμένο παράδειγμα είναι τα υποστυλώματα, είτε «tension-leg», είτε σταθερά και στερεωμένα στον πυθμένα, των κατασκευών ανοικτής θαλάσσης (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018).

Όταν συστοιχίες πολλαπλών σωμάτων υπόκεινται στη δράση προσπιπτόντων κυμάτων, προκύπτουν μερικές αξιοσημείωτες επιδράσεις υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης, καθώς προκαλούν, αυτόματα, συνεχείς ανακλάσεις των εισερχόμενων κυμάτων. Αποτέλεσμα αυτού του ενδιαφέροντος φαινομένου, αποτελούν οι αρκετά περίπλοκες μεταβολές της υδροδυναμικής φόρτισης και οι υδροδυναμικοί συντονισμοί, που εκφράζονται ως αιχμές στη φόρτιση και ως ισχυρές ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των κυλίνδρων και επίσης στις βρεχόμενες επιφάνειες των σωμάτων. Όσον αφορά τις πρώτες, οι πολυπλοκότητες στην υδροδυναμική φόρτιση οφείλονται κυρίως στην ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων στο πρόβλημα, δηλαδή στον αριθμό, τη διάταξη, τον προσανατολισμό και το μέγεθος των σωμάτων (σε σχέση με το βάθος του νερού) (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Όσον αφορά τους υδροδυναμικούς συντονισμούς, αυτοί οφείλονται επίσης στις υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις και συναντώνται όταν η γεωμετρία της διάταξης επιτρέπει ανοικτούς χώρους ρευστού/νερού μεταξύ των σωμάτων (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Αυτές οι επιδράσεις αναφέρονται συνήθως ως «trapped» και «near-trapped modes» και ανιχνεύονται σε συγκεκριμένους κυματάρθρους, που τελικά εξαρτώνται από όλες τις παραμέτρους που εμπλέκονται στο πρόβλημα (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Γενικά, «near-trapped mode» είναι μια τοπική συμπεριφορά, όπου η ενέργεια παγιδεύεται σε μια περικομμένη (truncated) περιοδική δομή (Chen J.T., Lee J.W., 2013).

Έτσι, η επίδραση των ωκεάνιων κυμάτων στις υποστηρικτικές στήλες μιας πλατφόρμας/διάταξης, αποτελούμενη από πολλαπλά υποστυλώματα, είναι σαφώς θεμελιώδους σημασίας για τις μελέτες σχεδιασμού και έχουν γραφτεί πολυάριθμα ακαδημαϊκά άρθρα που εξετάζουν την πιθανότητα, τα κύματα που σκεδάζονται από τις υποστηρικτικές στήλες να αλληλεπιδράσουν αθροιστικά,

προκαλώντας μεγάλα κυματικά φορτία λόγω της εμφάνισης των «trapped modes». Επιπλέον, η αυξημένη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η οποία συσχετίζεται πολύ συχνά με «trapped modes», μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη του κατώτερου καταστρώματος τέτοιων κατασκευών λόγω ενός λανθασμένου σχεδιασμού στο διάκενο αέρα (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Από την άλλη πλευρά, το «wave trapping» ή αλλιώς η παγίδευση της ενέργειας των κυμάτων, δεν είναι πάντοτε κάτι που πρέπει να αποφεύγεται. Για παράδειγμα, η ενέργεια που μπορούν να παγιδεύσουν οι διατάξεις με πολλαπλά στοιχεία σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς αλληλεπιδρούν με τα επιφανειακά κύματα, μπορεί να αξιοποιηθεί από συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγικότητα και η αποδοτικότητά τους (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Αυτά τα φαινόμενα έχουν επίσης παρατηρηθεί πειραματικά (Βλέπε για παράδειγμα Swan κ.ά., 1997). Είναι επομένως σημαντικό να κατανοήσουμε πότε εμφανίζονται αυτά τα φαινόμενα και πώς μπορεί να επηρεάζονται από παράγοντες όπως το ιξώδες και η μη γραμμικότητα, που συνήθως παραλείπονται από τους υπολογισμούς προκειμένου να καταστεί το πρόβλημα διαχειρίσιμο (McIver P., 2002).

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης κύματος - κατασκευής είναι ένα τρισδιάστατο, πλήρως μη γραμμικό πρόβλημα, στο οποίο όμως, εάν γίνουν αποδεκτές ορισμένες υποθέσεις και απλουστεύσεις, μπορούν να αναπτυχθούν αναλυτικά μοντέλα χαμηλής τάξης. Εάν η τυπική διάσταση, που σχετίζεται με ένα σώμα (π.χ. διάμετρος κυλίνδρου), είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με το μήκος κύματος και το πλάτος κύματος, τότε οι επιδράσεις διαχωρισμού της ροής λόγω του ιξώδους μπορούν να παραμεληθούν και οι επιδράσεις λόγω περίθλασης κυριαρχούν. Επιπλέον, η θεωρία περίθλασης υποθέτει ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και αστρόβιλη και ότι οι επιπτώσεις της επιφανειακής τάσης μπορούν να παραμεληθούν. Έτσι, βάσει των ανωτέρω, ένα βαθμωτό δυναμικό ταχύτητας μπορεί να περιγράψει τη ροή, ικανοποιώντας την εξίσωση Laplace εντός του πεδίου του ρευστού.

Οι λύσεις για το πρόβλημα της γραμμικής περίθλασης έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία και είναι γενικά αποδεκτές στην υπεράκτια βιομηχανία (Walker D.A.G., Eatock Taylor R., 2005). Ήταν ο Havelock (1940) ο οποίος άρχισε να εργάζεται σε αυτόν τον τομέα αναπτύσσοντας μια αναλυτική λύση για τη περίθλαση κανονικών γραμμικών προσπιπτόντων κυμάτων από έναν μόνο κύλινδρο σε νερό άπειρου βάθους. Οι McCamy & Fuchs (1954) επέκτειναν αυτό το αποτέλεσμα για ύδατα πεπερασμένου βάθους. Η μελέτη τους για τη περίθλαση των επίπεδων περιοδικών κυμάτων γύρω από έναν κυκλικό σταθερό κύλινδρο οδήγησε σε μια νέα προσέγγιση στο πρόβλημα της πρόβλεψης των δυνάμεων των κυμάτων στις κατασκευές (Spring, B.H., Monkmeier, P.L., 1974).

Όσον αφορά, το πρόβλημα αλληλεπίδρασης υδάτινων κυμάτων με πολλαπλούς κυκλικούς κυλίνδρους, η σωστή μεθοδολογία, γνωστή ως «άμεση μέθοδος» (direct method), δόθηκε για πρώτη φορά από τον Závitska (1913) και ανακαλύφθηκε εκ νέου από τους Spring & Monkmeier (1974), οι οποίοι ήθελαν να επεκτείνουν το έργο των McCamy & Fuchs στην εξέταση της αλληλεπίδρασης των κυμάτων με περισσότερους από έναν κάθετους σταθερούς κυλίνδρους. Χρησιμοποίησαν το λεγόμενο «Graf's addition theorem» για τις εξισώσεις Bessel ώστε να εξάγουν τη λύση του προβλήματος για δύο κυκλικούς κυλίνδρους. Εξετάστηκε, τόσο η περίπτωση οι κυκλικοί κύλινδροι να έχουν την ίδια ακτίνα, όσο και οι ακτίνες να είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Οι McIver & Evans (1984) βάσισαν την εργασία

τους στη μελέτη του Simon (1982). Χρησιμοποίησαν μια προσεγγιστική μέθοδο υποθέτοντας μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των κυλίνδρων και ανέφεραν θετική συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Spring & Monkmeyer (1974).

Το πρόβλημα της σκέδασης των υδάτινων κυμάτων από συστοιχίες σταθερών κάθετων κυκλικών κυλίνδρων επιλύθηκε ακριβώς από τους Linton & Evans (1990). Αυτοί βελτίωσαν σημαντικά την παραπάνω “άμεση μέθοδο” (direct matrix method) αναπτύσσοντας μια απλοποιημένη έκφραση για το δυναμικό της ταχύτητας τοπικά στη γύρω περιοχή ενός κυλίνδρου, παρέχοντας μια αποτελεσματική μέθοδο για τον υπολογισμό της δύναμης και τις ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας (Walker D.A.G., Eatock Taylor R., 2005). Η μέθοδος περιλαμβάνει την ανάπτυξη της έκφρασης των διαδιδόμενων κυμάτων σε όρους κυλινδρικών συντεταγμένων με αρχή των αξόνων σε κάθε κύλινδρο, και τη χρήση των λεγόμενων «addition theorems» για τη σύνδεση των διαφόρων αναπτυσμάτων μέσω των οριακών συνθηκών των κυλίνδρων. Η διαδικασία που περιγράφεται από τους Linton & Evans (1990) είναι ίσως η πιο αποτελεσματική (McIver P., 2002). Στο συχνά παραθετόμενο άρθρο των Linton & Evans (1990), παρουσιάζονται δεδομένα για την ασκούμενη δύναμη και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για κανονικούς γραμμικούς κυματισμούς που προσπίπτουν σε μια ομάδα τεσσάρων κυλίνδρων που βρίσκονται στις κορυφές ενός τετραγώνου. Αυτή η μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί από τους Huang & Eatock-Taylor για την επίλυση του δυναμικού περίθλασης πλήρους δεύτερης τάξης.

Μια διαφορετική προσέγγιση για την μελέτη της σκέδασης κυμάτων από συστοιχίες κυλίνδρων αποτελεί η μέθοδος «multiple scattering», τα θεμέλια της οποίας παρείχε ο Twersky (1952). Ο Twersky (1952) ανέπτυξε μια επαναληπτική μέθοδο που περιλαμβάνει διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ των κυλίνδρων. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των σωμάτων σε μια συστοιχία αυξάνεται, ο αριθμός των συνιστωσών των αλληλεπιδρώντων κυμάτων αυξάνεται ταχύτατα και ο υπολογισμός καθίσταται μη διαχειρίσιμος (Walker D.A.G., Eatock Taylor R., 2005). Ο Ohkusu (1974) εφάρμοσε τη μέθοδο του Twersky στο πλαίσιο των υδάτινων κυμάτων. Οι Μαυράκος & Κουμουτσάκος (1987) υιοθέτησαν τη μέθοδο του Twersky για την επίλυση του προβλήματος της αλληλεπίδρασης υδάτινων κυμάτων με πιο περίπλοκες συστοιχίες αξονοσυμμετρικών σωμάτων.

Μια σημαντική εξέλιξη και παράδειγμα αυτής της μεθόδου ήταν η εξαγωγή μιας γενικότερης θεωρίας αλληλεπιδράσεων από τους Kagamoto & Yue (1986), οι οποίοι χρησιμοποίησαν τη φυσική ιδέα του Ohkusu (1974) αλλά αλγεβρικά χρησιμοποίησαν τη διαμόρφωση πίνακα του Simon (1982). Περαιτέρω αποτελέσματα σχετικά με τη σκέδαση και την ακτινοβολία των υδάτινων κυμάτων λόγω μιας σειράς πλωτών κατακόρυφων κυλίνδρων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Kagamoto & Yue (1986) δίνονται από τους Yilmaz (2004) και Yilmaz & Incecik (1998).

Οι Maniar & Newman (1997) εξέτασαν επίσης το πρόβλημα περίθλασης υδάτινων κυματισμών από μια γραμμική συστοιχία σταθερών κυκλικών κυλίνδρων, καθήμενων στον πυθμένα, υπό τις παραδοχές της γραμμικής θεωρίας. Υπολόγισαν τις ασκούμενες δυνάμεις πρώτης τάξης στους κυλίνδρους, οι οποίοι ήταν πανομοιότυποι και ισαπέχαν κατά μήκος της συστοιχίας. Οι Maniar & Newman διαπίστωσαν ότι όταν ο αριθμός των κυλίνδρων είναι μεγάλος, αλλά πεπερασμένος, η υδροδυναμική αλληλεπίδραση πλησιάζει το συντονισμό (near-resonant modes) μεταξύ γειτονικών κυλίνδρων όταν

αυτοί βρίσκονται σε κρίσιμη απόσταση, γεγονός που σχετίζεται με τον κυματάρημο των προσπιπτόντων κυματισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες ασκούμενες δυνάμεις σε κάθε κύλινδρο της συστοιχίας, σε σύγκριση με την ασκούμενη δύναμη σε έναν μεμονωμένο κύλινδρο. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με την ύπαρξη παγιδευμένων κυμάτων (trapped waves) σε ένα κανάλι, των οποίων η ύπαρξη έχει καθιερωθεί από τους Linton & Evans (1992), Evans et al. (1994), Evans & Porter (1997b) (Walker D.A.G., Eatock Taylor R., 2005).

Με κίνητρο τη μελέτη των Maniari & Newman (1997), οι Evans & Porter (1997a) εξέτασαν την πιθανότητα να εντοπίσουν φαινόμενα «near trapping» στην περίπτωση μιας κυκλικής διάταξης αποτελούμενης από N ($N=4,5,6$) όμοιων, σε ίσες αποστάσεις τοποθετημένων και καθήμενων στον πυθμένα κυλίνδρων, μέσω της θεωρίας αλληλεπίδρασης των Linton & Evans (1990). Έδειξαν πόσο μεγάλες αιχμές αναπτύσσονται στις ασκούμενες δυνάμεις σε συστοιχίες τεσσάρων, πέντε και έξι κυλίνδρων, καθώς μειώνεται η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων. Σε αυτή τη μελέτη, από τους Evans & Porter, αποδεικνύεται ότι το φαινόμενο «near trapping» δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό κυλίνδρων (McIver P., 2002). Ακολούθως, οι Evans & Porter (1999), καθώς και οι Meylan & Eatock Taylor (2009) διερεύνησαν πιθανά φαινόμενα «trapping» και «near trapping», επίσης μέσω της μεθόδου των Linton & Evans (1990). Φαινόμενα παγίδευσης κυμάτων σε συστοιχίες κυλίνδρων υπό τυχαίο φάσμα προσπιπτόντων κυμάτων διερευνήθηκαν από τους Walker & Eatock Taylor (2005).

Ένα αυξημένο ενδιαφέρον για τη χρήση πλωτών ή βυθισμένων κυματοθραυστών τα τελευταία χρόνια οδήγησε στην εξέταση ορισμένων εναλλακτικών δομών, των οποίων η διατομή μοιάζει πολύ με έλλειψη. Ο ακριβής προσδιορισμός της ασκούμενης κυματικής φόρτισης σε τέτοιες κατασκευές και τα χαρακτηριστικά σκέδασης των κυμάτων είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση του αποδοτικού σχεδιασμού. Ωστόσο, το πρόβλημα της σκέδασης των υδάτινων κυμάτων από συστοιχίες ελλειπτικών κυλίνδρων δεν έχει ερευνηθεί στη κλίμακα που έχει μελετηθεί το αντίστοιχο πρόβλημα με κυκλικούς κυλίνδρους. Η μελέτη της διασποράς των κυμάτων από τα ελλειπτικά σώματα είναι σημαντική σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η ηλεκτρομαγνητική, η οπτική, η ακουστική και η υδροδυναμική, όμως το υδροδυναμικό πρόβλημα είναι το πιο απαιτητικό καθώς πρέπει να τεθεί στον τρισδιάστατο χώρο. Προφανώς, η λύση της υδροδυναμικής περιθλάσης που προκαλείται από πολλαπλούς αλληλεπιδρώντες ελλειπτικούς κυλίνδρους είναι απαιτητική, όχι μόνο από θεωρητική άποψη, αλλά θα μπορούσε επίσης να έχει πολλές πρακτικές εφαρμογές, π.χ. η αναλυτική προσέγγιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλοίων σε ρηχά ύδατα και η αλληλεπίδραση μεταξύ υπερράκτιων κυματοθραυστών (Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., 2010a).

Όσον αφορά τους ελλειπτικούς κυλίνδρους, η εφαρμογή των ημι-αναλυτικών μεθόδων περιλαμβάνει διάφορες προκλήσεις που κυρίως προέρχονται από τη γεωμετρική πολυπλοκότητα. Στην πραγματικότητα, η μαθηματική διαδικασία έχει πολλές ομοιότητες με τη γνωστή αναλυτική τεχνική που εφαρμόζεται για την υδροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ συστοιχιών κυκλικών κυλίνδρων και κανονικών επίπεδων κυματισμών (Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., 2010a). Παρ' όλα αυτά, τα προσπίπτοντα και τα περιθλώμενα κύματα πρέπει να εκφραστούν σε σχέση με τα ελλειπτικά συστήματα συντεταγμένων και από μαθηματική άποψη, αυτό περιλαμβάνει τις περιοδικές και τις ακτινικές (τροποποιημένες) συναρτήσεις Mathieu. Οι σειρές παραστάσεων των ακτινικών και

των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu χρησιμοποιούνται για τη διατύπωση της λύσης της εξίσωσης Laplace (Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., 2010a). Επιπλέον, απαιτείται η εφαρμογή ενός «addition theorem», παρόμοιο σε έννοια με το «Graf's addition theorem» για τις συναρτήσεις Bessel, αλλά σχετικό με τις περιοδικές και ακτινικές συναρτήσεις Mathieu.

Η έρευνα των προηγούμενων ετών έχει αντιμετωπίσει αναλυτικά το τρισδιάστατο πρόβλημα υδροδυναμικής περίθλασης και ακτινοβολίας, αλλά μόνο για κύματα που αλληλεπιδρούν με μεμονωμένους ελλειπτικούς κυλίνδρους. Σχετικά παραδείγματα είναι οι μελέτες των Williams (1985a, 1985b), Williams & Darwiche (1988, 1990) και Zhang & Williams (1990, 1996). Για παράδειγμα, στο άρθρο των Williams & Darwiche (1988) παρέχεται μια θεωρητική λύση για την περιγραφή της περίθλασης των κανονικών γραμμικών επιφανειακών κυμάτων μικρού πλάτους (γραμμικοποιημένων) τόσο από πλωτούς όσο και από βυθισμένους, ακίνητους ελλειπτικούς κυματοθραύστες σε ύδατα τυχαίου ομοιόμορφου βάθους. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στους κυλίνδρους από τα κύματα, καθώς και για τη μεταβολή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από την περίμετρο του κυματοθραύστη για μια σειρά παραμέτρων του κύματος και των σωμάτων.

Η καθαρή αναλυτική λύση για το πρόβλημα της υδροδυναμικής περίθλασης από συστοιχίες σταθερών ελλειπτικών κυλίνδρων δόθηκε από τους Chatjigeorgiou & Mavrakos (2009, 2010a). Χρησιμοποιήθηκε η γραμμική θεωρία και η επίλυση βασίστηκε στην ημι-αναλυτική διατύπωση του δυναμικού της ταχύτητας σε ελλειπτικές συντεταγμένες και στην εφαρμογή του λεγόμενου «addition theorem» για τις συναρτήσεις Mathieu, με το οποίο μετασχηματίζονται οι εκφράσεις που ορίζονται με συντεταγμένες ενός ελλειπτικού τοπικού συστήματος συντεταγμένων σε ένα αντίστοιχο ελλειπτικό καθολικό - σύστημα συντεταγμένων. Για το σκοπό αυτό οι συγγραφείς επέκτειναν το λεγόμενο «addition theorem» για τις συναρτήσεις Mathieu που παρουσιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του '50 από τον Sæmark (1959) προκειμένου να εκφραστεί με όρους των άρτιων και των περιττών, των περιοδικών και των τροποποιημένων συναρτήσεων Mathieu. Η ημι-αναλυτική διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στη μελέτη τους έχει ως αποτέλεσμα μια σχετικά απλή, συμπαγή μορφή για το συνολικό δυναμικό ταχύτητας. Το τελευταίο μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων κάθε σώματος της συστοιχίας ξεχωριστά. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της υδροδυναμικής φόρτισης που ασκείται σε κάθε σώμα καθώς και τη γραμμική ανύψωση (run-up) του κύματος στις περιμέτρους των σωμάτων (Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., 2010a).

Επιπλέον, ο Chatjigeorgiou (2011) επέκτεινε τη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τους Chatjigeorgiou & Mavrakos (2009, 2010a) για την αντιμετώπιση του προβλήματος σκέδασης από ελλειπτικούς και κυκλικούς κυλίνδρους, που είναι σταθερά τοποθετημένοι στον πυθμένα. Η χρησιμοποιούμενη θεωρία βασίστηκε στα «addition theorems» που δόθηκαν αρχικά από τους Schäfke (1953) και Sæmark (1959), κατάλληλα όμως προσαρμοσμένα για άρτιες και περιττές, περιοδικές και τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu. Στο μεταγενέστερο άρθρο του Chatjigeorgiou (2013), η μεθοδολογία ενισχύθηκε ώστε να εφαρμόζεται σε πλωτούς κυλίνδρους.

Πρόσφατα, οι Chen et al. (2012) χρησιμοποίησαν έναν διαφορετικό τρόπο για να μελετήσουν την υδροδυναμική των συστοιχιών αποτελούμενων από σταθερούς ελλειπτικούς και κυκλικούς κυλίνδρους. Σε αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση που οι συγγραφείς ονομάζουν "null-field boundary integral equations method". Τα αποτελέσματα της μελέτης των Chatjigeorgiou & Mavrakos (2010) χρησιμοποιήθηκαν από τους Chen & Lee (2012) για να επικυρώσουν τους υπολογισμούς τους που αποκτήθηκαν μέσω της προαναφερόμενης προσέγγισης (Chatjigeorgiou I.K., Katsardi V., 2018). Η ίδια αριθμητική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε από τους Chen & Lee (2013) για τον εντοπισμό φαινομένων «near trapping» σε συστοιχίες τεσσάρων κυλίνδρων.

3. Μορφοποίηση της θεωρίας αλληλεπίδρασης

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί η αναλυτική διαδικασία για την επίλυση του υδροδυναμικού προβλήματος της αλληλεπίδρασης γραμμικών κυματισμών με συστοιχία ελλειπτικών κυλίνδρων, και την εξαγωγή εκφράσεων για όλες τις υδροδυναμικές παραμέτρους, δηλαδή το δυναμικό της ταχύτητας, την υδροδυναμική φόρτιση και τη βρεχόμενη επιφάνεια των κυλίνδρων (wave run-up), παράμετροι που έχουν κρίσιμη σημασία για το σχεδιασμό παράκτιων δομών που υπόκεινται στη δράση των κυμάτων. Η αναλυτική προσέγγιση που παρουσιάζεται αποτελεί την υπάρχουσα λύση των Chatjigeorgiou & Mavrakos (2009, 2010a), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση του σχετικού προβλήματος, και έχει υιοθετηθεί από το επιστημονικό άρθρο “Hydrodynamics and near-trapping effects in arrays of multiple elliptical cylinders in waves” των Chatjigeorgiou & Katsardi (2018), στο οποίο δίνεται μια πιο λεπτομερής περιγραφή.

3.1 Το υδροδυναμικό πρόβλημα

Εξετάζεται μία ομάδα ελλειπτικών κυλίνδρων, που είναι στερεωμένοι στον πυθμένα και υπερβαίνουν την ελεύθερη επιφάνεια. Η συστοιχία υποβάλλεται σε δράση γραμμικών κυματισμών εύρους A και κυκλικής συχνότητας ω . Ο πυθμένας θεωρείται επίπεδος και οριζόντιος, ενώ το βάθος του νερού είναι ίσο με h . Το ρευστό είναι ασυμπύεστο και έχει μηδενικό ιξώδες, και η ροή είναι αστρόβιλη επιτρέποντας τη χρήση της γραμμικής θεωρίας δυναμικού. Το πεδίο της ροής στον τρισδιάστατο ευκλείδειο χώρο διέπεται από το δυναμικό γραμμικής ταχύτητας $\Phi(x, y, z, t)$, το οποίο είναι δίνεται ως εξής:

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}\{\phi(x, y, z)e^{-i\omega t}\}, \quad (1)$$

όπου με Re δηλώνεται το πραγματικό μέρος του στοιχείου στις αγκύλες και t είναι ο χρόνος. Ως συνήθως, το χωρικό σύνθετο δυναμικό $\phi(x, y, z)$ πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad (2)$$

παντού στο πεδίο του ρευστού, ικανοποιείται η γραμμικοποιημένη οριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας

$$-K\phi + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = h \quad (3)$$

και η κινηματική οριακή συνθήκη μηδενικής κατακόρυφης ταχύτητας στον πυθμένα

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0. \quad (4)$$

Στην εξ. (3), $K = \omega^2/g$, όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Είναι σαφές ότι, το σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) ορίστηκε στον πυθμένα και με την κάθετη συντεταγμένη z να δείχνει προς τα πάνω. Το συνολικό δυναμικό της ταχύτητας πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann στις επιφάνειες όλων των σωμάτων της συστοιχίας, δηλ.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad (5)$$

όπου με n ορίζεται το μοναδιαίο διάνυσμα, με τη σύμβαση ότι το n έχει κατεύθυνση προς την περιοχή του ρευστού. Στα πλαίσια του γραμμικού υδροδυναμικού προβλήματος, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ολικό δυναμικό της ταχύτητας αποτελείται από τις συνιστώσες του προσπίπτοντος και του περιθλώμενου κύματος, που στη συνέχεια θα ορίζονται ως ϕ_I και ϕ_D αντίστοιχα. Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι το δυναμικό περίθλασης θα πρέπει να ικανοποιεί την κατάλληλη συνθήκη ακτινοβολίας (radiation condition) για τα εξερχόμενα κύματα στο άπειρο (συνθήκη Sommerfeld),

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik_0 \right) \phi_D = 0, \quad (6)$$

όπου $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ και k_0 είναι ο κυματάρθμος.

3.2 Επίλυση σε όρους ελλειπτικών αρμονικών

Προκειμένου να γίνει αυτόνομη η παρούσα μελέτη, σημείο εκκίνησης θα είναι οι διαχωρίσιμες λύσεις της εξίσωσης Laplace σε ελλειπτικές συντεταγμένες. Τα προϊόντα αυτών των λύσεων ονομάζονται «harmonics» και στη συγκεκριμένη περίπτωση, «*Elliptical Harmonics*». Ο βασικός σκοπός της χρήσης των λύσεων της εξίσωσης Laplace προσαρμοσμένης σε ένα ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων είναι η ευκολία στη χρήση της οριακής συνθήκης Neumann (Mavrakos & Chatjigeorgiou, 2010).

Ξεκινώντας λοιπόν από την εξίσωση Laplace σε καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) :

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

στην συνέχεια, την τροποποιούμε σε ελλειπτικές συντεταγμένες (u, v, z) , χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς:

$$x = c \cosh u \cos v, \quad y = c \sinh u \sin v, \quad z = z, \quad (8)$$

όπου $u = \text{σταθ.}$, $v = \text{σταθ.}$ αποτελούν ορθογωνικά τεμνόμενες οικογένειες συνεστιακών ελλείψεων και υπερβολών, αντίστοιχα, ενώ ως c ορίζεται το ήμισυ της απόστασης μεταξύ των εστιών του ελλειπτικού πεδίου.

Η εξίσωση Laplace σε ελλειπτικές συντεταγμένες παίρνει την μορφή (Abramowitz and Stegun, 1970):

$$\frac{2}{c^2(\cosh 2u - \cos 2v)} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial v^2} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (9)$$

Υπάρχουν δύο τύποι διαχωρίσιμων λύσεων της εξίσωσης Laplace σε ελλειπτικές συντεταγμένες, οι άρτιες και οι περιττές λύσεις, οι οποίες εδώ γράφονται ως εξής:

$$\phi_{mn}^{(e)}(u, v, z) = C_{mn} M c_m^{(j)}(u, q_n) c e_m(v, q_n) Z_n(z) \quad (10)$$

$$\phi_{mn}^{(s)}(u, v, z) = S_{mn} M s_m^{(j)}(u, q_n) s e_m(v, q_n) Z_n(z) \quad (11)$$

όπου q_n είναι η επονομαζόμενη παράμετρος Mathieu, η οποία σχετίζεται με τις ιδιοτιμές των διαχωρίσιμων λύσεων $Z_n(z)$ στο z . Περαιτέρω $c e_m(v, q_n)$ και $s e_m(v, q_n)$ είναι οι άρτιες και οι περιττές περιοδικές συναρτήσεις Mathieu αντίστοιχα, όπου $m \in \mathbb{N}$ είναι ένας μη αρνητικός ακέραιος αριθμός. Ομοίως, οι $M c_m^{(j)}(u, q)$ και $M s_m^{(j)}(u, q)$ αποτελούν τις άρτιες και τις περιττές τροποποιημένες (ή ακτινικές) συναρτήσεις Mathieu, για $j = 1, 2, 3, 4$ (Mathieu, 1868). Οι δείκτες m και j υποδηλώνουν το είδος και τη τάξη των τροποποιημένων συναρτήσεων Mathieu. Στην πραγματικότητα, οι τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu για $j = 1, 2, 3, 4$ εκφράζονται ως άπειρα αναπτύγματα των συναρτήσεων Bessel J και Y , και των συναρτήσεων Hankel $H^{(1)}$ και $H^{(2)}$. Οι αναλυτικές σχέσεις για τις περιοδικές και τις τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu για θετική παράμετρο Mathieu δίνονται στο Παράρτημα Α της παρούσης εργασίας. Χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς που υιοθέτησαν οι Abramowitz και Stegun (1970), σε κάθε περίπτωση θα ισχύει:

$$M c_m^{(3),(4)}(u, q_n) = M c_m^{(1)}(u, q_n) \pm i M c_m^{(2)}(u, q_n), \quad (12)$$

$$Ms_m^{(3),(4)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_n) = Ms_m^{(1)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_n) \pm iMs_m^{(2)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_n),$$

όπου το αρνητικό πρόσημο αντιστοιχεί στις συναρτήσεις Mathieu τέταρτης τάξης. Τέλος, οι όροι C_{mn} και S_{mn} , στις εξισώσεις (10) και (11), υποδηλώνουν αυθαίρετες σταθερές (συντελεστές), που σχετίζονται με το είδος m και τις ιδιοτιμές n . Οι ιδιοσυναρτήσεις $Z_n(z)$, οι οποίες ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια και τον πυθμένα των εξισώσεων (3) και (4), δίνονται από:

$$Z_n(z) = \begin{cases} N_0^{-\frac{1}{2}} \cosh(k_0 z), & n = 0, \\ N_n^{-\frac{1}{2}} \cos(\alpha_n z), & n = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (13)$$

όπου

$$N_n = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2k_0 h)}{2k_0 h} \right], & n = 0, \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin(2\alpha_n h)}{2\alpha_n h} \right], & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (14)$$

Ο κυματάρηθος k_0 υπολογίζεται από τη γνωστή εξίσωση διασποράς για πεπερασμένο βάθος υδάτων:

$$k_0 \tanh(k_0 h) = K, \quad (15)$$

ενώ οι ιδιοτιμές α_n αποτελούν τις λύσεις της παρακάτω υπερβατικής εξίσωσης:

$$\alpha_n \tan(\alpha_n h) + K = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

Χρησιμοποιώντας τη συνθήκη $\alpha_0 = -ik_0$, επιτρέπεται η χρήση ενός ομοιόμορφου συμβολισμού για όλες τις πιθανές χαρακτηριστικές λύσεις (eigensolutions). Σημειώνεται ότι οι ιδιοσυναρτήσεις $Z_n(z)$ έχουν κανονικοποιηθεί δεόντως, ώστε να ικανοποιούν τη συνθήκη ορθογωνικότητας $\int_0^h Z_n(z)Z_m(z)dz = h\delta_{nm}$, όπου δ_{nm} είναι η συνάρτηση δέλτα του Kroneker. Ακολούθως, η παράμετρος Mathieu q_n [Εξ. (10-12)], που σχετίζεται με τις ιδιοτιμές α_n θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$q_0 = (k_0 c/2)^2, \quad q_n = -(\alpha_n c/2)^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

όπου παρατηρείται ότι για $n = 1, 2, 3, \dots$ λαμβάνει αρνητικές τιμές. Όταν η παράμετρος Mathieu είναι αρνητική, ο υπολογισμός των τροποποιημένων συναρτήσεων Mathieu πρέπει να εκτελείται με ιδιαίτερη προσοχή. Ωστόσο στη παρούσα εργασία, η περίπτωση αυτή δεν θα συναντηθεί.

3.3 Γενικός σχηματισμός του δυναμικού της ταχύτητας για τον προσπίπτον και τον περιθλώμενο κυματισμό

Υποθέτουμε ότι το προσπίπτον κύμα διαδίδεται υπό γωνία β σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα x στο επίπεδο (x, y) . Επομένως, το δυναμικό του προσπίπτοντος κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\phi_I = -i \frac{gA Z_0(z)}{\omega Z_0(h)} e^{ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)}. \quad (18)$$

Για να εκφραστεί η παραπάνω σχέση σε όρους ελλειπτικού συστήματος συντεταγμένων, πρέπει να τροποποιηθεί ο περιεχόμενος εκθετικός όρος. Σημειώνεται ότι ισχύει η ισότητα $\exp[ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)] = \exp(2i\sqrt{q_0}w)$, όπου $w = \cosh u \cos v \cos \beta + \sinh u \sin v \sin \beta$. Στη συνέχεια ορίζουμε ότι:

$$e^{2i\sqrt{q_0}w} = \sum_{m=0}^{\infty} f_m c e_m(v, q_0) + \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{f}_m s e_m(v, q_0). \quad (19)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις ορθογωνιότητας (Παράρτημα Α), που ικανοποιούνται από τις περιοδικές συναρτήσεις Mathieu, προκύπτει άμεσα:

$$f_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{2i\sqrt{q_0}w} c e_m(v, q_0) dv, \quad \tilde{f}_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{2i\sqrt{q_0}w} s e_m(v, q_0) dv. \quad (20)$$

Επιπλέον ισχύει ότι: [Abramowitz & Stegun, 1970; σελ. 738, εξισώσεις (20.7.34)-(20.7.35)]

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} e^{2i\sqrt{q_0}w} c e_m(v, q_0) dv &= 2\pi (-1)^s i^p c e_m(\beta, q_0) M c_m^{(1)}(u, q_0), \\ \int_0^{2\pi} e^{2i\sqrt{q_0}w} s e_m(v, q_0) dv &= 2\pi (-1)^s (-i)^{-p} s e_m(\beta, q_0) M s_m^{(1)}(u, q_0), \end{aligned} \quad (21)$$

όπου $m = 2s + p$, $p = 0, 1$. Επομένως, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (19)-(21) στην εξίσωση (18), δύναται να μετασχηματιστεί το δυναμικό του προσπίπτοντος κύματος με όρους ελλειπτικού συστήματος συντεταγμένων, σύμφωνα με:

$$\begin{aligned} \phi_I(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}) = & -2i \frac{gA Z_0(z)}{\omega Z_0(h)} \left[\sum_{m=0}^{\infty} i^m M c_m^{(1)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_0) c e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_0) c e_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{q}_0) \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m M s_m^{(1)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_0) s e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_0) s e_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{q}_0) \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Το επόμενο βήμα είναι να οριστεί αποτελεσματικά το δυναμικό της περίθλασης, το οποίο πρέπει να δομηθεί μέσω της γραμμικής υπέρθεσης των ελλειπτικών αρμονικών (elliptical harmonics). Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε:

$$\begin{aligned} \phi_D(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{z}) = & -i\omega Ah \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{mn}^{(c)} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{mn}^{(s)} \right] \\ = & -i\omega Ah \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} M c_m^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_n) c e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_n) Z_n(\mathbf{z}) \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} S_{mn} M s_m^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_n) s e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_n) Z_n(\mathbf{z}) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εξετάζεται η ειδική περίπτωση όπου οι ελλειπτικοί κύλινδροι είναι σταθεροί και στερεωμένοι στον πυθμένα. Επομένως, σε συμφωνία με τα στοιχεία της περίπτωσης των κυκλικών κυλίνδρων, μόνο ο μηδενικός όρος των ιδιοσυναρτήσεων $Z_0(z)$ θα συμμετέχει στην λύση. Στην πραγματικότητα, αυτό αποδεικνύεται εφαρμόζοντας τη συνθήκη Neumann στο σύνολο του ύψους του εκάστοτε κυλίνδρου, δηλαδή στο διάστημα $0 \leq z \leq h$. Παρ' όλα αυτά, αυτό θεωρήθηκε ως δεδομένο εξ' αρχής ώστε να απλοποιηθούν οι σημειογραφίες στην ανάλυση που ακολουθεί. Επιπλέον, το δυναμικό περίθλασης πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη ακτινοβολίας (radiation condition) της εξίσωσης (6), η οποία σε ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων παίρνει τη μορφή:

$$\lim_{u \rightarrow \infty} (c \cosh u)^{1/2} \left(\frac{1}{c \sinh u} \frac{\partial}{\partial u} - i k_0 \right) \phi_D = 0. \quad (24)$$

Αποδεικνύεται ότι, μόνο οι τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu 3^{ης} τάξης συμπεριφέρονται ικανοποιητικά στο άπειρο και, επομένως, το δυναμικό περίθλασης απλοποιείται περαιτέρω, παίρνοντας την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} \phi_D(\mathbf{u}, \mathbf{v}, z) = & -i\omega AhZ_0(z) \left[\sum_{m=0}^{\infty} C_m M c_m^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_0) c e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_0) \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} S_m M s_m^{(3)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_0) s e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_0) \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

3.4 Υδροδυναμική αλληλεπίδραση συστοιχιών πολλαπλών ελλειπτικών κυλίνδρων

Υποθέτουμε τώρα μια ομάδα ελλειπτικών κυλίνδρων, πλήθους N , οι οποίοι υποβάλλονται στη δράση προσπιπτόντων μονοχρωματικών κυματισμών, με την προφανή συνέπεια της πρόκλησης υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Συνεπώς, κάθε κύλινδρος βρίσκεται υπό την επίδραση των προσπιπτόντων κυμάτων καθώς και των κυμάτων που ανακλώνται από τους υπόλοιπους κυλίνδρους της συστοιχίας. Στη συνέχεια, υποθέτουμε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) , τοποθετημένο στην ελεύθερη επιφάνεια και επομένως ορίζουμε την γωνία διάδοσης β ως τη γωνία, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στη διεύθυνση διάδοσης των γραμμικών κυμάτων και τον οριζόντιο άξονα X . Το κέντρο του εκάστοτε κυλίνδρου $k = 1, 2, \dots, N$ βρίσκεται στο σημείο (X_k, Y_k) , αναφορικά με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) . Εάν το σημείο (x_k, y_k) ορίζει το επίπεδο της ελεύθερης επιφάνειας αναφορικά με το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων τοποθετημένο στο κέντρο του σώματος k , τότε το δυναμικό των εξισώσεων (18) και (22), εκφρασμένο αναφορικά με το ίδιο σύστημα συντεταγμένων θα δίνεται από:

$$\begin{aligned} \phi_I = & -2i \frac{gA Z_0(z)}{\omega Z_0(h)} \Lambda_k \left[\sum_{m=0}^{\infty} i^m M c_m^{(1)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_k) c e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_k) c e_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{q}_k) \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m M s_m^{(1)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}_k) s e_m(\mathbf{v}, \mathbf{q}_k) s e_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{q}_k) \right], \quad \Lambda_k = e^{ik_0(X_k \cos \beta + Y_k \sin \beta)}, \end{aligned} \quad (26)$$

Όπου, με $q_k = (k_0 c_k / 2)^2$ δηλώνεται ο μηδενικός όρος της παραμέτρου Mathieu, που σχετίζεται με τις διαστάσεις του εκάστοτε σώματος k , και με $c_k = (a_k^2 - b_k^2)^{1/2} = \epsilon_k a_k$ ορίζεται το ήμισυ της

απόστασης των εστιών του κυλίνδρου k , ενώ με a_k , b_k και ϵ_k ορίζονται ο μεγάλος και ο μικρός ημιάξονας αντίστοιχα, και η εκκεντρότητα του ελλειπτικού κυλίνδρου k .

Το δυναμικό περίθλασης του σώματος k συμβολίζεται με $\phi_D^{(k)}$, και εκφράζεται σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων (x_k, y_k, z) , όπου το z είναι κοινό για όλα τα σώματα, ή ισοδύναμα σε σχέση με το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων (u_k, v_k, z) . Ως εκ τούτου, μπορούμε να γράψουμε

$$\begin{aligned} \phi_D^{(k)}(u_k, v_k, z) = & -2i \frac{gA Z_0(z)}{\omega Z_0(h)} \left[\sum_{m=0}^{\infty} i^m C_m^{(k)} Kc_m^{(k)} Mc_m^{(3)}(u_k, q_k) ce_m(v_k, q_k) \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m S_m^{(k)} Ks_m^{(k)} Ms_m^{(3)}(u_k, q_k) se_m(v_k, q_k) \right], \end{aligned} \quad (27)$$

όπου τα $C_m^{(k)}$ και $S_m^{(k)}$ δηλώνουν τους άγνωστους συντελεστές του αναπτύγματος (unknown expansion coefficients) που σχετίζονται με το σώμα k και

$$Kc_m^{(k)} = Mc_m^{(1)'}(u_{k0}, q_k) / Mc_m^{(3)'}(u_{k0}, q_k), \quad Ks_m^{(k)} = Ms_m^{(1)'}(u_{k0}, q_k) / Ms_m^{(3)'}(u_{k0}, q_k), \quad (28)$$

όπου με $u_{k0} = \tanh^{-1}(b_k/a_k)$ ορίζεται το όριο του ελλειπτικού σώματος k . Οι τονούμενοι όροι δηλώνουν παραγωγή ως προς το u .

Το ολικό δυναμικό της ταχύτητας, που αποτελείται από το προσπίπτον δυναμικό και τις συνιστώσες της περίθλασης όλων των σωμάτων της συστοιχίας, θα υπολογίζεται μέσω της γραμμικής υπέρθεσης τους.

$$\phi = \phi_I + \phi_D^{(k)} + \sum_{j \neq k}^N \phi_D^{(j)}. \quad (29)$$

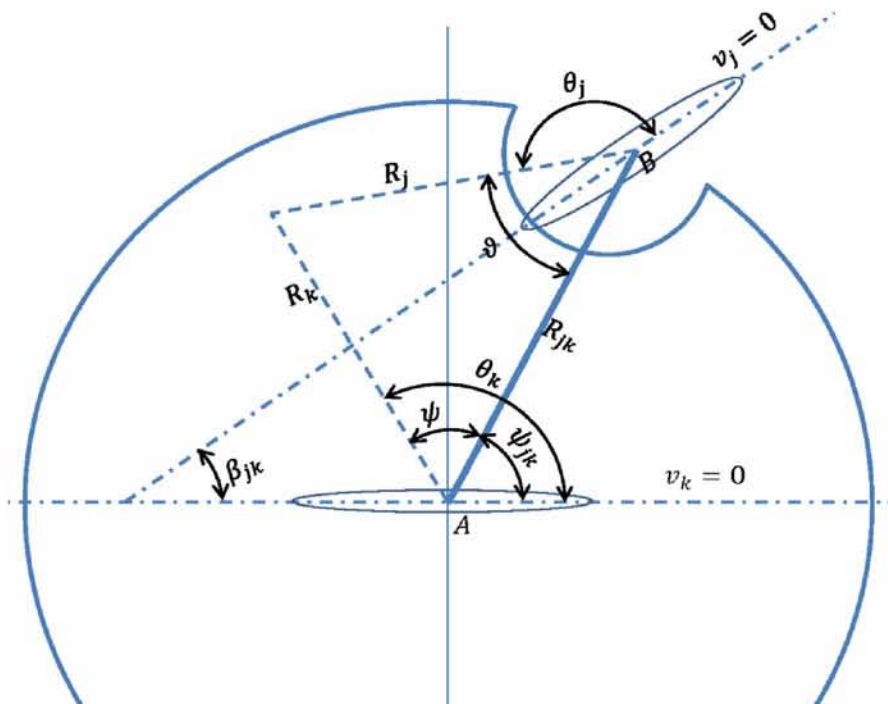
Υποθέτοντας ότι το δυναμικό ϕ_I δίνεται από την Εξ. (26) και ότι τα $\phi_D^{(k)}$, $\phi_D^{(j)}$ δίνονται από την Εξ. (27), καταλήγουμε σε μια εξίσωση, στην οποία το δυναμικό του προσπίπτοντος κύματος και το δυναμικό των περιθλώμενων κυμάτων από το σώμα αναφοράς k εκφράζονται σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων (u_k, v_k, z) , ενώ όλες οι συνιστώσες της περίθλασης λόγω των άλλων σωμάτων $\phi_D^{(j)}$, $j = 1, 2, \dots, N$, $j \neq k$ εκφράζονται σε σχέση με τα διαφορετικά τοπικά συστήματα συντεταγμένων (u_j, v_j, z) . Η κύρια πρόκληση, επομένως, είναι να τροποποιήσουμε κατάλληλα το δυναμικό $\phi_D^{(j)}$ ώστε να εκφραστεί σε σχέση με το σύστημα (u_k, v_k, z) . Αυτό επιτρέπει να περιγραφεί

το ολικό δυναμικό της ταχύτητας σε σχέση με ένα και μόνο συστήμα συντεταγμένων και άμεσα να εφαρμοστεί η συνθήκη Neumann, η οποία τώρα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial \phi^{(k)}}{\partial u_k} = 0, \quad u_k = u_{k0}, \quad 0 \leq v_k \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq h, \quad (30)$$

όπου $\phi^{(k)}$ είναι το ολικό δυναμικό της ταχύτητας, που εκφράζεται αναφορικά με το τοπικό σύστημα (u_k, v_k, z) .

