

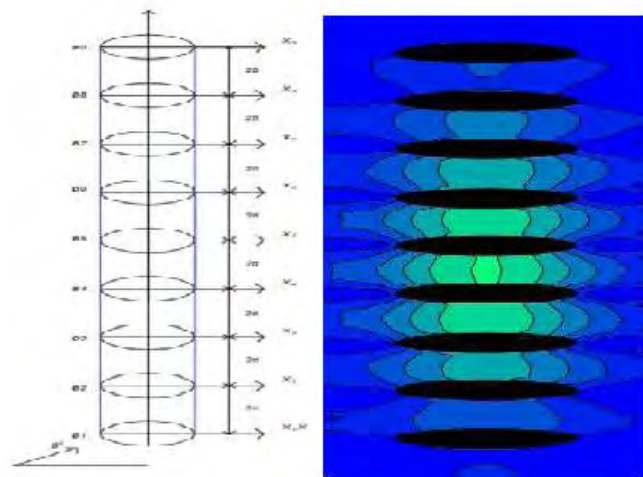


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ  
ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ  
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ

*Optimization of a wave-trapping array of elliptical cylinders to be used for  
energy exploitation*



ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ  
ΓΡΑΝΤΖΑΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος Πολιτικού  
Μηχανικού

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Βανέσσα Κατσαρδή Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Θεοφάνης Γραμμένος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Αντώνιος Λιακόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα Καθηγήτρια κ. Βασιλική Κατσαρδή για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της, αλλά και την εμπιστοσύνη που μας έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας. Επίσης, οφείλω ευχαριστίες στους Καθηγητές κ. Αντώνιο Λιακόπουλο και Θεοφάνη Γραμμένο που μας τίμησε με την παρουσία του στην Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας. Θέλουμε, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους μου στο Βόλο για την κατανόηση και την υποστήριξη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, οφείλουμε το μεγαλύτερο ευχαριστήσουμε στους γονείς μας, για την απεριόριστη στήριξη που μου προσέφεραν πάντα. Σε αυτούς αφιερώνεται και η παρούσα εργασία.

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΓΡΑΝΤΖΑΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ

# «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΙΕΡΑΣ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ »

ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΓΡΑΝΤΖΑΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2019

**Επιβλέπουσα** Δρ. Βανέσσα Κατσαρδή  
**Καθηγήτρια** Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών συστοιχιών ελλειπτικών κυλίνδρων ώστε να εξάγουμε την περισσότερη ενέργεια προτείνοντας παράλληλα μια οικονομική λύση. Για την μετατροπή ενέργειας προτείνεται να τοποθετηθεί συσκευή(-ές) τύπου point absorber(-s). Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές διατάξεις, που περιλαμβάνουν δυο, πέντε, οκτώ, εννέα και δέκα ελλειπτικούς κυλίνδρους αντίστοιχα καθώς και κάθε φορά λήφθηκαν δυο περιπτώσεις κυματισμών μια με γωνιά πρόσπτωσης  $45^\circ$  και μια με  $90^\circ$ . Διερευνήθηκαν τα αποτελέσματα για απόσταση  $2a$  και  $3a$  μεταξύ των κέντρων των ελλειπτικών κυλίνδρων όπου  $a$  ο κύριος ημιάξονας της έλλειψης. Η μελέτη αφορά τα ρηχά νερά.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι για τα ρηχά νερά η καταλληλότερη λύση είναι μία διάταξη από εννέα κυλίνδρους των οποίων τα κέντρα θα απέχουν 2 φορές από τον κύριο ημιάξονα της έλλειψης καθώς και οι κυματισμοί με γωνιά  $90^\circ$  εμφανίζουν μεγαλύτερες δυνάμεις αρά και μεγαλύτερη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Εξετάστηκαν και οι περιπτώσεις για εννέα κυλίνδρους με απόσταση  $3a$  καθώς και στρέψη του πρώτου κυλίνδρου κατά  $45^\circ$  ωστόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι παρουσιάζονται μικρότερες δυνάμεις κάτι το οποίο θα οδηγήσει σε μικρότερη ενέργεια. Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι η διάταξη μας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως κυματοθραύστης.

## ***«Optimization of wave-trapping array of elliptical cylinders to be used for energy exploitation »***

### **Abstract**

The present study examines the hydrodynamic interactions between different elliptical cylinder arrays in order to extract the maximum energy while proposing an economical solution. Five different arrangements were used, comprising two, five, eight, nine and ten elliptic cylinders respectively, and each case was divided in two subcases, one with wave angle heading of  $45^\circ$  and one with  $90^\circ$ . In addition, the results were investigated for distance  $2a$  between the centers of the elliptic cylinders where  $a$  the main axis of the ellipse is the center. The study was conducted in shallow water.

The study has shown that the most appropriate solution for shallow water is a layout of nine cylinders whose centers will be twice as far from the main axis of the ellipse. Waves with angle of heading of  $90^\circ$  create higher peaks. The cases of nine cylinders with  $3a$  was examined as well as the first cylinder being rotated by  $45^\circ$ , but the results showed that they had lower forces which would lead to less energy. Another interesting conclusion is that our device could also be used as breakwaters. Finally, for energy conversion, we conclude that the appropriate devices we must install are point absorbers.

## Περιεχόμενα

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	8
1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
2.ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ,ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	9
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	10
2.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	11
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ.....	11
2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	16
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
3.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ.....	19
3.3ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΑΤΘΙΕΥ.....	22
3.4 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΥΨΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	24
3.5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ.....	25
4 . ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	26
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	26
4.1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	26
4.1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΟ $b/a$ .....	30
4.1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΟ $d/a$ .....	30
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	32
4.2.1 ΕΝΑ ΣΩΜΑ ΤΟΙΧΟΣ.....	32
4.2.2 ΔΥΟ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	36
4.2.3 ΠΕΝΤΕ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	42
4.2.3 ΟΚΤΩ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	48
4.2.4 ΕΝΝΕΑ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	54
4.2.5 ΔΕΚΑ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ.....	60
5. ΣΧΟΛΙΑΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	66
5.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	66
5.2 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	68
5.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ.....	68
5.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΥΞΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ.....	70
5.2.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	73
5.3 ΣΥΠΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79



## **1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για τον στόχο της διπλωματικής, καθώς και μία σύντομη περιγραφή του αντικειμένου της έρευνας και των κεφαλαίων που απαρτίζουν την εργασία.