Πράγματι, υπάρχει ανάλογη έκφραση για να δοθεί το δυναμικό περίθλασης $\phi_D^{(j)}$ αναφορικά με το σύστημα (u_k, v_k, z) . Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το λεγόμενο «addition theorem» για τις συναρτήσεις Mathieu και ειδικότερα το θεώρημα που αντιμετωπίζει ελλειπτικά συστήματα συντεταγμένων. Αυτά τα θεωρήματα παρέχουν σημαντικές συνδέσεις μεταξύ των συναρτήσεων Mathieu με διαφορετικές παραμέτρους και σε διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Φαίνεται ότι, έχουν εξεταστεί μόνο από τους Meixner & Schäfer (1954), ωστόσο, ο Sæmark (1959) ανέπτυξε ένα εναλλακτικό θεώρημα σε σχέση με αυτό που παρουσιάστηκε από τους Meixner & Schäfer (1954), το οποίο βεβαίως είναι πολύ ευκολότερο και κατανοητό στη χρήση. Γενικά, είναι ανάλογα με τα «addition theorem» για τις συναρτήσεις Bessel (π.χ. Graf's, Gegenbauer's και Neumann's theorem).



Σχήμα 14: Η κοινή διάταξη με δύο ελλειπτικά συστήματα συντεταγμένων, A: (u_k, v_k) και B: (u_j, v_j) με κέντρα A και B (Sæmark, 1959).

Με βάση το σχήμα 14, ο τύπος από τον Sæmark's (1959) ορίζει:

$$M_m^{(l)}(u_j, q_j) m e_m(v_j, q_j) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} Q_{r,m}^{(l)} M_r^{(1)}(u_k, q_k) m e_r(v_k, q_k), \quad l = 1, 2, 3, 4, \quad (31)$$

όπου

$$Q_{r,m}^{(l)} = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} d'_{r-p,p}(q_k) Z_{p-s}^{(l)}(k_0 R_{jk}) d_{s-m,m}(q_j) e^{i(s-p)\psi_{jk}} e^{-is\beta_{jk}}, \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (32)$$

και

$$Z_m^{(1)}(k_0 R_{jk}) = J_m(k_0 R_{jk}),$$

$$Z_m^{(2)}(k_0 R_{jk}) = Y_m(k_0 R_{jk}),$$

(33)

$$Z_m^{(3)}(k_0 R_{jk}) = H_m^{(1)}(k_0 R_{jk}),$$

$$Z_m^{(4)}(k_0 R_{jk}) = H_m^{(2)}(k_0 R_{jk}).$$

Σημειώνεται ότι, οι J_m, Y_m ορίζουν τις συναρτήσεις Bessel (1^{ou}) πρώτου και (2^{ou}) δεύτερου είδους αντίστοιχα, ενώ $H_m^{(1),(2)}(k_0 R_{jk})$ είναι οι συναρτήσεις Hankel, (1^{ou}) και (2^{ou}) είδους. Στην Εξ. (31) οι όροι $M_m^{(l)}$ και $m e_m$ δηλώνουν τον καθολικό συμβολισμό των τροποποιημένων και των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu, ο οποίος περιλαμβάνει και τις άρτιες και τις περιπτές συναρτήσεις. Οι αλληλοσυσχετίσεις ανάμεσα σε αυτές και τις άρτιες και περιπτές συναρτήσεις Mathieu δίνονται στο παράρτημα Α. Επιπλέον, οι συντελεστές $d'_{n,p}(q)$ and $d_{n,p}(q)$ στην Εξ. (32) σχετίζονται με τους συντελεστές του αναπτύγματος των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu $m e_m$. Οι σχέσεις τους με τους συντελεστές του αναπτύγματος των άρτιων και περιπτών περιοδικών συναρτήσεων Mathieu δίνονται επίσης στο παράρτημα Α. Όπως σημειώνεται από τον Særmærk (1959), το «addition theorem» [Εξ.(31)] είναι έγκυρο εκτός του κύκλου με κέντρο στο Β και $R_j = c_j = a_j \epsilon_j$, αλλά εντός του κύκλου με κέντρο στο Α και $R_k = R_{jk}$. Η περιοχή αυτή φαίνεται στο σχήμα 14.

Αντικείμενο ενδιαφέροντος ωστόσο, αποτελούν μόνο οι τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu 3^{ns} τάξης, δηλαδή για $l = 3$ στις Εξ. (31) και (32). Συνεπώς, το σχετικό «addition theorem» μπορεί να χωριστεί αποτελεσματικά σε άρτιους και περιπτούς όρους σύμφωνα με:

$$\begin{aligned}
& Mc_m^{(3)}(u_j, q_j) ce_m(v_j, q_j) \\
&= \sum_{r=0}^{\infty} Q_{r,m}^{(3)} Mc_r^{(1)}(u_k, q_k) ce_r(v_k, q_k) \\
&\quad - i \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r Q_{-r,m}^{(3)} Ms_r^{(1)}(u_k, q_k) se_r(v_k, q_k)
\end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
& Ms_m^{(3)}(u_j, q_j) se_m(v_j, q_j) \\
&= i(-1)^m \sum_{r=0}^{\infty} Q_{r,-m}^{(3)} Mc_r^{(1)}(u_k, q_k) ce_r(v_k, q_k) \\
&\quad + \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^{m-r} Q_{-r,-m}^{(3)} Ms_r^{(1)}(u_k, q_k) se_r(v_k, q_k)
\end{aligned} \tag{35}$$

Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις Εξ.(26), (27), (29), (34) και (35) καταλήγουμε στην ακόλουθη αναλυτική μορφή για το δυναμικό της ταχύτητας, κανονικοποιημένη ως εξής $\phi^{(k)} = -2i(gA/\omega)[Z_0(z)/Z_0(h)]\varphi^{(k)}$

$$\begin{aligned}
\varphi^{(k)} = & \Lambda_k \left[\sum_{m=0}^{\infty} i^m M c_m^{(1)}(u, q_k) c e_m(v, q_k) c e_m(\beta, q_k) \right. \\
& + \left. \sum_{m=1}^{\infty} i^m M s_m^{(1)}(u, q_k) s e_m(v, q_k) s e_m(\beta, q_k) \right] \\
& + \sum_{m=0}^{\infty} i^m C_m^{(k)} K c_m^{(k)} M c_m^{(3)}(u_k, q_k) c e_m(v_k, q_k) \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} i^m S_m^{(k)} K s_m^{(k)} M s_m^{(3)}(u_k, q_k) s e_m(v_k, q_k) \\
& + \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=0}^{\infty} i^m C_m^{(j)} K c_m^{(j)} \left[\sum_{r=0}^{\infty} Q_{r,m}^{(3)} M c_r^{(1)}(u_k, q_k) c e_r(v_k, q_k) \right. \\
& - \left. i \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r Q_{-r,m}^{(3)} M s_r^{(1)}(u_k, q_k) s e_r(v_k, q_k) \right] \\
& + \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=0}^{\infty} i^m S_m^{(j)} K s_m^{(j)} \left[i (-1)^m \sum_{r=0}^{\infty} Q_{r,-m}^{(3)} M c_r^{(1)}(u_k, q_k) c e_r(v_k, q_k) \right. \\
& + \left. \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^{m-r} Q_{-r,-m}^{(3)} M s_r^{(1)}(u_k, q_k) s e_r(v_k, q_k) \right]
\end{aligned} \tag{36}$$

Χρησιμοποιώντας περαιτέρω τη συνθήκη Neumann [Eq. (30)] και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις ορθογωνικότητας των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu (Παράρτημα Α), το ακόλουθο γραμμικό σύστημα σε όρους των άγνωστων συντελεστών του αναπτύγματος $C_m^{(j)}$ και $S_m^{(j)}$, $j = 1, 2, \dots, N$ αποδίδει αμέσως:

$$C_m^{(k)} + \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} C_r^{(j)} K c_r^{(j)} Q_{m,r}^{(3)} + i \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=1}^{\infty} i^{r-m} (-1)^r S_r^{(j)} K s_r^{(j)} Q_{m,-r}^{(3)} = -\Lambda_k c e_m(\beta, q_k) \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{s}_m^{(k)} - i(-1)^m \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} \mathbf{c}_r^{(j)} K \mathbf{c}_r^{(j)} \mathbf{Q}_{-m,r}^{(3)} + \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=1}^{\infty} i^{r-m} (-1)^{r-m} \mathbf{s}_r^{(j)} K \mathbf{s}_r^{(j)} \mathbf{Q}_{-m,-r}^{(3)} \\
& = -\Lambda_k \mathbf{s} e_m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{q}_k)
\end{aligned} \tag{38}$$

Το ζευγάρι των Εξ.(37) και (38) αντιστοιχεί σε ένα περίπλοκο αλγεβρικό σύστημα. Το σύστημα πρέπει να συντημηθεί σε ένα πεπερασμένο αριθμό όρων, επαρκή όμως ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση. Αν και περίπλοκο, το σύστημα είναι γραμμικό και μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας δεδομένες τεχνικές πινάκων.

Αντικαθιστώντας στη συνέχεια τις Εξ.(37) και (38) στην έκφραση του ολικού δυναμικού της ταχύτητας του σώματος k [η οποία δίνεται κανονικοποιημένη από την Εξ. (36)], προκύπτει άμεσα η ακόλουθη συμπαγής έκφραση για το δυναμικό $\phi^{(k)}$:

$$\begin{aligned}
& \phi^{(k)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{z}) = \\
& -2i \frac{gA}{\omega} \frac{Z_0(\mathbf{z})}{Z_0(\mathbf{h})} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} i^m \mathbf{c}_m^{(k)} \mathbf{c} e_m(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_k) \left[K \mathbf{c}_m^{(k)} \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(3)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) - \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(1)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) \right] \right. \\
& \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m \mathbf{s}_m^{(k)} \mathbf{s} e_m(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_k) \left[K \mathbf{s}_m^{(k)} \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(3)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) - \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(1)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{39}$$

Η εξίσωση (39) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω, εάν το δυναμικό $\phi^{(k)}$ υπολογιστεί ακριβώς στο σύνορο του ελλειπτικού σώματος k , δηλαδή στο $u_k = u_{k0}$. Τότε, το ολικό δυναμικό της ταχύτητας θα είναι:

$$\phi^{(k)}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{v}_k, \mathbf{z}) = \frac{4gA}{\pi \omega} \frac{Z_0(\mathbf{z})}{Z_0(\mathbf{h})} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{i^m \mathbf{c}_m^{(k)} \mathbf{c} e_m(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_k)}{\mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(3)}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k)} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m \mathbf{s}_m^{(k)} \mathbf{s} e_m(\mathbf{v}_k, \mathbf{q}_k)}{\mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(3)}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k)} \right\} \tag{40}$$

Για την δημιουργία της Εξ. (40) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις «Wronskian relations» (McLachlan, 1947)

$$\begin{aligned}
& \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(1)'}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k) \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(3)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) - \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(3)'}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k) \mathbf{M} \mathbf{c}_m^{(1)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) \\
& = \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(1)'}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k) \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(3)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) - \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(3)'}(\mathbf{u}_{k0}, \mathbf{q}_k) \mathbf{M} \mathbf{s}_m^{(1)}(\mathbf{u}_k, \mathbf{q}_k) = \frac{2i}{\pi}
\end{aligned} \tag{41}$$

3.5 Υδροδυναμική φόρτιση

Η γραμμική υδροδυναμική φόρτιση (δυνάμεις και ροπές) υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την υδροδυναμική πίεση στην διαβρεγμένη επιφάνεια κάθε σώματος στη συστοιχία. Χρησιμοποιώντας μόνο τον γραμμικό όρο στην εξίσωση Bernoulli, οι δυνάμεις F_x (surge force) και F_y (sway force), καθώς και οι ροπές M_x (roll moment), M_y (pitch moment) και M_z (yaw moment) θα υπολογίζονται ως εξής:

$$F_x^{(k)} = -i\omega\rho b_k \int_0^h \int_0^{2\pi} \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \cos v_k dv_k dz \quad (42)$$

$$F_y^{(k)} = -i\omega\rho a_k \int_0^h \int_0^{2\pi} \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \sin v_k dv_k dz \quad (43)$$

$$M_x^{(k)} = -i\omega\rho a_k \int_0^h \int_0^{2\pi} z \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \sin v_k dv_k dz \quad (44)$$

$$M_y^{(k)} = i\omega\rho b_k \int_0^h \int_0^{2\pi} z \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \cos v_k dv_k dz \quad (45)$$

$$M_z^{(k)} = i\omega\rho \frac{c_k^2}{2} \int_0^h \int_0^{2\pi} \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \sin 2v_k dv_k dz \quad (46)$$

Οι ροπές M_x (roll moment) και M_y (pitch moment) υπολογίζονται αναφορικά με τον πυθμένα, στο $z = 0$. Αντικαθιστώντας την Εξ. (40) στις Εξ.(42)-(46) και πραγματοποιώντας την ολοκλήρωση, αποκτάμε τις ακόλουθες κανονικοποιημένες εκφράσεις για τις διάφορες συνιστώσες της υδροδυναμικής φόρτισης:

$$\frac{F_x^{(k)}}{\rho g A a_k^2} = -4i \frac{k_0 b_k}{(k_0 a_k)^2} \tanh k_0 h \sum_{m=0}^{\infty} \frac{i^m A_1^m(q_k) C_m^{(k)}}{M c_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \quad (47)$$

$$\frac{F_y^{(k)}}{\rho g A a_k^2} = -4i \frac{1}{k_0 a_k} \tanh k_0 h \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m B_1^m(q_k) S_m^{(k)}}{M s_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \quad (48)$$

$$\frac{M_x^{(k)}}{\rho g A a^3} = -4i \frac{1}{(k_0 a_k)^2} \left[\frac{1}{\cosh k_0 h} + K h - 1 \right] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m B_1^m(q_k) S_m^{(k)}}{M s_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \quad (49)$$

$$\frac{M_y^{(k)}}{\rho g A a^3} = 4i \frac{k_0 b_k}{(k_0 a_k)^3} \left[\frac{1}{\cosh k_0 h} + K h - 1 \right] \sum_{m=0}^{\infty} \frac{i^m A_1^m(q_k) C_m^{(k)}}{M c_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \quad (50)$$

$$\frac{M_z^{(k)}}{\rho g A a^3} = 2i \frac{(k_0 c_k)^2}{(k_0 a_k)^3} \tanh k_0 h \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m B_2^m(q_k) S_m^{(k)}}{M s_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \quad (51)$$

όπου $A_n^m(q_k)$ και $B_n^m(q_k)$ αποτελούν τους συντελεστές του αναπτύγματος των άρτιων και περιπλών περιοδικών συναρτήσεων Mathieu (Παράρτημα Α).

3.6 Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (run up)

Η σχέση που παρέχει την κυματική ανύψωση σε οποιαδήποτε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας για τυχαίο κύλινδρο k , είναι:

$$\eta(u_k, v_k, h) = \frac{i\omega}{g} \varphi(u_k, v_k, h) \quad (52)$$

ενώ, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του κυλίνδρου k υπολογίζεται θέτοντας $u_k = u_{k0}$ στην ανωτέρω σχέση. Έτσι, προκύπτει:

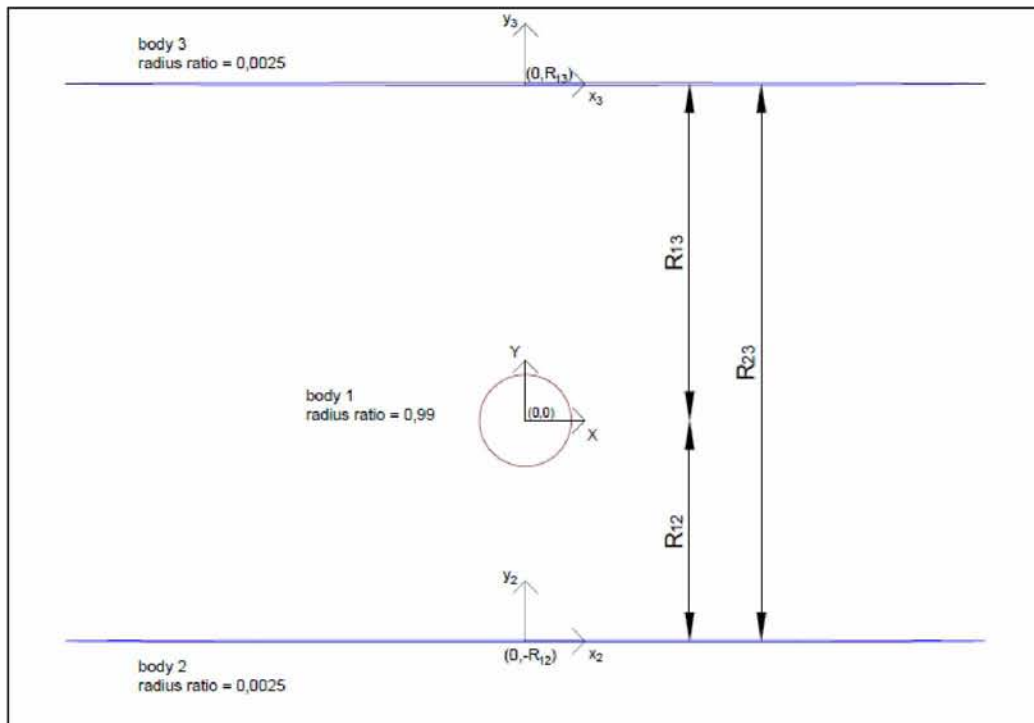
$$\eta^k(u_{k0}, v_k)/A = \frac{4i}{\pi} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{i^m C_m^{(k)} c e_m(v_k, q_k)}{M c_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{i^m S_m^{(k)} s e_m(v_k, q_k)}{M s_m^{(3)}(u_{k0}, q_k)} \right\} \quad (53)$$

Όπως σημειώνεται από τον Særmak (1959), η περιοχή, στην οποία το λεγόμενο «addition theorem» (Εξ.31) είναι έγκυρο (και κατά συνέπεια οι εκφράσεις του δυναμικού και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας), καθορίζεται ρητά από την απόσταση μεταξύ των κέντρων των κυλίνδρων και το ήμισυ της απόστασης μεταξύ των εσίων του κάθε κυλίνδρου (σχήμα 14). Έτσι, η έκφραση για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι έγκυρη γύρω από τον κύλινδρο k , αλλά μπορεί να μην ισχύει κοντά σε έναν άλλον κύλινδρο.

4. Αποτελέσματα υδροδυναμικής φόρτισης

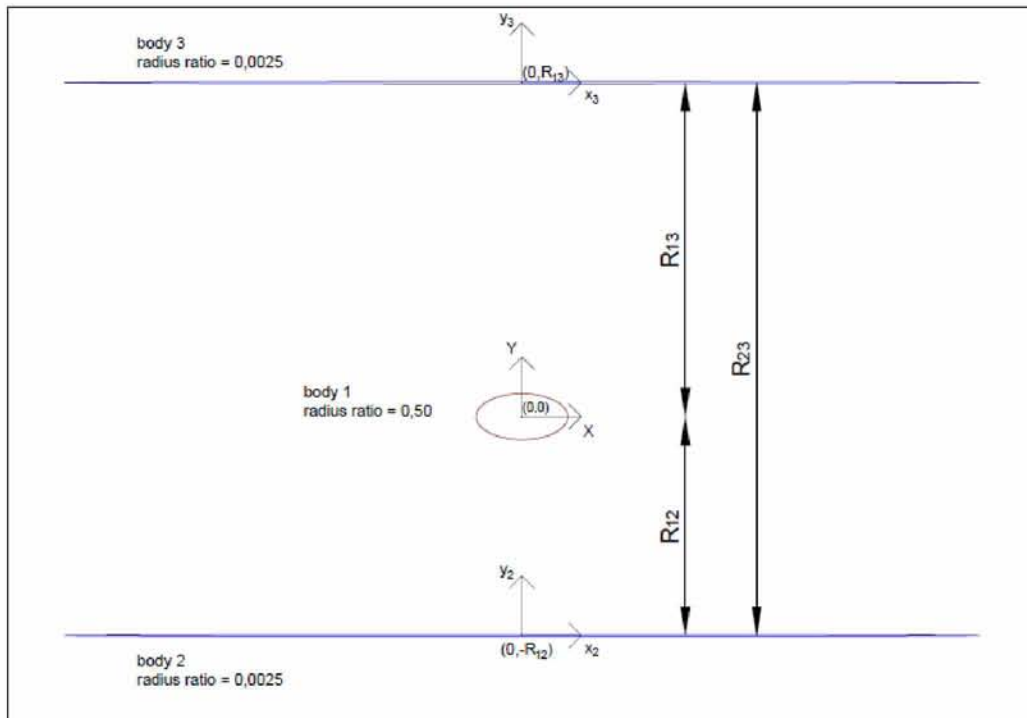
Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της υδροδυναμικής φόρτισης (δυνάμεις, ροπές) και της βρεχόμενης επιφάνειας των σωμάτων (wave run up) για το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης γραμμικών κυματισμών με μια συστοιχία σταθερών ελλειπτικών κυλίνδρων, χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

Αναλυτικότερα, εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές διατάξεις, οι οποίες έχουν ωστόσο, ως κοινό στοιχείο δύο πολύ μακρόστενους κυλίνδρους (bodies 2 & 3) με μεγάλη εκκεντρότητα, σχεδόν ίση με τη μονάδα, όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν. Οι διατάξεις 1 έως 4 αποτελούνται από 3 σώματα με την διαφοροποίησή τους να επέρχεται στην εκκεντρότητα και τον προσανατολισμό του μεσαίου σώματος (body1), ενώ η διάταξη 5 αποτελείται από 4 σώματα.

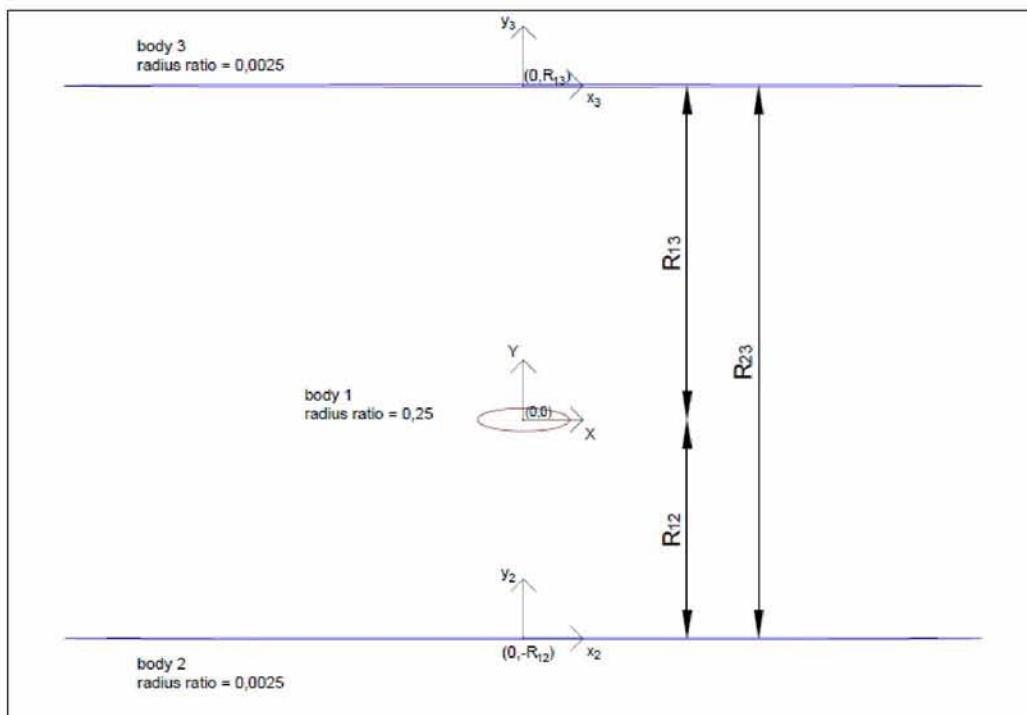


Σχήμα 15: Διάταξη 1 – Καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i)

Τα ελλειπτικά σώματα 2 και 3 έχουν ίδιες διαστάσεις και ο λόγος $b_{2,3}/a_{2,3}$ είναι ίσος με 0,0025 σε όλες τις διατάξεις, ενώ είναι τοποθετημένα παράλληλα, ώστε να προσομοιάζουν ένα κανάλι. Ο μεσαίος ελλειπτικός κύλινδρος (body 1) έχει λόγο b_1/a_1 ίσο με 0,99 στην διάταξη 1 και αποτελεί σχεδόν μια τέλεια έλλειψη, στην περίπτωση αυτή, ενώ στις διατάξεις 2 και 3 η εκκεντρότητα του μεσαίου σώματος αυξάνεται και ο λόγος b_1/a_1 λαμβάνει τιμές 0,50 και 0,25 αντίστοιχα.

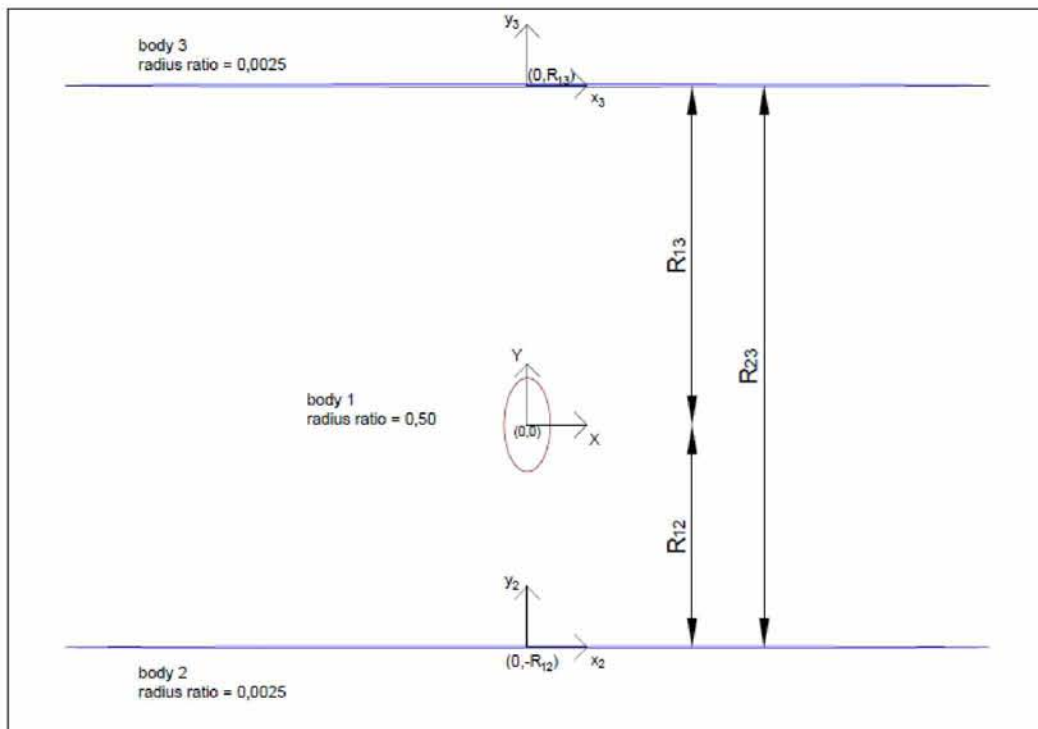


Σχήμα 16: Διάταξη 2 – Καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i)

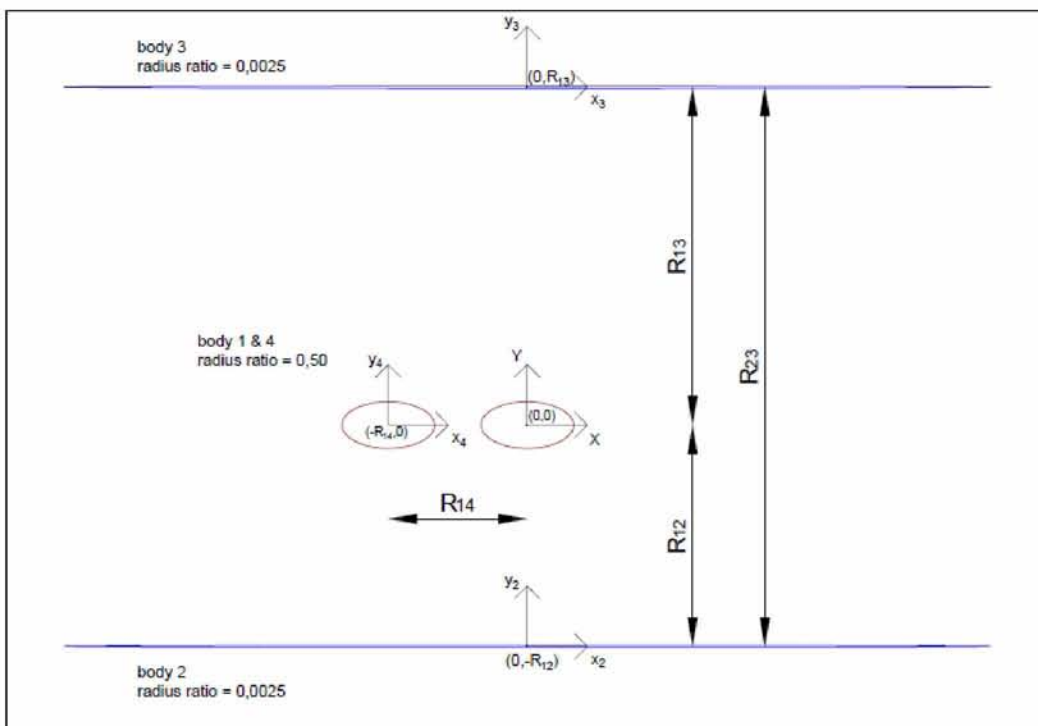


Σχήμα 17: Διάταξη 3 – Καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i)

Στη διάταξη 4, το μεσαίο σώμα έχει λόγο b_1/a_1 ίσο με 0,50, όμως στην περίπτωση αυτή ο πρωτεύων άξονας a είναι κάθετος ως προς τον οριζόντιο άξονα, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 18: Διάταξη 4 – Καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i)



Σχήμα 19: Διάταξη 5 – Καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) και τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων (x_i, y_i)

Τέλος, στη διάταξη 5, το επιπλέον σώμα (body 4) έχει ίδιες διαστάσεις με το σώμα 1, με τους λόγους b_1/a_1 και b_4/a_4 ίσους με 0,50, και βρίσκεται και αυτό ανάμεσα στους δύο μακρόστενους κυλίνδρους, μπροστά από το σώμα 1.

Σε όλες τις περιπτώσεις, το προσπίπτον κύμα σχηματίζει γωνία β ίση με 0° με τον οριζόντιο άξονα X του καθολικού συστήματος συντεταγμένων (X, Y) , που συμπίπτει με το κέντρο του μεσαίου σώματος 1 (body 1). Οι κύλινδροι προεξέχουν της ελεύθερης επιφάνειας και το ύψος, τους είναι επαρκές, ώστε να μην επιτρέπεται υπερπήδηση. Ο λόγος του βάθους των υδάτων προς τον πρωτεύοντα άξονα h/a_1 ισούται με 1 σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Οι τιμές των αποστάσεων R_{jk} μεταξύ των κέντρων k_i των σωμάτων στις διατάξεις που παρουσιάστηκαν ανωτέρω λαμβάνουν διάφορες τιμές, σύμφωνα με τον πίνακα:

Πίνακας 3: Αποστάσεις R_{ij} μεταξύ των κέντρων των σωμάτων

	ΔΙΑΤΑΞΗ 1 $b_1/a_1=0,99$	ΔΙΑΤΑΞΗ 2 $b_1/a_1=0,50$	ΔΙΑΤΑΞΗ 3 $b_1/a_1=0,25$	ΔΙΑΤΑΞΗ 4 $b_1/a_1=0,50$	ΔΙΑΤΑΞΗ 5 $b_1/a_1=0,50, b_4/a_4=0,50$	
					$R_{14}= 3a$	$R_{14}= 4a$
1	$R_{12}= 2a, R_{13}= 3a, R_{23}= 5a$			$R_{12}= 2a, R_{13}= 3a, R_{23}= 5a$	$R_{12}= 2a, R_{13}= 3a, R_{23}= 5a$	
2	$R_{12}= 2a, R_{13}= 4a, R_{23}= 6a$			-	-	
3	$R_{12}= 2a, R_{13}= 5a, R_{23}= 7a$			-	-	
4	$R_{12}= 2a, R_{13}= 6a, R_{23}= 8a$			$R_{12}= 2a, R_{13}= 6a, R_{23}= 8a$	$R_{12}= 2a, R_{13}= 6a, R_{23}= 8a$	
5	$R_{12}= 2a, R_{13}= 7a, R_{23}= 9a$			-	-	
6	$R_{12}= 2a, R_{13}= 8a, R_{23}= 10a$			$R_{12}= 2a, R_{13}= 8a, R_{23}= 10a$	$R_{12}= 2a, R_{13}= 8a, R_{23}= 10a$	
7	$R_{12}= 3a, R_{13}= 2a, R_{23}= 5a$			$R_{12}= 3a, R_{13}= 2a, R_{23}= 5a$	$R_{12}= 3a, R_{13}= 2a, R_{23}= 5a$	
8	$R_{12}= 3a, R_{13}= 3a, R_{23}= 6a$			-	-	
9	$R_{12}= 3a, R_{13}= 4a, R_{23}= 7a$			-	-	
10	$R_{12}= 3a, R_{13}= 5a, R_{23}= 8a$			$R_{12}= 3a, R_{13}= 5a, R_{23}= 8a$	$R_{12}= 3a, R_{13}= 5a, R_{23}= 8a$	
11	$R_{12}= 3a, R_{13}= 6a, R_{23}= 9a$			-	-	
12	$R_{12}= 3a, R_{13}= 7a, R_{23}= 10a$			$R_{12}= 3a, R_{13}= 7a, R_{23}= 10a$	$R_{12}= 3a, R_{13}= 7a, R_{23}= 10a$	
13	-			$R_{12}= 4a, R_{13}= 4a, R_{23}= 8a$	$R_{12}= 4a, R_{13}= 4a, R_{23}= 8a$	
14	$R_{12}= 4a, R_{13}= 5a, R_{23}= 9a$			-	-	
15	$R_{12}= 4a, R_{13}= 6a, R_{23}= 10a$			$R_{12}= 4a, R_{13}= 6a, R_{23}= 10a$	$R_{12}= 4a, R_{13}= 6a, R_{23}= 10a$	

4.1 Ασκούμενες δυνάμεις και ροπές

Οι ασκούμενες δυνάμεις εκφράζονται σε σχέση με το καθολικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (X, Y) , το οποίο επιλέχθηκε έτσι ώστε να συμπίπτει με το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του σώματος 1 (σχήμα 15-19). Επιπλέον, όπως έχει προαναφερθεί οι ροπές M_x (roll moment) και M_y (pitch moment) υπολογίζονται αναφορικά με τον πυθμένα, στο $z = 0$.

Τα στοιχεία της υδροδυναμικής φόρτισης, και πιο συγκεκριμένα οι δυνάμεις F_x και F_y (surge & sway forces) καθώς και οι ροπές M_x και M_y (roll & pitch moments), που ασκούνται στις διατάξεις των συστοιχιών κυλίνδρων, εξετάζονται στο παρόν με τη βοήθεια των διαγραμμάτων 8-103. Οι συνιστώσες της υδροδυναμικής φόρτισης δίνονται κανονικοποιημένες ως προς τους παράγοντες όπως φαίνεται στους κατακόρυφους άξονες των διαγραμμάτων, και σε σχέση με την κανονικοποιημένη χωρική συχνότητα του κύματος $k_0 a$. Προς χάριν των συγκρίσεων, όλα τα σχήματα δείχνουν επιπλέον τις δυνάμεις και τις ροπές, για την περίπτωση όπου τα σώματα απέχουν πολύ μεταξύ τους (single body case), πράγμα που σημαίνει ότι το υδροδυναμικό πεδίο επηρεάζεται μόνο από ένα μόνο σώμα.

Οι δυνάμεις και οι ροπές για τους δύο μακρόστενους ελλειπτικούς κυλίνδρους (body 2 & body 3) είναι μηδενικές ,σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Με βάση αυτό, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην υδροδυναμική φόρτιση που υπόκειται το σώμα 1, και το σώμα 4 στην περίπτωση που εξετάζεται η διάταξη 5 .

Για τις περιπτώσεις των διατάξεων 1,2 και 3, η τοποθέτηση των κυλίνδρων σε σχέση με την διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων, ακυρώνει κάθε τύπο συμμετρίας και κατά συνέπεια καμία μορφή φόρτισης δεν είναι μηδενική στο εξεταζόμενο σώμα 1.

Στα διαγράμματα 8-16, που παρουσιάζονται στη συνέχεια, φαίνεται 'ότι, για κυματική διάδοση παράλληλη προς τους διαμήκεις άξονες των σωμάτων ($\beta = 0^\circ$), οι ασκούμενες δυνάμεις προς την ίδια κατεύθυνση (surge forces F_x) για το σώμα 1 στις διατάξεις 1,2 και 3, ακολουθούν την ίδια τάση μεταβολής, όπως στην περίπτωση όπου το σώμα 1 είναι μόνο του στο πεδίο (single body case). Πιο συγκεκριμένα, στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές των δυνάμεων F_x φαίνεται να μην διαφοροποιούνται σημαντικά και να συμπίπτουν με τις δυνάμεις F_x όπου το σώμα 1 ήταν μόνο του στο πεδίο. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις (διαγράμματα 8,9 και 11) οι τιμές των δυνάμεων F_x , για το "μεμονωμένο" σώμα 1 «single body case», είναι αρκετά μεγαλύτερες. Επιπλέον, σχεδόν σε όλα τα διαγράμματα των δυνάμεων F_x , οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων μετατοπίστηκαν σε μεγαλύτερες συχνότητες σε σύγκριση με την περίπτωση του ενός μόνο σώματος. Εξαίρεση σε αυτό, αποτελούν οι περιπτώσεις όπου οι αποστάσεις R_{12} ήταν ίσες με $4a$. Οι μέγιστες δυνάμεις εμφανίζονται σε ένα εύρος συχνοτήτων από $k_0 a = 0,83$ έως $1,13$ με το εύρος αυτό να μειώνεται σημαντικά, όσο αυξάνεται η εκκεντρότητα του μεσαίου σώματος.

Είναι γεγονός ότι, για έναν μόνο ελλειπτικό κύλινδρο που υποβάλλεται σε κύματα που διαδίδονται παράλληλα προς το διαμήκη άξονά του, η δύναμη F_y (sway force) είναι μηδέν λόγω συμμετρίας.

Ωστόσο, όσον αφορά τις συστοιχίες των ελλειπτικών κυλίνδρων οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις επάγουν δυνάμεις F_y (sway forces), με μεγέθη συγκρίσιμα με τα μεγέθη των δυνάμεων F_x (surge forces) όπως φαίνεται στα διαγράμματα 17-25 για τις διατάξεις 1,2 και 3.

Πίνακας 4: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_x και οι αντίστοιχες συχνότητες k_0a

		$\Delta 1 - b_1/a_1 = 0,99$		$\Delta 2 - b_1/a_1 = 0,50$		$\Delta 3 - b_1/a_1 = 0,25$	
		F_{x_max}	k_0a_x	F_{x_max}	k_0a_x	F_{x_max}	k_0a_x
Single body		3,42	0,80	1,44	0,96	0,63	1,07
5a	2-3	2,77	1,07	1,36	1,07	0,62	1,13
	3-2	2,77	1,07	1,36	1,07	0,62	1,13
6a	2-4	2,80	1,05	1,36	1,05	0,62	1,11
7a	2-5	2,79	1,04	1,36	1,05	0,62	1,11
	3-4	3,24	0,94	1,43	1,02	0,63	1,09
8a	2-6	2,78	1,05	1,36	1,07	0,62	1,13
	3-5	3,24	0,93	1,42	0,98	0,63	1,09
9a	2-7	2,79	1,05	1,36	1,07	0,62	1,13
	3-6	3,22	0,93	1,42	1,02	0,63	1,11
	4-5	<u>3,47</u>	<u>0,85</u>	<u>1,45</u>	<u>0,94</u>	<u>0,63</u>	<u>1,05</u>
10a	2-8	2,79	1,05	1,36	1,05	0,62	1,13
	3-7	3,21	0,94	1,42	1,02	0,63	1,09
	4-6	<u>3,43</u>	<u>0,83</u>	<u>1,44</u>	<u>0,96</u>	<u>0,63</u>	<u>1,07</u>

Στα διαγράμματα 17-25, οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις είναι εμφανείς και ενίοτε ισχυρές, καθώς οι δυνάμεις F_y παρουσιάζουν αιχμηρές ενισχύσεις. Αυτές οι ενισχύσεις εμφανίζονται με τη μορφή επαναλαμβανόμενων κορυφών στις σχετικές καμπύλες. Το συγκεκριμένο φαινόμενο συσχετίζεται στενά με ισχυρές υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες εκτός από την αύξηση της φόρτισης προκαλούν και ισχυρή αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας και μεταξύ των κυλίνδρων, και αποτελεί σαφή ένδειξη παγίδευσης κυμάτων (wave trapping) μεταξύ των κυλίνδρων. Η εμφάνιση ενισχύσεων στη φόρτιση είναι πιο εμφανής όταν οι αποστάσεις R_{12} στην διάταξη είναι ίσες με $4a$ (διαγράμματα 19, 22 και 25), καθώς οι αιχμηρές κορυφές είναι πιο έντονες.

Η μέγιστη φόρτιση απεικονίζεται στα διαγράμματα 10, 19, 28 και 37 και αντιστοιχεί στην περίπτωση της διάταξης 1, όπου οι αποστάσεις R_{12} , R_{13} , και R_{23} είναι ίσες με $4a$, $5a$ και $9a$ αντίστοιχα. Αυτή η

παρατήρηση υποδηλώνει ότι τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης είναι πολύ σημαντικά ακόμα και αν η απόσταση μεταξύ των σωμάτων είναι αρκετά μεγάλη.

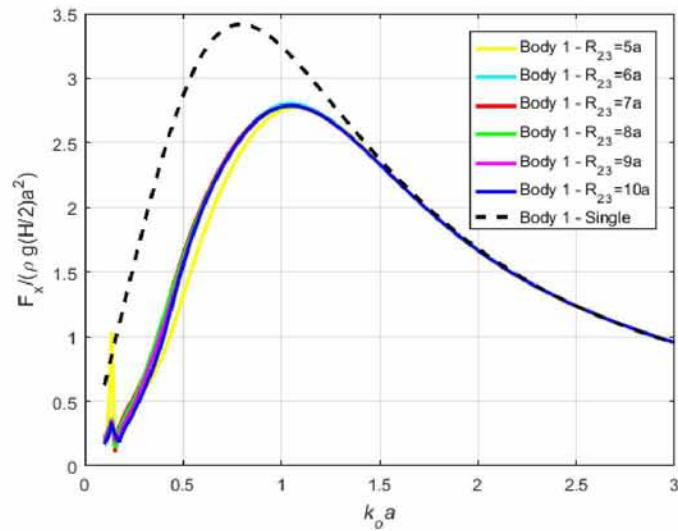
Μια σημαντική παρατήρηση είναι, ότι η αύξηση της εκκεντρότητας επιφέρει μείωση της ασκούμενης φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, όσο μειώνεται ο λόγος b/a , τόσο περίπου μειώνονται και οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x και των ροπών M_y , στις διατάξεις 1, 2 και 3.