### **1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ**

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων που προκαλούνται σε διατάξεις ελλειπτικών κυλίνδρων που υποβάλλονται σε κανονικά κύματα, με περιόδους 7-15 second καθώς αυτά είναι τα συχνότερα σε Μεσόγειο και Βόρεια Θάλασσα, με σκοπό την δημιουργία και την εξαγωγή βέλτιστης ενεργείας από την ανύψωση της στάθμης. Η υδροδυναμική φόρτιση στις ελλειπτικές διατάξεις καθορίζεται κυρίως από παραμέτρους, όπως ο αριθμός των στοιχείων, η διάταξη, ο προσανατολισμός, η διεύθυνση του κυματισμού που προσπίπτει και τα μεγέθη των σωμάτων. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη ενεργεία, εξετάζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στα σώματα, καθώς και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται βασίζονται στην γραμμική θεωρία δυναμικού.

### **1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Αρχικά, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εμβάθυνση στο θέμα ,μια ιστορική αναδρομή καθώς και η παρουσίαση συσκευών που αξιοποιούν και μετατρέπουν την κυματική ενέργεια . Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται το πρόβλημα και το αντίστοιχο μοντέλο που δημιουργήθηκε για αυτόν το σκοπό. Στο επόμενο κεφάλαιο 4 παρατίθενται η περιγραφή των εξεταζόμενων διατάξεων καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις για διαφορετικές παραμέτρους του προβλήματος με σκοπό την βελτιστοποίηση της διάταξης. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και παρουσίαση των συμπερασμάτων που εξάγονται από τα αποτελέσματα του προαναφερθέντος κεφαλαίου.



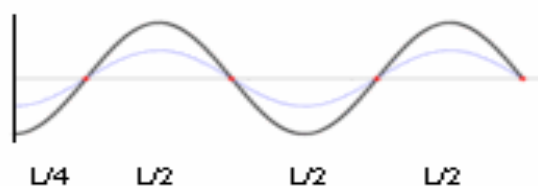
## 2.ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ,ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι διατάξεις πολλαπλών σωμάτων που υποβάλλονται στη δράση των κυματισμών δίνουν ενδιαφέροντα φαινόμενα όπως είναι πολύπλοκες μεταβολές των υδροδυναμικών φορτίων. Συγκεκριμένα εμάς θα μας απασχολήσουν τα φαινόμενα των υδροδυναμικών συντονισμών. Οι συντονισμοί οφείλονται επίσης στις υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις και συναντώνται όταν η γεωμετρία της διάταξης επιτρέπει ανοικτούς χώρους ρευστού μεταξύ των σωμάτων. Αυτές οι επιδράσεις αναφέρονται συνήθως ως παγιδευμένη και σχεδόν παγιδευμένη κυματική ενέργεια και ανιχνεύεται σε συγκεκριμένους κυματικούς αριθμούς οι οποίοι τελικά εξαρτώνται από όλες τις παραμέτρους που εμπλέκονται στο πρόβλημα.

Οποιαδήποτε γεωμετρία ή διάταξη που δημιουργεί ένα χώρο ρευστού μεταξύ των τοιχωμάτων (δηλαδή επιφάνειες στις οποίες ισχύει μια συνθήκη Neumann) είναι μια δομή δυνητικά παγιδευμένου τρόπου λειτουργίας. Μια αξιοσημείωτη γεωμετρία ενός σώματος ελλειπτικός σκελετός.

### ΑΡΧΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

Το φαινόμενο αύξησης της στάθμης παρατηρήθηκε πρώτη φορά με την σύγκρουση ενός κύματος σε τοίχο ή σε πολύ απότομο βράχο, όπου το κύμα ανακλάται και επιστρέφει. Η συμβολή αυτών των δύο κυμάτων δημιουργεί έναν φαινομενικά στάσιμο κυματισμό, ο οποίος έχει το διπλάσιο ύψος από το εισερχόμενο κύμα που προσπίπτει στον τοίχο. Αυτό το στάσιμο κύμα πήρε τον όρο clapotis από τον Γάλλο φυσικό και μαθηματικό Joseph Valentin Boussinesq.



**Σχήμα 2.1:** Κύμα clapotis

Πηγή : (<https://en.wikipedia.org/wiki/Clapotis>)

Ωστόσο το φαινόμενο είναι ιδανικό για παρουσιαστεί διπλασιασμός της στάθμης, αλλά είναι μικρότερη του διπλάσιου. Παρ' όλα αυτά υπάρχει μεγέθυνση της στάθμης, της δύναμης και της κινητικής ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να παρουσιαστεί ως παγίδευση με ένα σώμα.

## 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η παγίδευση κυμάτων μπορεί να προκληθεί από διαφορετικές διατάξεις πολλαπλών σωμάτων. Γενικά η παγίδευση των κυματισμών απασχολεί τους ερευνητές και τούς επιστήμονες ως πρόβλημα, καθώς το φαινόμενο της παγίδευσης παρατηρείται σε κατασκευές όπως γέφυρες πλωτά αεροδρόμια και άλλες κατασκευές σε βαθιά ύδατα . Σε τέτοιες κατασκευές οι κολόνες στηρίζεις δημιουργούν παγίδευση, και όταν δεν έχει εξασφαλιστεί το κατάλληλο κενό μπορεί να αποβεί μοιραίο. Ωστόσο από την άλλη πλευρά η αύξηση της στάθμης συνεπάγεται με την αύξηση της κατακόρυφης δύναμης άρα και της ενέργειας . Οπότε όλη αυτή η ενέργεια μπορεί να συλλεχτεί με τις κατάλληλες συσκευές και να μας ωφελήσει. Από την άποψη αυτή, η μόνη γεωμετρία που εξετάστηκε, τουλάχιστον αναλυτικά, είναι αυτή του κυκλικού κυλίνδρου. Οι συστοιχίες των κυλίνδρων έχουν μελετηθεί από πολλούς συγγραφείς, χωρίς να επικεντρώνονται πάντοτε σε φαινόμενα παγίδευσης κύματος .

Οι συστοιχίες κυκλικών κυλίνδρων που χρησιμοποιούν αναλυτικά μοντέλα, έχουν εξεταστεί αρκετά καλά όπως αναφέρθηκε παραπάνω .Παρουσιάζεται ενδιαφέρουσα μελέτη πάνω το πρόβλημα του υδροδυναμικού προβλήματος 3-D σε έναν κατακόρυφο κύλινδρο(I.K.Chatjigeorgiou et al, 2016).Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση συστοιχίας κυλίνδρων ως κυματοθραύστες (Κ.Α.Belibassakis et al,2018). Είναι βέβαιο ότι το ίδιο δεν ισχύει για διαφορετικές γεωμετρίες, όπως για παράδειγμα για πολλαπλούς ελλειπτικούς κυλίνδρους, αν και πρέπει να αναφερθεί ότι για πιο σύνθετες γεωμετρίες, όπως πλατφόρμες βαρύτητας πολλαπλών κολώνων και άλλες δομές παγίδευσης, έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές. Η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας αναλυτικής λύσης για το πρόβλημα της περίθλασης κυμάτων νερού με συστοιχίες ελλειπτικών κυλίνδρων και κατά συνέπεια η διερεύνηση πιθανών φαινομένων παγίδευσης κύματος είναι εφικτή λόγω της μεθόδου των χωρισμένων μεταβλητών που μπορεί να εφαρμοστεί στην εξίσωση Laplace και όταν αυτή είναι εκφρασμένη σε ελλειπτικές συντεταγμένες.

Ωστόσο, οι σχετικές μελέτες είναι λιγοστές στη βιβλιογραφία και αφορούν κυρίως απομονωμένα σώματα. Ο Chen and Mei (1971) λύνουν τα προβλήματα σκέδασης και ακτινοβολίας των κυμάτων του νερού από έναν ελλειπτικό κύλινδρο που στεγάζει τον πυθμένα, ο οποίος βρίσκεται στο κάτω μέρος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση Laplace. Αργότερα, ο Chen και ο Mei (1973) διερεύνησαν το υδροδυναμικό φορτίο σε μια σταθερή πλατφόρμα ελλειπτικού σχήματος εν μέρει βυθισμένη στην ελεύθερη επιφάνεια. Ο Williams (1985α) παρουσίασε δύο προσεγγιστικές λύσεις στο πρόβλημα σκέδασης. Το ένα βασίζεται στην επέκταση της ακριβούς λύσης του Chen και Mei (1971) για μικρές τιμές της ελλειπτικής εκκεντρικότητας, ενώ η άλλη βασίζεται στην τεχνική της ενσωματωμένης εξίσωσης που περιλαμβάνει την εφαρμογή του Θεωρήματος του Green. Ο ίδιος συγγραφέας (Williams, 1985b) εξέτασε την περίπτωση μιας βυθισμένης ελλειπτικής δομής που ακουμπάει στη θάλασσα. Ο Williams και ο Darwiche (1988, 1990) χρησιμοποίησαν ακριβείς λύσεις για να διερευνήσουν αντίστοιχα τα προβλήματα σκέδασης και ακτινοβολίας με περικομμένους ελλειπτικούς κυλίνδρους, ενώ οι Zhang και Williams (1996a, 1996b)

αντιμετώπισαν τα ίδια προβλήματα με έναν πλήρως βυθισμένο ελλειπτικό δίσκο. Διερεύνηση των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων που προκαλούνται από συστοιχίες συστοιχιών ελλειπτικού κυλίνδρου που υποβάλλονται σε κανονικά κύματα πραγματοποιήθηκε (I.K. Chatjigeorgiou & V. Katsardi, 2018) .

## 2.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η κυματική ενέργεια είναι το σύνολο της κινητικής και δυναμικής ενέργειας των κυματισμών χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα ρεύματα.

Η θαλάσσια επιφάνεια απορροφά τεράστιες ποσότητες ηλιακής και αιολικής ενέργειας που εμφανίζονται στη θάλασσα με τη μορφή κυμάτων ή ρευμάτων που μετακινούνται μεταφέροντας κινητική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια είναι εκμεταλλεύσιμη ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων. Η Νότια Αφρική, ο βόρειος Καναδάς και η Αυστραλία είναι ανάμεσα στα πλουσιότερα σε κυματική ενέργεια μέρη του κόσμου ενώ το κυματικό δυναμικό της χώρας μας είναι το υψηλότερο της Μεσογείου.

Η κυματική ενέργεια ανήκει στις καθαρές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και θεωρείται πρακτικά ανεξάντλητη. Από τον Μεσαίωνα οι αγρότες παγίδευαν το θαλάσσιο νερό στις λίμνες μύλων για να το χρησιμοποιήσουν στους υδρόμυλους. Συστήματα κυματικής ενέργειας είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στον πυθμένα (υποβρύχια), στην επιφάνεια ανοιχτά της θάλασσας (επιπλέοντα), στα παράλια ή στα ρηχά νερά (επάκτια).

Η κυματική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για αφαλάτωση και παροχή γλυκού νερού κατάλληλου προς χρήση ιδιαίτερα στις νησιωτικές περιοχές όπου δεν υπάρχει άφθονο γλυκό νερό.

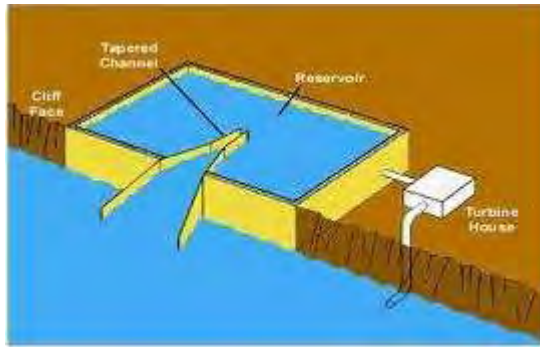
## 2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ

Τα κύματα έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μια εντελώς βιώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να συλληφθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια από συστήματα μετατροπείς κυματικής ενέργειας (Wave Energy Converters WECS). Οι WECS αναπτύχθηκαν για να εξαγάγουν ενέργεια από την ακτογραμμή.

Είναι γνωστό πως τα κύματα έχουν μεγάλα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας . Από την στιγμή που προσπαθούμε να τα παγιδεύουμε και να μεγεθύνουμε αυτήν την ενέργεια , θα πρέπει και να την απολάβουμε .

Τα συστήματα διακρίνονται σε :

- Σταθερά
- Πλωτά



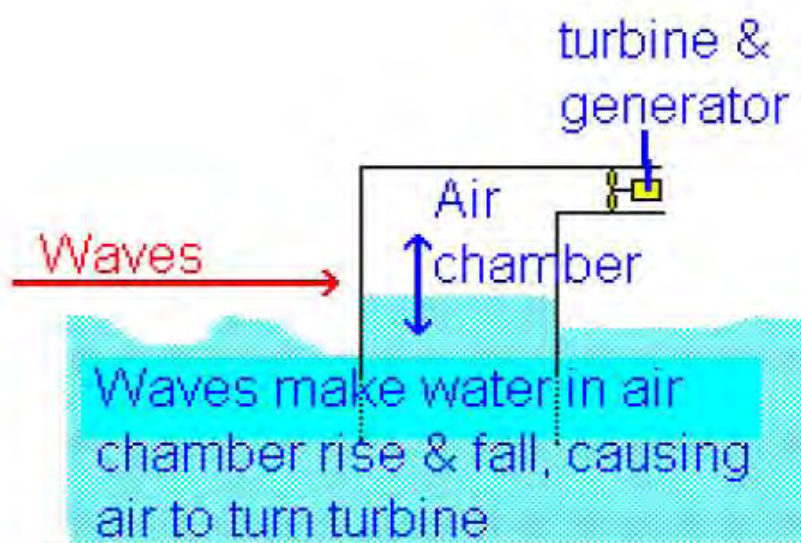
**Εικόνα 2.1:** το σύστημα tarchan (σταθερό σύστημα)

**Εικόνα 2.2:** Παράδειγμα πλωτού

Γενικά τα σταθερά συστήματα, τα οποία τοποθετούνται στις ακτές ή στα ρηχά νερά έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των πλωτών συστημάτων. Όπως για παράδειγμα στον τομέα της συντήρησης και άμεση εκμετάλλευση της ενέργειας. Ωστόσο, ο αριθμός των διαθέσιμων περιοχών κατάλληλες για σταθερά συστήματα είναι περιορισμένος.