Πίνακας 5: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_y και οι αντίστοιχες συχνότητες k_0a

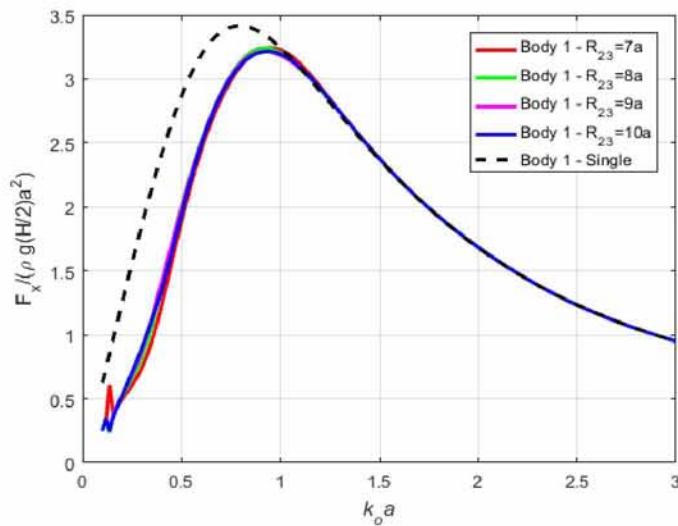
		$\Delta 1 - b_1/a_1 = 0,99$		$\Delta 2 - b_1/a_1 = 0,50$		$\Delta 3 - b_1/a_1 = 0,25$	
		F_{y_max}	k_0a_y	F_{y_max}	k_0a_y	F_{y_max}	k_0a_y
5a	2-3	2,00	1,46	1,98	1,33	1,21	1,27
	3-2	2,00	1,46	1,98	1,33	1,21	1,27
6a	2-4	2,16	1,09	1,75	1,04	0,95	1,02
7a	2-5	1,51	0,47	1,09	1,46	0,73	1,42
	3-4	2,63	1,38	2,30	1,33	1,33	1,29
8a	2-6	1,54	0,41	1,23	1,22	0,77	1,20
	3-5	2,72	0,85	1,80	0,82	1,09	1,24
9a	2-7	1,38	0,38	1,03	1,07	0,66	1,05
	3-6	2,84	1,44	2,18	1,37	0,98	1,33
	4-5	3,88	1,05	2,33	1,04	1,32	1,02
	2-8	1,12	0,34	0,83	1,33	0,75	1,90
10a	3-7	1,92	1,31	2,05	1,29	1,36	1,27
	4-6	2,72	1,00	2,07	0,98	1,26	0,96

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι για τις υψηλές τιμές χωρικής συχνότητας κύματος k_0 , οι δυνάμεις F_x μειώνονται προοδευτικά, σε αντίθεση με τις δυνάμεις F_y που ακολουθούν μια αυξητική τάση, ωστόσο όμως, και αυτές μειώνονται σημαντικά καθώς οι τιμές της χωρικής συχνότητας κύματος k_0 φτάνουν στο μέγιστο όριο του εύρους που εξετάστηκε.

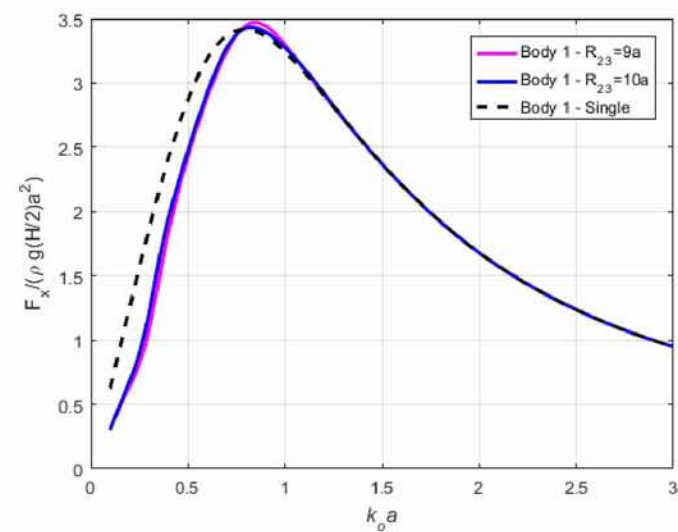
Τέλος, όπως αναμενόταν, το μοτίβο για τις ροπές M_x (roll moments), διαγράμματα 26-34, παρέχεται από τις δυνάμεις F_y (διαγράμματα 17-25) και κατ' αναλογία το μοτίβο για τις ροπές M_y (pitch moments), διαγράμματα 35-43, παρέχεται από τις δυνάμεις F_x (διαγράμματα 8-16).



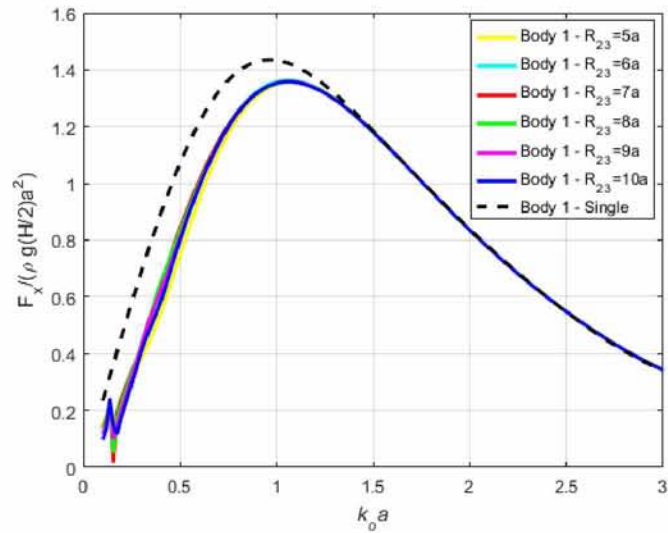
Διάγραμμα 8: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



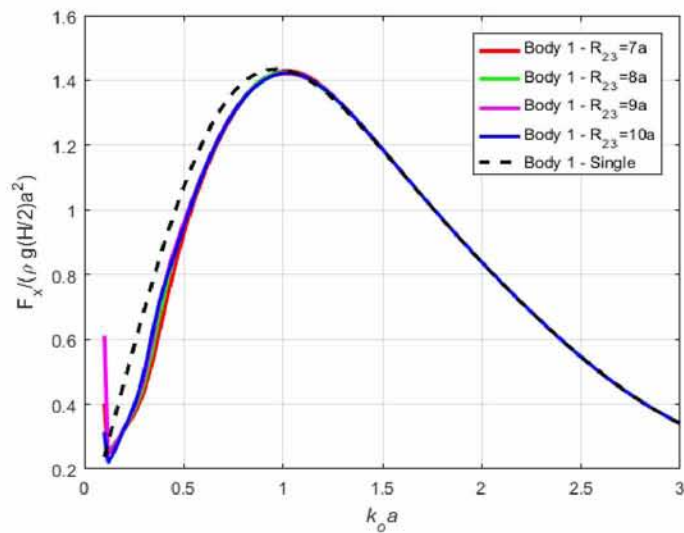
Διάγραμμα 9: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



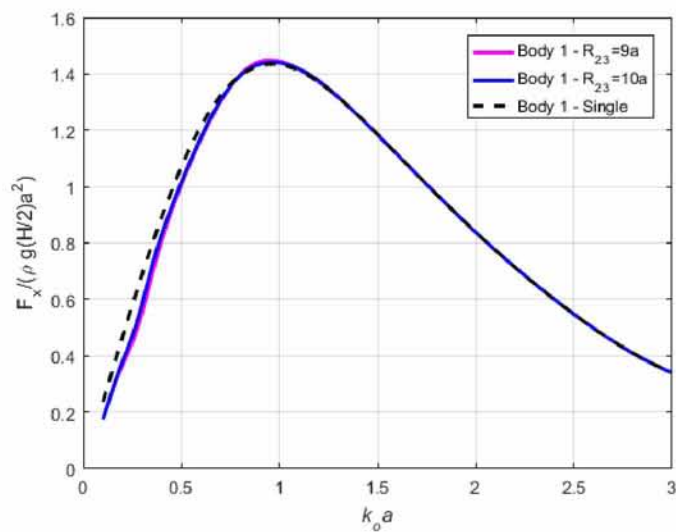
Διάγραμμα 10: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



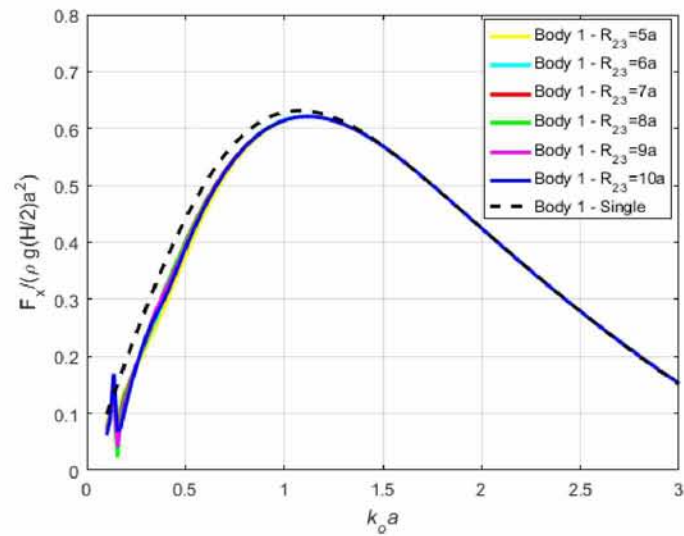
Διάγραμμα 11: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



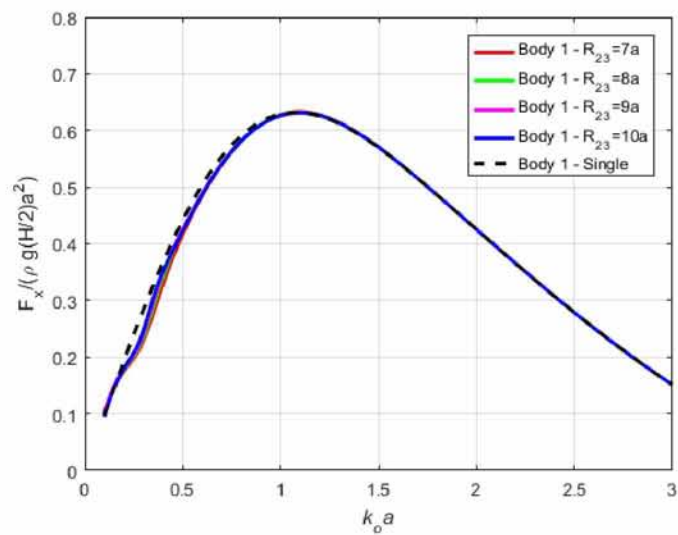
Διάγραμμα 12: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



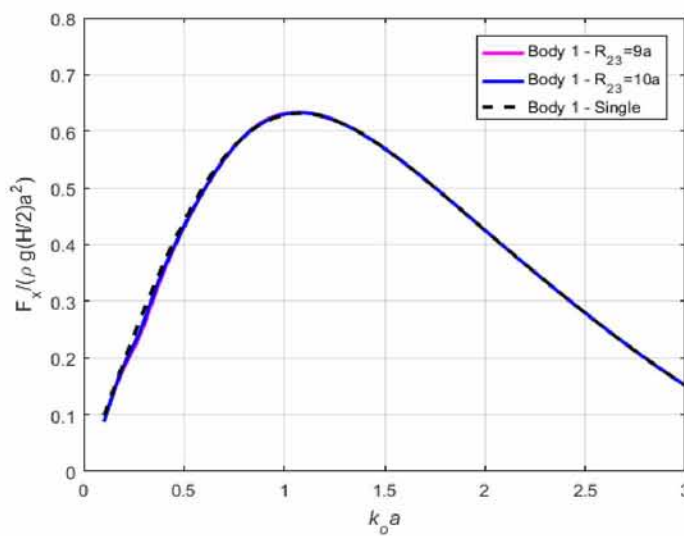
Διάγραμμα 13: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



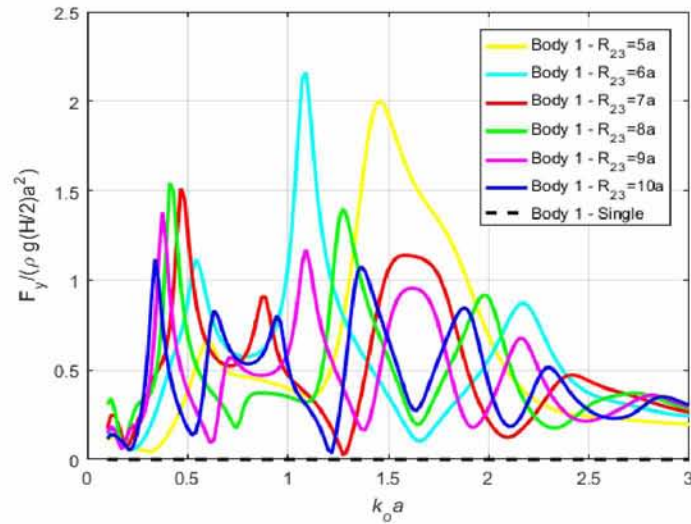
Διάγραμμα 14: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



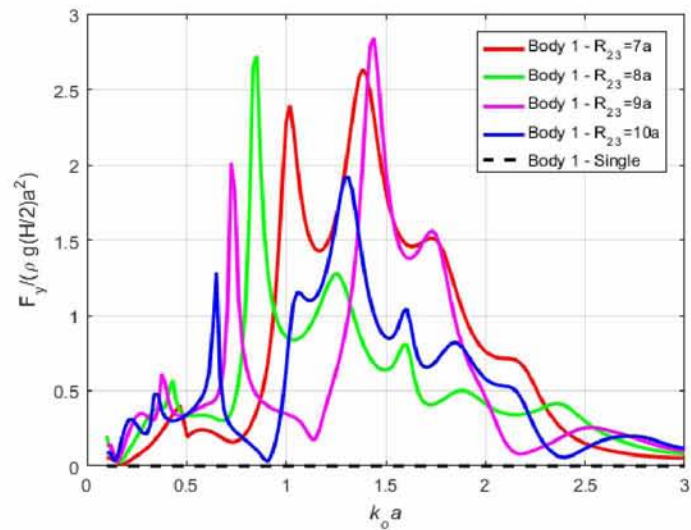
Διάγραμμα 15: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



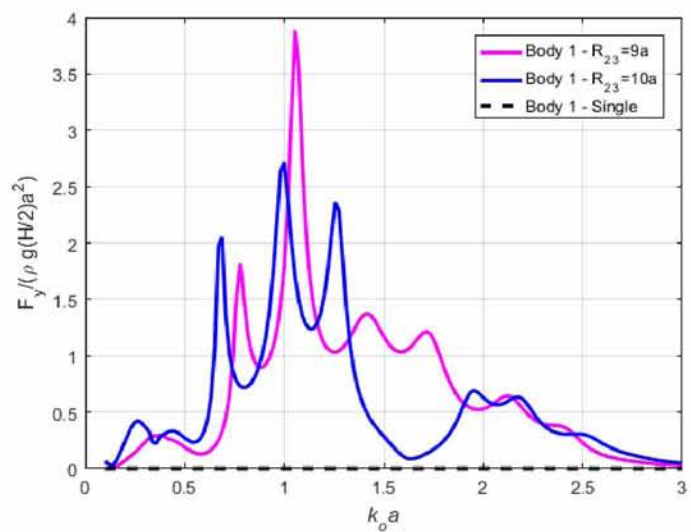
Διάγραμμα 16: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



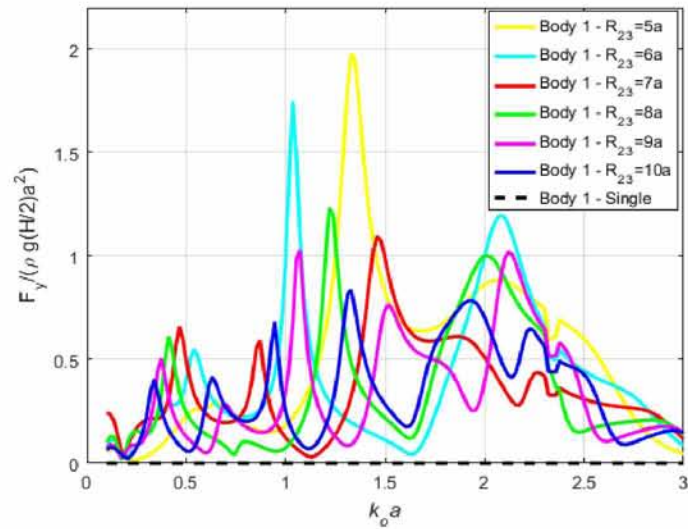
Διάγραμμα 17: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



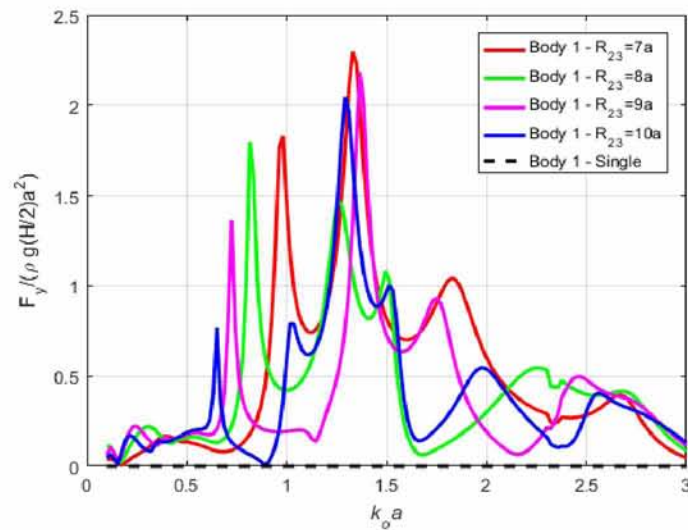
Διάγραμμα 18: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



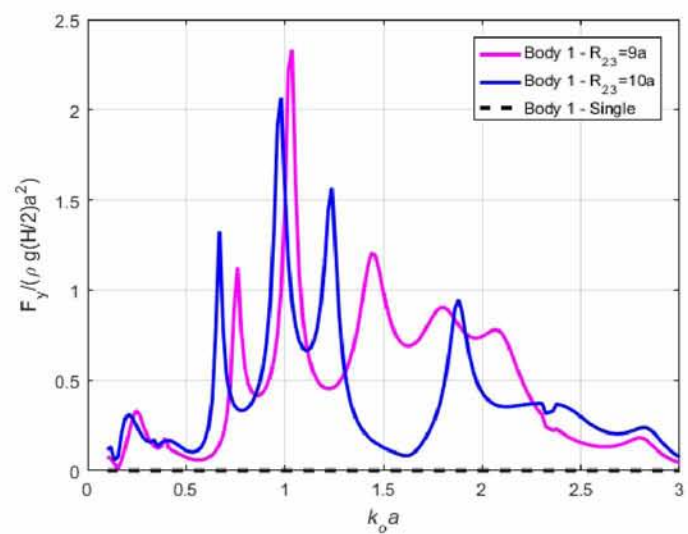
Διάγραμμα 19: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



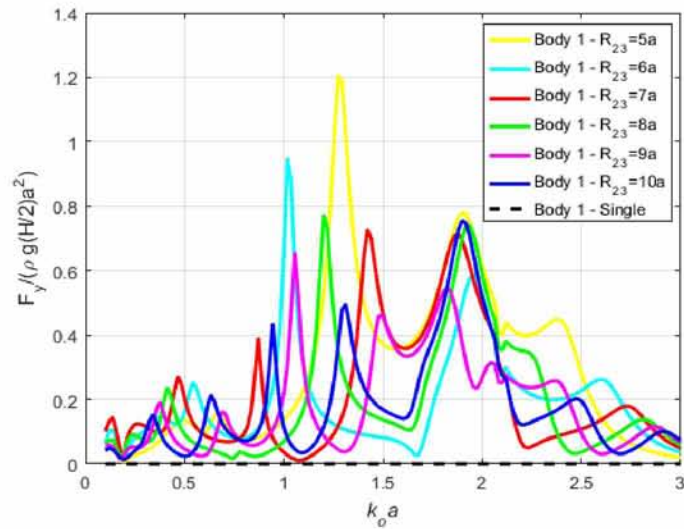
Διάγραμμα 20: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



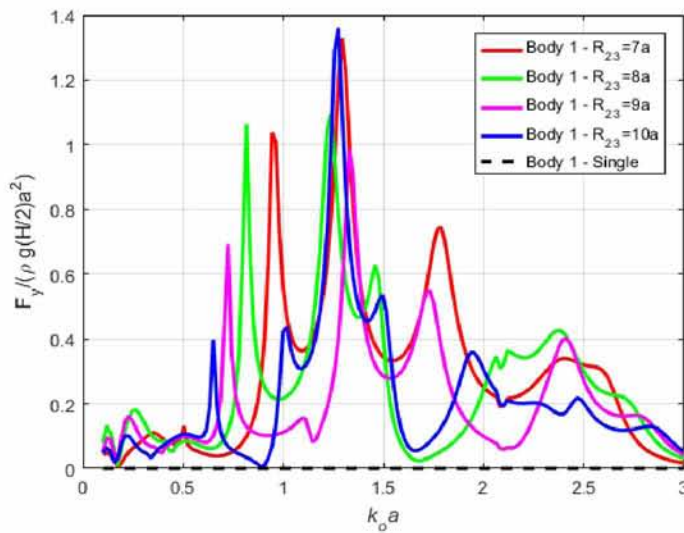
Διάγραμμα 21: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



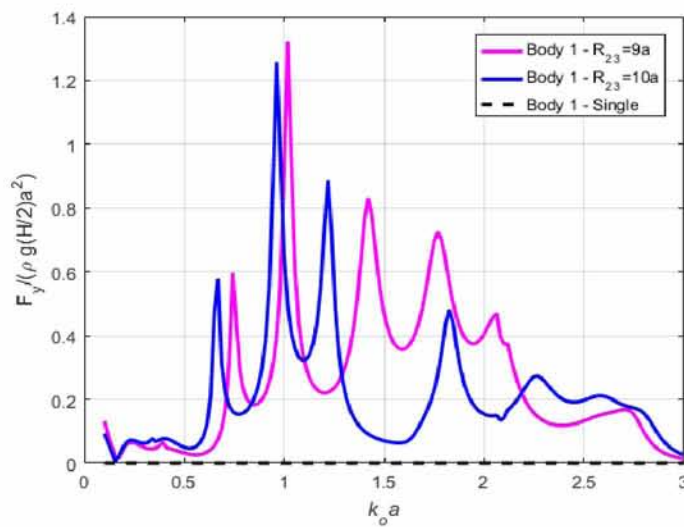
Διάγραμμα 22: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



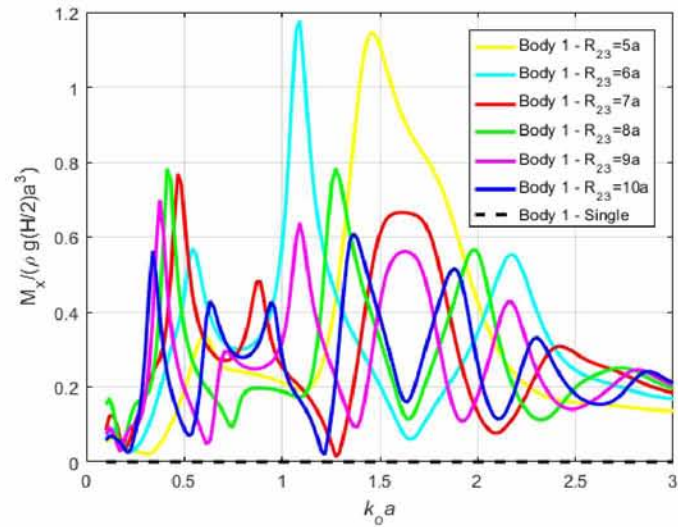
Διάγραμμα 23: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



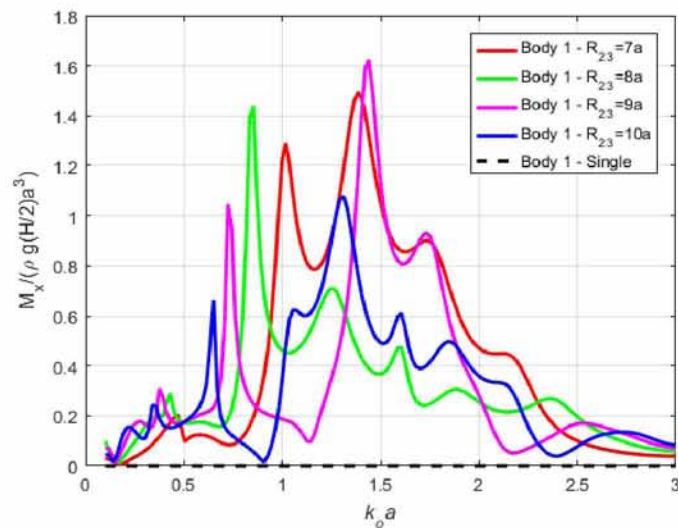
Διάγραμμα 24: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



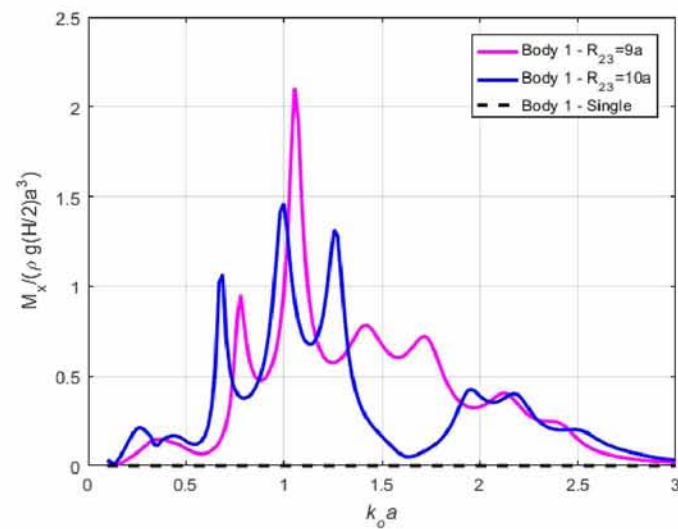
Διάγραμμα 25: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



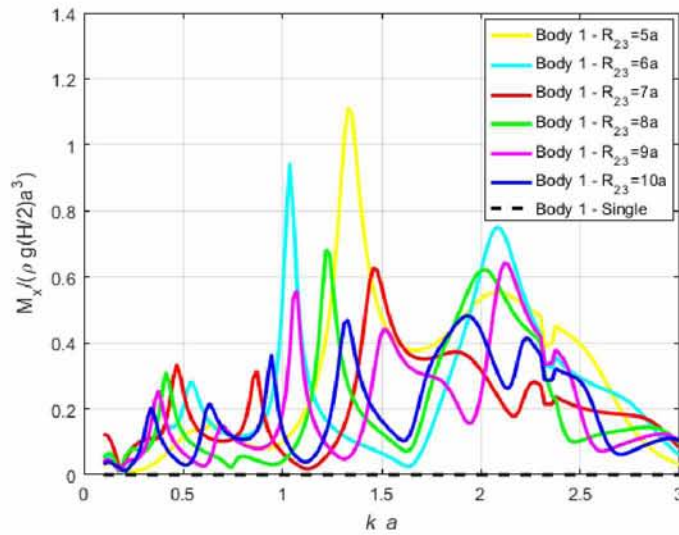
Διάγραμμα 26: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



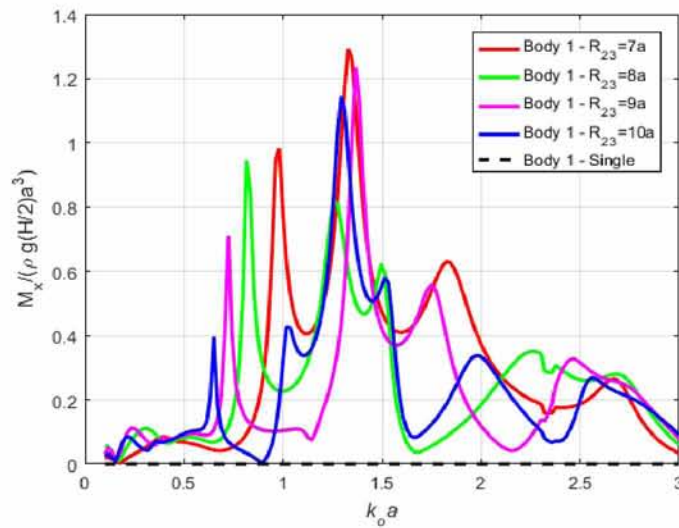
Διάγραμμα 27: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



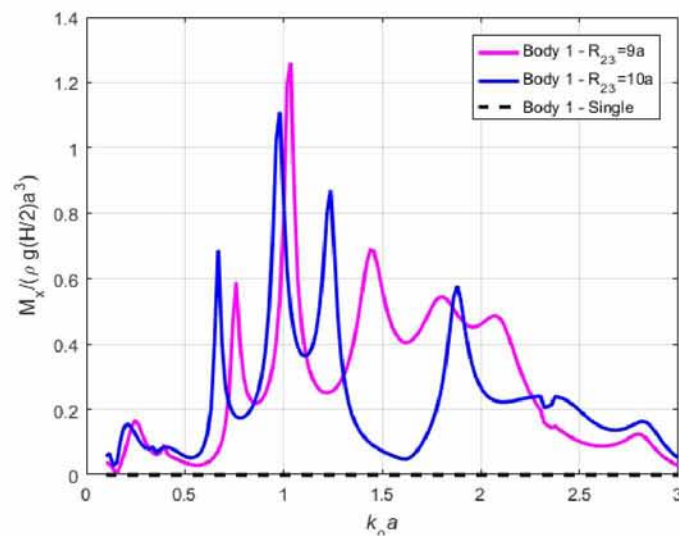
Διάγραμμα 28: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



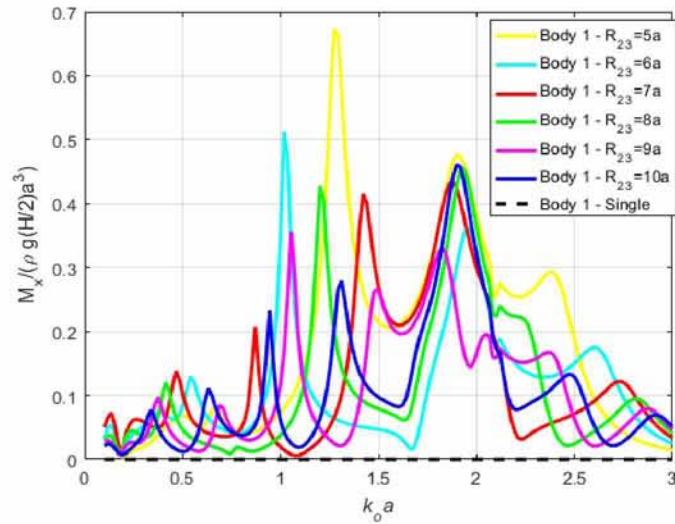
Διάγραμμα 29: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



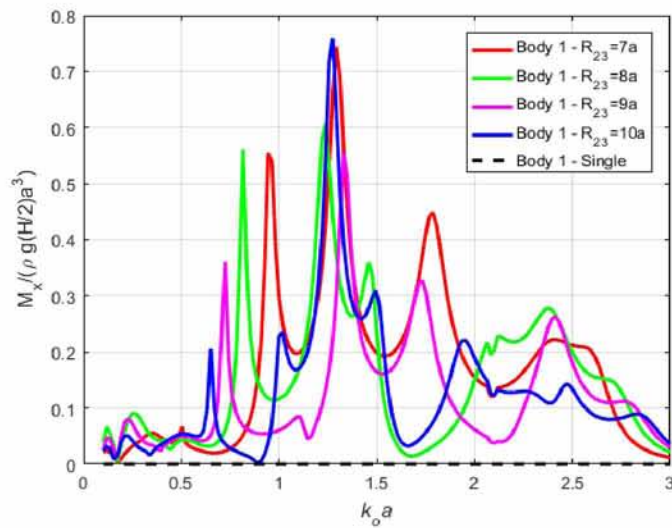
Διάγραμμα 30: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



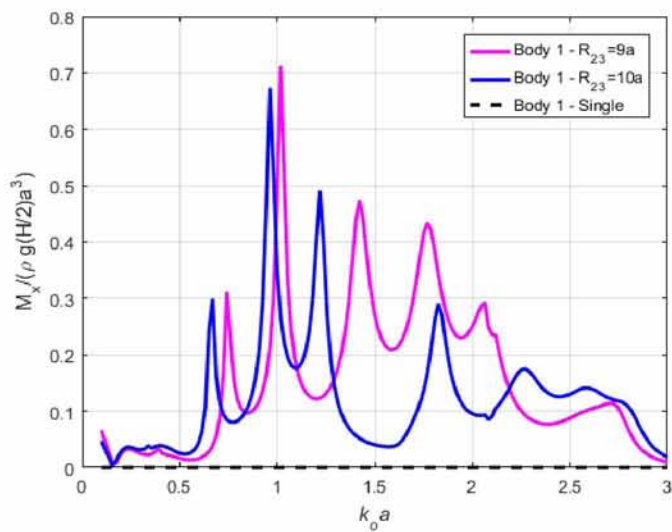
Διάγραμμα 31: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



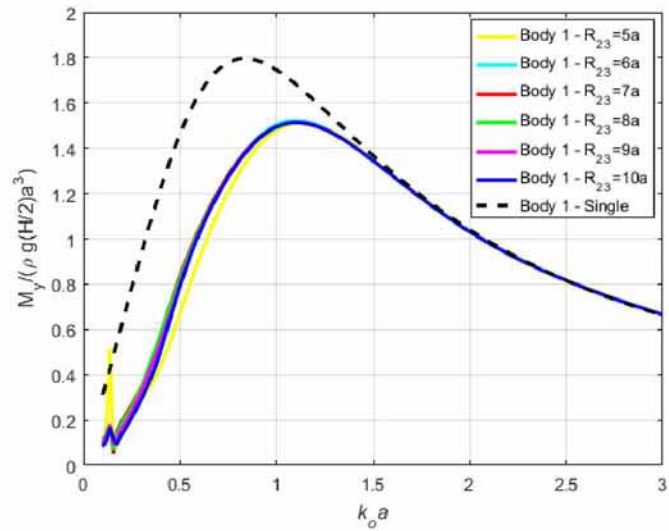
Διάγραμμα 32: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



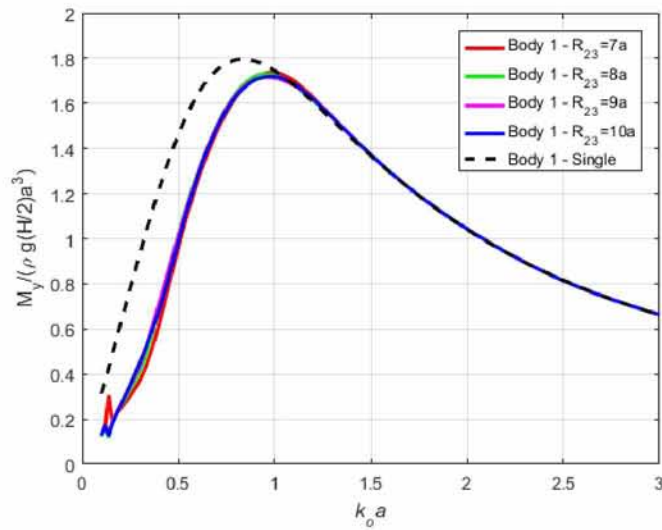
Διάγραμμα 33: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



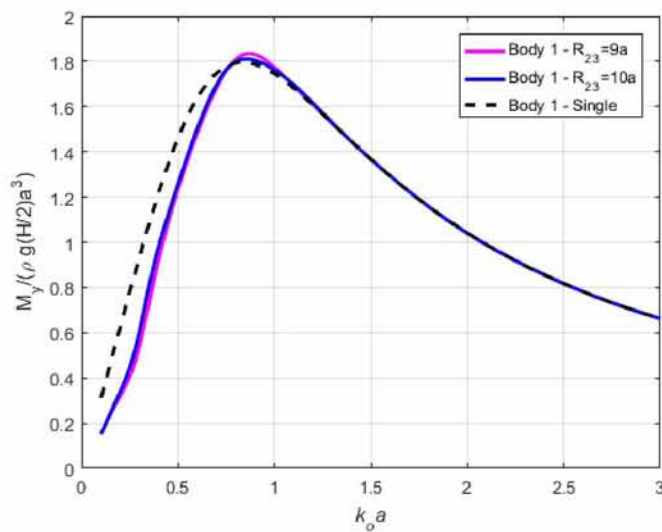
Διάγραμμα 34: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



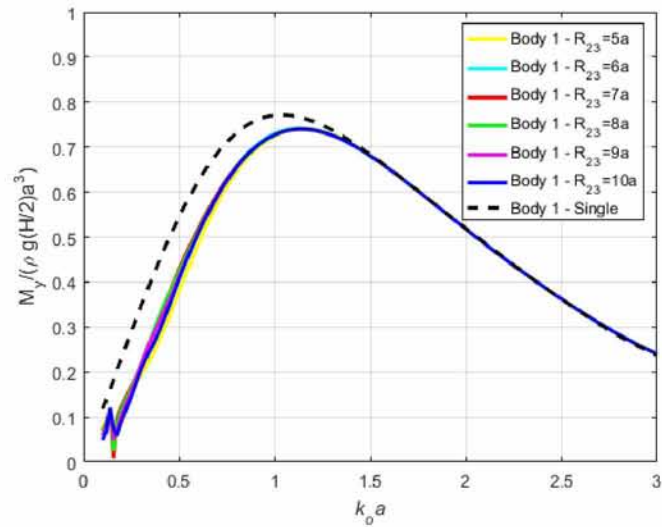
Διάγραμμα 35: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



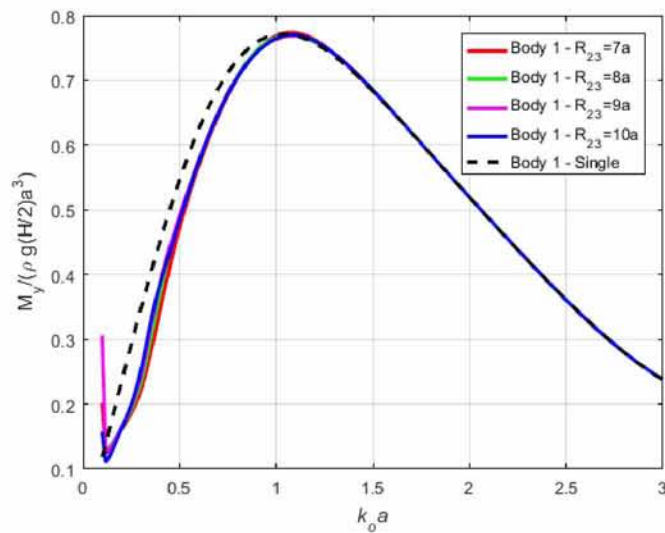
Διάγραμμα 36: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



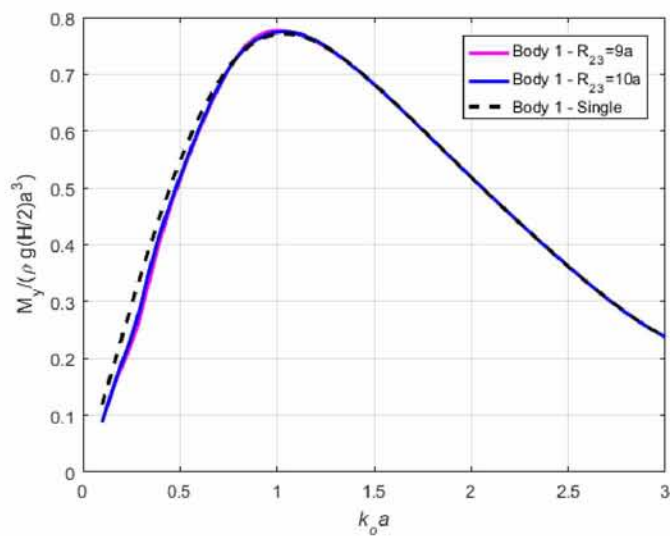
Διάγραμμα 37: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$



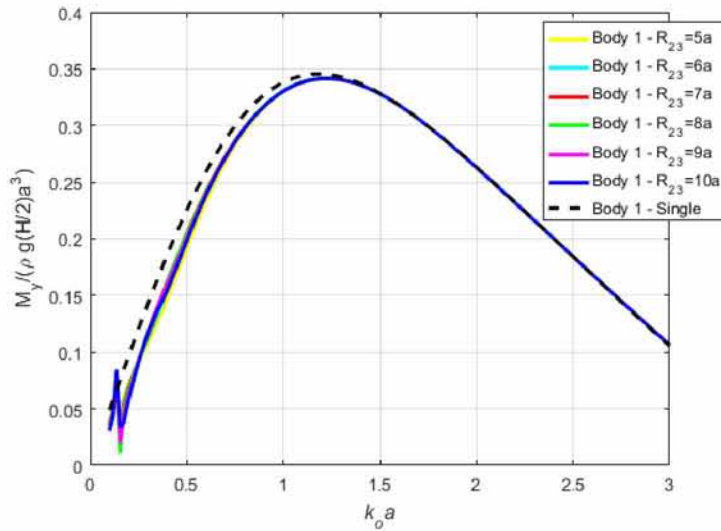
Διάγραμμα 38: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



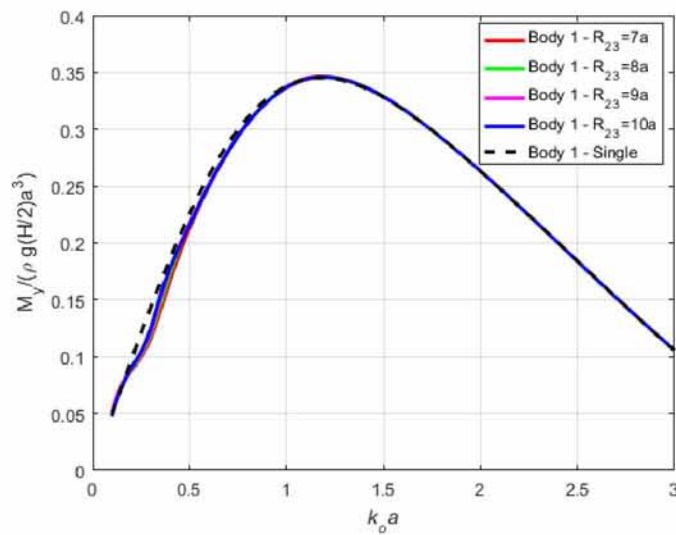
Διάγραμμα 39: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



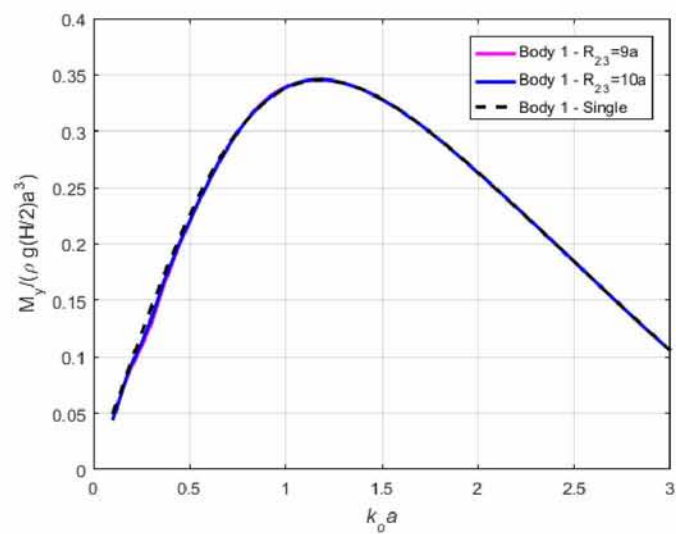
Διάγραμμα 40: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



Διάγραμμα 41: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



Διάγραμμα 42: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$



Διάγραμμα 43: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$

Η σχηματική παράσταση της διάταξης 4 δίνεται από το σχήμα 18. Η διαφορετικότητα στον προσανατολισμό του μεσαίου σώματος (body 1), δεδομένου ότι, ο πρωτεύων άξονας a είναι κάθετος ως προς τον οριζόντιο άξονα X , επιφέρει και έντονες διαφορές στην φόρτιση που ασκείται στα σώματα τις συστοιχίας. Η υδροδυναμική φόρτιση, που ασκείται στην διάταξη 4, εξετάζεται στην παρούσα μελέτη με την βοήθεια των διαγραμμάτων 44-55.

Οι καμπύλες διακύμανσης των δυνάμεων, παράλληλων προς τον άξονα διάδοσης των κυμάτων, F_x παρουσιάζουν πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Εδώ, οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις είναι πολύ δραστηρές, ενώ είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε την εμφάνιση αιχμηρών κορυφών στις σχετικές καμπύλες της δύναμης F_x και τη ροπής M_y , όπως αυτές των καμπύλων των δυνάμεων F_y , για τιμές της συχνότητας k_0 μικρότερες από 1,5. Ωστόσο, στη συνέχεια για μεγαλύτερες τιμές της χωρικής συχνότητας, η κατανομή των δυνάμεων F_x , ομαλοποιείται και πλησιάζει την κατανομή που αντιστοιχεί στην περίπτωση του μεμονωμένου σώματος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, η μέγιστη φόρτιση εμφανίζεται στις περιπτώσεις όπου το μεσαίο σώμα βρίσκεται πλησιέστερα στο ένα εκ των δύο μακρόστενων ελλειπτικών σωμάτων που οριοθετούν το κανάλι ($R_{12}=2a$).

Αντίστοιχα, και η κατανομή των εξεταζόμενων δυνάμεων κατά τον άξονα y , για τις περιπτώσεις της διάταξης 4, διαφέρει αισθητά σε σχέση με αυτές των προηγούμενων διατάξεων που εξετάστηκαν. Κύριο χαρακτηριστικό τους αποτελεί το γεγονός ότι οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις περιορίζονται στις χαμηλές τιμές της χωρικής συχνότητας κύματος k_0 , με τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y να αντιστοιχούν σε συχνότητες από 0,118 έως 0,155.

Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση, όπου το μεσαίο σώμα είναι τοποθετημένο συμμετρικά στη συστοιχία με το κέντρο του να ισαπέχει από τα κέντρα των άλλων δυο σωμάτων ($R_{12}=R_{13}=4a$ & $R_{23}=8a$). Λόγω της συμμετρικής τοποθέτησης των κυλίνδρων σε σχέση με τη γωνία διάδοσης των κυμάτων, θα αναμενόταν η δύναμη κατά τη διεύθυνση y (sway force) καθώς και η ροπή γύρω από τον άξονα (roll moment), δεδομένου ότι έχουν παρόμοιες παραλλαγές κατά το εύρος των εξεταζόμενων συχνοτήτων, να είναι ίσες με μηδέν. Εδώ, κάτι τέτοιο δεν ισχύει (βλ. διάγραμμα 49,52) και σίγουρα οι επιδράσεις των υδροδυναμικών φαινομένων σε αυτή τη διάταξη πρέπει να διερευνηθούν σε περαιτέρω.

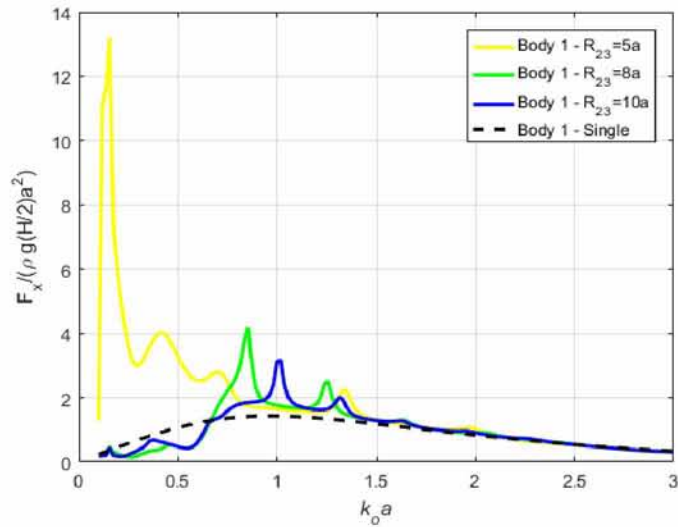
Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_x , F_y και οι αντίστοιχες συχνότητες k_{0a}

		$\Delta 4 - b_1/a_1 = 0,50$			
		F_{x_max}	ka_{x_max}	F_{y_max}	Ka_{y_max}
Single body		1,44	0,96	-	-
5a	2-3	<u>13,20</u>	<u>0,155</u>	<u>1,30</u>	<u>0,118</u>
	3-2	<u>13,07</u>	0,155	1,15	0,118
8a	2-6	<u>4,19</u>	<u>0,85</u>	<u>1,46</u>	<u>0,155</u>
	3-5	3,11	0,83	0,42	0,155
	4-4	3,79	0,155	0,40	0,155
10a	2-8	<u>3,17</u>	<u>1,02</u>	<u>2,30</u>	<u>0,155</u>
	3-7	<u>3,18</u>	0,67	0,33	0,155
	4-6	2,15	0,34	0,25	0,155

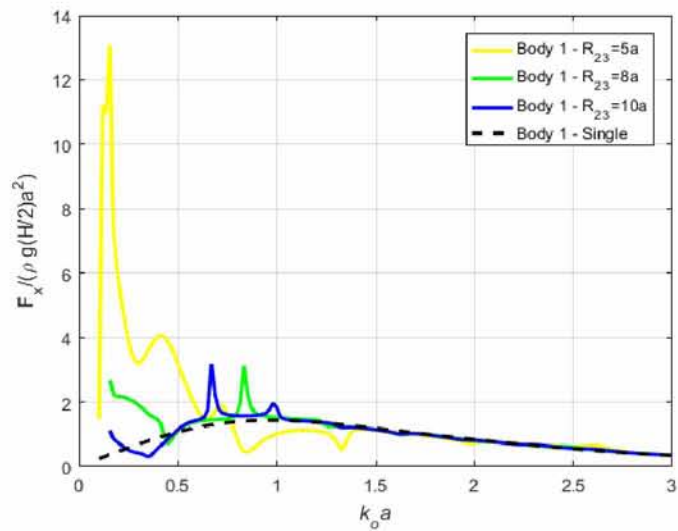
Επιπλέον, εξετάζοντας τον ανωτέρω πίνακα, παρατηρείται ότι για τις περιπτώσεις όπου $R_{12}=4a$, η φόρτιση που υφίσταται το μεσαίο σώμα της διάταξης 4 μειώνεται, εν αντιθέσει με τις άλλες διατάξεις, όπου για τις αντίστοιχες περιπτώσεις, λαμβάνουμε κάποιες από τις μέγιστες τιμές. Στην προκειμένη περίπτωση οι μέγιστες τιμές των ασκούμενων δυνάμεων αντιστοιχούν στις καμπύλες των διαγραμμάτων 44 και 47, όπου $R_{12}=2a$.

Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων που αφορούν την διάταξη 4, από τα υπόλοιπα αποτελέσματα που εξάχθηκαν, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι σκόπιμο να μην συγκριθούν "ποσοτικά" με αυτά των άλλων διατάξεων, και ενισχύεται η απαίτηση για την περαιτέρω διερεύνηση των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων στην διάταξη αυτή.

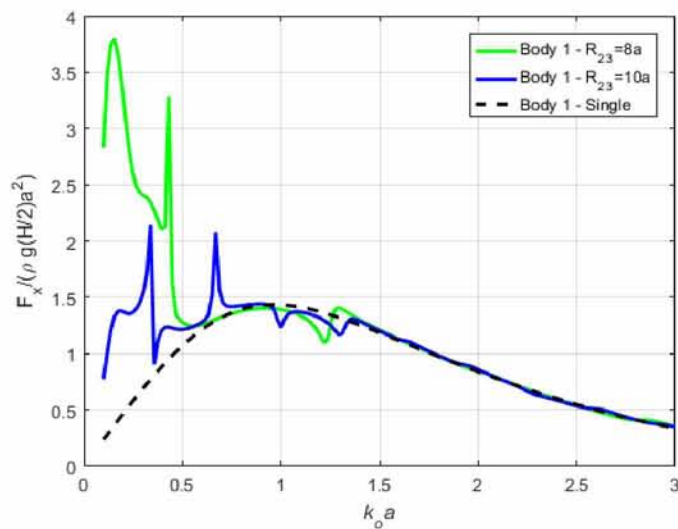
Τέλος, όπως αναμενόταν, το μοτίβο για τις ροπές M_x (roll moments), διαγράμματα 50-52, παρέχεται από τις δυνάμεις F_y (διαγράμματα 47-49) και κατ'αναλογία το μοτίβο για τις ροπές M_y (pitch moments), διαγράμματα 53-55, παρέχεται από τις δυνάμεις F_x (διαγράμματα 44-46).



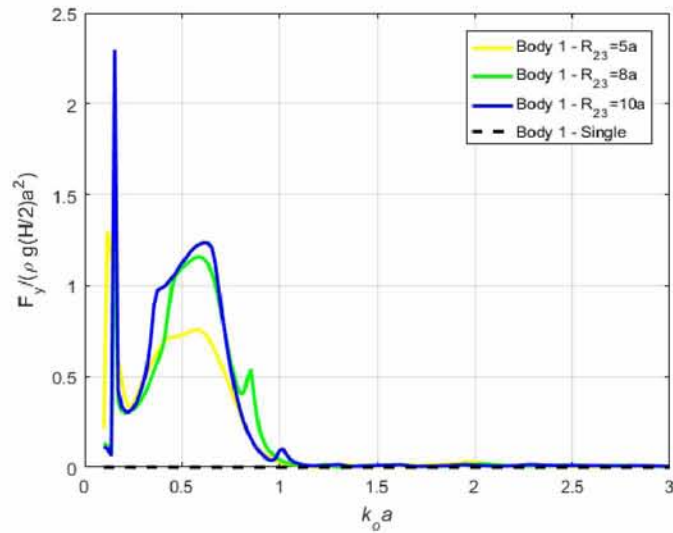
Διάγραμμα 44: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



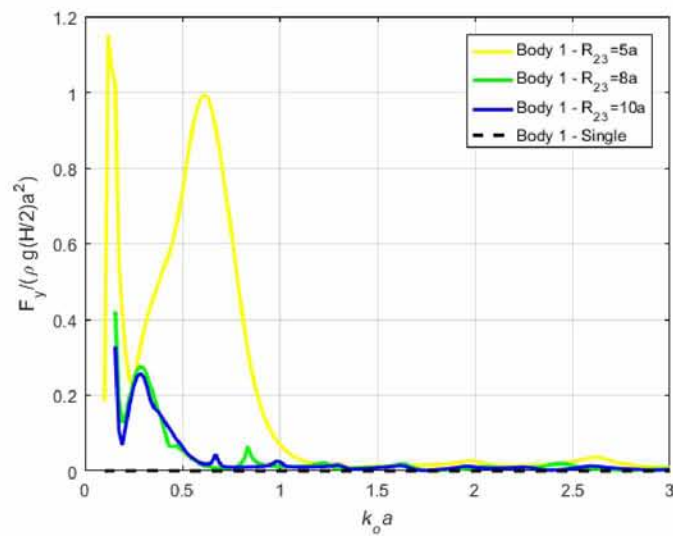
Διάγραμμα 45: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



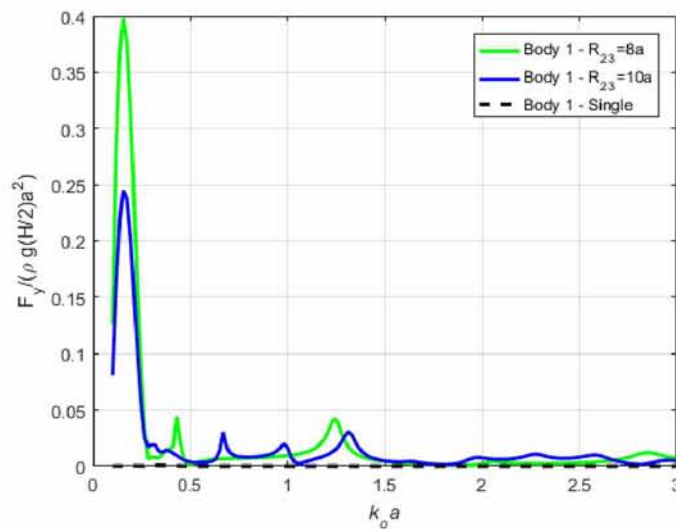
Διάγραμμα 46: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



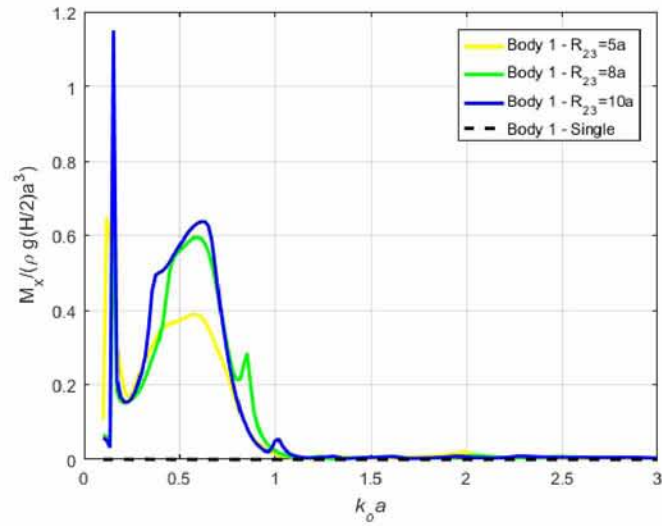
Διάγραμμα 47: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



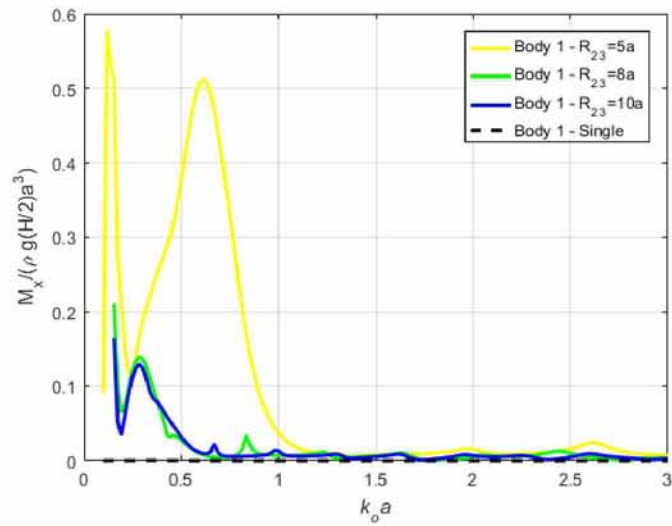
Διάγραμμα 48: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



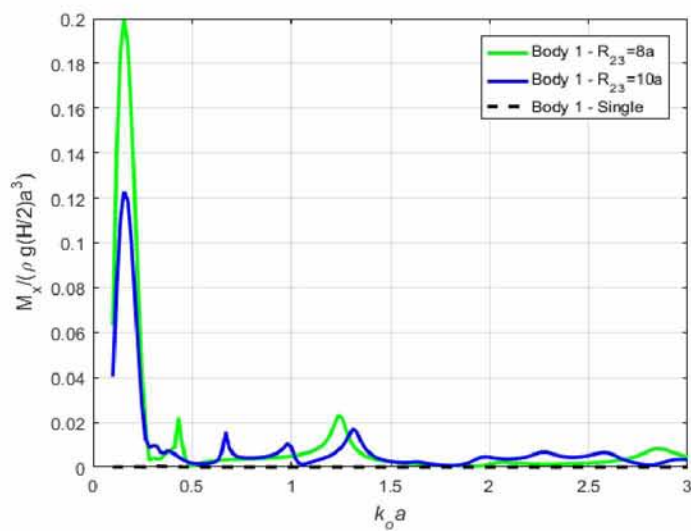
Διάγραμμα 49: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



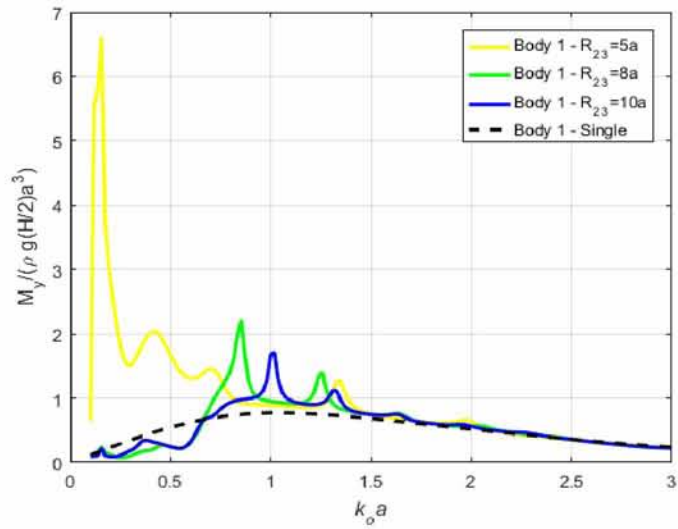
Διάγραμμα 50: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



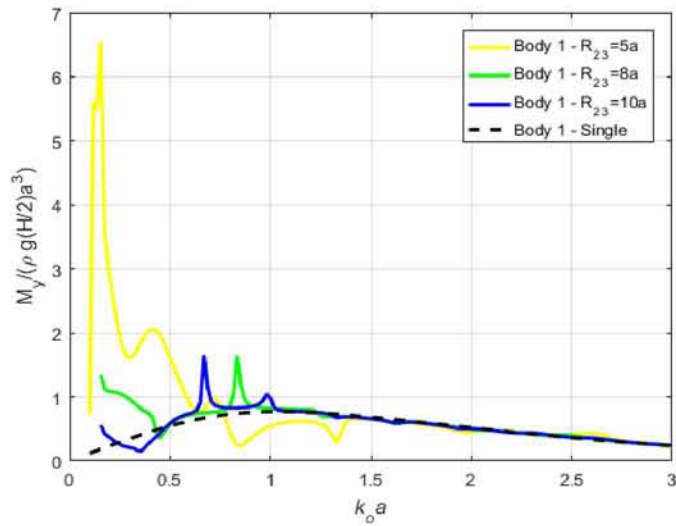
Διάγραμμα 51: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



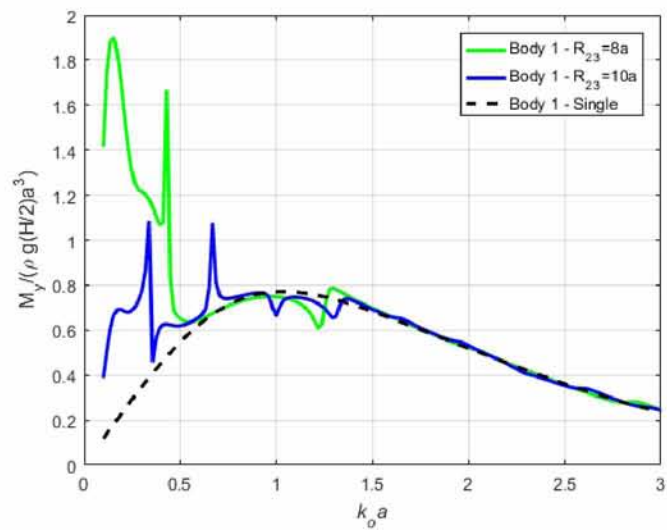
Διάγραμμα 52: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



Διάγραμμα 53: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



Διάγραμμα 54: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$



Διάγραμμα 55: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$

Στην συνέχεια εξετάζεται η διάταξη 5, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 19. Τα μεγέθη των συνιστωσών της υδροδυναμικής φόρτισης για τις 2 περιπτώσεις της διάταξης 5 ($R_{14}=3a$ και $R_{14}=4a$) δίνονται από τα διαγράμματα 56-103. Η ύπαρξη ενός επιπλέον σώματος (body 4) στη συστοιχία, επιφέρει διαφορετική φόρτιση στα σώματα, αλλά συνολικά κάποια από τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με αυτά της διάταξης 2 για το πλήρες διάστημα των κυματικών συχνοτήτων. Αυτό εξηγείται εύκολα, λόγω της ίδιας εκκεντρότητας των σωμάτων ($b_1/a_1=0,50$). Χαρακτηριστικό αποτελεί ότι, οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x και F_y για το σώμα 1 και στις δύο περιπτώσεις της διάταξης 5, κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τις μέγιστες τιμές των αντίστοιχων δυνάμεων για το μεσαίο σώμα της διάταξης 2. Αντίστοιχα, ισχύει και για τις τιμές της χωρικής συχνότητας k_0 που σημειώνονται τα μέγιστα αυτά.

Πίνακας 7: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_x και οι αντίστοιχες συχνότητες k_0a

		$\Delta 5 - b_1/a_1 = 0,50 - R_{14}=3a$		$\Delta 5 - b_1/a_1 = 0,50 - R_{14}=4a$		$\Delta 2 - b_1/a_1 = 0,50$	
		F_{x_max}	ka_{x_max}	F_{x_max}	ka_{x_max}	F_{x_max}	ka_{x_max}
Single body		1,43	0,96	1,43	0,96	1,43	0,96
Body 4 present		1,36	0,85	1,36	0,85	-	-
5a	2-3	1,29	1,29	1,32	1,20	1,36	1,07
	3-2	1,29	1,29	1,32	1,20	1,36	1,07
8a	2-6	1,27	1,20	1,31	1,16	1,36	1,07
	3-5	1,41	0,82	1,37	1,15	1,42	0,98
	4-4	1,51	0,89	1,47	0,87	1,45	0,98
10a	2-8	1,28	0,94	1,30	1,22	1,36	1,05
	3-7	1,45	1,02	1,39	0,98	1,42	1,02
	4-6	1,50	0,98	1,42	0,96	1,44	0,96

Η μέγιστη φόρτιση που υφίσταται το σώμα 1 κατά τον άξονα διάδοσης των κυμάτων είναι μικρότερη σε σχέση την φόρτιση του μεμονωμένου σώματος, εκτός από κάποιες περιπτώσεις (βλ. πίν. 7). Αντίθετα, το σώμα 4 υφίσταται μεγαλύτερη φόρτιση στην ίδια διεύθυνση, τόσο σε σχέση με το μεμονωμένο σώμα, όσο και σε σχέση με το σώμα 1 (βλ. πίν. 8). Αυτό, εξηγείται από τη θέση των σωμάτων στη διάταξη, καθώς το σώμα 4 βρίσκεται μπροστά από το σώμα 1, με αποτέλεσμα να το "σκιάζει-προστατεύει". Οι μέγιστες τιμές λαμβάνουν χώρα σε ένα εύρος συχνοτήτων k_0 από 0,87 έως 1,29, με την πλειοψηφία των χωρικών συχνοτήτων αυτών να είναι μεγαλύτερες από την μονάδα, ενώ για το μεμονωμένο σώμα η συχνότητα k_0 για τη μέγιστη τιμή της δύναμης είναι ίση με 0,96.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ασκούμενες δυνάμεις F_x και στα δυο σώματα ακολουθούν την κατανομή των αντίστοιχων δυνάμεων στη περίπτωση, όπου τα σώματα 1 και 4, βρίσκονται μόνα τους στο υδροδυναμικό πεδίο. Παρατηρείται, όμως, ότι οι αναφερόμενες καμπύλες δεν είναι “ομαλές”, αλλά παρουσιάζουν διακυμάνσεις, για τιμές της συχνότητας k_0 μεγαλύτερες από την μονάδα. Η μεταβλητότητα αυτή είναι ισχυρότερη στις καμπύλες που αφορούν το σώμα 4.

Πίνακας 8: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_x και οι αντίστοιχες συχνότητες $k_0 a$

		$\Delta 5 - b_4/a_4 = 0,50 - R_{14}=3a$		$\Delta 5 - b_4/a_4 = 0,50 - R_{14}=4a$	
		F_{x_max}	ka_{x_max}	F_{x_max}	ka_{x_max}
Single body		1,43	0,96	1,43	0,96
Body 1 present		1,55	0,74	1,55	0,74
5a	2-3	1,64	0,89	1,42	0,74
	3-2	1,64	0,89	1,42	0,74
8a	2-6	1,67	0,87	1,47	0,72
	3-5	1,78	0,82	1,62	0,82
	4-4	<u>2,01</u>	<u>0,89</u>	<u>1,86</u>	<u>0,87</u>
10a	2-8	1,69	0,94	1,46	0,72
	3-7	1,85	1,02	1,47	0,74
	4-6	<u>1,94</u>	<u>0,98</u>	<u>1,60</u>	<u>0,67</u>

Η αλληλεπίδραση των κυμάτων με τα σώματα που αποτελούν την συστοιχία, αποτυπώνεται εντονότερα στις καμπύλες διακύμανσης των δυνάμεων F_y , οι οποίες παρουσιάζουν πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Στις σχετικές καμπύλες που ακολουθούν, (διαγρ. 62-67 & 86-91) παρατηρείται ότι το σώμα 1 δεν προστατεύεται πραγματικά από το σώμα 4 (σχήμα 19), καθώς το μέγεθος της δύναμης που προκαλείται σε αυτό είναι αρκετά σημαντικό. Επιπρόσθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται πως η ύπαρξη του σώματος 4, ενισχύει την ασκούμενη φόρτιση στο σώμα 1 (βλ. πιν. 9). Η κατανομή των ασκούμενων δυνάμεων F_y στο σώμα 1 της διάταξης 5 μοιάζει αρκετά με την κατανομή των δυνάμεων F_y του ίδιου σώματος της διάταξης 2, και η παρουσία αιχμηρών κορυφών είναι χαρακτηριστική. Από την άλλη πλευρά, το σώμα 4 υπόκειται και αυτό σε φαινόμενα υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης, ωστόσο αυτά δεν είναι τόσο έντονα όσο στο σώμα 1.

Εκτός από τις προφανείς ισχυρές υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις που υφίστανται τα εξεταζόμενα σώματα, τα γενικά συμπεράσματα που εξήχθησαν προηγουμένως για τις διατάξεις 1,2 και 3 ισχύουν και για την διάταξη 5. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για τις υψηλές τιμές χωρικής συχνότητας κύματος

k_0 , οι δυνάμεις F_x μειώνονται προοδευτικά, ενώ οι δυνάμεις F_y ακολουθούν ένα μοτίβο αυξομειώσεων σε όλο το εύρος των χωρικών συχνοτήτων κύματος k_0 που εξετάστηκε.

Όμοια με τα αποτελέσματα των προηγούμενων διατάξεων, το μοτίβο για τις ροπές M_x (διαγράμματα 68-73 & 92-97) παρέχεται από τις δυνάμεις F_y (διαγράμματα 62-67 & 86-91), και κατ' αναλογία το μοτίβο για τις ροπές M_y (διαγράμματα 74-79 & 98-103) παρέχεται από τις δυνάμεις F_x (διαγράμματα 56-61 & 80-85).

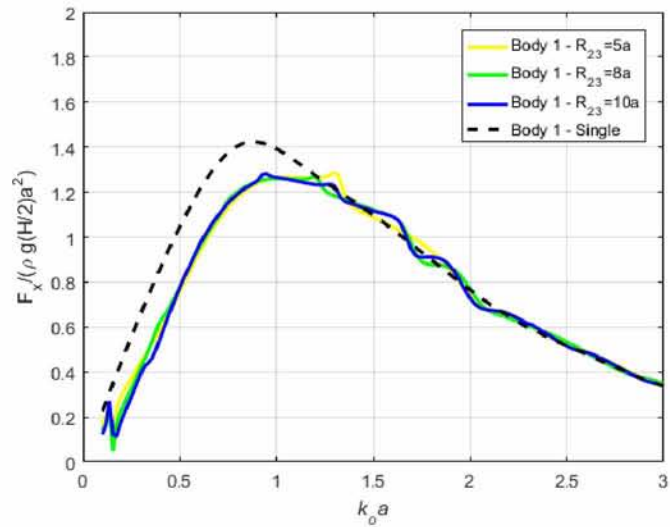
Πίνακας 9: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_y και οι αντίστοιχες συχνότητες k_{0a}

		$\Delta 5 - b_1/a_1 = 0,50 - R_{14}=3a$		$\Delta 5 - b_1/a_1 = 0,50 - R_{14}=4a$		$\Delta 2 - b_1/a_1 = 0,50$	
		F_{y_max}	ka_y	F_{y_max}	ka_y	F_{y_max}	ka_y
5a	2-3	1,82	1,33	2,04	1,33	1,98	1,33
	3-2	1,82	1,33	2,04	1,33	1,98	1,33
8a	2-6	1,21	2,01	1,25	2,01	1,23	1,22
	3-5	1,33	1,27	1,50	1,26	1,80	0,82
10a	2-8	0,94	1,94	1,01	1,94	0,83	1,33
	3-7	1,83	1,29	2,19	1,29	2,05	1,29
	4-6	1,23	0,98	1,68	0,98	2,07	0,98

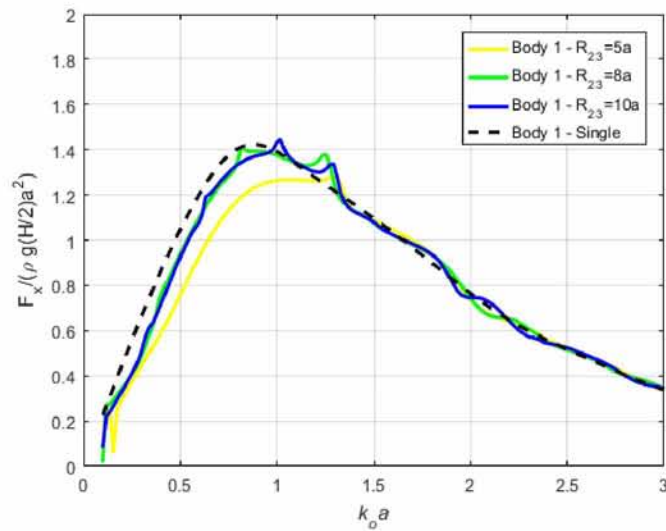
Πίνακας 10: Μέγιστες τιμές δυνάμεων F_y και οι αντίστοιχες συχνότητες k_{0a}

		$\Delta 5 - b_4/a_4 = 0,50 - R_{14}=3a$		$\Delta 5 - b_4/a_4 = 0,50 - R_{14}=4a$	
		F_{y_max}	ka_y	F_{y_max}	ka_y
5a	2-3	0,68	1,33	0,50	1,33
	3-2	0,68	1,33	0,50	1,33
8a	2-6	0,45	1,22	0,40	1,22
	3-5	0,81	0,82	0,88	0,82
10a	2-8	0,43	0,93	0,37	1,31
	3-7	1,00	0,61	0,88	0,63
	4-6	0,72	0,65	0,59	0,67

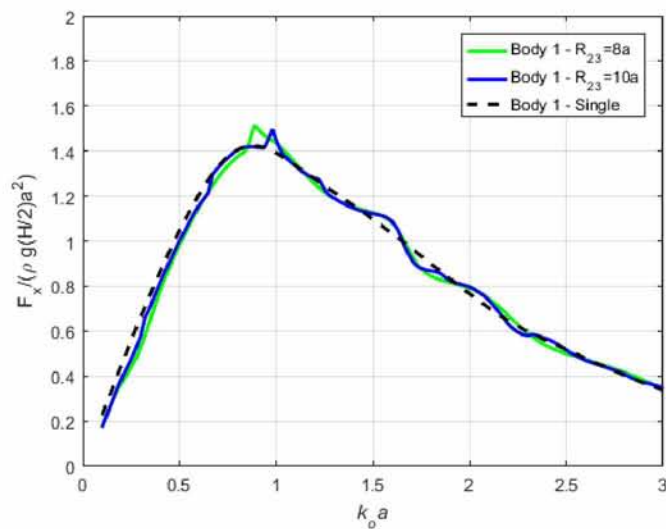
Στα διαγράμματα που ακολουθούν οι σειρές *single body* αναφέρονται στο εκάστοτε μεμονωμένο σώμα (body 1/body 4), αλλά στην ανάλυση έχει συνυπολογιστεί και η ύπαρξη του έτερου μεσαίου σώματος (body 4/body 1) αντίστοιχα στο πεδίο.



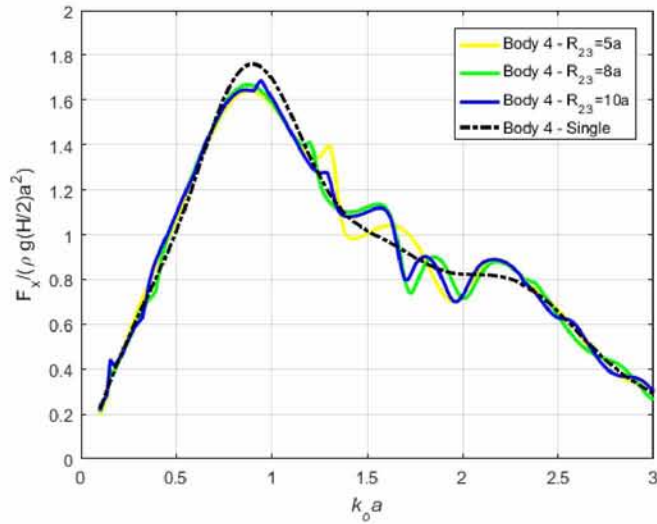
Διάγραμμα 56: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



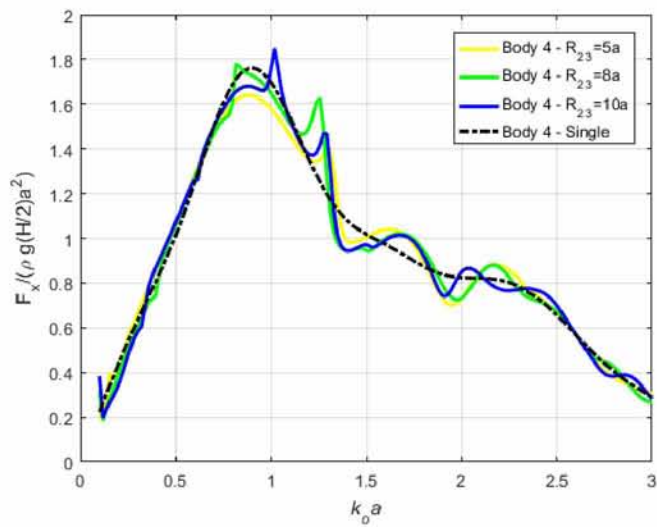
Διάγραμμα 57: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



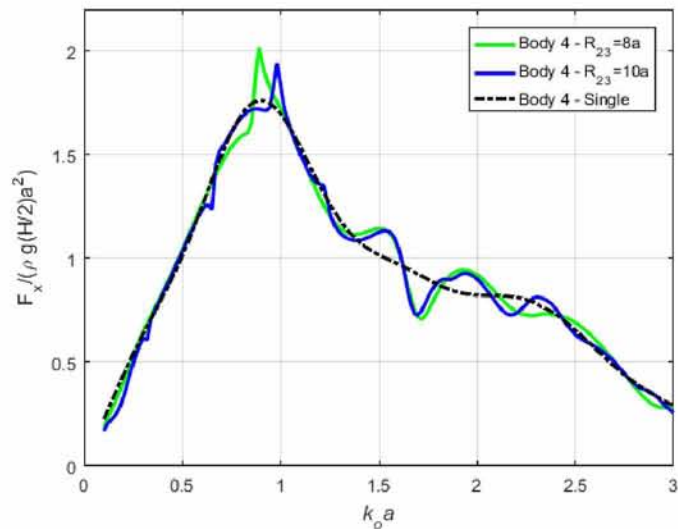
Διάγραμμα 58: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



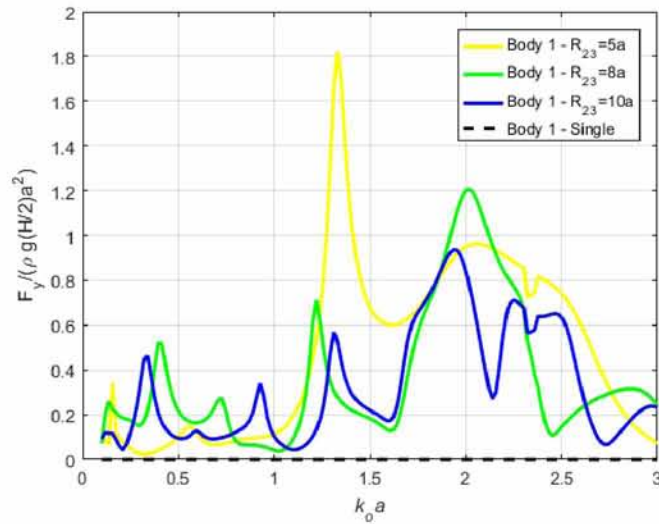
Διάγραμμα 59: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



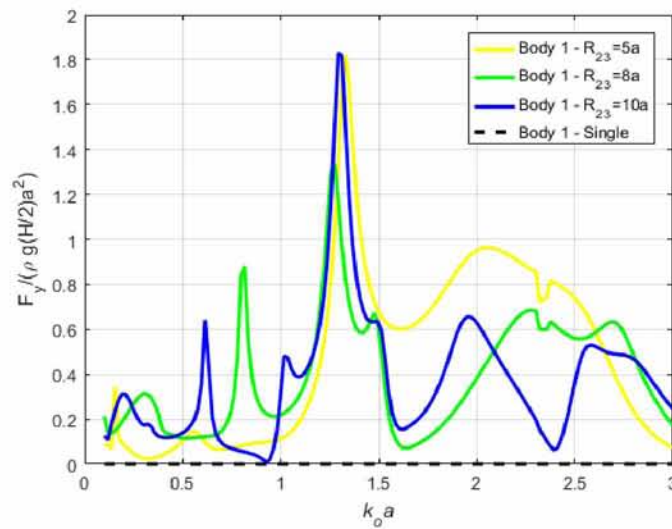
Διάγραμμα 60: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



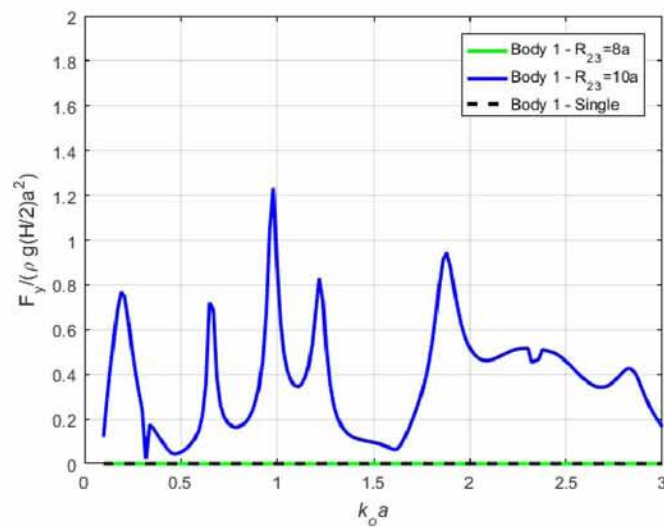
Διάγραμμα 61: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



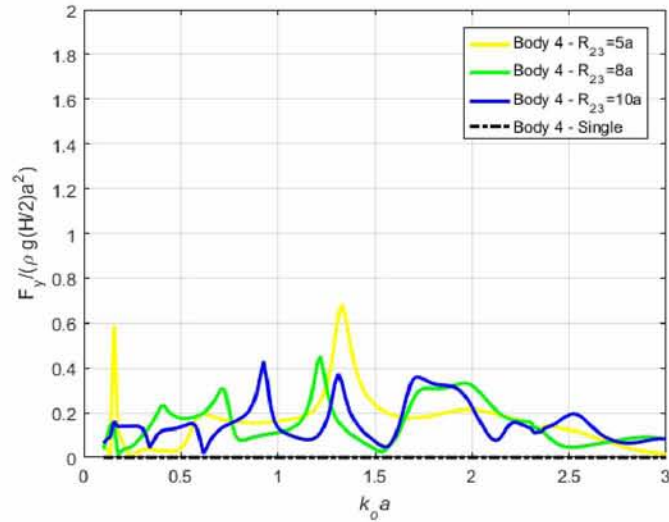
Διάγραμμα 62: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



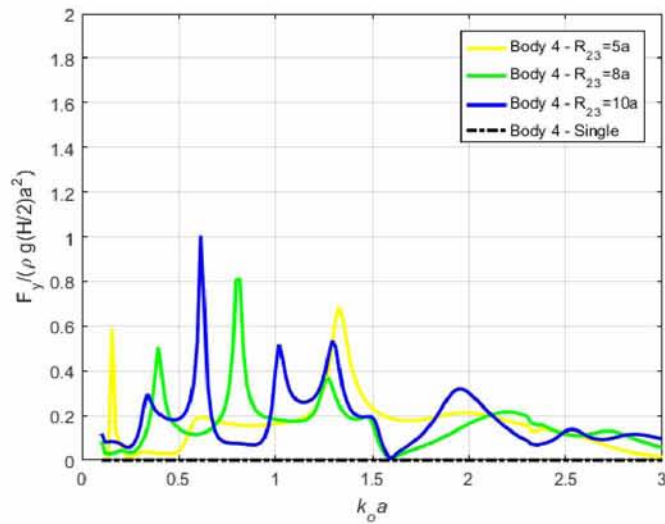
Διάγραμμα 63: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



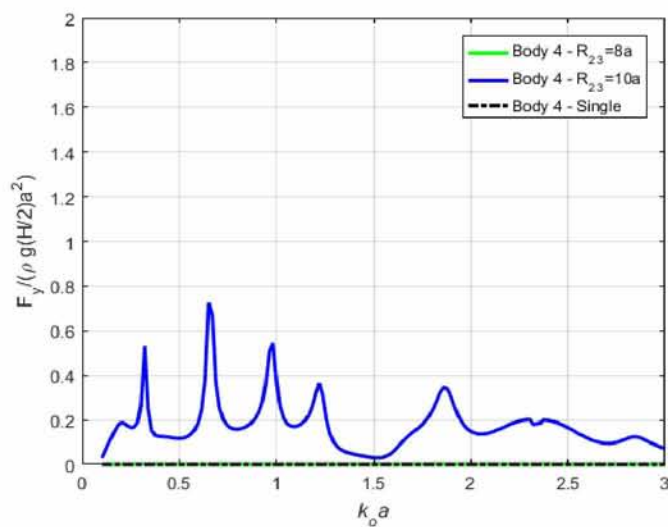
Διάγραμμα 64: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



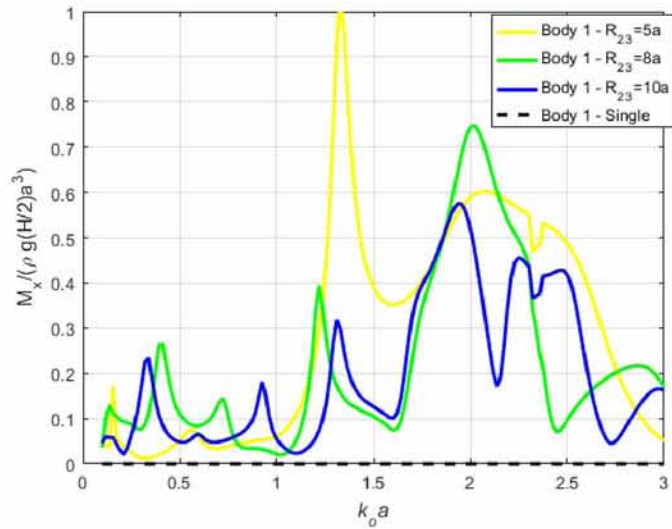
Διάγραμμα 65: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



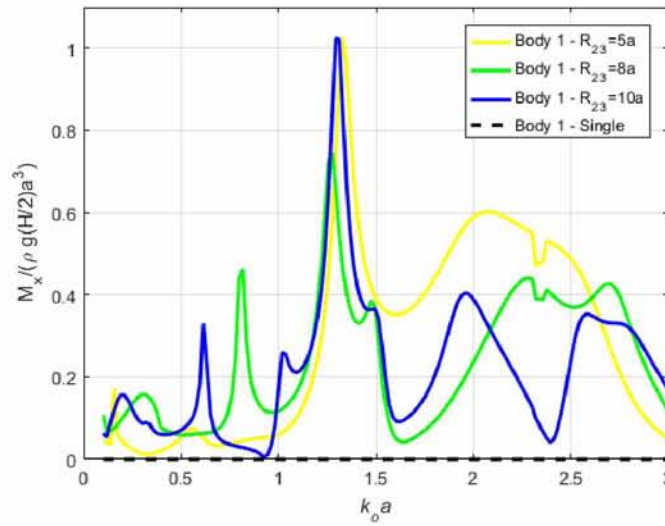
Διάγραμμα 66: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