### Oscillating water columns

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι που αποθηκεύουν την ενέργεια των κυμάτων, από τις πιο αποτελεσματικές είναι αυτή που χρησιμοποιεί και η μηχανή παραγωγής κυμάτων δεξαμενής. Στην στήλη η μηχανή φυσάει τον αέρα πάνω κάτω και δημιουργεί τον κυματισμό, αντίστοιχα στην περίπτωση μας το ύψος της στάθμης σπρώχνει τον αέρα μέσα έξω από την τρύπα στον κλειστό θάλαμο. Μέσα στην τρύπα είναι τοποθετημένη μια τουρμπίνα η οποία περιστρέφεται με την κίνηση του αέρα και παράγει ενέργεια. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι ιδιαίτερα θορυβώδης λόγω της τουρμπίνας, αλλά μπορεί αποφευχθεί με έναν σιγαστήρα. Αλλά και πάλι δεν προκαλεί ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς και τα κύματα από μόνα τους κάνουν θόρυβο. Με αυτόν τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε την ταχύτητα την στάθμη και το βάθος του κυματισμού αποτελεσματικότερα και οικονομικότερα.



**Εικόνα2.1:**

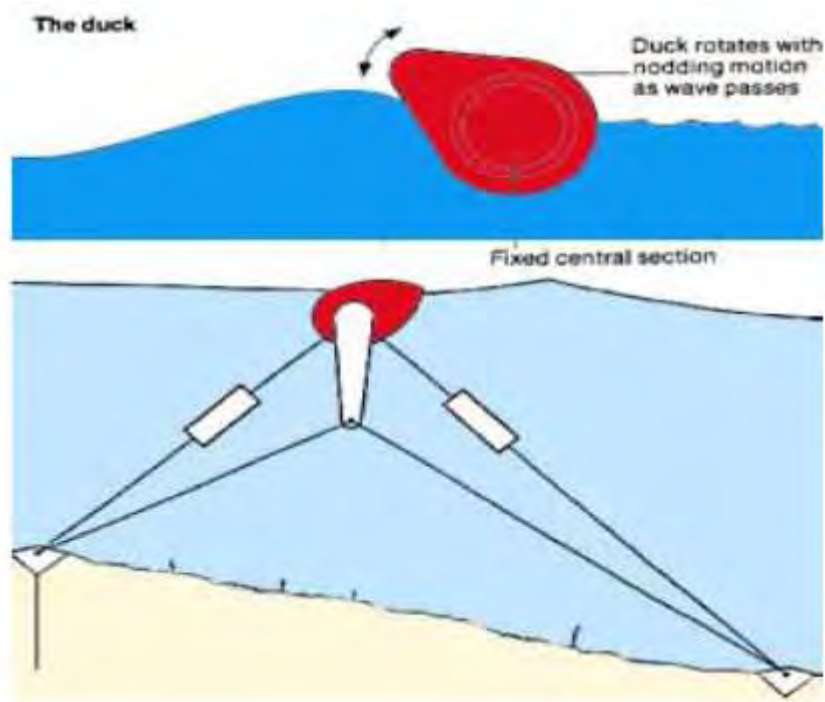
Ταλαντούμενες

στήλες

νερού Πηγή: ([http://www.scuolacascia.it/attivita/clil2/webquest/resources/www.darvill.clara.net/alte/nerg/wave.htm?fbclid=IwAR1GF2ZK3N1JT3BROKHZCbt2aQ\\_HytpdPtYdcb2VhUmDO\\_QQh\\_RDOLNVds](http://www.scuolacascia.it/attivita/clil2/webquest/resources/www.darvill.clara.net/alte/nerg/wave.htm?fbclid=IwAR1GF2ZK3N1JT3BROKHZCbt2aQ_HytpdPtYdcb2VhUmDO_QQh_RDOLNVds))

## SALTER DUCK

Άλλη μια συσκευή παραγωγής ενέργειας από τα κύματα είναι Salter Duck η οποία αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Stephen Salter . Η συσκευή αυτή παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της κίνησης των κυμάτων πάνω-κάτω . Αρχικά είχε αποσυρθεί διότι είχε υπολογιστεί λανθασμένα το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παρήγαγε , αλλά τελικά διορθώθηκε και τα τελευταία χρόνια προκαλεί μεγάλο ενδιαφέρον η Salter Duck .

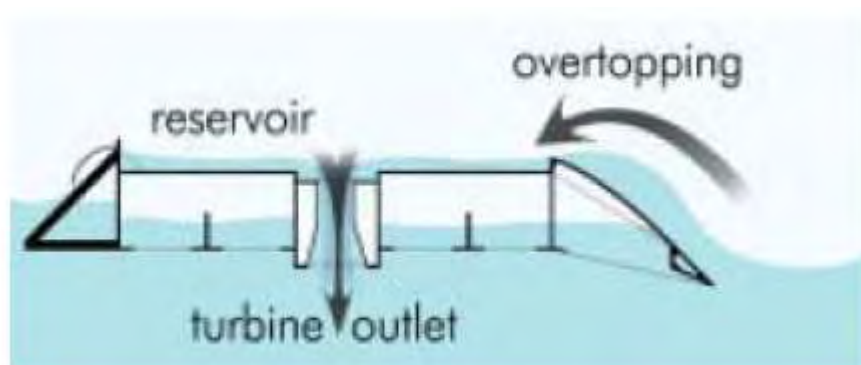


**Εικόνα 2.2 :** Salter Duck

Πηγή : ([http://users.sch.gr/omixara/eco\\_energy/ananeosimes/ocean.htm](http://users.sch.gr/omixara/eco_energy/ananeosimes/ocean.htm))

## WAVE DRAGON

Το wave dragon είναι μετατροπέας κυμάτων με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας . Δουλεύει ως εξής , η overtopping συσκευή ανυψώνει τα κύματα τα οποία αποθηκεύονται προσωρινά σε μια δεξαμενή , μετά η διαφορά δυναμικού μεταξύ του αποθηκευμένου νερού και την στάθμη της θάλασσας προκαλούν κίνηση στην τουρμπίνα η οποία παράγει την ενέργεια . Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται για ωκεάνια κύματα. Στην περίπτωση της παγίδευσης θα είναι αρκετά αποτελεσματικό.