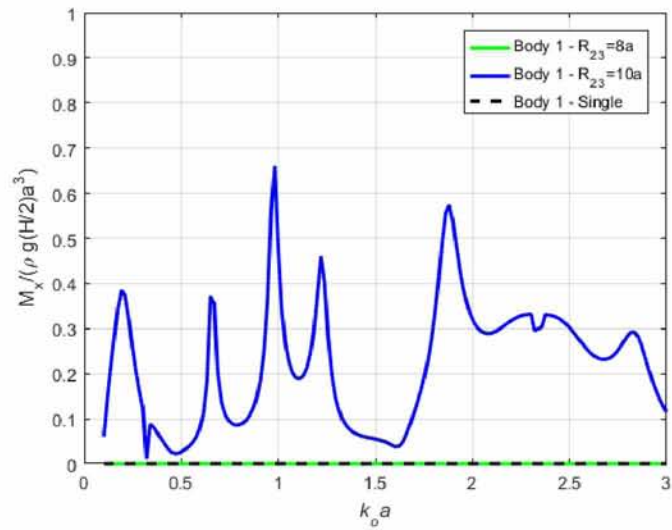
Διάγραμμα 67: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



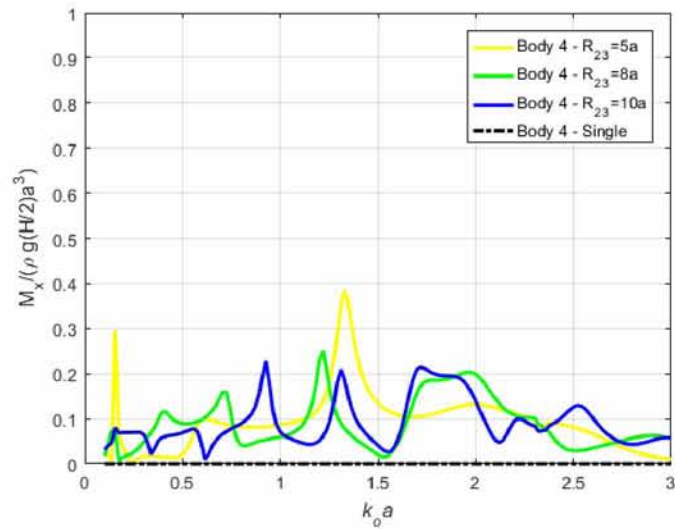
Διάγραμμα 68: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



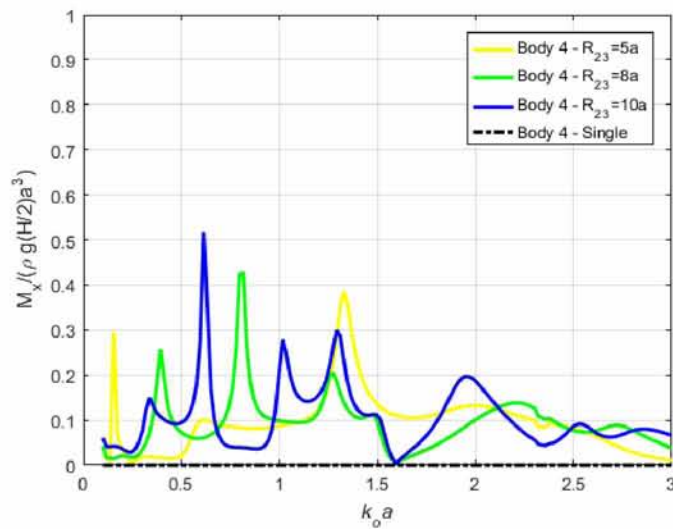
Διάγραμμα 69: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



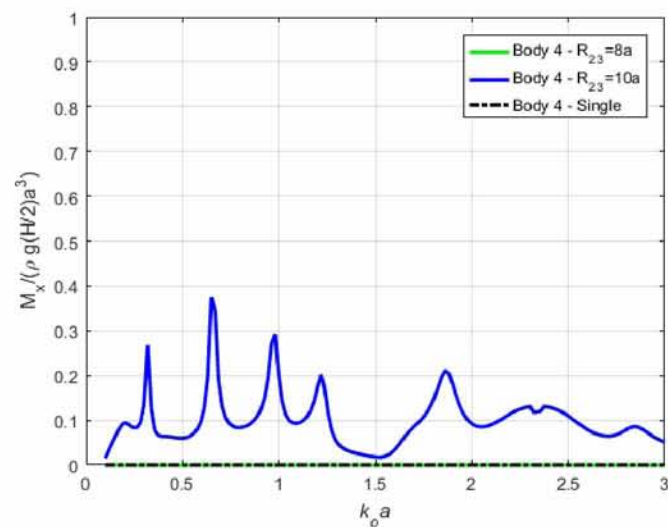
Διάγραμμα 70: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



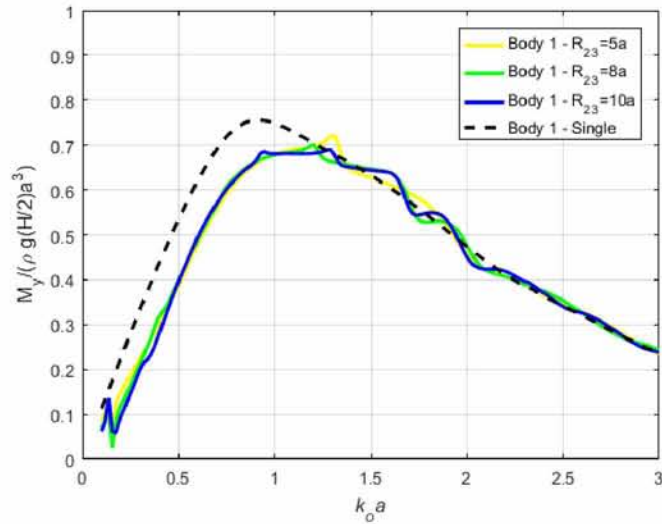
Διάγραμμα 71: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



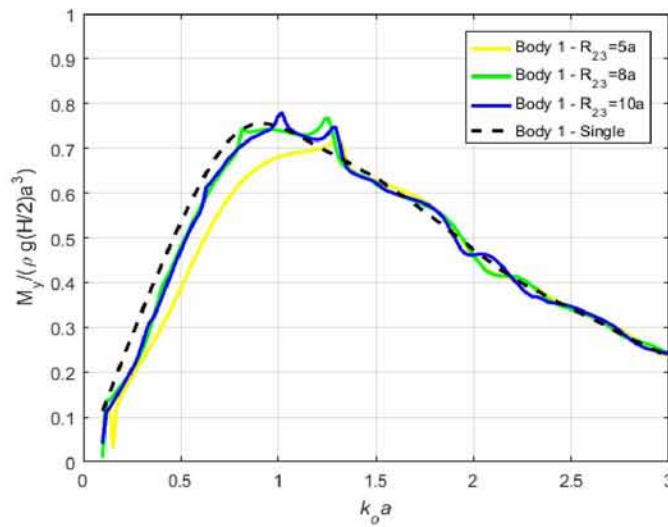
Διάγραμμα 72: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



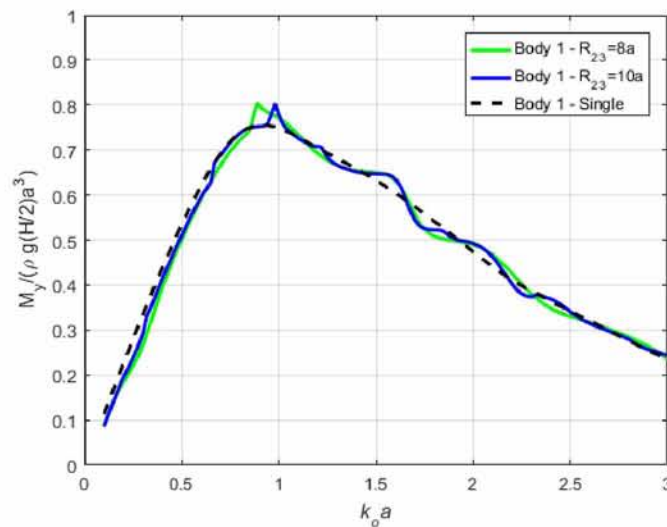
Διάγραμμα 73: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



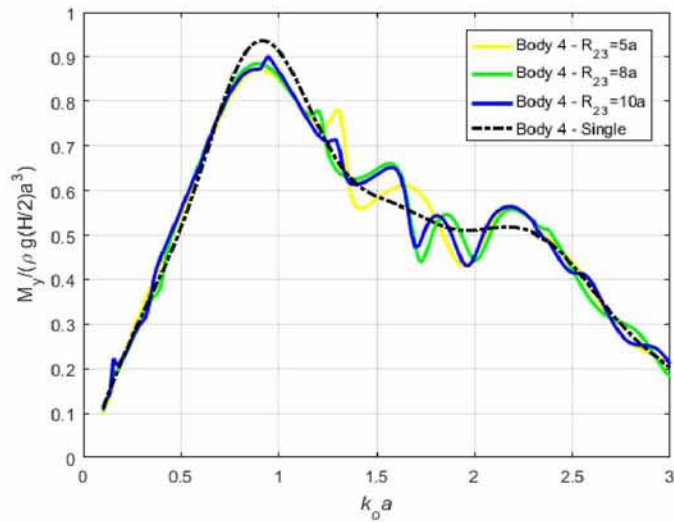
Διάγραμμα 74: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



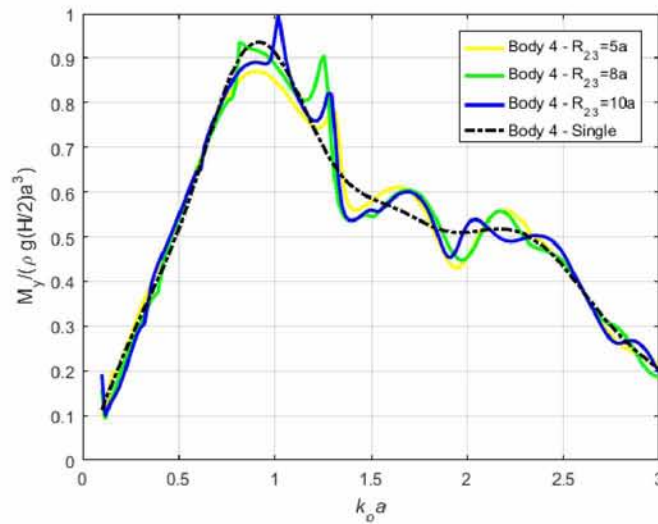
Διάγραμμα 75: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



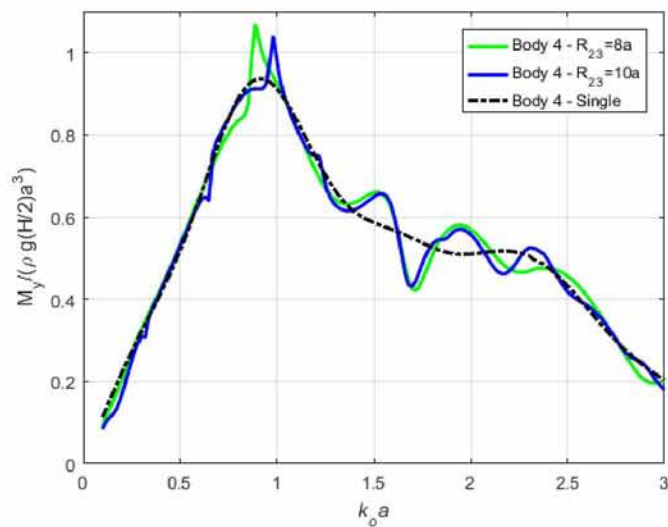
Διάγραμμα 76: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



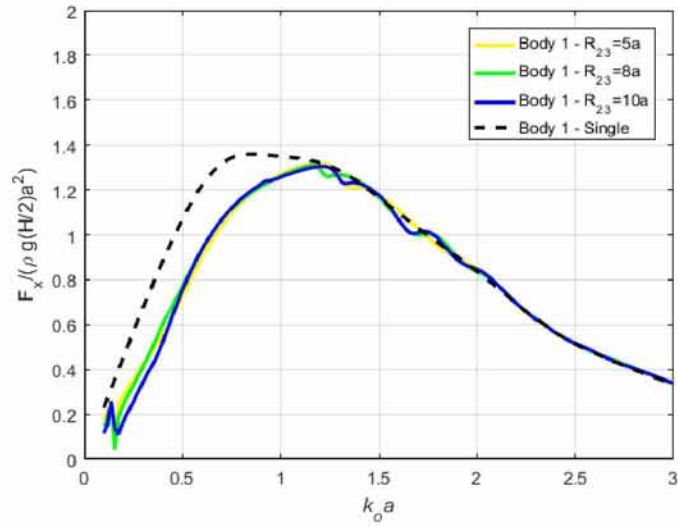
Διάγραμμα 77: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



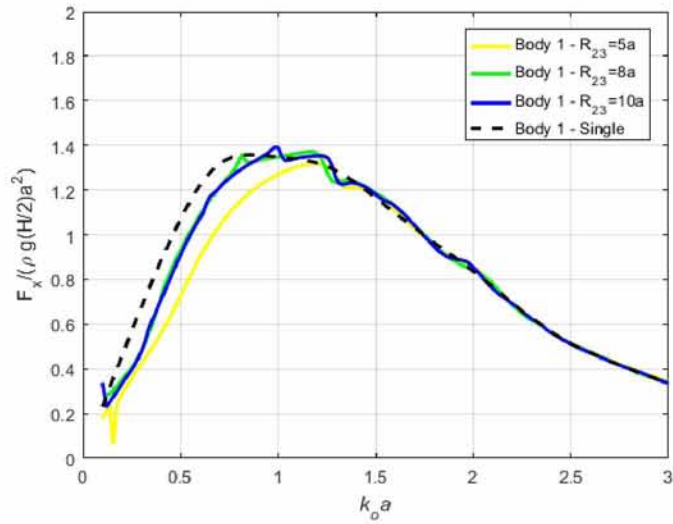
Διάγραμμα 78: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



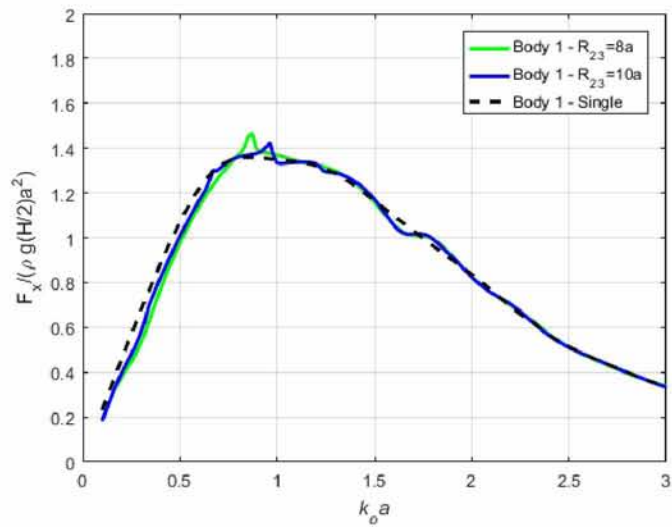
Διάγραμμα 79: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



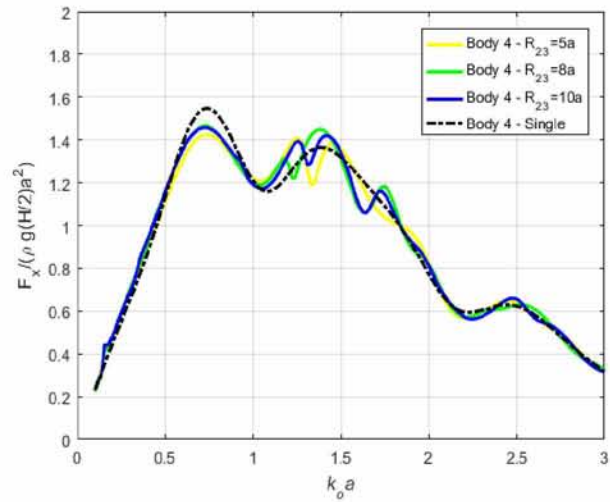
Διάγραμμα 80: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



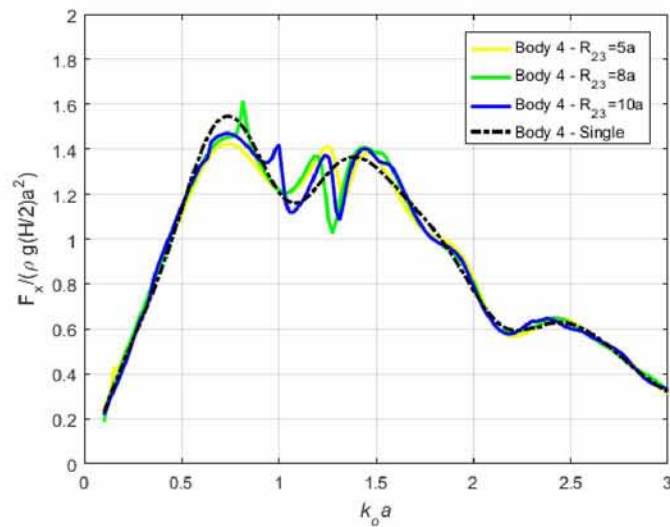
Διάγραμμα 81: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



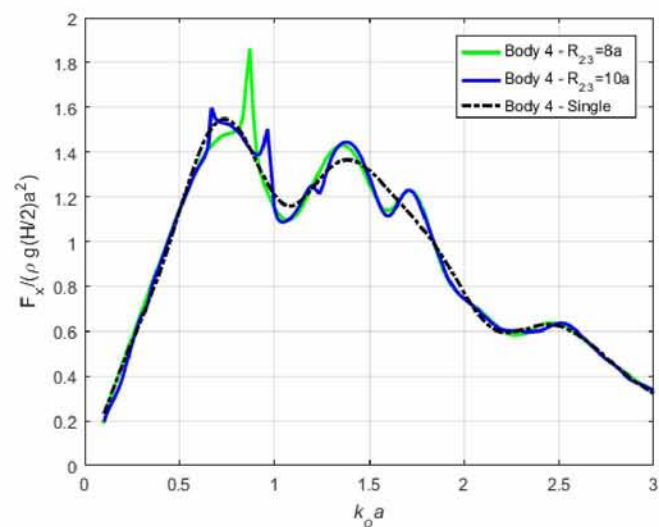
Διάγραμμα 82: Surge Forces on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



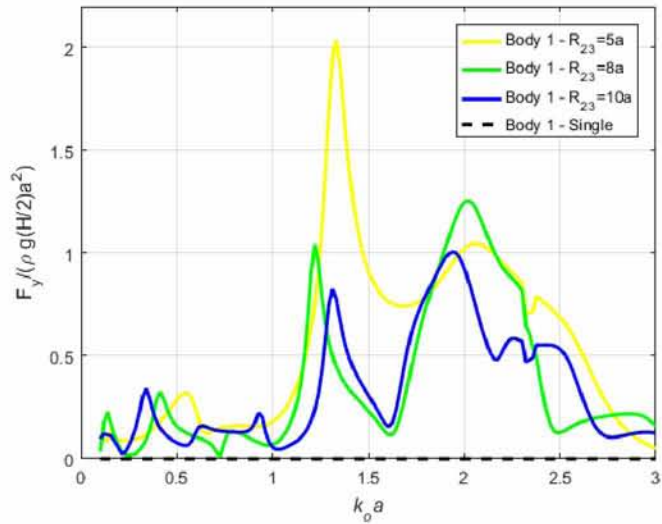
Διάγραμμα 83: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



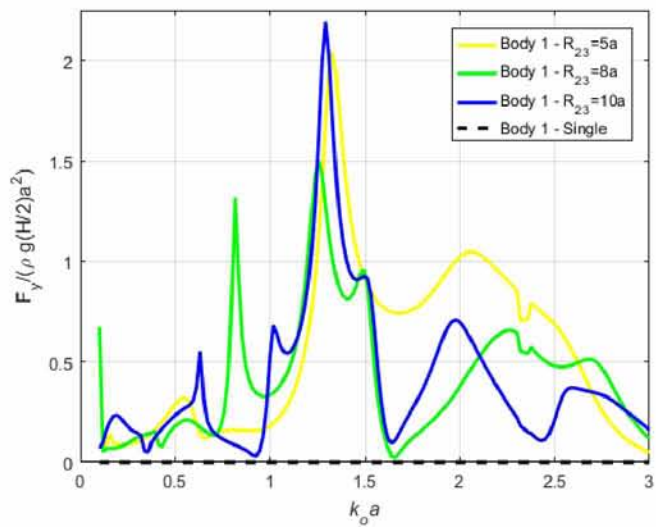
Διάγραμμα 84: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



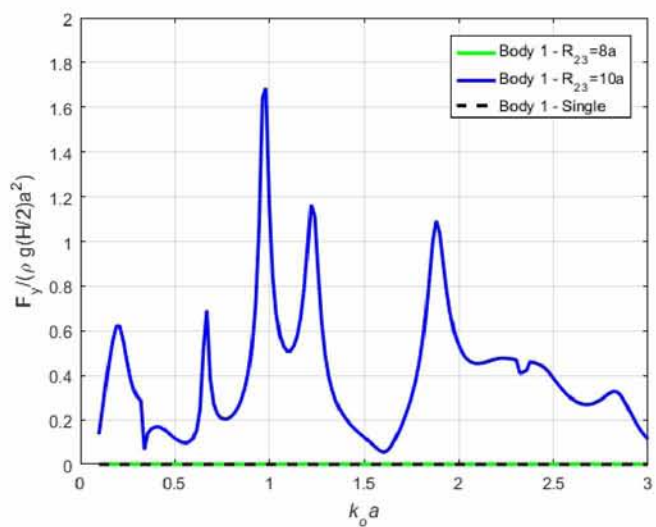
Διάγραμμα 85: Surge Forces on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



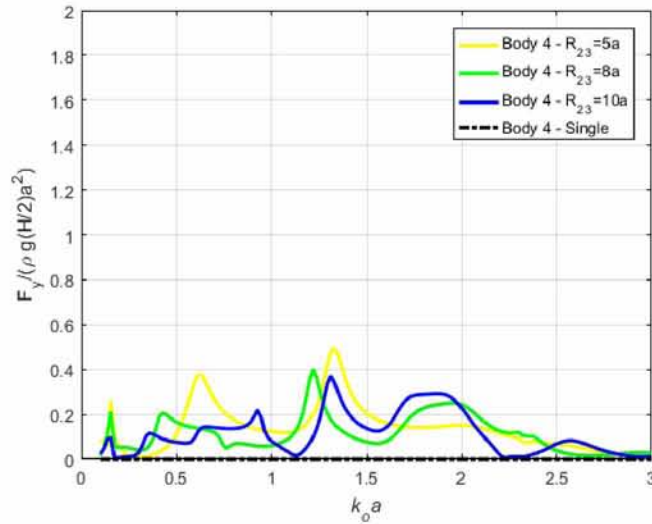
Διάγραμμα 86: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



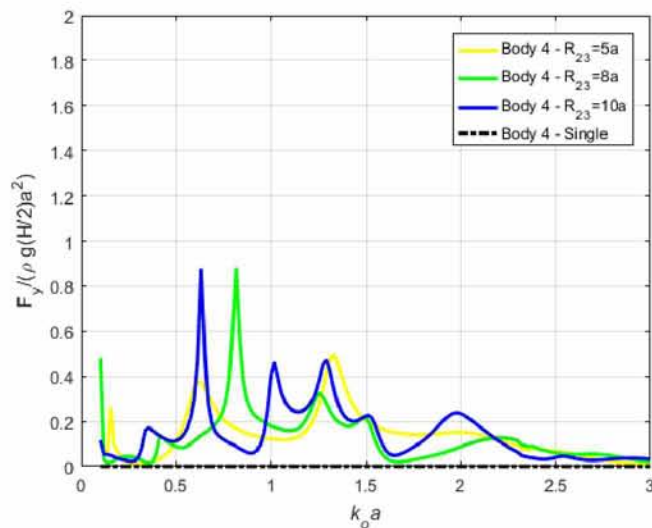
Διάγραμμα 87: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



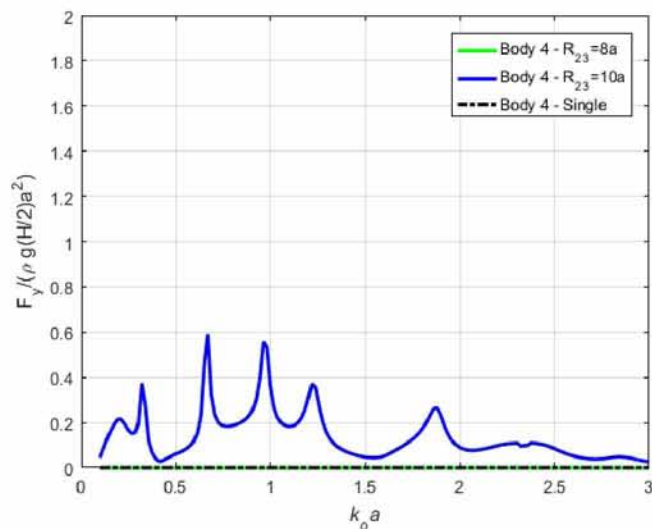
Διάγραμμα 88: Sway Forces on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



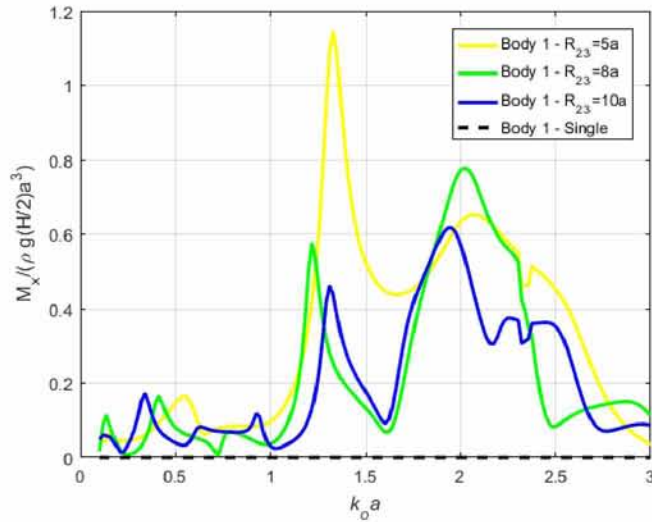
Διάγραμμα 89: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



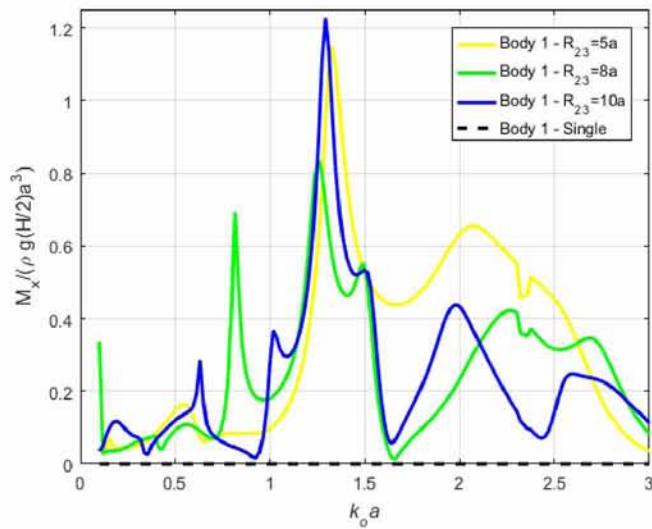
Διάγραμμα 90: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



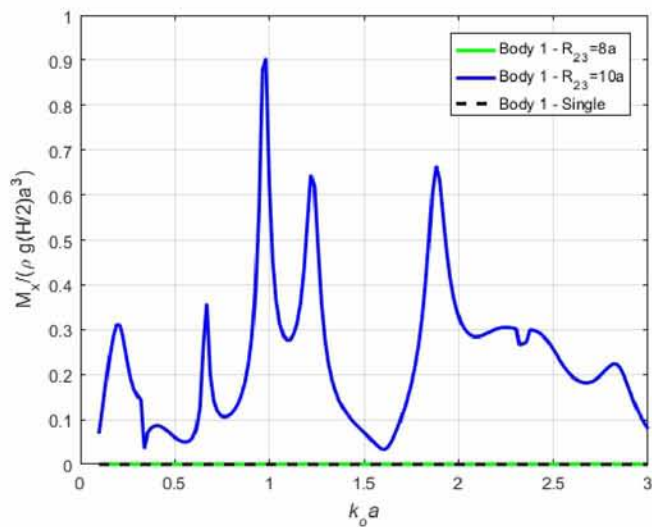
Διάγραμμα 91: Sway Forces on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



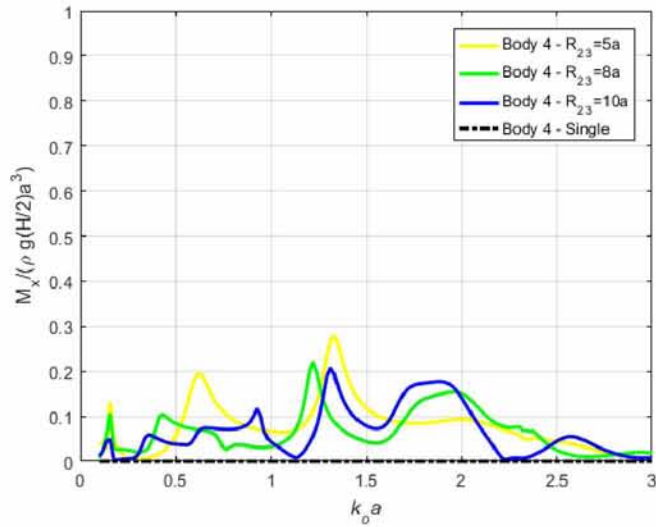
Διάγραμμα 92: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



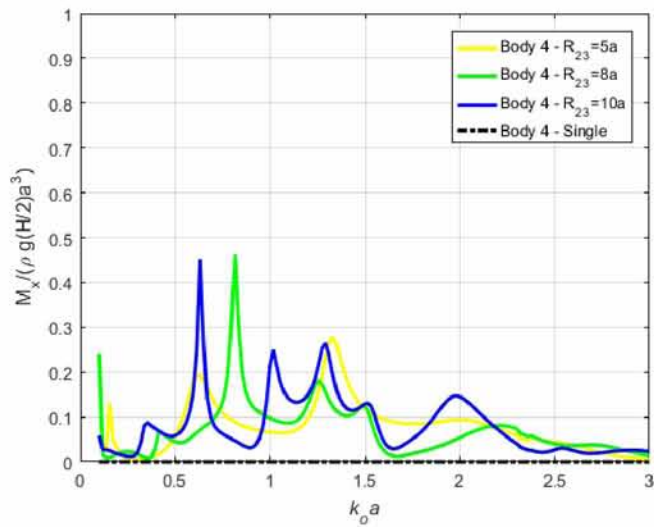
Διάγραμμα 93: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



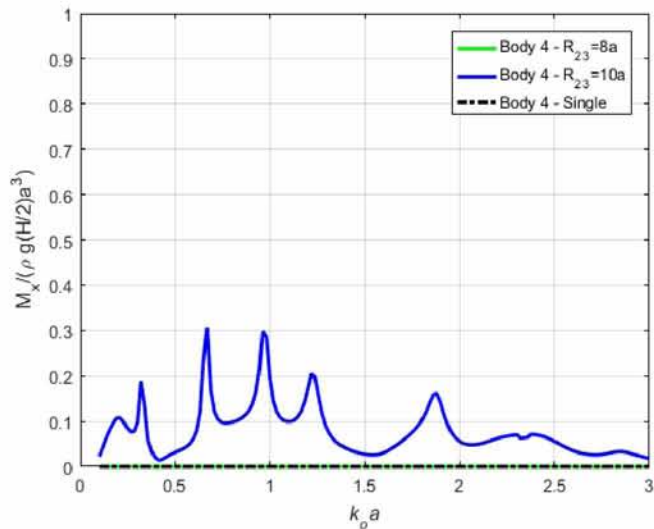
Διάγραμμα 94: Roll Moments on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



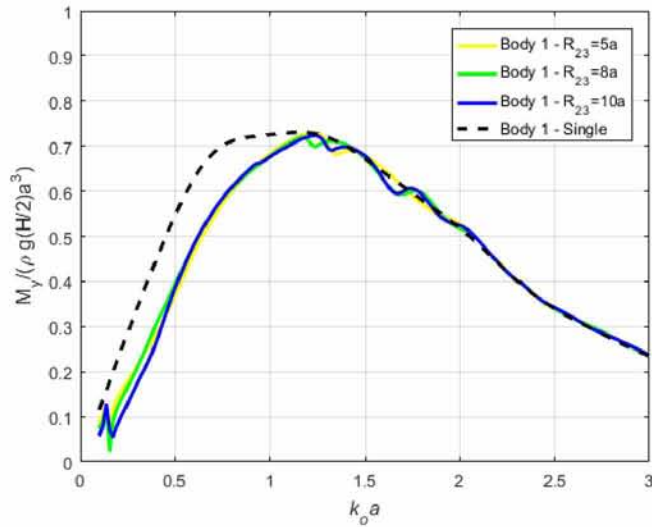
Διάγραμμα 95: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



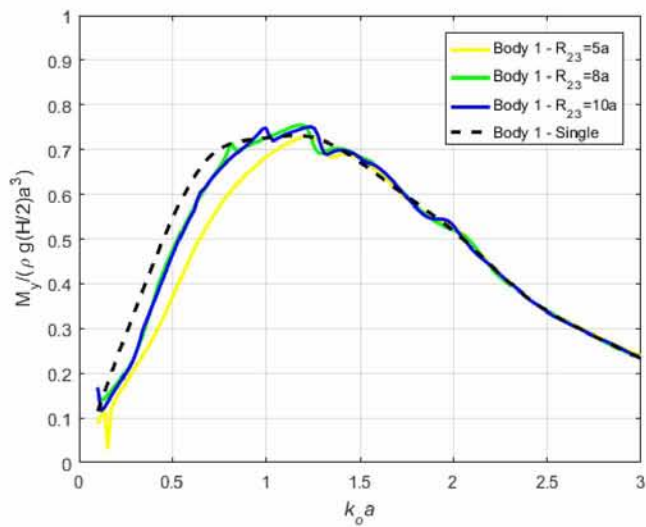
Διάγραμμα 96: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



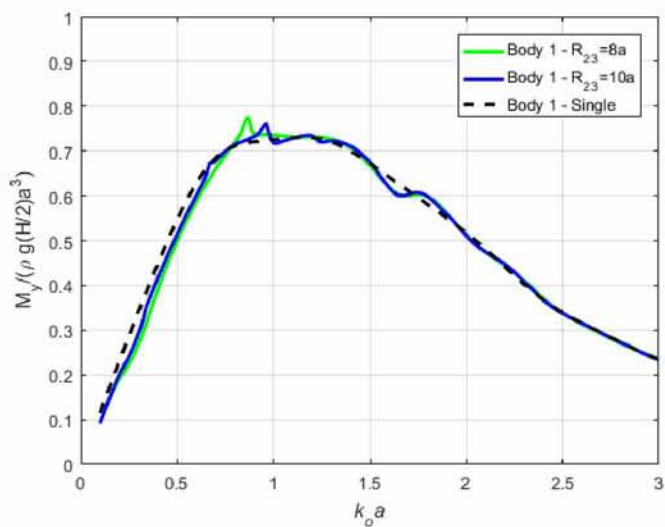
Διάγραμμα 97: Roll Moments on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



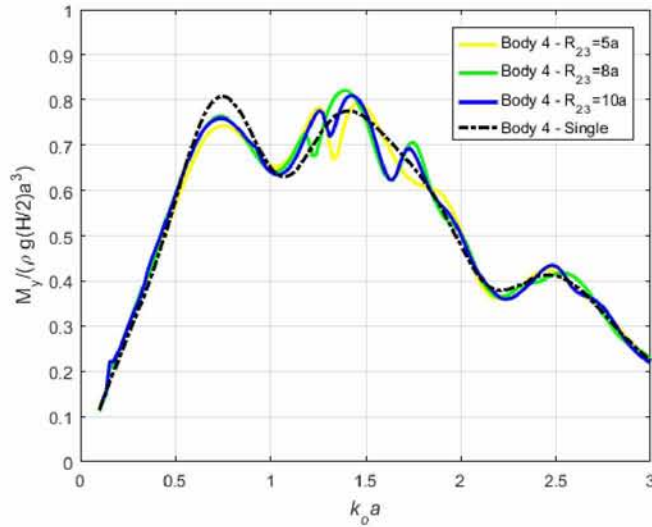
Διάγραμμα 98: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



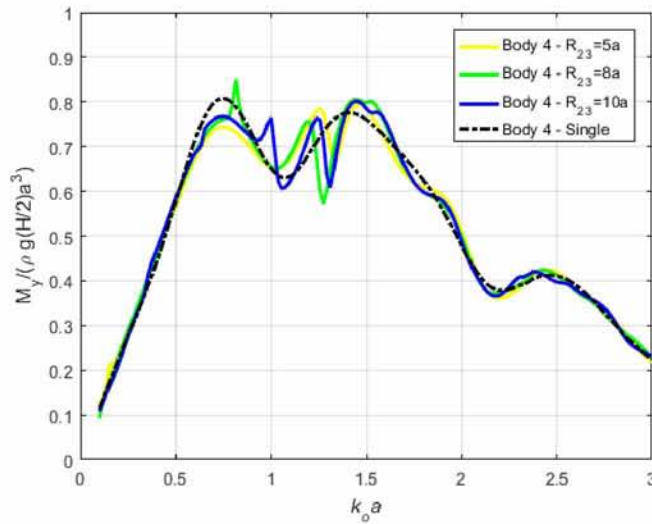
Διάγραμμα 99: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



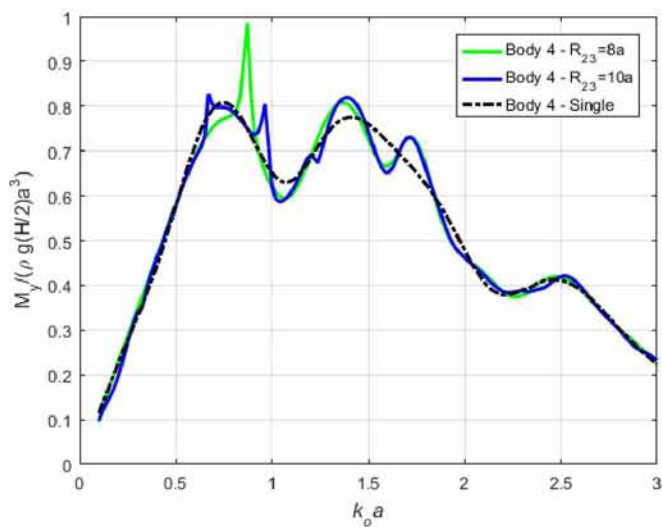
Διάγραμμα 100: Pitch Moments on Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$



Διάγραμμα 101: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



Διάγραμμα 102: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$



Διάγραμμα 103: Pitch Moments on Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}= 0.50$

4.2 Βρεχόμενη επιφάνεια (wave run up)

Στην ενότητα αυτή, θα εξεταστεί η βρεχόμενη επιφάνεια (wave run up) των σωμάτων της συστοιχίας. Πιο συγκεκριμένα, στα διαγράμματα που ακολουθούν, αποτυπώνεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας επί της περιμέτρου των σωμάτων για επιλεγμένες συχνότητες κύματος. Τα αποτελέσματα για τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας που παρουσιάζονται, δίδονται κανονικοποιημένα προς το πλάτος κύματος, $H/2$, και παράγονται χρησιμοποιώντας τη γραμμική θεωρία δυναμικού (*linear potential theory*). Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, για κάθε σώμα, υπολογίζεται σε σχέση με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του, το οποίο επίσης ορίζει και τις σχετικές αζιμουθιακές γωνίες.

Οι συχνότητες κύματος επιλέχθηκαν σκόπιμα, και αντιστοιχούν στις συχνότητες $k_0 a$ όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x και F_y για τα εξεταζόμενα σώματα. Κατ' αντιστοιχία με τα αποτελέσματα των συνιστωσών της υδροδυναμικής φόρτισης, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, πάλι το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο μεσαίο σώμα, δηλαδή το σώμα 1 και το σώμα 4 (διάταξη 5). Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο των δύο μακρόστενων κυλίνδρων (σώμα 2 & 3) δεν είναι πάντα μηδενική.

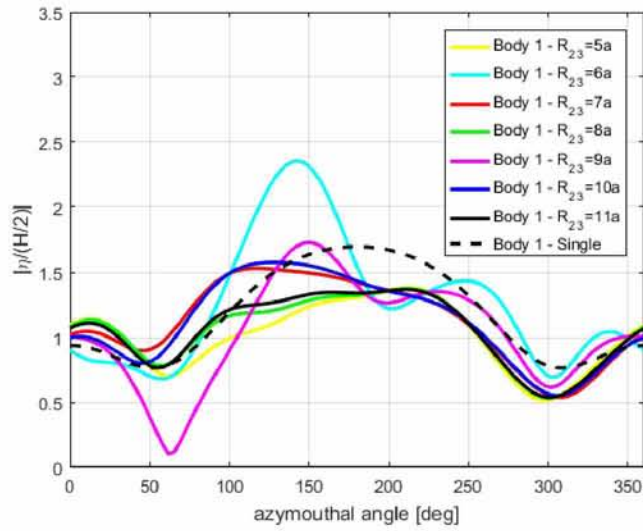
Ξανά, προς χάριν των συγκρίσεων, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, περιλαμβάνουν και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του μεμονωμένου σώματος. Οι σχετικοί υπολογισμοί διεξήχθησαν αυξάνοντας υπερβολικά την απόσταση μεταξύ των σωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για το μεμονωμένο σώμα ελήφθησαν υποθέτοντας ότι, οι αποστάσεις (R_{12}, R_{13}) μεταξύ των κέντρων των ελλειπτικών κυλίνδρων είναι ίση με 2000 φορές το μεγάλο άξονα a .

Η κυματική ανύψωση στην περίμετρο των σωμάτων για τις διατάξεις 1,2,3 (σχ.15-17) εξετάζεται με τη βοήθεια του των διαγραμμάτων 104-121. Για τις εξεταζόμενες συχνότητες, όπου αντιστοιχούν οι μέγιστες δυνάμεις F_x , παρατηρείται ότι σε αρκετές περιπτώσεις οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις δεν αυξάνουν την ανύψωση του κύματος στην επιφάνεια των κυλίνδρων σε σύγκριση με τη περίπτωση του μεμονωμένου σώματος και επιπλέον, υπάρχει μια ομοιότητα των καμπυλών αυτών σε σχέση με το μεμονωμένο σώμα, η οποία είναι πιο έντονη στις περιπτώσεις τις διάταξης 3. Βέβαια, υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπου οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις προκαλούν ακραίες μεταβολές της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του μεσαίου σώματος (body 1), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στα διαγράμματα (104,105,107-109 και 111). Αντίστοιχα, τα διαγράμματα 113-121, αποτυπώνουν την εμφάνιση ακραίων τοπικών ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του μεσαίου σώματος, στις συχνότητες που αντιστοιχούν οι μέγιστες δυνάμεις F_y . Γενικά, φαίνεται η επίδραση της ανάκλασης και της περίθλασης των κυμάτων να είναι έντονη σχεδόν σε ολόκληρη την περιφέρεια του σώματος 1.

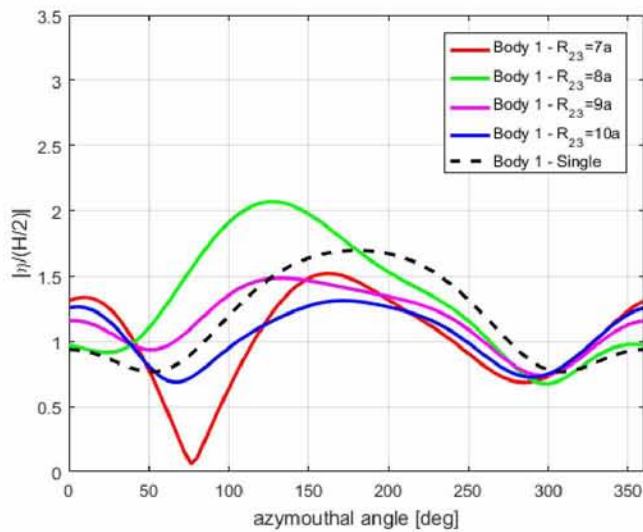
Σημαντική παρατήρηση αποτελεί ότι, ανά διαφορά $3a$ στην απόσταση R_{23} των κέντρων των μεγάλων μακρόστενων ελλειπτικών σωμάτων, υπάρχει μια ομοιότητα στις εξεταζόμενες καμπύλες (διαγρ. 104-112). Για το λόγο αυτό, προστέθηκε και η περίπτωση όπου $R_{23} = 11a$ ($R_{12} = 2a$, $R_{13} = 9a$), όπου όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 104,107 και 110, συμπίπτει με τις αντίστοιχες καμπύλες για τις περιπτώσεις όπου $R_{23} = 5a$ ($R_{12} = 2a$, $R_{13} = 3a$) και $R_{23} = 8a$ ($R_{12} = 2a$, $R_{13} = 6a$). Η σύμπτωση των καμπυλών γίνεται πιο έντονη για μικρότερη τιμή του λόγου b_1/a_1 .