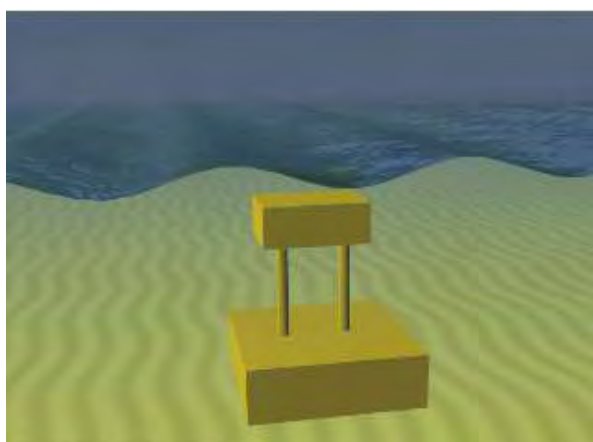


**Εικόνα 2.3 :** Wave Dragon

Πηγή: ([https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_Dragon?fbclid=IwAR3ktlVOaLq-N0J7l8uBFlJicF-ZdlM\\_vvb9LSacjZ6K1j6\\_FUhoaRmUTGw](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon?fbclid=IwAR3ktlVOaLq-N0J7l8uBFlJicF-ZdlM_vvb9LSacjZ6K1j6_FUhoaRmUTGw))

## ΒΥΘΙΖΟΜΕΝΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η συσκευή αυτή είναι βυθισμένη κοντά στον πυθμένα και κοντά στην ακτή . Καθώς η στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας ανεβοκατεβαίνει δημιουργείται διαφορά πίεσης, αυτό ωθεί την συσκευή να ανεβοκατεβαίνει και αυτή η κίνηση οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

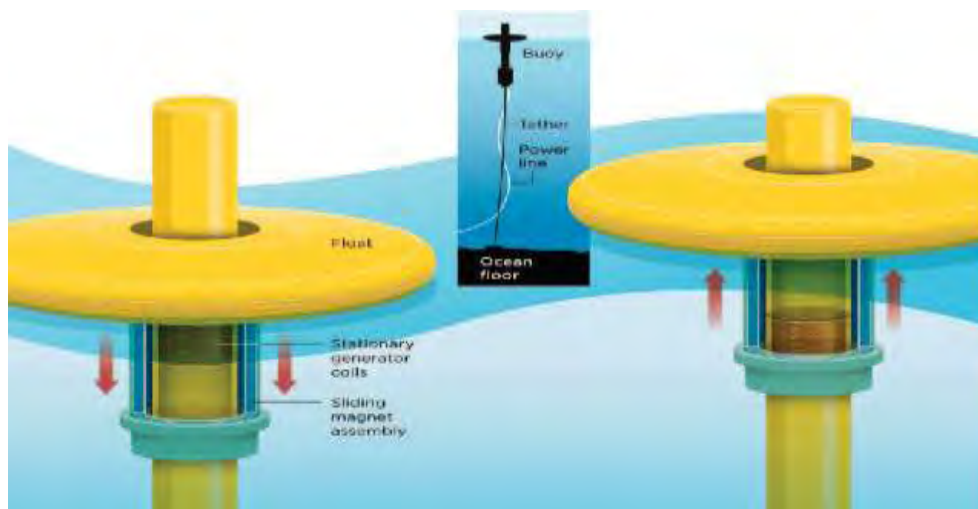


**Εικόνα 2.5 :** Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης

Πηγή : (<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>)

## POINT ABSORBER

Ο αξονοσυμμετρικός απορροφητής είναι μια πλωτή συσκευή η οποία απορροφά την κυματική ενέργεια μέσω της κίνησης της επιφάνειας. Έχει γενικά μικρές διαστάσεις με διάμετρο μερικών μέτρων συνήθως . Μετατρέπει την κίνηση της σηματοδούρας πάνω κάτω σε ηλεκτρική ενέργεια .



Εικόνα 2.4 : Point absorber

Πηγή : (On Model Predictive Control for a point absorber Wave Energy Converter, [Ted K. A. Brekken](#), 2011)

## ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Υπάρχουν τέσσερις σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται στην επιλογή τοποθεσίας κατάλληλης για την εγκατάσταση και εκμετάλλευση των κυμάτων και συγκεκριμένα

- το ύψος κύματος (m)
- η ταχύτητα των κυμάτων (m/s)
- το μήκος κύματος (m)
- η πυκνότητα του νερού

Οι πλέον ευνοϊκές τοποθεσίες για να συλλεχθεί η ενέργεια των κυμάτων είναι συγχρόνως εκείνες όπου ο άνεμος είναι πολύ ισχυρός και επίσης στα ανοιχτά του ωκεανού.

Ένα σύστημα κυματικής ενέργειας μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο στον ωκεανό και να παράγει ενέργεια, μπορεί να είναι αγκυροβολημένο στο πυθμένα ή πλωτό ανοιχτά της θάλασσας, ή σύστημα εγκατεστημένο στα παράλια ή όπως και στη δική μας περίπτωση στα ρηχά νερά.

## **2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

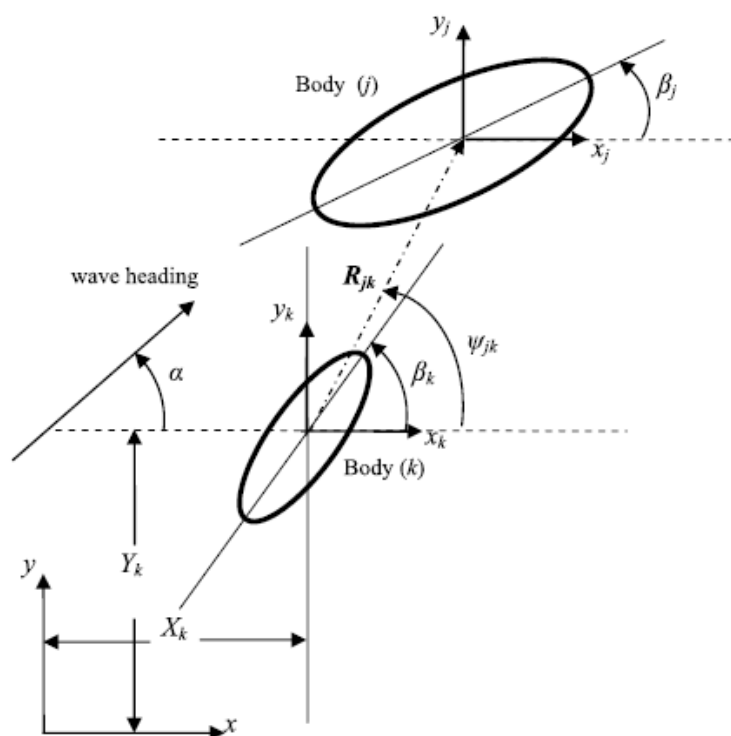
Η αισθητική επίδραση ενός συστήματος στο περιβάλλον εξαρτάται από τον τύπο που θα υιοθετηθεί, έτσι ένα σύστημα μερικώς βυθισμένο ή τοποθετημένο λίγα χιλιόμετρα μακριά δεν επηρεάζει την εναρμόνιση του συστήματος στο φυσικό περιβάλλον. Αντίθετα συστήματα κυματικής ενέργειας τοποθετημένα στις ακτές μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην όλη αισθητική και να μετατρέψουν ένα φυσικό περιβάλλον σε άκρως βιομηχανικό. Έτσι προσοχή απαιτείται τόσο στην μορφή του συστήματος που πρόκειται να υιοθετηθεί καθώς και πως θα εναρμονιστεί με την υπάρχουσα αρχιτεκτονική τοπίου και το φυσικό ανάγλυφο της περιοχής. Η συνεργασία του μηχανικών κρίνεται απαραίτητη και επιτακτική για αρμονικό σχεδιασμό.



### 3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

#### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο κύριος στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση των φαινομένων παγίδευσης κύματος λόγω των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων με συστοιχίες ελλειπτικών κυλίνδρων. Θεωρούνται 5 διαφορετικές συστοιχίες, αποτελούμενες από έναν, δυο, πέντε, εννέα και δέκα ελλειπτικούς κυλίνδρους αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.1:** Γενική διάταξη των ελλειπτικών κυλίνδρων: συστήματα συντεταγμένων και γεωμετρικοί ορισμοί (*I.K. Chatjigeorgiou and S.A. Mavrakos, 2010*)

Μια ομάδα ελλειπτικών κυλίνδρων, οι οποίες είναι στερεωμένες στο κάτω μέρος και υπερβαίνουν την ελεύθερη επιφάνεια, εξετάζονται. Η συστοιχία υποβάλλεται σε ενέργεια κανονικών κυμάτων πλάτους  $A$  και κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Ο πυθμένας θεωρείται επίπεδος και οριζόντιος, ενώ το βάθος του νερού είναι ίσο με  $h$ . Το ρευστό είναι ιδανικό και ασυμπύεστο και η ροή είναι αστρόβιλη επιτρέποντας τη χρήση της θεωρίας του γραμμικού δυναμικού. Το πεδίο ροής στον τρισδιάστατο ευκλείδειο χώρο διέπεται από το δυναμικό γραμμικής ταχύτητας  $\Phi(x, y, z, t)$  το οποίο γράφεται ως

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

όπου το  $\text{Re}$  υποδηλώνει το πραγματικό μέρος των συνιστωσών στις αγκύλες και  $t$  είναι ο χρόνος. Ως συνήθως το χωρικό σύνθετο δυναμικό  $\phi(x, y, z)$  θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση Laplace

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

σε κάθε σημείο του ρευστού, τη γραμμικοποιημένη συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

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

και η συνθήκη μηδενικής ταχύτητας στον πυθμένα

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

Στη σχέση (3)  $K = \omega^2/g$ , όπου γείναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Το σύστημα συντεταγμένων  $(x, y, z)$  θεωρήθηκε σταθερό στον πυθμένα με την κάθετη συντεταγμένη  $z$  να έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Το συνολικό δυναμικό πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη του Neumann στις επιφάνειες όλων των σωμάτων της διάταξης

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

όπου το  $n$  υποδηλώνει το μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης στην επιφάνεια κάθε σώματος. Στην παρούσα μελέτη έγινε η σύμβαση ότι το  $n$  κατευθύνεται προς την περιοχή του ρευστού. Μέσα στα πλαίσια του γραμμικού υδροδυναμικού προβλήματος, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το συνολικό δυναμικό αποτελείται από το προσπίπτον κύμα και τις συνιστώσες περίθλασης, σχηματίζοντας τις συνιστώσες  $\phi_I$  και  $\phi_D$ . Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι το δυναμικό διάθλασης θα πρέπει να ικανοποιεί την κατάλληλη συνθήκη ακτινοβολίας για κυματισμούς που εξέρχονται προς το άπειρο (συνθήκη του Sommerfeld),

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

όπου είναι  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  και  $k_0$  είναι ο αριθμός κύματος που δίνεται από την εξίσωση διασποράς  $\omega^2 = k_0 g \tanh(k_0 h)$  (7)

Προκειμένου να γίνει αυτόνομη η παρούσα μελέτη αρχίζουμε από την αρχή, δηλαδή τις διαχωρίσιμες λύσεις της εξίσωσης Laplace σε ελλειπτικές συντεταγμένες. Τα προϊόντα αυτών των λύσεων ονομάζονται αρμονικές και στη συγκεκριμένη περίπτωση, η Ελλειπτική Αρμονία. Λεπτομέρειες για τις ελλειπτικές αρμονικές, τις ιδιότητες και τη χρήση τους μπορούν να βρεθούν στα βιβλία των McLachlan (1947) και Meixner και Schäfer (1954). Περιλήψεις περιέχονται στα εγχειρίδια των Abramowitz και Stegun (1970) και Olver et al. (2010), ενώ η Moon and Spencer (1971) παρέχουν μόνο στοιχειώδεις πληροφορίες. Ο βασικός στόχος της χρήσης λύσεων της εξίσωσης Laplace προσαρμοσμένης σε ένα ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων είναι η ευκολία χρησιμοποίησης της οριακής κατάστασης του Neumann (Μαυράκος και Χατζηγεωργίου, 2010).

Γίνεται χρήση ελλειπτικών συντεταγμένων  $(u, v, z)$ , όπου  $u = \text{σταθερό}$  και  $v = \text{σταθερό}$ . Ο άξονας  $z$  είναι σταθερός στον πυθμένα με κατεύθυνση κάθετα προς τα πάνω. Ο μετασχηματισμός από ελλειπτικές συντεταγμένες σε καρτεσιανές είναι  $x = c \cosh u \cos v$  και  $y = c \sinh u \sin v$ , όπου  $c = (a^2 - b^2)^{1/2} = a\varepsilon$  με  $\varepsilon$  την εκκεντρότητα της έλλειψης που δίνεται από τη σχέση  $\varepsilon^2 = 1 - (b/a)^2$ .