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας των κυμάτων στην περίμετρο του μεσαίου σώματος για τις περιπτώσεις της διάταξης 4 (σχ.18) απεικονίζεται στα διαγρ. 122-127. Οι ισχυρές υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις (βλέπε διαγρ.44-55) αποτυπώνονται εδώ με την εμφάνιση έντονων διακυμάνσεων και ακραίων τοπικών ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας του κύματος στην περίμετρο του σώματος 1, για τις επιλεγμένες συχνότητες. Το γεγονός είναι ότι, τα μοτίβα για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι πολύ πιο πολύπλοκα και δύσκολα αναλύονται λεπτομερώς.

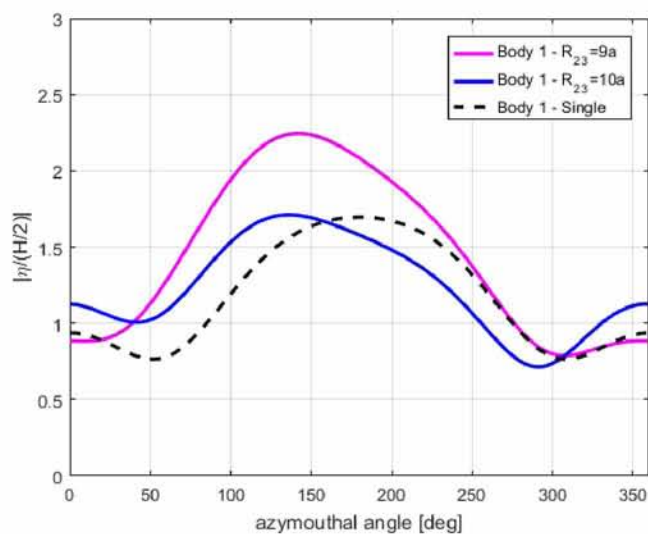
Η βρεχόμενη επιφάνεια των δύο μεσαίων κυλίνδρων, σώμα 1 και σώμα 4, της διάταξης 5 (σχ.19) εξετάζεται με τα διαγρ. 128-151. Για τις εξεταζόμενες συχνότητες, όπου αντιστοιχούν οι μέγιστες δυνάμεις F_x και F_y για το σώμα 1 (διαγρ.128-133, 140-145) παρατηρείται ότι σε αρκετές περιπτώσεις οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις εντός του καναλιού αυξάνουν την ανύψωση του κύματος στην περίμετρο του σώματος 1, σε σύγκριση με τη περίπτωση όπου τα σώματα 1 και 4 είναι μόνα τους στο πεδίο, ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται κάποια ακραία μεταβολή. Η εμφάνιση έντονων τοπικών ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας του κύματος αποτυπώνεται ξανά στις συχνότητες που αντιστοιχούν οι μέγιστες δυνάμεις F_y , και σχετίζεται με τις έντονες μεταβολές στην υδροδυναμική φόρτιση που παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Όσον αφορά την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του σώματος 4, παρατηρείται ότι στις εξεταζόμενες συχνότητες όπου αντιστοιχούν οι μέγιστες δυνάμεις F_x και F_y (διαγρ. 134-139,146-151), οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις δεν επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στην ανύψωση του κύματος στην περίμετρο του σώματος 4 σε σύγκριση με τη περίπτωση όπου τα σώματα 1 και 4 είναι μόνα τους στο πεδίο.



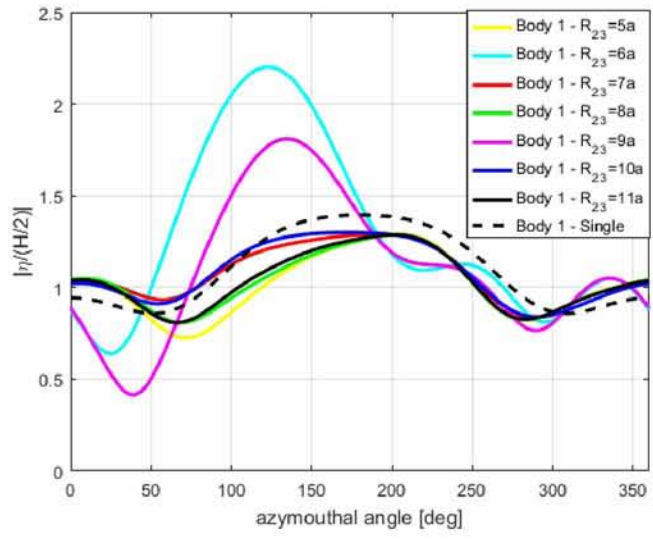
Διάγραμμα 104: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; ka_x



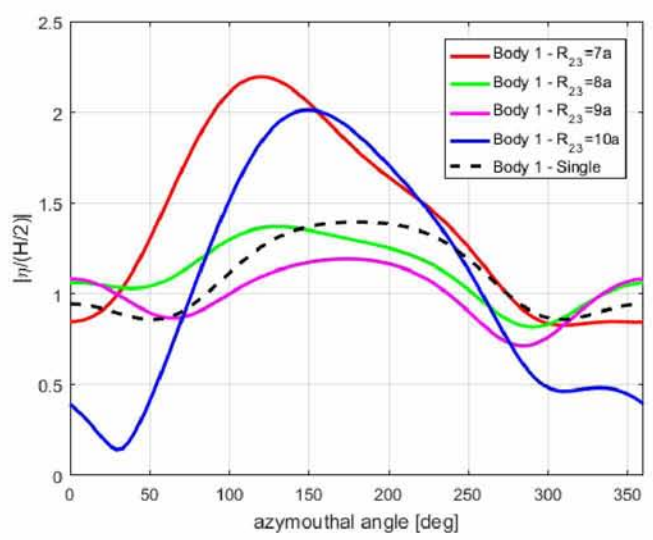
Διάγραμμα 105: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; ka_x



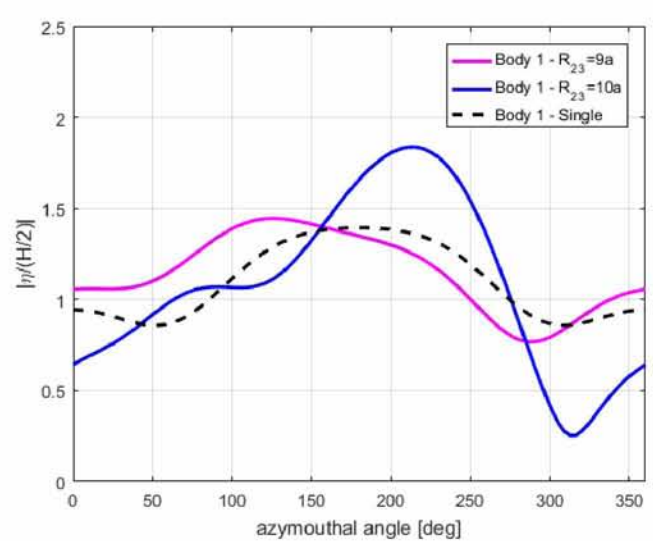
Διάγραμμα 106: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; ka_x



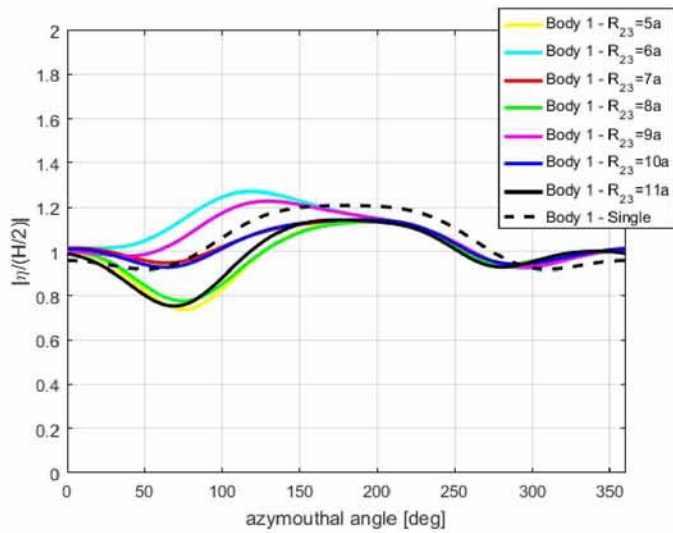
Διάγραμμα 107: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; $\kappa a x$



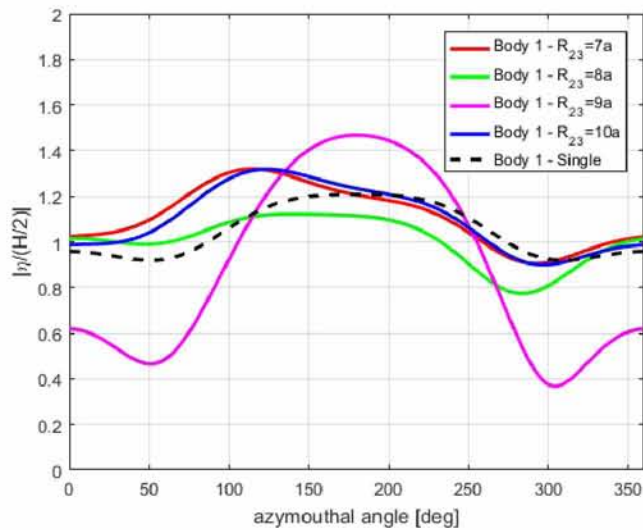
Διάγραμμα 108: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; $\kappa a x$



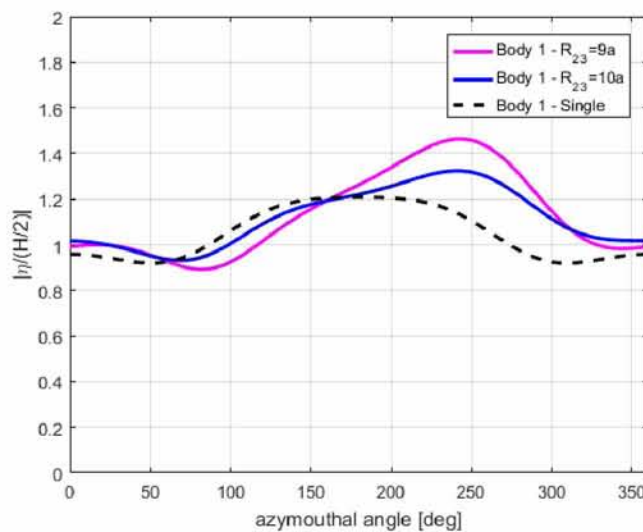
Διάγραμμα 109: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; $\kappa a x$



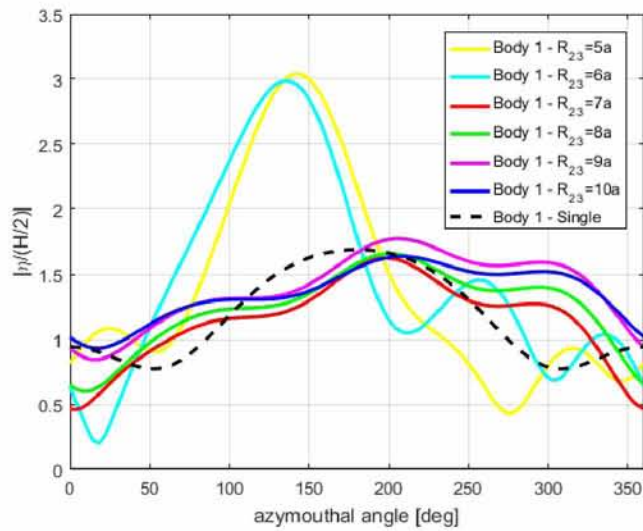
Διάγραμμα 110: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kax



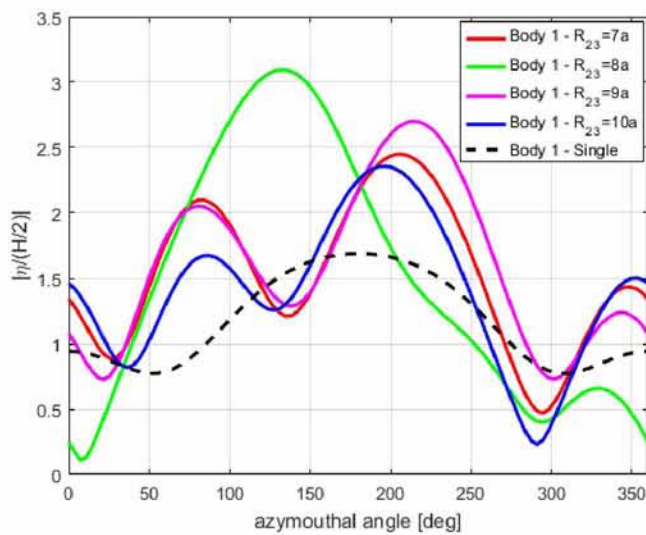
Διάγραμμα 111: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kax



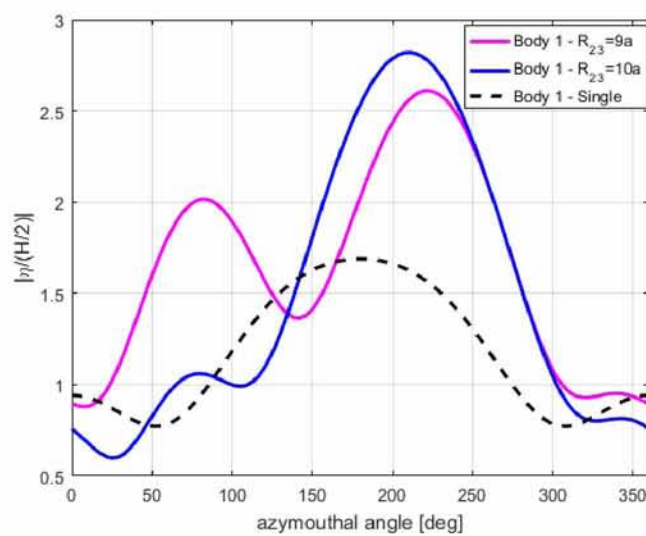
Διάγραμμα 112: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kax



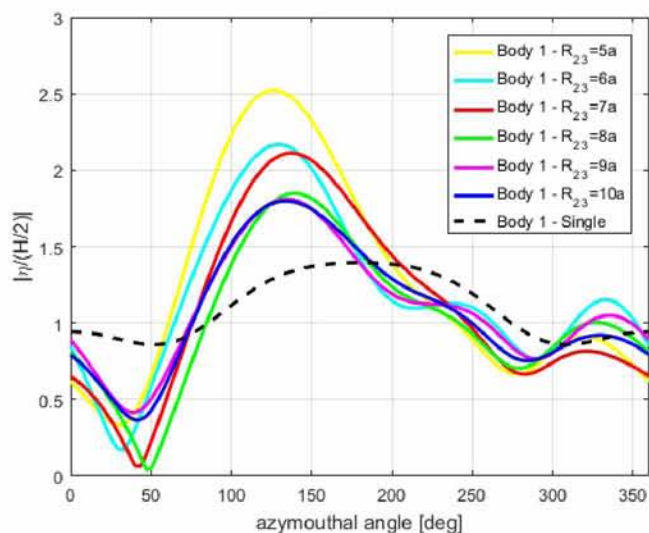
Διάγραμμα 113: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; kay



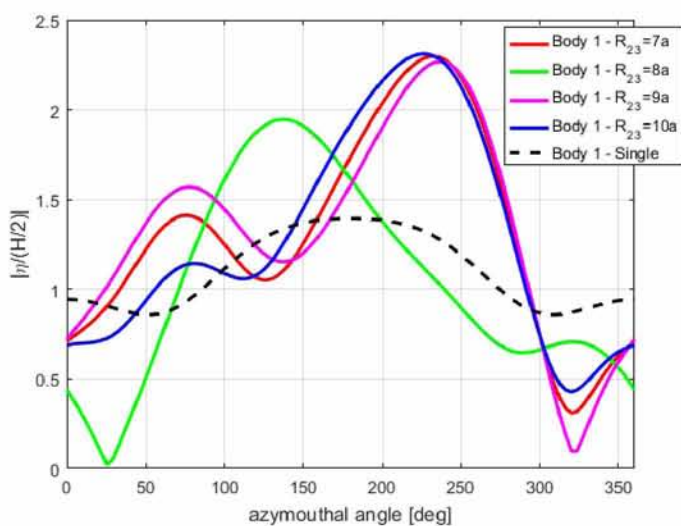
Διάγραμμα 114: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; kay



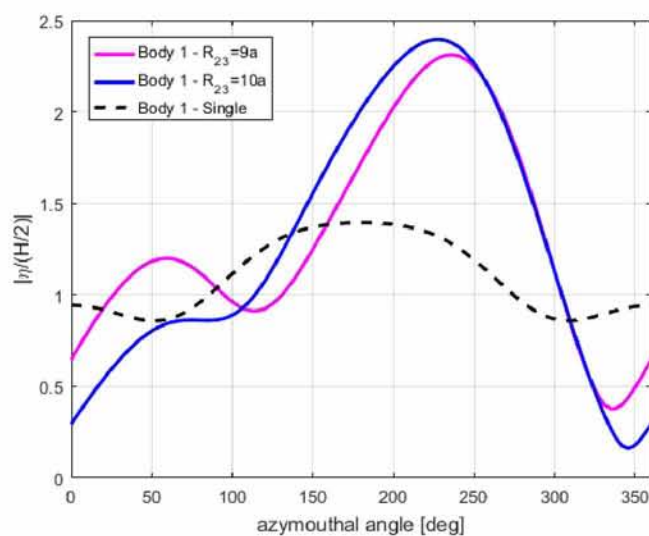
Διάγραμμα 115: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.99$; kay



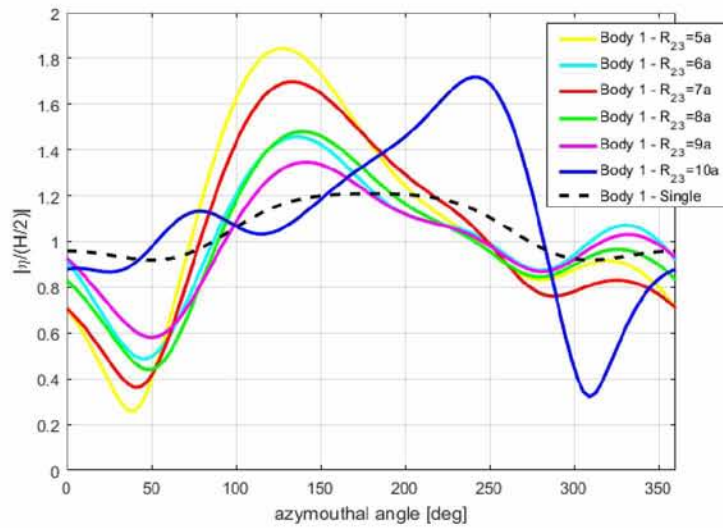
Διάγραμμα 116: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



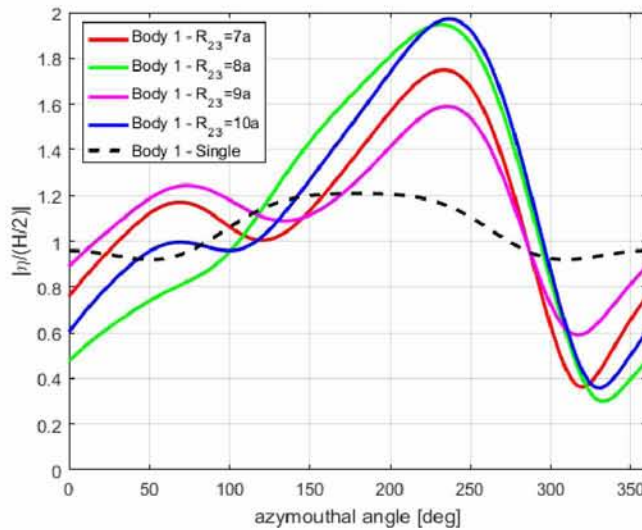
Διάγραμμα 117: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



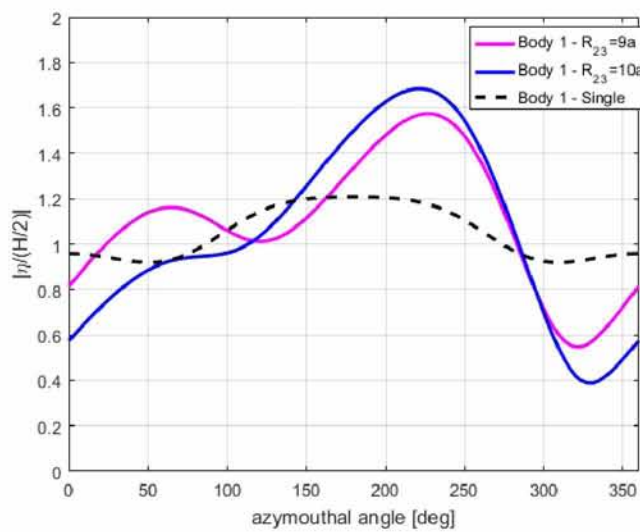
Διάγραμμα 118: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



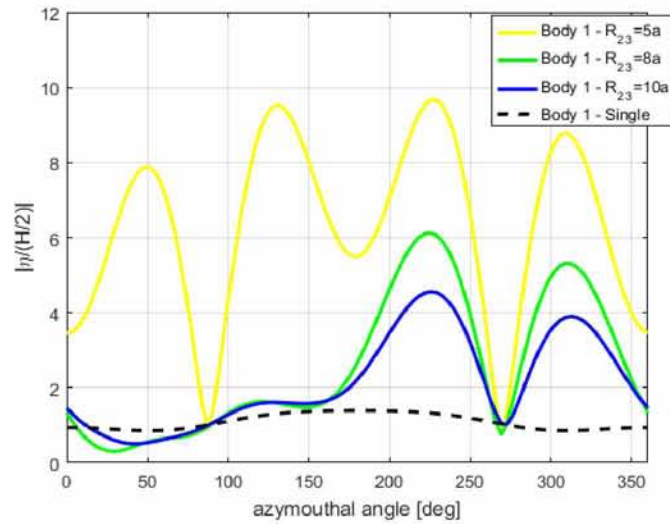
Διάγραμμα 119: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kay



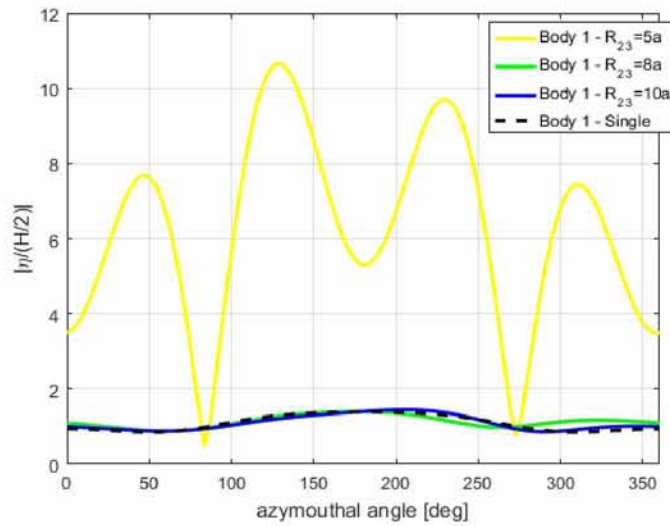
Διάγραμμα 120: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kay



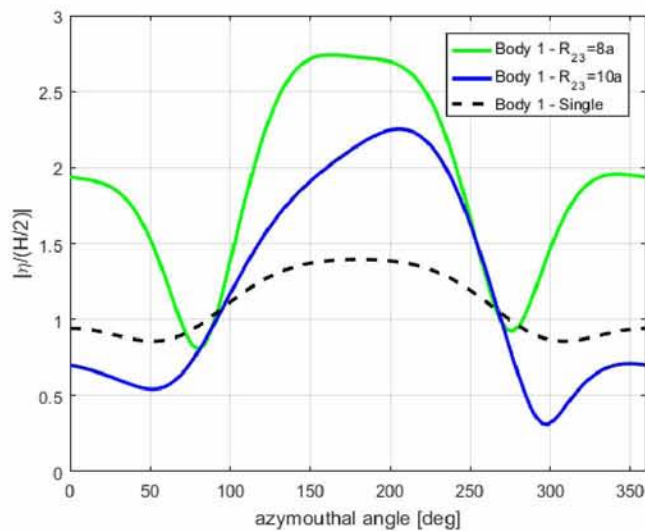
Διάγραμμα 121: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.25$; kay



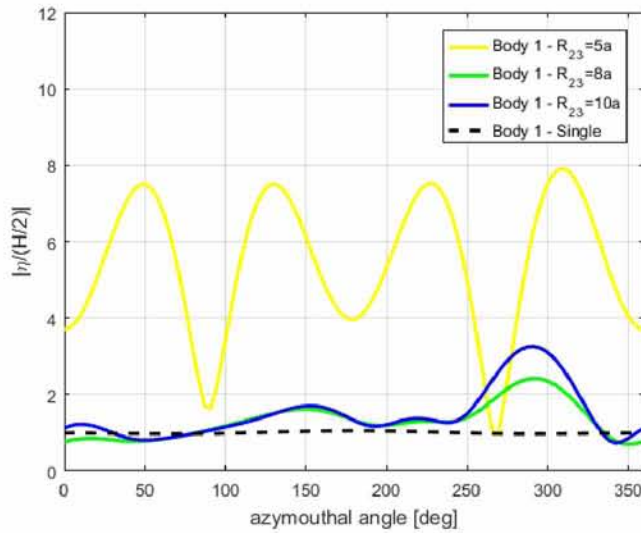
Διάγραμμα 122: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kax



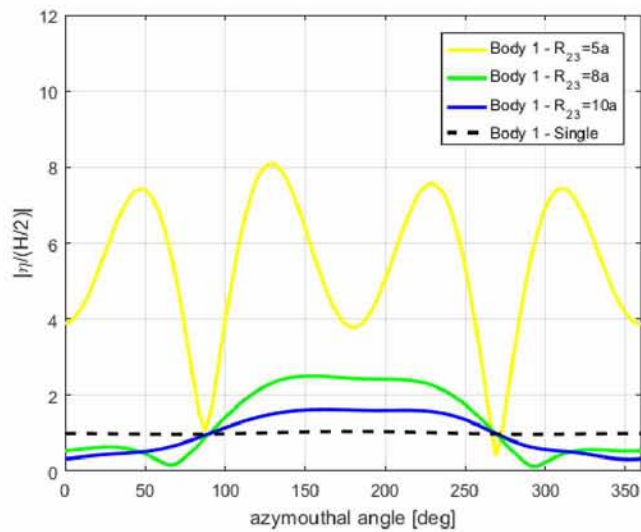
Διάγραμμα 123: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kax



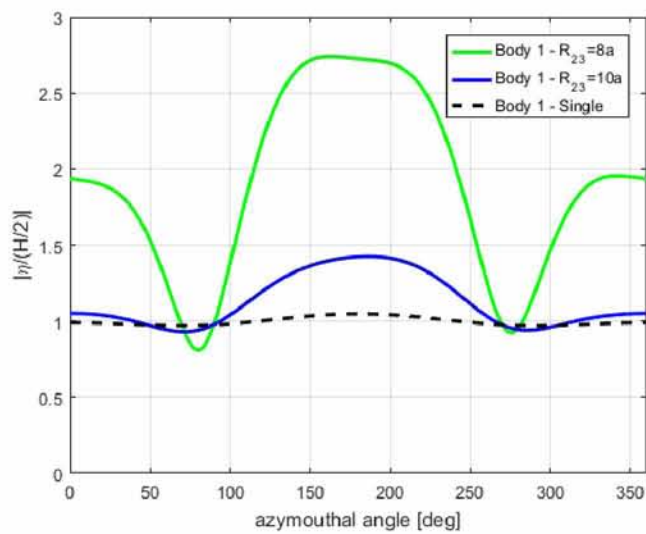
Διάγραμμα 124: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kax



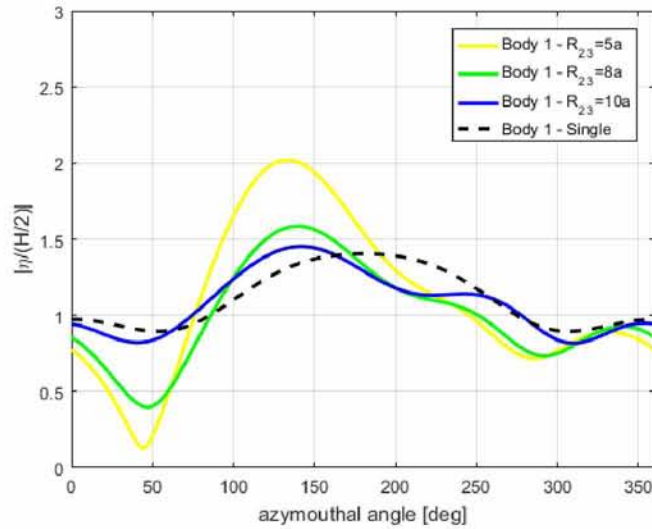
Διάγραμμα 125: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



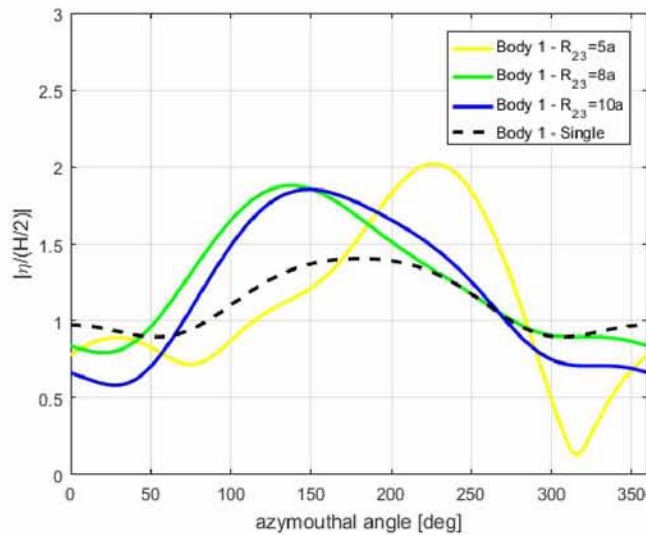
Διάγραμμα 126: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



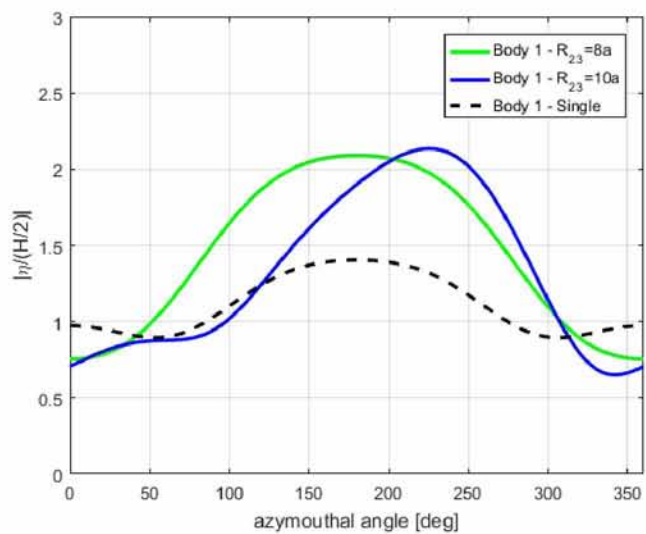
Διάγραμμα 127: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_1/a_1=0.50$; kay



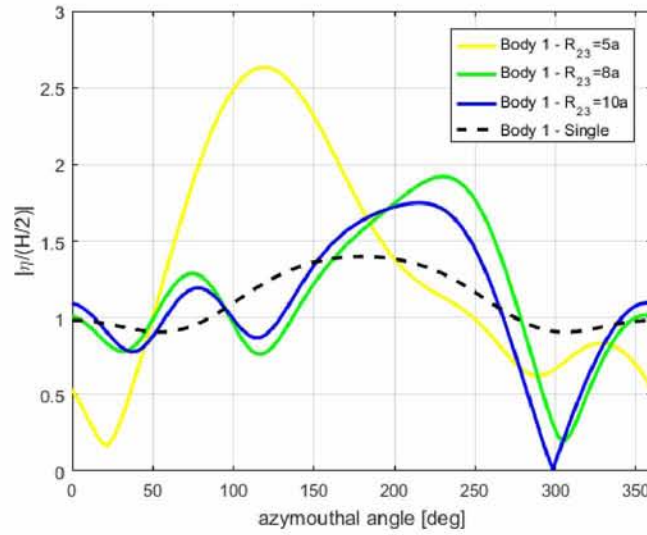
Διάγραμμα 128: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



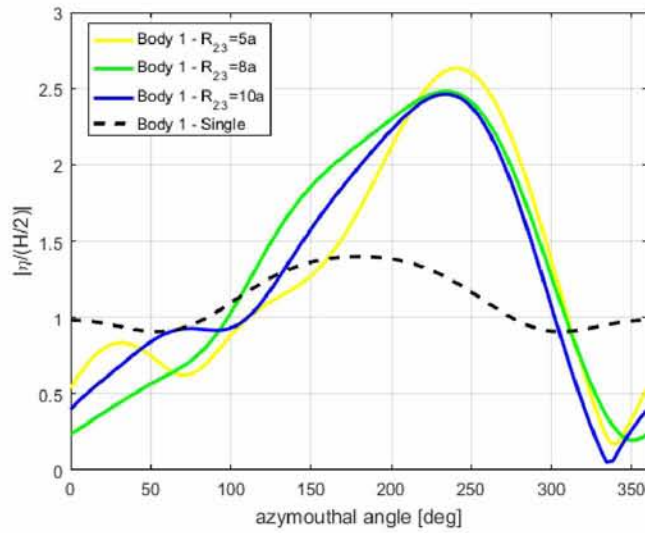
Διάγραμμα 129: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



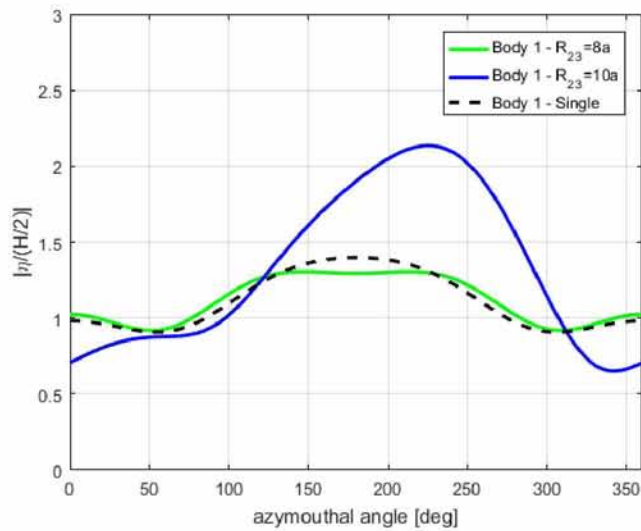
Διάγραμμα 130: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



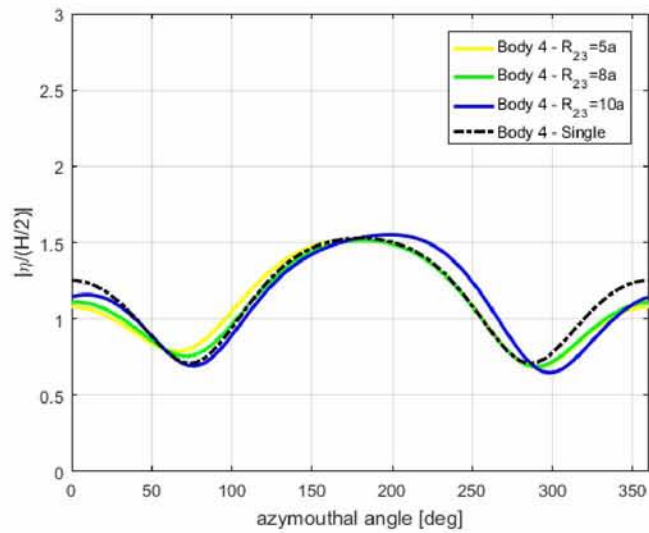
Διάγραμμα 131: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



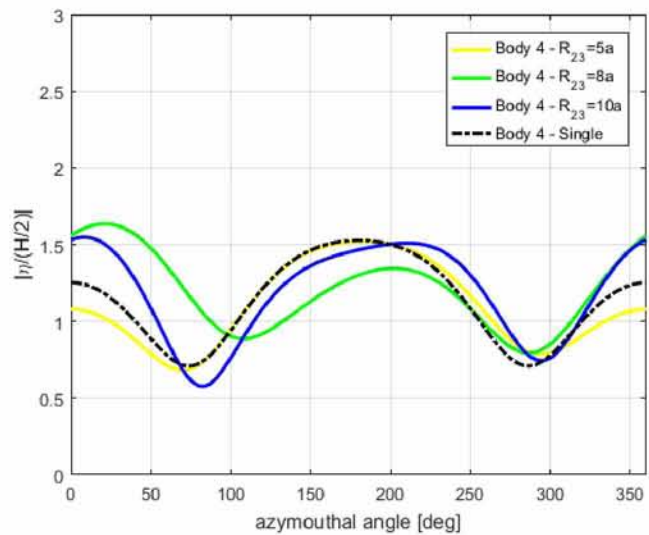
Διάγραμμα 132: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



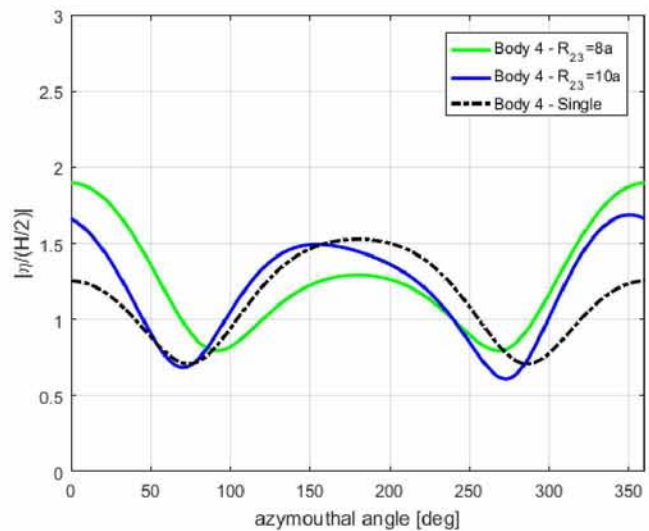
Διάγραμμα 133: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



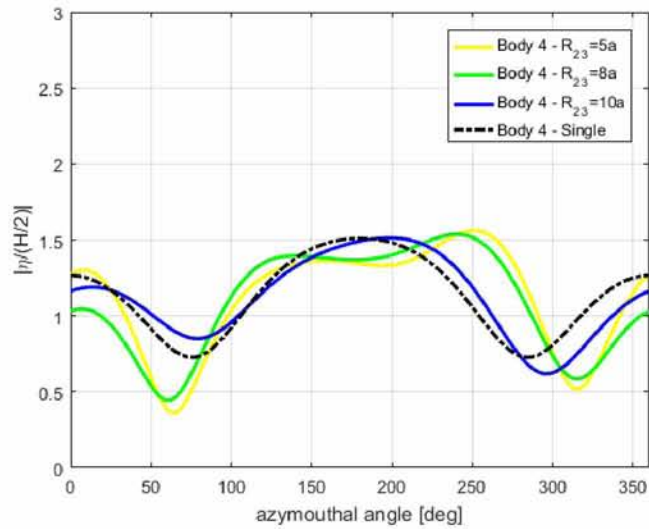
Διάγραμμα 134: Wave run up – Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



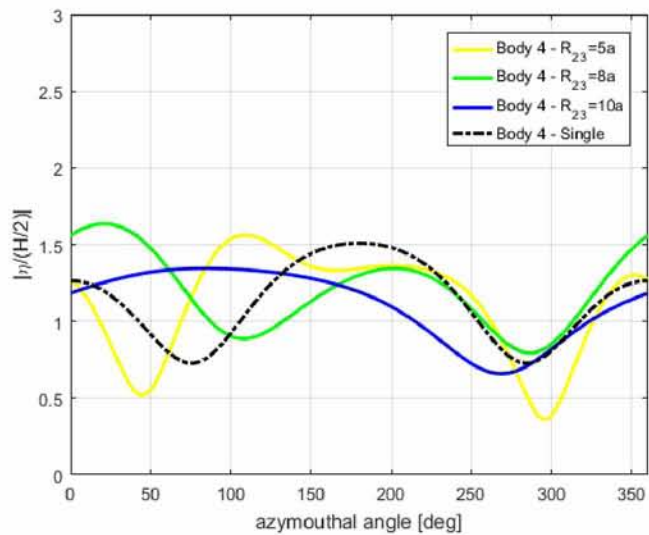
Διάγραμμα 135: Wave run up – Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



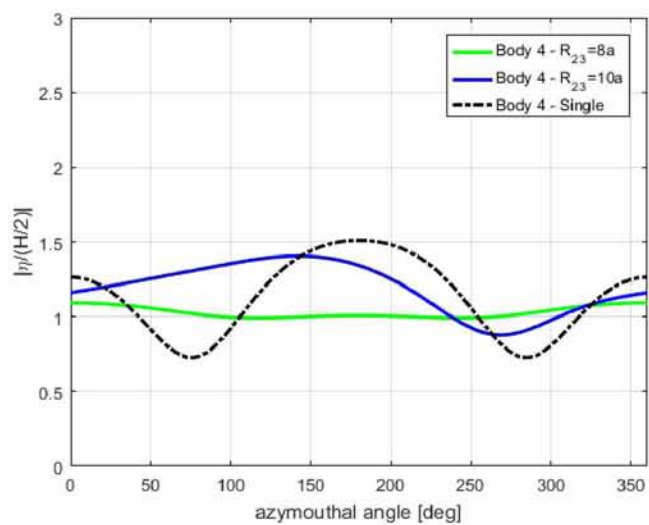
Διάγραμμα 136: Wave run up – Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



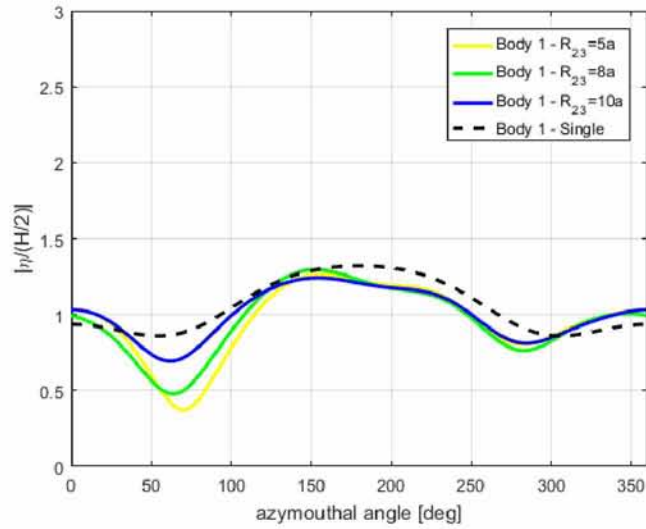
Διάγραμμα 137: Wave run up – Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