### 3.2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

Σε μία διάταξη με περισσότερα του ενός σώματα είναι πιο βολικό όλα τα δυναμικά, τα οποία σχετίζονται με το υδροδυναμικό πρόβλημα, να εκφράζονται με συντεταγμένες που θα έχουν ως σημείο αναφοράς το κάθε σώμα που απαρτίζει την διάταξη. Έστω ότι είναι  $(x_k, y_k, z)$  οι καρτεσιανές συντεταγμένες οποιουδήποτε σημείου στο πεδίο με σημείο αναφοράς το σύστημα συντεταγμένων του σώματος  $k$ . Τότε, το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού θα δίνεται από τη σχέση

$$\phi_I = -i \frac{gH Z_0(z)}{\omega 2 Z_0(h)} A_k e^{ik_0(x_k \cos \alpha + y_k \sin \alpha)} \quad (8)$$

όπου

$$Z_0(z) = N_0^{-1/2} \cosh(k_0 z) \quad (9)$$

$$N_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\sinh(k_0 h)}{2k_0 h} \right] \quad (10)$$

και

$$\Lambda_k = e^{ik_0(X_k \cos \alpha + Y_k \sin \alpha)} \quad (11)$$

Το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού μπορεί στη συνέχεια να εκφραστεί με όρους του τοπικού ελλειπτικού συστήματος συντεταγμένων του αυθαίρετα επιλεγμένου σώματος  $k(u_k, v_k, z)$  και οι μετασχηματισμένες και τροποποιημένες εξισώσεις Mathieu σε άρτιες και περιττές περιοδικές και ακτινικές εξισώσεις Mathieu, αντίστοιχα (Meixner and Schäfer, 1954), όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$\begin{aligned} \phi_I &= -2i \frac{gH Z_0(z)}{\omega^2 Z_0(h)} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} i^m M C_m^{(j)}(u_k; q_k) c e_m(v_k; q_k) c e_m(a; q_k) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m M S_m^{(1)}(u_k; q_k) s e_m(v_k; q_k) s e_m(a, q_k) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

όπου  $q_k = (k_0 \alpha_k / 2)^2$  είναι η παράμετρος Mathieu,  $c e_m(v_k; q_k)$  και  $s e_m(v_k; q_k)$  είναι οι άρτιες και περιττές περιοδικές εξισώσεις Mathieu, και  $M C_m^{(j)}$ ,  $M S_m^{(1)}$  είναι οι άρτιες και περιττές ακτινικές εξισώσεις Mathieu αντίστοιχα, όπου το  $(j)$  υποδηλώνει το είδος της ακτινικής εξίσωσης Mathieu.

Για να εφαρμοστεί η συνθήκη μηδενικής ταχύτητας στην υγρή επιφάνεια του σώματος  $k$ , το συνολικό δυναμικό της περίθλασης λόγω της σκέδασης των κυμάτων από όλα τα σώματα, θα πρέπει να εκφράζεται σε σχέση με το ίδιο σύστημα συντεταγμένων και πιο συγκεκριμένα σε σχέση με το τοπικό ελλειπτικό σύστημα του σώματος  $k$ . Το συνολικό δυναμικό περίθλασης γύρω από το σώμα  $k$  θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη το δυναμικό περίθλασης λόγω της σκέδασης των κυματισμών που προκαλείται από όλα τα σώματα της διάταξης. Ως εκ τούτου ισχύει  $\varphi_D = \sum_{k=1}^N \varphi_D^{(k)}$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των σωμάτων στη διάταξη. Το δυναμικό περίθλασης γύρω από ένα μεμονωμένο σώμα  $k$  μπορεί επίσης να εκφραστεί στο ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων του σώματος  $k$

$$\begin{aligned} \phi_D^{(k)}(u_k, v_k, z) &= -2i \frac{gA Z_0(z)}{\omega Z_0(h)} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} i^m C_m^{(k)} K C_m^{(k)} M C_m^{(3)}(u_k, q_k) c e_m(v_k, q_k) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=1}^{\infty} i^m S_m^{(k)} K S_m^{(k)} M S_m^{(3)}(u_k, q_k) s e_m(v_k, q_k) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

όπου τα  $C_m^{(k)}$  και  $S_m^{(k)}$  υποδηλώνουν τους άγνωστους συντελεστές που συνδέονται με το σώμα  $k$ , και

$$\begin{aligned} K C_m^{(k)} &= M C_m^{(1)'}(u_{k0}, q_k) / M C_m^{(3)'}(u_{k0}, q_k), \\ K S_m^{(k)} &= M S_m^{(1)'}(u_{k0}, q_k) / M S_m^{(3)'}(u_{k0}, q_k), \end{aligned} \quad (14)$$

στα οποία το  $u_{k0} = \tanh^{-1}(b_k/a_k)$  υποδηλώνουν τα ελλειπτικά σύνορα του σώματος  $k$ .

Το μεμονωμένο κυματικό πεδίο σκέδασης γύρω από κάθε σώμα επιβάλλεται με σκοπό να αποδώσει το συνολικό κυματικό πεδίο σκέδασης γύρω από το σώμα  $k$ , λόγω της παρουσίας όλων των σωμάτων στη διάταξη. Αυτό διατυπώνεται ως εξής

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{h} \varphi_D \\
&= -i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{m=0}^{\infty} i^m A_m^{(k)} K C_m^{(k)} M C_m^{(3)}(u_k; q_k) c e_m(v_k; q_k) \\
&\quad - i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{m=1}^{\infty} i^m B_m^{(k)} K S_m^{(k)} M S_m^{(3)}(u_k; q_k) s e_m(v_k; q_k) \\
&\quad - i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=0}^{\infty} i^m A_m^{(j)} K C_m^{(j)} M C_m^{(3)}(u_j; q_j) c e_m(v_j; q_j) \\
&\quad - i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=1}^{\infty} i^m B_m^{(j)} K S_m^{(j)} M S_m^{(3)}(u_j; q_j) s e_m(v_j; q_j) \quad (15)
\end{aligned}$$

Ο σκοπός εδώ είναι να εκφραστεί το συνολικό δυναμικό περίθλασης σύμφωνα με το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων του σώματος  $k$ , όπως έγινε και προηγουμένως για το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού. Για το λόγο αυτό, τα παράγωγα των εξισώσεων Mathieu στους δύο τελευταίους όρους της εξίσωσης (15) που εκφράζονται με βάση το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων  $(u_j, v_j, z)$ , θα πρέπει να εκφραστούν με βάση το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων του σώματος  $k$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του επονομαζόμενου προσθετικού θεωρήματος στις εξισώσεις Mathieu.