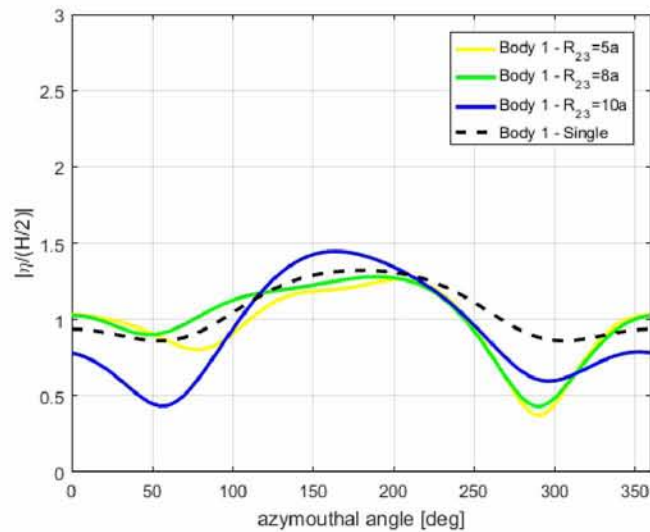
Διάγραμμα 138: Wave run up – Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



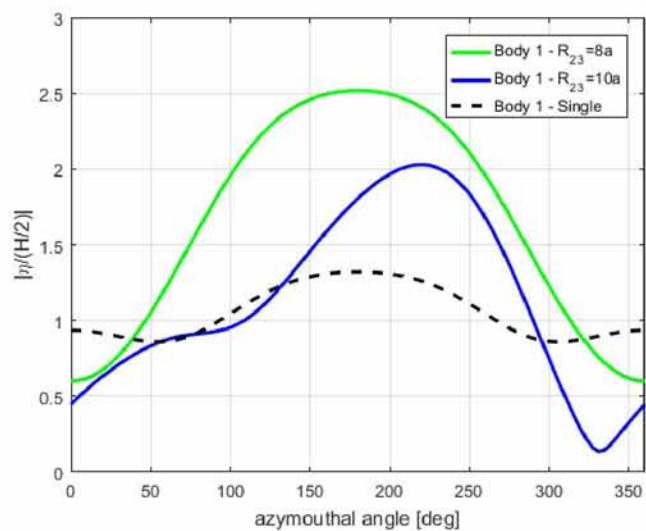
Διάγραμμα 139: Wave run up – Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=3a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



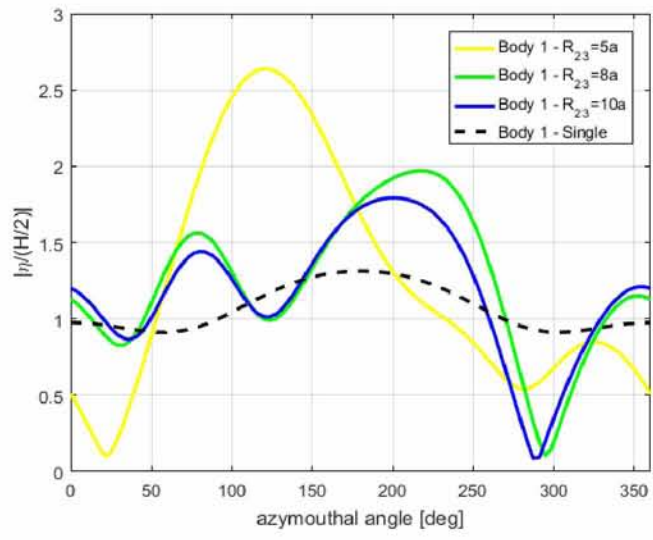
Διάγραμμα 140: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



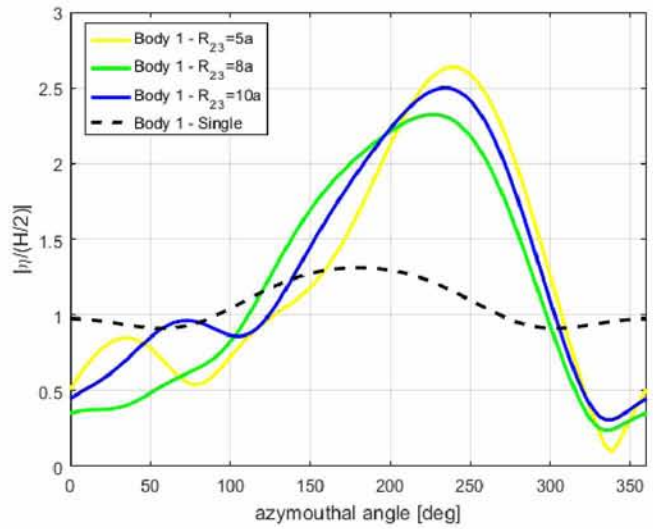
Διάγραμμα 141: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



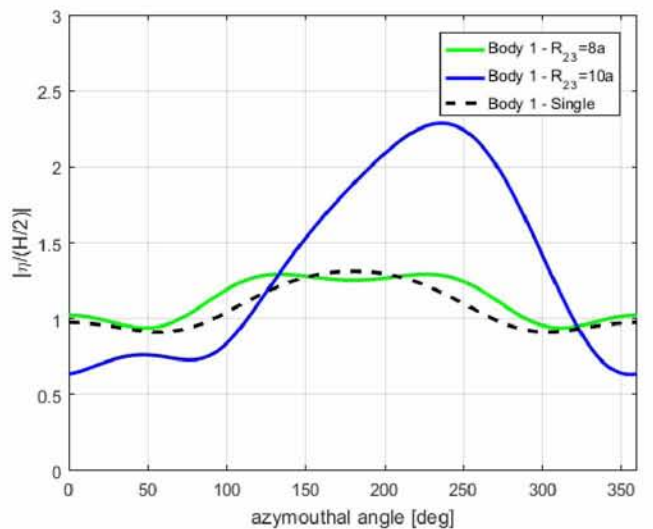
Διάγραμμα 142: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



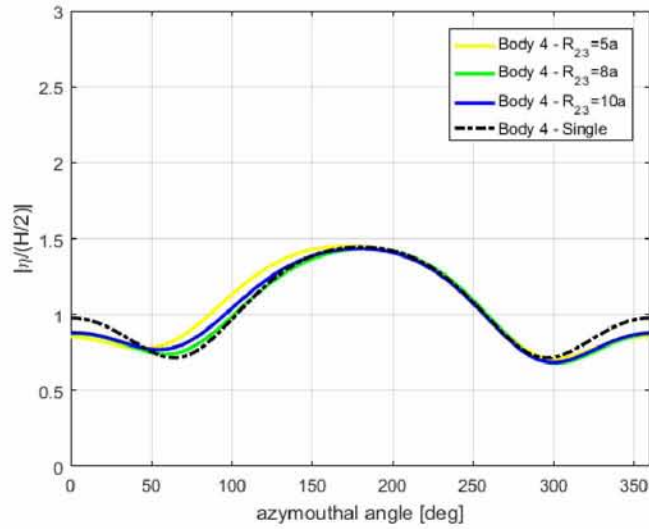
Διάγραμμα 143: Wave run up – Body 1; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



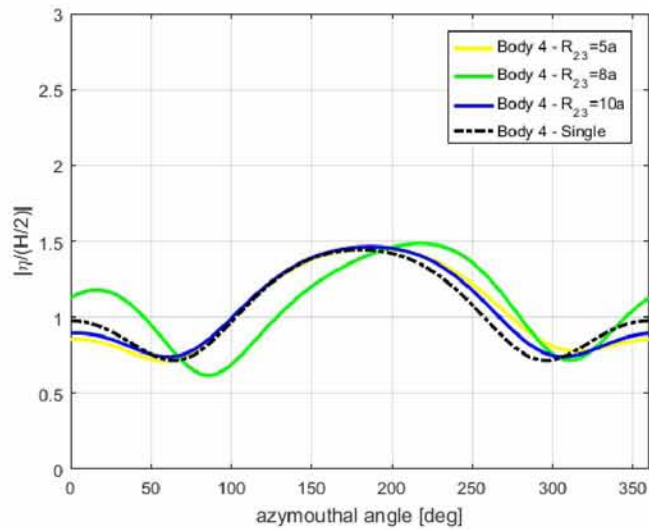
Διάγραμμα 144: Wave run up – Body 1; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



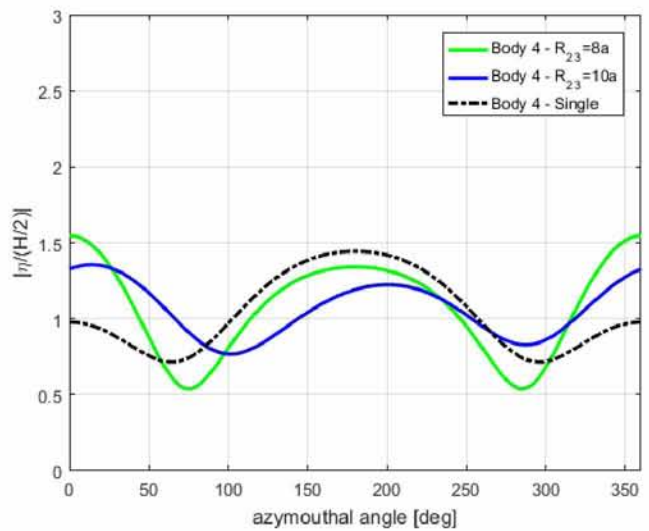
Διάγραμμα 145: Wave run up – Body 1; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



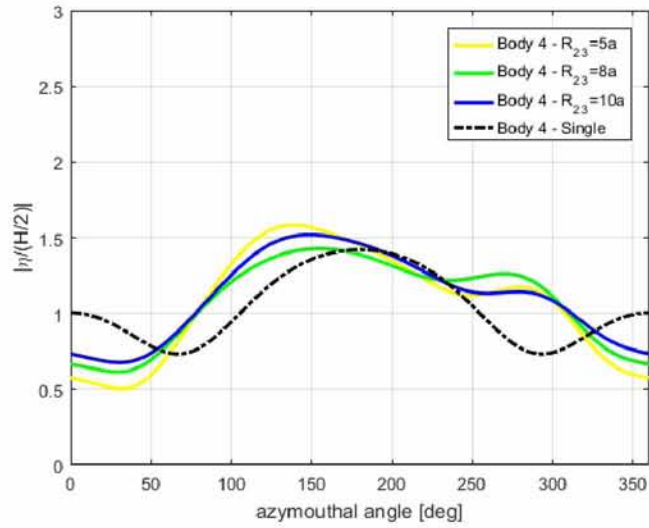
Διάγραμμα 146: Wave run up – Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



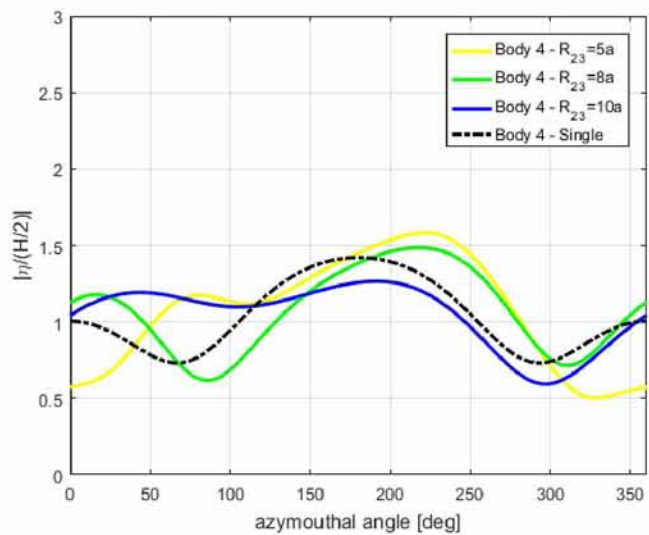
Διάγραμμα 147: Wave run up – Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



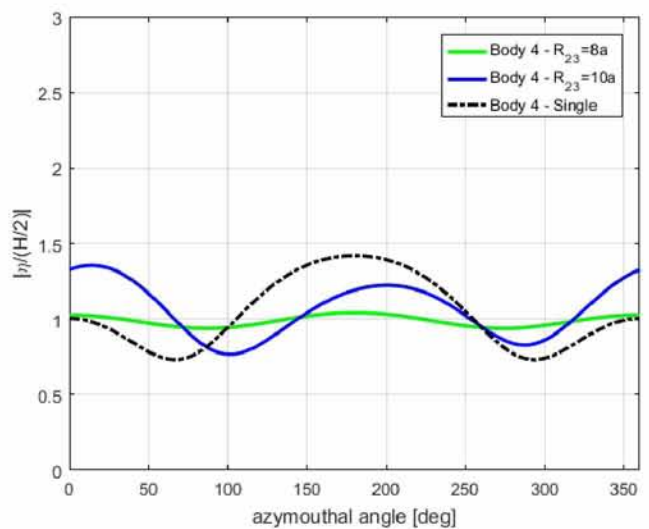
Διάγραμμα 148: Wave run up – Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kax



Διάγραμμα 149: Wave run up – Body 4; $R_{12}=2a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



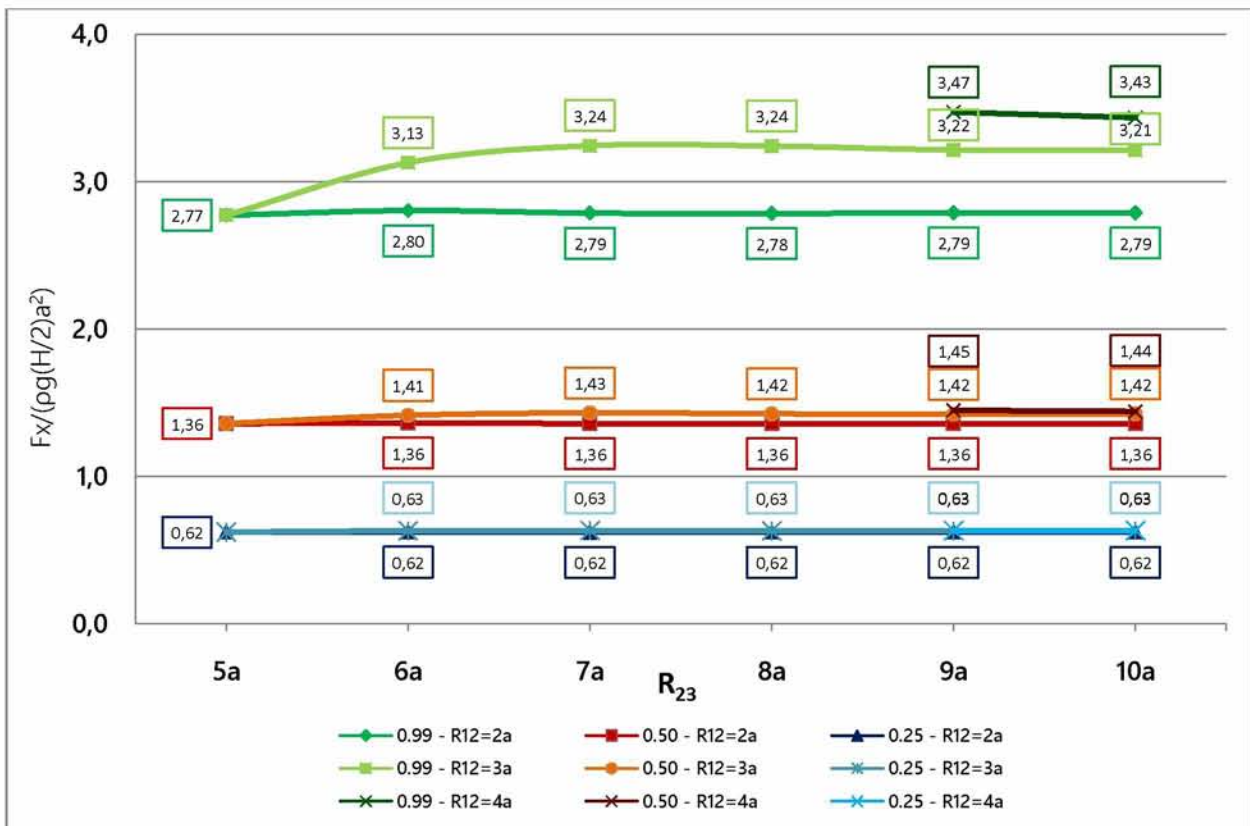
Διάγραμμα 150: Wave run up – Body 4; $R_{12}=3a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay



Διάγραμμα 151: Wave run up – Body 4; $R_{12}=4a$ & $R_{14}=4a$; Angle of heading $\beta=0^\circ$; $b_{1,4}/a_{1,4}=0.50$; kay

4.3 Συγκριτικά διαγράμματα

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην παρούσα εργασία. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές για τις δυνάμεις (surge force, sway force) και οι αντίστοιχες τιμές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο των σωμάτων, για κάθε μια από τις περιπτώσεις των διατάξεων που εξετάστηκαν. Στο σημείο αυτό, γίνεται, πλέον αντιληπτό, πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η γεωμετρία κάθε σώματος στην διάταξη και οι μεταξύ τους αποστάσεις, στην διαμόρφωση του υδροδυναμικού πεδίου.

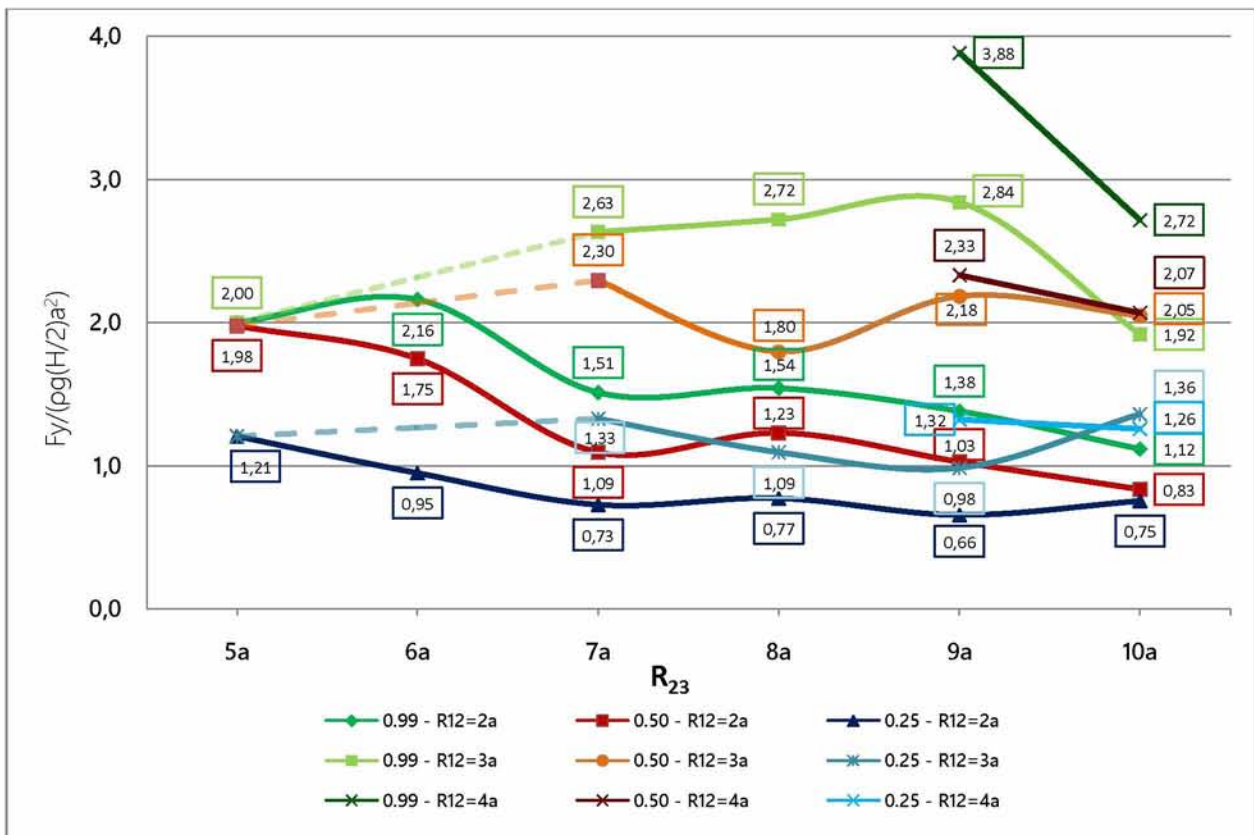


Διάγραμμα 152: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x (Διάταξη: Δ1-Δ2-Δ3)

Εξετάζοντας τα διαγράμματα 152-155 μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Η μείωση του λόγου b/a , επιφέρει:
 - > μείωση στις οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων που δρουν στο σώμα 1. Αντίστοιχα, ισχύει και στις περισσότερες περιπτώσεις για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του.
 - > μικρότερο εύρος διακύμανσης των μέγιστων τιμών τόσο στις ασκούμενες δυνάμεις, όσο και στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του σώματος 1.

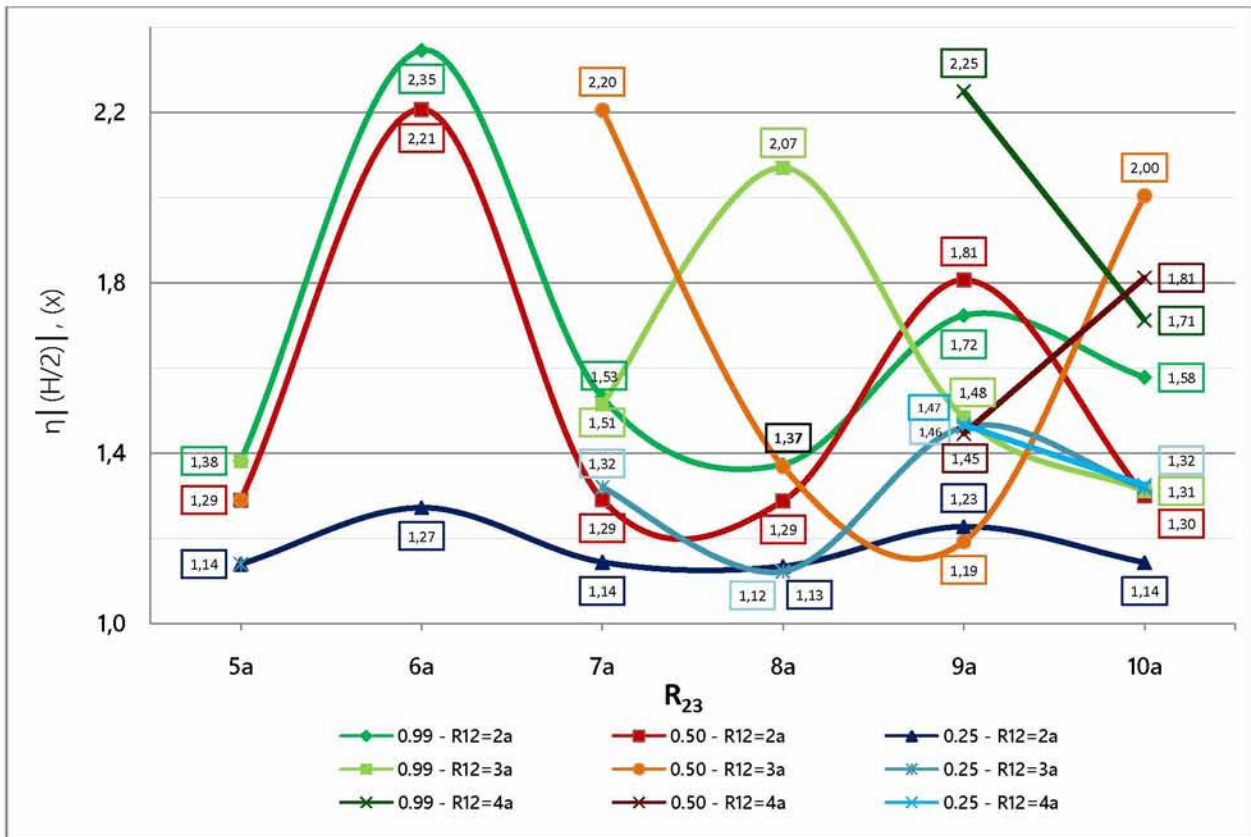
- Όταν η απόσταση R_{12} ισούται με $2a$:
 - > οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x δεν μεταβάλλονται με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} (βλ. διαγρ. 152), και οι αντίστοιχες τιμές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή (βλ. διαγρ. 154).
 - > οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} (βλ. διαγρ. 153).
- Η αύξηση της απόστασης R_{12} ($2a \rightarrow 3a \rightarrow 4a$) επιφέρει αύξηση της υδροδυναμικής φόρτισης. Ωστόσο, στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι περαιτέρω αύξηση των αποστάσεων μεταξύ των σωμάτων, οδηγεί σε σύγκλιση των τιμών στις τιμές που αντιστοιχούν στην περίπτωση του μεμονωμένου σώματος.



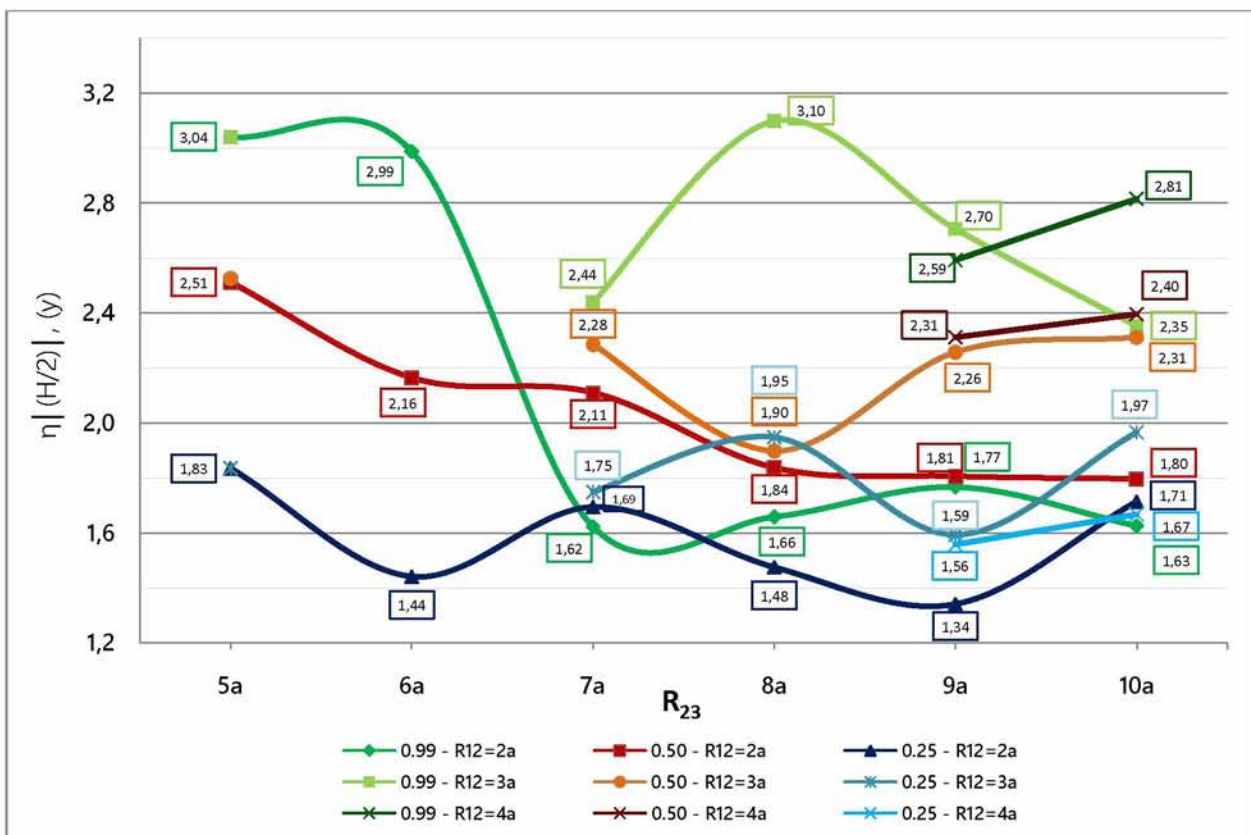
Διάγραμμα 153: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y (Διάταξη: Δ1-Δ2-Δ3)

Στα διαγράμματα 156-157, που αφορούν την διάταξη 4, παρατηρείται ότι:

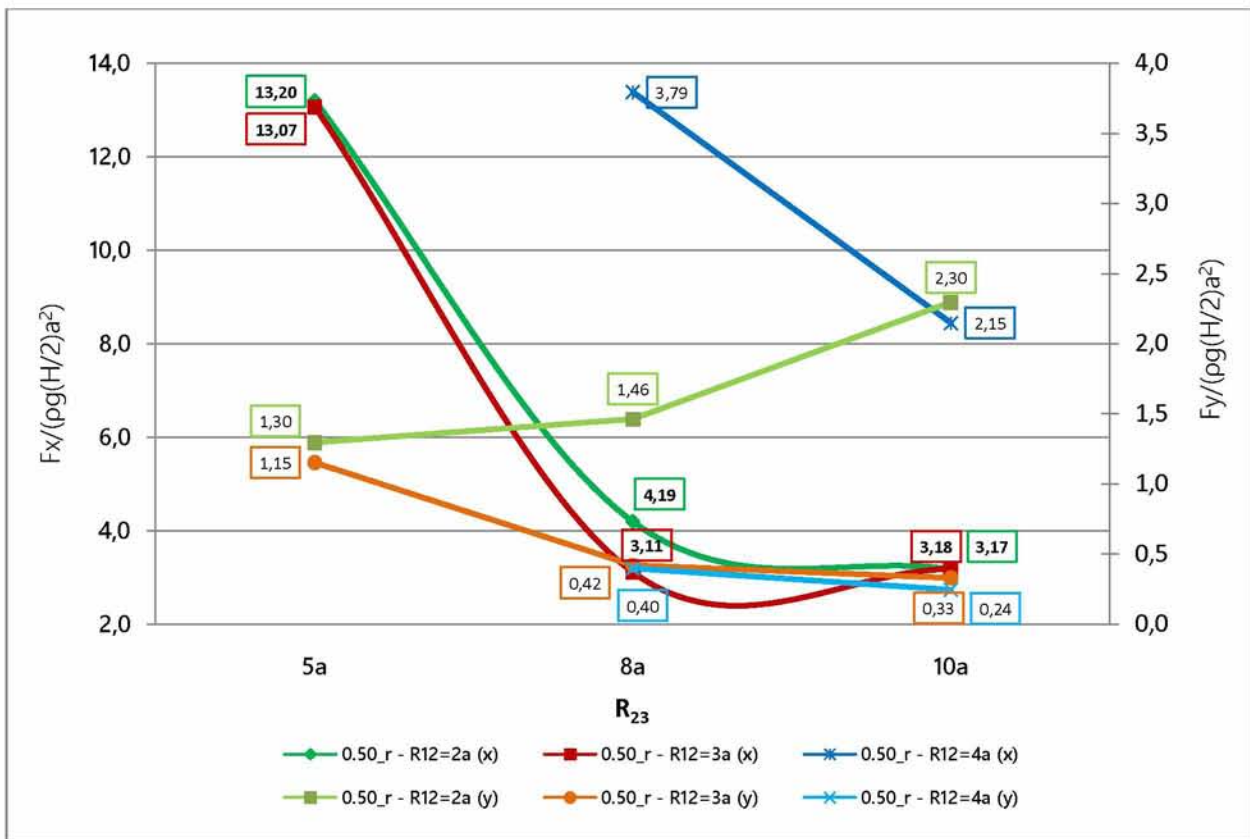
- Η αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} επιφέρει μείωση των ασκούμενων δυνάμεων, με εξαίρεση την περίπτωση όπου $R_{23} = 10a$ ($R_{12} = 2a$, $R_{13} = 8a$), που η μέγιστη τιμή της δύναμης F_y αυξάνεται. Όπως προαναφέρθηκε, η περαιτέρω αύξηση των αποστάσεων μεταξύ των σωμάτων, οδηγεί σε σύγκλιση των τιμών στις τιμές που αντιστοιχούν στην περίπτωση του μεμονωμένου σώματος. Συνεπώς, οι τιμές της δύναμης F_y θα συγκλίνουν στο μηδέν.
- Παρόμοια μεταβολή παρουσιάζουν και οι αντίστοιχες τιμές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.



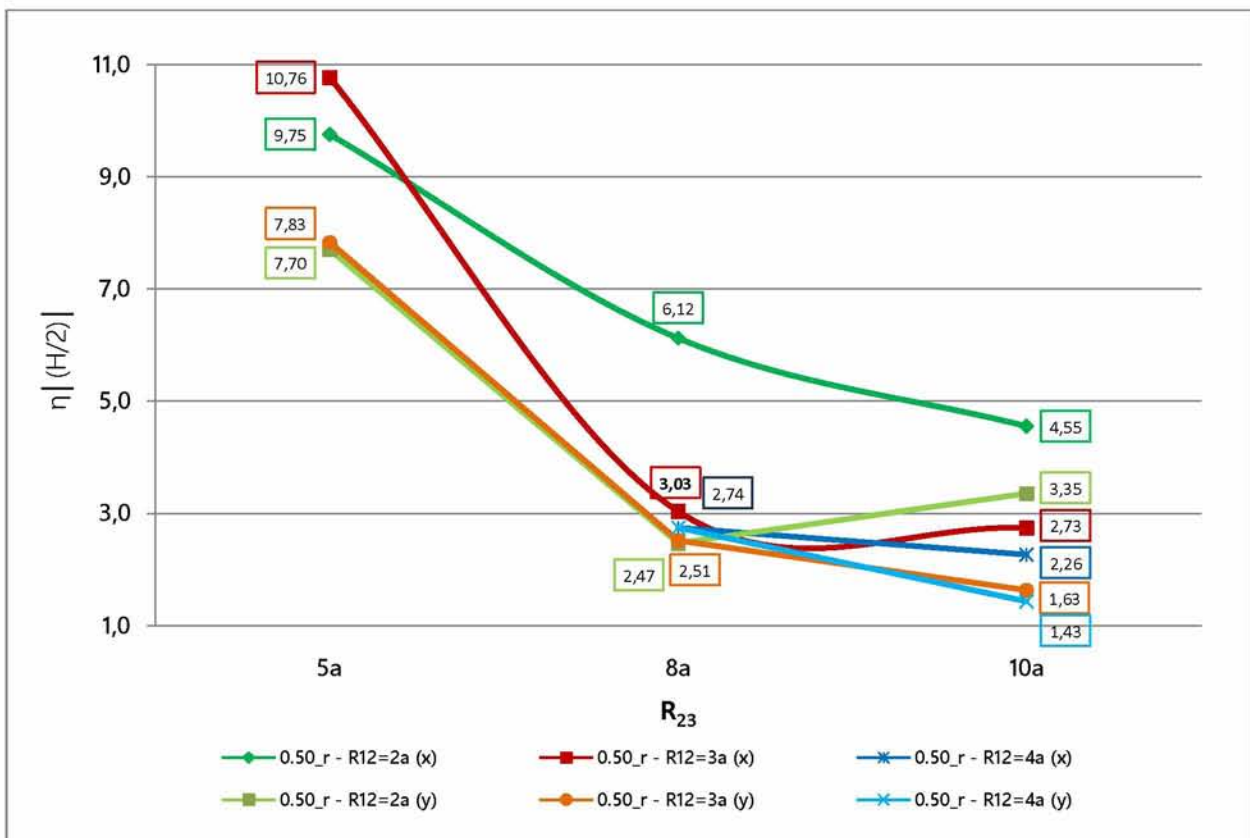
Διάγραμμα 154: “Wave run up” για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x (Διάταξη: Δ1-Δ2-Δ3)



Διάγραμμα 155: “Wave run up” για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y (Διάταξη: Δ1-Δ2-Δ3)



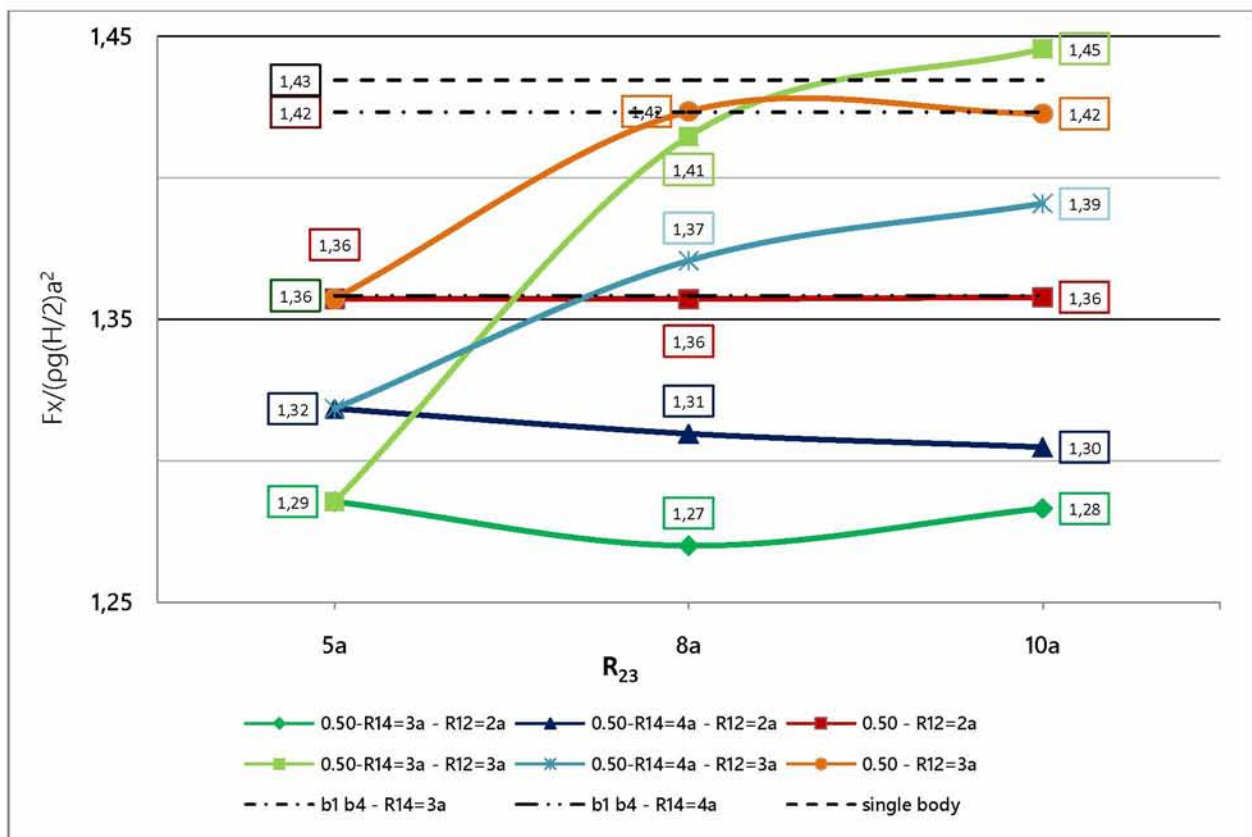
Διάγραμμα 156: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x και F_y (Διάταξη 4)



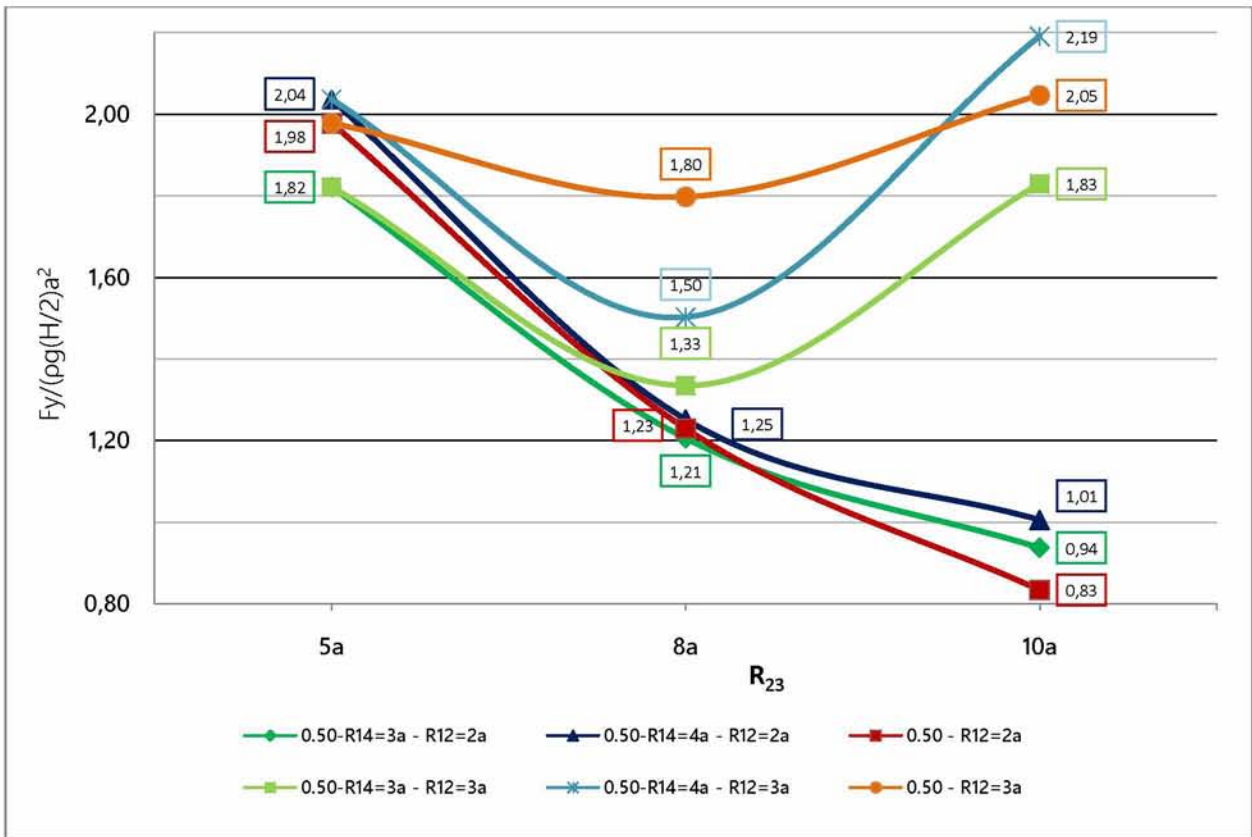
Διάγραμμα 157: "Wave run up" για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x και F_y (Διάταξη 4)

Στα διαγράμματα 158-161 ,που αφορούν το σώμα 1 της διάταξης 5, παρατηρείται ότι:

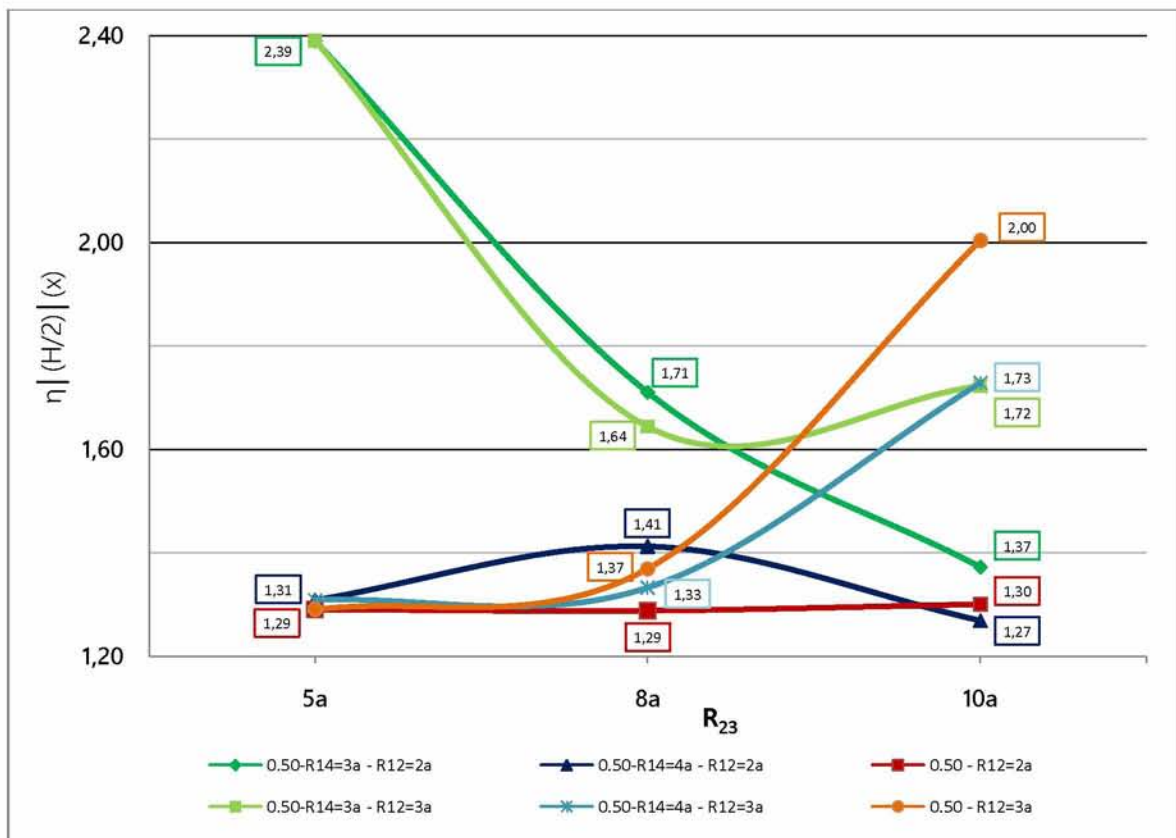
- Οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x παρουσιάζουν παρόμοια διακύμανση με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} για κοινές αποστάσεις R_{12} . Ειδικότερα όταν $R_{12}=2a$ μένουν σταθερές ενώ όταν $R_{12}=3a$ αυξάνονται(βλ. διαγρ. 158).
- Οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y παρουσιάζουν παρόμοια διακύμανση με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} για κοινές αποστάσεις R_{12} . Ειδικότερα όταν $R_{12}=2a$ οι δυνάμεις μειώνονται σημαντικά, περίπου 50%. Το ίδιο ισχύει, και για τις αντίστοιχες τιμές της ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. (βλ. διαγρ. 159,161).
- Για μεγαλύτερη απόσταση R_{14} μεταξύ των σωμάτων, οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών της υδροδυναμικής φόρτισης είναι μεγαλύτερες.
- Η ύπαρξη του σώματος 4 μπροστά από το σώμα 1, δεν επηρεάζει σημαντικά την φόρτιση που υφίσταται το σώμα 1, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι πολύ κοντά με αυτά της διάταξης 2.



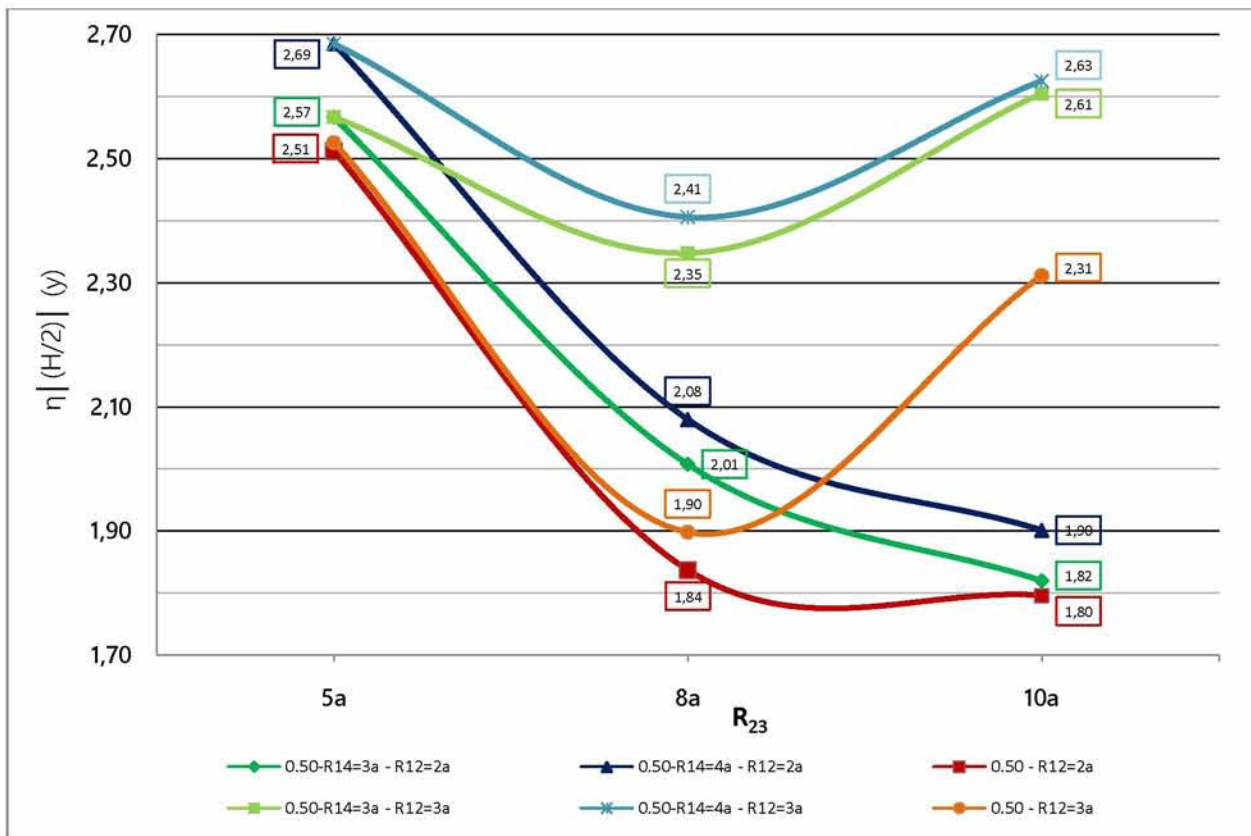
Διάγραμμα 158: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x – Body 1 (Διάταξη 5)



Διάγραμμα 159: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y – Body 1 (Διάταξη 5)



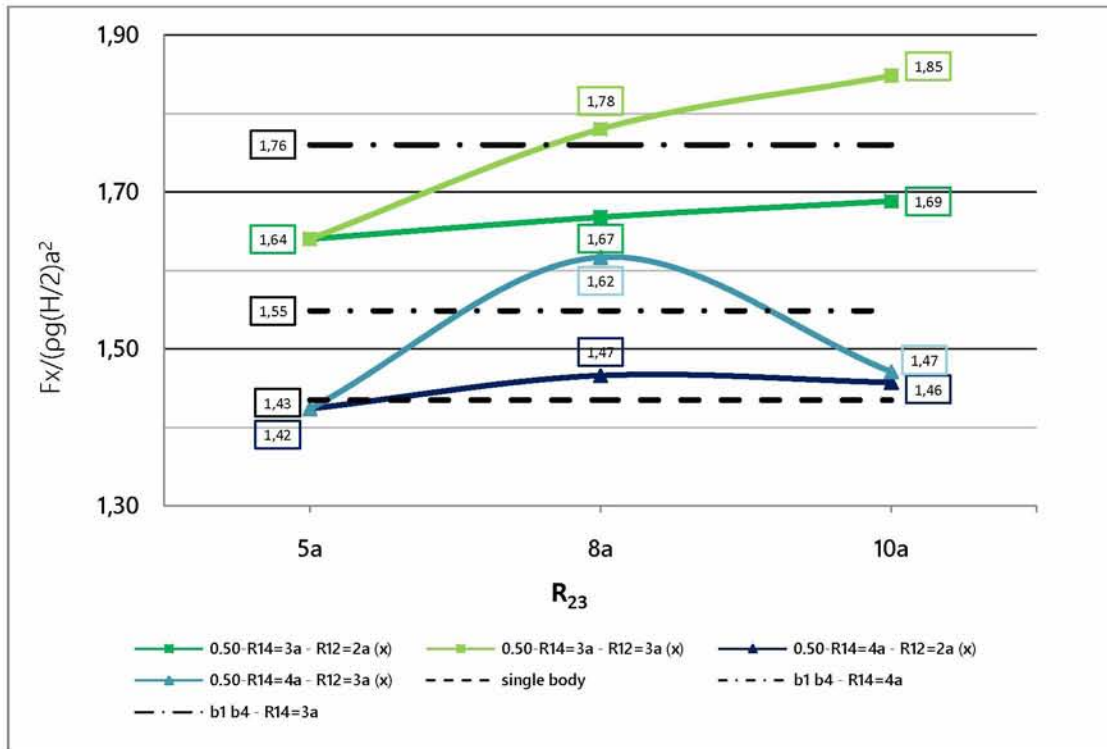
Διάγραμμα 160: "Wave run up" για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x – Body 1 (Διάταξη 5)



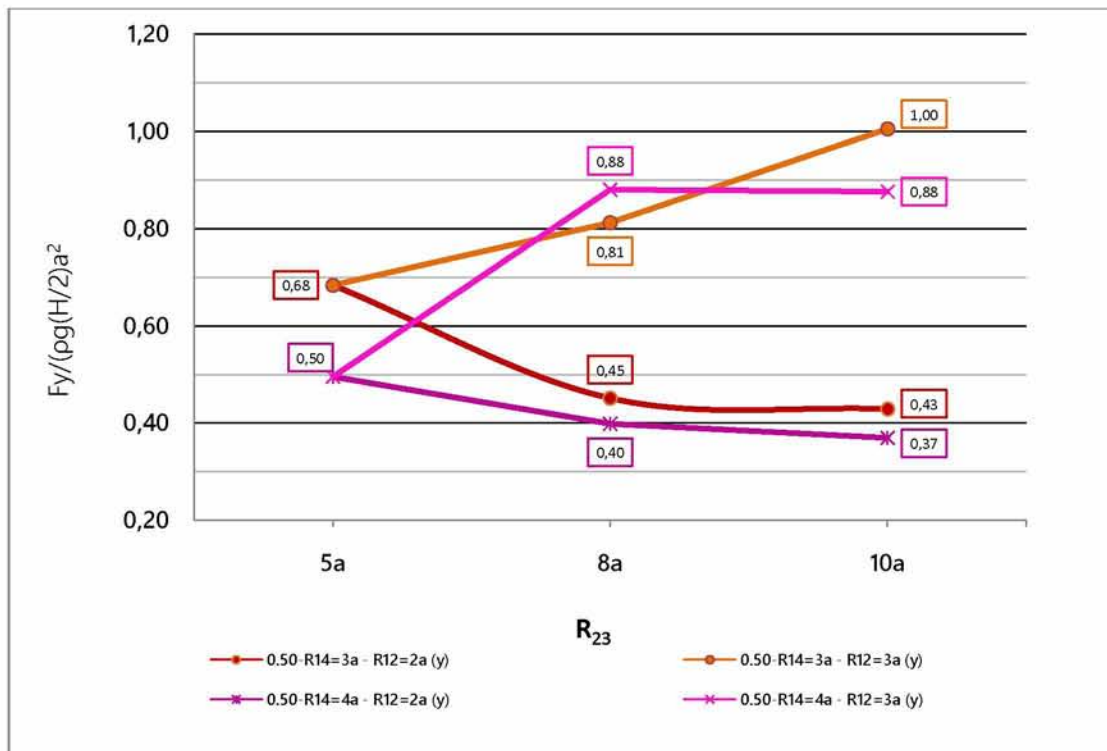
Διάγραμμα 161: “Wave run up” για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y – Body 1 (Διάταξη 5)

Τέλος, εξετάζοντας τα διαγράμματα 162-164 εντοπίζονται τα εξής:

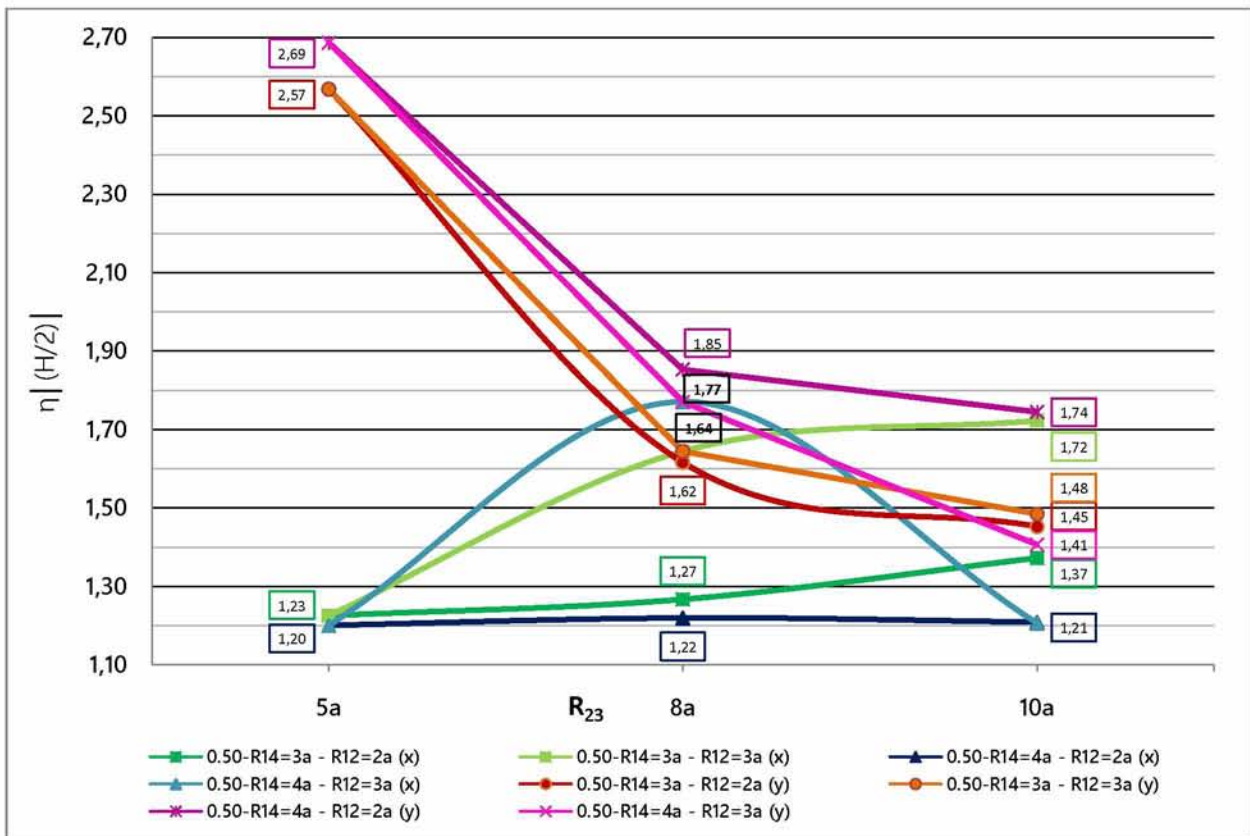
- Οι μέγιστες δυνάμεις F_x παρουσιάζουν μικρή διακύμανση με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} για κοινές αποστάσεις R_{12} (βλ. διαγρ. 162). Παρόμοιο μοτίβο παρατηρείται και για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του σώματος 4 στις σχετικές συχνότητες (βλ. διαγρ. 164).
- Για τις περιπτώσεις που εξετάζονται, η μέγιστη τιμή της δύναμης F_x για το μεμονωμένο σώμα είναι μικρότερη από τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα 4, είτε αυτό είναι μόνο με το σώμα 1, είτε όλα τα σώματα της διάταξης βρίσκονται στο πεδίο (βλ. διαγρ. 162).
- Για μεγαλύτερη απόσταση R_{14} μεταξύ των σωμάτων, οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_x είναι μικρότερες (βλ. διαγρ. 162).
- Οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων F_y κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 163, και αναλυτικότερα, με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} για κοινές αποστάσεις R_{12} , μειώνονται ελαφρώς όταν $R_{12}=2a$, ενώ για $R_{12}=3a$ παρουσιάζουν αυξητική τάση. Αντίθετα, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίμετρο του σώματος 4 στις σχετικές συχνότητες εμφανίζεται αυξημένη, ωστόσο μειώνεται με την αύξηση του εύρους του καναλιού R_{23} (βλ. διαγρ. 164).



Διάγραμμα 162: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων Fx – Body 4 (Διάταξη 5)



Διάγραμμα 163: Μέγιστες τιμές των δυνάμεων Fy – Body 4 (Διάταξη 5)



Διάγραμμα 164: “Wave run up” για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων Fx και Fy – Body 4 (Διάταξη 5)

5. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να συμβάλλει στη θεμελιώδη πρόκληση της πράσινης και της μπλε ανάπτυξης. Δηλαδή στην αξιοποίηση των φυσικών πόρων πιο αποτελεσματικά, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα οικοσυστήματα διατηρούν τη λειτουργικότητά τους.

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση από την χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει φτάσει στο κρίσιμο σημείο, όπου το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής απειλεί το μέλλον του πλανήτη. Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί το βήμα της ενεργειακής μετάβασης και να ληφθούν έκτακτα μέτρα, ώστε να επιτύχουμε ένα βιώσιμο μέλλον. Τα ορυκτά καύσιμα έχουν πλέον μειωμένο ρόλο, στο ενεργειακό μας προφίλ, και ένα σημαντικό ποσοστό από το μερίδιό τους, θα παρέχεται πλέον από ανανεώσιμες πηγές. Το κάρβουνο έχει φτάσει στην κορύφωσή του, το πετρέλαιο θα κορυφωθεί το 2023 και το φυσικό αέριο θα γίνει η μεγαλύτερη πηγή παροχής ενέργειας το 2026 και θα αγγίξει το 25% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης το 2050. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (16% της παγκόσμιας παροχής ενέργειας) και η αιολική ενέργεια (12%) θα εξελιχθούν στους πιο σημαντικούς «παικτες» μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η ωκεάνια ενέργεια, έχει πολλά να προσφέρει σε αυτή τη δραματική ενεργειακή μετάβαση που εκτυλίσσεται, καθώς το ενεργειακό δυναμικό των θαλασσών και των ωκεανών μας ξεπερνά τις σημερινές μας ανάγκες, και δύναται να βγάλει την ανθρωπότητα από το ενεργειακό τέλμα. Η τακτική φύση της παροχής της ωκεάνιας ενέργειας, συμπληρώνει τις πιο μεταβλητές Α.Π.Ε. (αιολική, ηλιακή), συμβάλλοντας στην εξομάλυνση της καμπύλης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και στη διευκόλυνση της εξισορρόπησης των δικτύων. Η κυματική ενέργεια λαμβάνει ένα μερίδιο έως και 80% της θαλάσσιας ενέργειας και είναι η πλέον ελπιδοφόρος μορφή της, καθώς πιστεύεται ότι είναι ένας από τους πιο ευεργετικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρισμού, δεδομένου ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θεωρούνται ήπιες.

Ωστόσο, η μετάβαση μιας νέας τεχνολογίας ενέργειας στη βιομηχανική πραγματικότητα και η τροφοδοσία σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, απαιτεί δεκαετίες επενδύσεων, καινοτομίας και εφαρμοσμένης έρευνας. Παρά το αυξημένο ενδιαφέρον, που αποδεικνύεται από τις πολιτικές πρωτοβουλίες, η ανάπτυξη της ενέργειας των ωκεανών προχωρεί με χαμηλότερο ρυθμό από ό, τι αναμενόταν. Αιτίες είναι, η χαμηλή πρόσβαση στη χρηματοδότηση, διοικητικά και περιβαλλοντικά ζητήματα, ανεπαρκής συνεργασία μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα και οι αλληλεπικαλύψεις στην έρευνα.

Ο τομέας της κυματικής ενέργειας φθάνει σε ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη της βιομηχανίας, με θετικά βήματα προς την εμπορική βιωσιμότητα. Έρευνες έχουν δείξει ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στον θαλάσσιο χώρο μπορεί να είναι χαμηλότερο από οποιαδήποτε άλλη πηγή αλλά, η συντήρηση και η λειτουργία των εγκαταστάσεων ωκεάνιας ενέργειας παραμένει δαπανηρή. Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι, στην Ευρώπη, η τιμή κατασκευής

εγκαταστάσεων υπεράκτιων αιολικών πάρκων μειώθηκε κατά 46% τα τελευταία 5 χρόνια και 22% μόνο κατά το τελευταίο έτος.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί, ότι οι υβριδικές λύσεις παρουσιάζουν πρόσθετο δυναμικό και μπορούν να περιλαμβάνουν υπεράκτια αιολικά πάρκα που ενσωματώνουν συσκευές ωκεάνιας ενέργειας, εγκαταστάσεις υδατοκαλλιέργειας συνδυασμένες με τεχνολογίες για την εκμετάλλευση θαλάσσιας ενέργειας καθώς και την αφαλάτωση θαλασσινού νερού σε συνδυασμό με τεχνολογία ωσμωτικής ισχύος. Επιπλέον, η ενσωμάτωση WEC σε κυματοθραύστες ή λιμενικές εγκαταστάσεις μεγιστοποιεί την οικονομική αποδοτικότητα στην εφαρμογή τους, ενώ παράλληλα εκμεταλλεύεται τα οφέλη που προκύπτουν .

Τέλος , στην ελληνική πραγματικότητα μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το πλεονέκτημα των ισχυρών ανέμων σε όλη τη διάρκεια του έτους στο Αιγαίο πέλαγος και την δυνατότητα ταυτόχρονης εκμετάλλευσης των πηγών ενέργειας ανέμου και κυματισμών, το μεγάλο μήκος των ακτογραμμών (16.000 χλμ) και την ενσωμάτωση WEC σε ήδη υπάρχοντες κυματοθραύστες/ λιμενικές εγκαταστάσεις (>1300). Επιπλέον, με βάση τις εκτιμήσεις ανέμου-κύματος, η διαθέσιμη ενέργεια μπορεί να καλύψει τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό που υπερβαίνει το 85-90% στις περιοχές κοντά στα νησιά του Αιγαίου πελάγους. Επίσης, σύμφωνα με τον πρόεδρο της ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή, το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο νησιωτικό χώρο του Αιγαίου (χερσαίο και υπεράκτιο), ξεπερνά τα 10.000 MW, σχεδόν όσο η αιχμή ζήτησης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε, η αλληλεπίδραση επίπεδων γραμμικών κυματισμών με μια συστοιχία σωμάτων. Σε κάθε περίπτωση, μεταβάλλονταν γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας (διάταξη), είτε του εξεταζόμενου σώματος (ελλειπτική εκκεντρότητα), ώστε να εντοπιστούν φαινόμενα «wave trapping». Η ενέργεια που μπορούν να παγιδεύσουν οι διατάξεις με πολλαπλά στοιχεία σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς αλληλεπιδρούν με τα επιφανειακά κύματα, μπορεί να αξιοποιηθεί από συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγικότητα και η αποδοτικότητά τους. Η μεθοδολογία επίλυσης αποτελεί την υπάρχουσα λύση των Chatjigeorgiou & Mantrakos (2009, 2010a), η οποία έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά το πρόβλημα της υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης στο πλαίσιο της γραμμικής θεωρίας.

Συνοπτικά, μια λίστα των γενικών παρατηρήσεων που θα μπορούσαν να γίνουν είναι:

- Οι δυνάμεις F_x (surge forces) παρέχουν το μοτίβο για τις ροπές M_y (pitch moments), ενώ οι δυνάμεις F_y (sway forces) παρέχουν το μοτίβο για τις ροπές M_x (roll moments).
- Οι αιχμές στη φόρτιση είναι εμφανείς και συνδέονται με υδροδυναμικούς συντονισμούς. Ενδιαφέρον προκαλεί η κυματιστή κατανομή των δυνάμεων F_y και των ροπών M_x για τις διατάξεις 1,2,3 και 5 με αιχμηρές ενισχύσεις σε πολλές εξεταζόμενες περιπτώσεις.
- Το προηγούμενο συνοδεύεται με ισχυρές ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των κυλίνδρων και επίσης στις βρεχόμενες επιφάνειες των σωμάτων.

Συνεπώς, η μεταβολή της υδροδυναμικής φόρτισης είναι γενικά πολύπλοκη και αποτελεί κυριολεκτικά συνάρτηση της γεωμετρίας της συστοιχίας (διάταξη, προσανατολισμός) και προφανώς του πλήθους και της μορφής των κυλίνδρων. Όσον αφορά τους υδροδυναμικούς συντονισμούς, αυτοί ανιχνεύονται σε συγκεκριμένους κυματάρθμους, που τελικά εξαρτώνται από όλες τις παραμέτρους που εμπλέκονται στο πρόβλημα

Συμπερασματικά, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης των συσκευών/ κατασκευών αυτών μέσω διερεύνησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των OWC σε συνδυασμό με τις ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες που επικρατούν στην αντίστοιχη περιοχή που μας ενδιαφέρει.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διατυπώματα για τις περιοδικές και τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu

A.1 Άρτιες και περιττές περιοδικές συναρτήσεις Mathieu

$$ce_{2r}(v, q) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{2k}^{2r}(q) \cos 2kv, \quad (\text{A.1})$$

$$ce_{2r+1}(v, q) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{2k+1}^{2r+1}(q) \cos(2k+1)v, \quad (\text{A.2})$$

$$se_{2r+1}(v, q) = \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1}^{2r+1}(q) \sin(2k+1)v, \quad (\text{A.3})$$

$$se_{2r+2}(v, q) = \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+2}^{2r+2}(q) \sin(2k+2)v, \quad (\text{A.4})$$

όπου, A_{2k}^{2r} , A_{2k+1}^{2r+1} , B_{2k+1}^{2r+1} και B_{2k+2}^{2r+2} είναι οι συντελεστές των αναπτυγμάτων των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu, οι οποίες αποτελούν συναρτήσεις της παραμέτρου Mathieu q .

A.2 Άρτιες και περιττές τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu

Οι τροποποιημένες συναρτήσεις Mathieu μπορούν να εκφραστούν ως σειρές συναρτήσεων Bessel σύμφωνα με τους *Abramowitz and Stegun (1970)*.

$$\begin{aligned} ce_{2r}(u, q) &= \frac{ce_{2r}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{A_0^{2r}(q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k A_{2k}^{2r}(q) J_{2k}(2\sqrt{q} \cosh u) \\ &= \frac{ce_{2r}(0, q)}{A_0^{2r}(q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k A_{2k}^{2r}(q) J_{2k}(2\sqrt{q} \sinh u), \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned}
ce_{2r+1}(u, q) &= \frac{ce'_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{\sqrt{q}A_1^{2r+1}(q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+1} A_{2k+1}^{2r+1}(q) J_{2k+1}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{ce_{2r+1}(0, q)}{\sqrt{q}A_1^{2r+1}(q)} \coth u \sum_{k=0}^{\infty} (2k+1) A_{2k+1}^{2r+1}(q) J_{2k+1}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.6}$$

$$\begin{aligned}
se_{2r+1}(u, q) &= \frac{se_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{\sqrt{q}B_1^{2r+1}(q)} \tanh u \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (2k+1) B_{2k+1}^{2r+1}(q) J_{2k+1}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{se'_{2r+1}(0, q)}{\sqrt{q}B_1^{2r+1}(q)} \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1}^{2r+1}(q) J_{2k+1}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}
s_{2r+2}(u, q) &= \frac{se'_{2r+2}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{\sqrt{q}B_2^{2r+2}(q)} \tanh u \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+1} (2k+2) B_{2k+2}^{2r+2}(q) J_{2k+2}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{se'_{2r+2}(0, q)}{qB_2^{2r+2}(q)} \coth u \sum_{k=0}^{\infty} (2k+2) B_{2k+2}^{2r+2}(q) J_{2k+2}(2\sqrt{q} \sinh u).
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Επίσης, ως σειρές προϊόντων των συναρτήσεων Bessel δίνονται και από τον *McLachlan* (1947)

$$ce_{2r}(u, q) = \frac{ce_{2r}(0, q)ce_{2r}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{[A_0^{2r}(q)]^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k A_{2k}^{2r}(q) J_k(u_1) J_k(u_2), \tag{A.9}$$

$$\begin{aligned}
ce_{2r+1}(u, q) &= \frac{ce_{2r+1}(0, q)ce'_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{\sqrt{q}[A_1^{2r+1}(q)]^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+1} A_{2k+1}^{2r+1}(q) [J_k(u_1) J_{k+1}(u_2) \\
&\quad + J_{k+1}(u_1) J_k(u_2)],
\end{aligned} \tag{A.10}$$

$$\begin{aligned}
se_{2r+1}(u, q) &= \frac{se'_{2r+1}(0, q)se_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{\sqrt{q}[B_1^{2r+1}(q)]^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k B_{2k+1}^{2r+1}(q) [J_k(u_1) J_{k+1}(u_2) \\
&\quad - J_{k+1}(u_1) J_k(u_2)],
\end{aligned} \tag{A.11}$$

$$\begin{aligned}
se_{2r+2}(u, q) &= \frac{se'_{2r+2}(0, q)se'_{2r+2}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)}{q[B_{2r+2}^{2r+2}(q)]^2} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+1} B_{2k+2}^{2r+2}(q) [J_k(u_1)J_{k+2}(u_2) \\
&\quad - J_{k+2}(u_1)J_k(u_2)],
\end{aligned} \tag{A.12}$$

Όπου $u_1 = \sqrt{q}e^{-u}$ and $u_2 = \sqrt{q}e^u$.

Εναλλακτικές μορφές των τροποποιημένων συναρτήσεων Mathieu (αναφερόμενες και ως ακτινικές συναρτήσεις Mathieu) είναι (Meixner and Schäfer, 1954)

$$\begin{aligned}
Mc_{2r}^{(j)}(u, q) &= \frac{1}{ce_{2r}(0, q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} A_{2k}^{2r}(q) Z_{2k}^{(j)}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{(-1)^r}{ce_{2r}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)} \sum_{k=0}^{\infty} A_{2k}^{2r}(q) Z_{2k}^{(j)}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.13}$$

$$\begin{aligned}
Mc_{2r+1}^{(j)}(u, q) &= \frac{1}{ce_{2r+1}(0, q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} A_{2k+1}^{2r+1}(q) Z_{2k+1}^{(j)}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{(-1)^{r+1} \coth u}{ce'_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)} \sum_{k=0}^{\infty} (2k+1) A_{2k+1}^{2r+1}(q) Z_{2k+1}^{(j)}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.14}$$

$$\begin{aligned}
Ms_{2r+1}^{(j)}(u, q) &= \frac{\tanh u}{se'_{2r+1}(0, q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} (2k+1) B_{2k+1}^{2r+1}(q) Z_{2k+1}^{(j)}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{(-1)^r}{se_{2r+1}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)} \sum_{k=0}^{\infty} B_{2k+1}^{2r+1}(q) Z_{2k+1}^{(j)}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.15}$$

$$\begin{aligned}
Ms_{2r+2}^{(j)}(u, q) &= \frac{\tanh u}{se_{2r+2}(0, q)} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} (2k+2) B_{2k+2}^{2r+2}(q) Z_{2k+2}^{(j)}(2\sqrt{q} \cosh u) \\
&= \frac{(-1)^{r+1} \coth u}{se'_{2r+2}\left(\frac{\pi}{2}, q\right)} \sum_{k=0}^{\infty} (2k+2) B_{2k+2}^{2r+2}(q) Z_{2k+2}^{(j)}(2\sqrt{q} \sinh u),
\end{aligned} \tag{A.16}$$

όπου $j = 1, 2, 3, 4$ δηλώνει την τάξη των ακτινικών συναρτήσεων Mathieu, ενώ η αντιστοιχία μεταξύ των συναρτήσεων $Z_m^{(j)}$ και των συναρτήσεων Bessel και Hankel είναι $Z_m^{(1)} \equiv J_m$, $Z_m^{(2)} \equiv Y_m$, $Z_m^{(3)} \equiv H_m^{(1)}$ και $Z_m^{(4)} \equiv H_m^{(2)}$.

Οι ακτινικές συναρτήσεις Mathieu (Εξ. A.13-A.16) μπορούν επίσης να εκφραστούν ως σειρές προϊόντων των συναρτήσεων Bessel (Meixner and Schäfer, 1954). Οι σχετικοί τύποι είναι:

$$Mc_{2r}^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = \frac{1}{A_0^{2r}(\mathbf{q})} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} A_{2k}^{2r}(\mathbf{q}) J_k(\mathbf{u}_1) Z_k^{(j)}(\mathbf{u}_2), \quad (\text{A.17})$$

$$s_{2r+1}^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = \frac{1}{A_1^{2r+1}(\mathbf{q})} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} A_{2k+1}^{2r+1}(\mathbf{q}) [J_k(\mathbf{u}_1) Z_{k+1}^{(j)}(\mathbf{u}_2) + J_{k+1}(\mathbf{u}_1) Z_k^{(j)}(\mathbf{u}_2)], \quad (\text{A.18})$$

$$c_{2r+1}^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = \frac{1}{B_1^{2r+1}(\mathbf{q})} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} B_{2k+1}^{2r+1}(\mathbf{q}) [J_k(\mathbf{u}_1) Z_{k+1}^{(j)}(\mathbf{u}_2) - J_{k+1}(\mathbf{u}_1) Z_k^{(j)}(\mathbf{u}_2)], \quad (\text{A.19})$$

$$s_{2r+2}^{(j)}(\mathbf{u}, \mathbf{q}) = \frac{1}{B_2^{2r+1}(\mathbf{q})} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+r} B_{2k+2}^{2r+2}(\mathbf{q}) [J_k(\mathbf{u}_1) Z_{k+2}^{(j)}(\mathbf{u}_2) - J_{k+2}(\mathbf{u}_1) Z_k^{(j)}(\mathbf{u}_2)]. \quad (\text{A.20})$$

A.3 Ορθογωνικότητα των περιοδικών συναρτήσεων Mathieu

Οι περιοδικές συναρτήσεις Mathieu ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες ορθογωνικότητας (Abramowitz and Stegun, 1970).

$$\int_0^{2\pi} ce_r(v, \mathbf{q}) ce_m(v, \mathbf{q}) dv = \int_0^{2\pi} se_r(v, \mathbf{q}) se_m(v, \mathbf{q}) dv = \pi \delta_{rm}. \quad (\text{A.21})$$

A.4 Καθολικός συμβολισμός των περιοδικών και των ακτινικών συναρτήσεων Mathieu.

Οι Meixner και Schäfer (1954) παρέχουν τους ακόλουθους συμπαγείς συμβολισμούς για τις περιοδικές και ακτινικές συναρτήσεις Mathieu:

$$ce_r(v, q) = 2^{-1/2}me_r(v, q), \quad r = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{A.22})$$

$$se_r(v, q) = i2^{-1/2}me_{-r}(v, q), \quad r = 1, 2, \dots, \quad (\text{A.23})$$

$$M_r^{(j)}(u, q) = Mc_r^{(j)}(u, q), \quad r = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{A.24})$$

$$(-1)^r M_{-r}^{(j)}(u, q) = Ms_r^{(j)}(u, q), \quad r = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{A.25})$$

A.5 Συντελεστές αναπτυγμάτων για τις περιοδικές συναρτήσεις Mathieu $me_r(v, q)$

Οι περιοδικές συναρτήσεις Mathieu $me_r(v, q)$ μπορούν να αναπτυχθούν ως εξής:

$$me_r(v, q) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_{2s}^r(q) e^{i(r+2s)v}, \quad (\text{A.26})$$

και

$$d_{2s,r}(q) = (-1)^s C_{2s}^r(q), \quad d_{2s+1,r}(q) = 0, \quad (\text{A.27})$$

$$d'_{2s,r}(q) = (-1)^s C_{-2s}^{r+2s}(q), \quad d'_{2s+1,r}(q) = 0. \quad (\text{A.28})$$

Οι σχέσεις μεταξύ των συντελεστών των αναπτυγμάτων d and d' και των συντελεστών των αναπτυγμάτων των άρτιων και των περιττών περιοδικών συναρτήσεων Mathieu είναι (Chatjigeorgiou and Mavrakos, 2010) :

$$\begin{aligned} d'_{s-r,r}(q) &= 2^{-1/2}(-1)^{(s-r)/2}A_r^s(q), \quad s = 0, 1, 2, \dots, \\ d'_{-s-r,r}(q) &= -2^{-1/2}(-1)^{(-s-r)/2}B_r^s(q), \quad s = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} d'_{2s,0}(q) &= 2^{1/2}(-1)^s A_0^{2s}(q), \quad r = 0, \\ d_{s-r,r}(q) &= 2^{-1/2}(-1)^{(s-r)/2}A_s^r(q), \quad r = 0, 1, 2, \dots, \\ d_{s+r,-r}(q) &= -2^{-1/2}(-1)^{(s+r)/2}B_s^r(q), \quad r = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

$$d_{-2r,2r}(q) = 2^{1/2}(-1)^{-r}A_0^{2r}(q), \quad s = 0.$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2012). *Blue Growth, opportunities for marine and maritime sustainable growth*, Brussels.
- [2]. European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2014). *Innovation in the Blue Economy: realizing the potential of our seas and oceans for jobs and growth*, Brussels.
- [3]. European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2014). *Blue Energy: Action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond*, Brussels.
- [4]. European Commission: Commission staff working document (2017). *Report on the Blue Growth Strategy: Towards more sustainable growth and jobs in the blue economy*, Brussels.
- [5]. Ocean Energy Forum (2016). *Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe*.
- [6]. Sang, Y., Karayaka, H.B., Yan, Y., Yilmaz, N., Souders, D., (2018). "Ocean (Marine) Energy," *Comprehensive Energy Systems Volume 1*, pp.733-769.
- [7]. Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., et al., (2002). "Wave Energy in Europe: Current status and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405-31.
- [8]. Magagna, D., Uihlein, A., (2015). "Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives," *International Journal of Marine Energy* 11, 84–104.
- [9]. Γκριζαρη Ν., *Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες*. ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
- [10]. Μαναλης Α.Ε., *Κυματική και ωκεάνια ενέργεια, σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές*. ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ-ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΒΑΛΑΣ, Καβάλα, 2012.
- [11]. Παναγιωτόπουλος Μ., *Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας*. (ΚΑΠΕ), 2010.
- [12]. Κατσαρδή Β., *ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ : ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ - ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ «ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ 1^Ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ , ΙΟΥΝΙΟΣ 2017*
- [13]. Arena, F., Fiamma, V., Laface, V., Malara, G., Romolo, A., Viviano, A., Sannino, G., Carillo A.,(2013). "Installing U-OWC Devices Along Italian Coasts," in: *Proc 32nd Int. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France, 2013, Volume 8: *Ocean Renewable Energy*.

- [14]. Arena, F., Romolo, A., Malara, G., Fiamma, V., Laface, V., (2017). "The First Full Operative U-OWC Plants in the Port of Civitavecchia," in: Proc 36th Int. Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim, Norway, 2017, Volume 10: Ocean Renewable Energy.
- [15]. Falcão, A.F.O., Henriques, J.C.C., (2015). "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," *Renewable Energy*, 85, pp. 1391-1424.
- [16]. Konispoliatis, D.N., Mazarakos, T.P., Mavrakos, S.A., (2016). "Hydrodynamic analysis of three-unit arrays of floating annular oscillating-water-column wave energy converters," *Applied Ocean Research* 61, 42–64.
- [17]. Emmanouil, G., Galanis, G., Kalogeri, C., et al. (2016). "10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas," *Renewable Energy* 90, 399–419.
- [18]. Lavidas, G., Venugopal, V., (2017). "A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea," *Renewable Energy* 103, 401-417.
- [19]. Melikoglu, M., (2018). "Current status and future of ocean energy sources: A global review," *Ocean Engineering* 148, 563–573.
- [20]. Mustapa, M.A., Yaakob, O.B., Ahmed, Y.M., Rheem, C.K., Koh, K.K., Adnan, F.A., (2017). "Wave energy device and breakwater integration: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, 43–58.
- [21]. European Commission: COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT - IMPACT ASSESSMENT (2014). *Blue Energy: Action needed to deliver on the potential of ocean energy in European seas and oceans by 2020 and beyond*, Brussels.
- [22]. Williams, AN., Darwiche, MK., (1988). "Three dimensional wave scattering by elliptical breakwaters," *Ocean Engineering*, 15, 103–118.
- [23]. Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., (2009). "Hydrodynamic diffraction by multiple elliptical cylinders," in: Proc 24th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Zelonogorsk, Russia, 2009, pp. 38–41.
- [24]. Chatjigeorgiou, I.K., Mavrakos, S.A., (2010a). "An analytical approach for the solution of the hydrodynamic diffraction by arrays of elliptical cylinders," *Applied Ocean Research* 32, 242–251.
- [25]. Chatjigeorgiou, I.K. (2011). "Three dimensional wave scattering by arrays of elliptical and circular cylinders," *Ocean Engineering*, 38, 1480–1494.
- [26]. Katsardi, V., Grammenos, T., Katifeoglou, S., Mavrakos, S.A., Chatjigeorgiou, I.K., (2016). "Hydrodynamic Loading and Wave Run-up on "Elliptical" Breakwaters," in: Proc 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), ISBN 978-1-880653-88-3; ISSN 1098-6189.
- [27]. Chen, J.T., Lee, J.W., (2013). "A semi-analytical method for near-trapped mode and fictitious frequencies of multiple scattering by an array of elliptical cylinders in water waves," *PHYSICS OF FLUIDS* 25, 097103 (2013).

- [28]. Chatjigeorgiou, I.K., Katsardi, V., 2018. "Hydrodynamics and near-trapping effects in arrays of multiple elliptical cylinders in waves ", *Ocean Engineering*, 157, 121–139.
- [29]. Linton, C.M., McIver, P., (2001). *Mathematical Techniques for Wave/Structure Interactions*. Chapman & Hall/CRC.
- [30]. Martin, P.A., (1995). "Multiple Scattering: An Invitation, Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation," SIAM, Philadelphia, pp. 3–16.
- [31]. McCamy, R.S., Fuchs, R.A., (1954). *Wave forces on piles: A diffraction theory*. US Army Corps of Engineers. Tech. Memo, Washington, DC.
- [32]. Spring, B.H., Monkmeyer, P.L., (1974). "Interaction of plane waves with vertical cylinders," in: *Proc 14th International Conference on Coastal Engineering*, Chap. 107. pp. 1828–1845.
- [33]. Evans, D.V., Porter, R., (1997a). "Near-trapping of waves by circular arrays of vertical cylinders," *Applied Ocean Research* 19, 83–99.
- [34]. Maniar, H.D., Newman, J.N., (1997). "Wave diffraction by a long array of cylinders," *J. Fluid Mech.* 339, 309–330.
- [35]. Evans, D.V., Porter, R., (1999). "Trapping and near trapping by arrays of cylinders in waves," *Journal of Engineering Mathematics* 35: 149-179.
- [36]. Walker, D.A.G., Eatock Taylor, R. (2005). "Wave diffraction from linear arrays of cylinders," *Ocean Eng.* 32, 2053-2078.
- [37]. McIver, P., (2002). "Wave interaction with arrays of structures," *Applied Ocean Research* 24, 121-126.
- [38]. McIver, P., Evans, D.V., (1984). "Approximation of wave forces on cylinder arrays," *Applied Ocean Research* 6, 101–107.
- [39]. Abramowitz, M., Stegun, I.A., (1996). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. US Government Printing Office and Dover.
- [40]. Linton, C.M., Evans, D.V., (1990). "The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders," *J. Fluid Mech.* 215, 549–569.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

<http://ec.europa.eu>

https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/blue_growth_en

<http://bluegrowth.inogs.it/content/about-blue-growth>

www.energypress.gr

<http://www.irena.org>

https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power#Fixed_foundation_offshore_wind_farms

<https://www.boem.gov/>

https://en.wikipedia.org/wiki/Marine_energy

<https://www.oceanenergy-europe.eu/>

<https://corporate.vattenfall.com/about-energy/renewable-energy-sources/ocean-energy/>

<https://renewablegreenenergypower.com>

https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydropower_wave

https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power

<https://www.conserve-energy-future.com/>

<https://deepoceanfacts.com/social-impacts-of-ocean-energy>

<https://setis.ec.europa.eu/related-jrc-activities/jrc-setis-reports/ocean-energy-technology-information-sheet>

<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>

http://www.coastalwiki.org/wiki/Wave_energy_converters#Introduction

<https://tethys.pnnl.gov/technology-type/ocean-current>

<http://learning.media.mit.edu/seed/wave%20energy.html>

<https://science.howstuffworks.com/environmental/earth/oceanography/wave-energy2.htm>

<https://www.carnegiece.com/>

<https://oscillapower.com/triton-wec/>

<https://www.energy.gov/eere/articles/how-do-wind-turbines-survive-severe-storms>

www.ecocrete.gr

www.renewablesinternational.net

www.wavesenergy.com

www.awsocan.com

www.wavegen.co.uk

https://en.wikipedia.org/wiki/Islay_LIMPET

www.oceanlinx.com

www.aquamarinepower.com

www.pelamiswave.com

www.waveenergy.no

www.taperedchannelwaveenergy.weebly.com

www.wavedragon.net

www.wavestarenergy.com

www.ypeka.gr

www.dei.gr

<https://futurism.com/device-power-one-third-u-s-using-ocean-waves/>

www.wikipedia.org

<https://www.sinnpower.com>

<http://www.insider.gr>

<http://worldenergynews.gr>

<https://www.naftemporiki.gr/story/1390816/ti-allazei-sti-15etia-gia-orukta-kausima-fusiko-aerio-ape>

<https://www.dnvgl.com/>

www.amna.gr

[\(http://www.noel.unirc.it/\)](http://www.noel.unirc.it/)