### 3.3 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ MATHIEU

Η ύπαρξη ενός προσθετικού θεωρήματος στις εξισώσεις Mathieu διατυπώθηκε από τον Særmærk (1959), ο οποίος επέκτεινε τους τύπους που αναφέρθηκαν από τους Meixner και Schäfke (1954) σε όρους εξισώσεων Bessel. Συγκεκριμένα, ο Særmærk (1959) απέδειξε ότι το προσθετικό θεώρημα στις εξισώσεις Mathieu περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M_m^{(l)}(u_j, q_j) m e_m(v_j, q_j) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} Q_{r,m}^{(l)} M_r^{(1)}(u_k, q_k) m e_r(v_k, q_k), \quad l = 1, 2, 3, 4, \quad (16)$$

με

$$Q_{r,m}^{(l)} = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{p=-\infty}^{\infty} d'_{r-p,p}(q_k) Z_{p-s}^{(l)}(k_0 R_{jk}) d_{s-m,m}(q_j) e^{i(s-p)\psi_{jk}} e^{-is\beta_{jk}}, \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

και

$$\begin{aligned} Z_m^{(1)}(k_0 R_{jk}) &= J_m(k_0 R_{jk}), \\ Z_m^{(2)}(k_0 R_{jk}) &= Y_m(k_0 R_{jk}), \\ Z_m^{(3)}(k_0 R_{jk}) &= H_m^{(1)}(k_0 R_{jk}), \\ Z_m^{(4)}(k_0 R_{jk}) &= H_m^{(2)}(k_0 R_{jk}). \end{aligned} \quad (18)$$

όπου τα  $J_m$  και  $Y_m$  είναι οι εξισώσεις Bessel πρώτης και δεύτερης τάξης, αντίστοιχα. Τα  $H_m^{(1)} = J_m + iY_m$  και  $H_m^{(2)} = J_m - iY_m$  είναι οι εξισώσεις Hankel πρώτης και δεύτερης τάξης, αντίστοιχα. Στην εξίσωση (17) οι συντελεστές  $d'_{n-p,p}(q)$  και  $d_{s-m,m}(q)$  δίνονται σε όρους των σύνθετων συντελεστών επέκτασης των περιοδικών εξισώσεων Mathieu (Meixner και Schäfke, 1954 – Særmærk, 1959).

Δεδομένου ότι τα δυναμικά περίθλασης εκφράζονται σε όρους των άρτιων και περιπλών περιοδικών και ακτινικών εξισώσεων Mathieu, είναι πιο βολικό για υπολογιστικούς λόγους, να αντικατασταθούν τα  $d$  και  $d'$  με τους συντελεστές επέκτασης  $A$  και  $B$  που σχετίζονται με τις άρτιες και περιπτες περιοδικές εξισώσεις Mathieu. Μετά από εκτεταμένους μαθηματικούς υπολογισμούς, το συνολικό δυναμικό περίθλασης με βάση το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων του αυθαίρετα επιλεγμένου σώματος  $k$  είναι το εξής:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{h} \varphi_D &= -i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{m=0}^{\infty} i^m \tilde{A}_m^{(k)} K C_m^{(k)} M C_m^{(3)}(u_k; q_k) c e_m(v_k; q_k) \\
&- i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{m=1}^{\infty} i^m \tilde{B}_m^{(k)} K S_m^{(k)} M S_m^{(3)}(u_k; q_k) s e_m(v_k; q_k) \\
&- i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \\
&\times \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=0}^{\infty} i^m \tilde{A}_m^{(j)} K C_m^{(j)} \left[ \sum_{r=0}^{\infty} Q_{r,m}^{(3)} M C_r^{(1)}(u_k; q_k) c e_r(v_k; q_k) \right. \\
&- i \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^r Q_{-r,m}^{(3)} M S_r^{(1)}(u_k; q_k) s e_r(v_k; q_k) \left. \right] \\
&- i\omega \frac{H}{2} Z_o(z) \sum_{j \neq k}^N \sum_{m=0}^{\infty} i^m \tilde{B}_m^{(j)} K S_m^{(j)} \left[ \sum_{r=1}^{\infty} (-1)^{m-r} Q_{-r,-m}^{(3)} M S_r^{(1)}(u_k; q_k) s e_r(v_k; q_k) \right. \\
&+ i \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^m Q_{r,-m}^{(3)} M C_r^{(1)}(u_k; q_k) c e_r(v_k; q_k) \left. \right] \tag{19}
\end{aligned}$$

Η συνθήκη μηδενικής ταχύτητας στην υγρή επιφάνεια του σώματος  $k$  απαιτεί να ισχύει

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial u_k} + \frac{\partial \varphi_I}{\partial u_k} = 0, \text{ για } u_k = u_{k0} \tag{20}$$

Μετά την εισαγωγή των εξισώσεων (12) και (19) στην εξίσωση (20), διαχωρίζοντας τους άρτιους και τους περιττού όρους και εξισώνοντας τις ίσες τάξεις των  $c e_m(v_k; q_k)$  και  $s e_m(v_k; q_k)$  σε άρτια και περιττά γινόμενα, αντίστοιχα, προκύπτουν τα εξής:

$$\begin{aligned}
\tilde{A}_m^{(k)} + \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} \tilde{A}_r^{(j)} K C_r^{(j)} Q_{m,r}^{(3)} + i \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} (-1)^r \tilde{B}_r^{(j)} \\
\times K S_r^{(j)} Q_{m,-r}^{(3)} = -2 \frac{g}{\omega^2 h} \frac{1}{h Z_o(h)} \Lambda_k c e_m(a; q_k) \tag{21}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{B}_m^{(k)} - i \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} (-1)^{-m} \tilde{A}_r^{(j)} K C_r^{(j)} Q_{-m,r}^{(3)} \\
+ \sum_{j \neq k}^N \sum_{r=0}^{\infty} i^{r-m} (-1)^{r-m} \tilde{B}_r^{(j)}
\end{aligned}$$

$$\times Ks_r^{(j)} Q_{-m,-r}^{(3)} = -2 \frac{g}{\omega^2 h} \frac{1}{h Z_0(h)} \Lambda_k s e_m(a; q_k). \quad (22)$$

Οι εξισώσεις (21) και (22) αντιπροσωπεύουν ένα άπειρο γραμμικό σύστημα. Υποθέτοντας ότι  $N$  είναι ο αριθμός των σωμάτων στην διάταξη, οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να συντομευτούν για να σχηματίσουν ένα  $2(M+1)N$  σύνθετο γραμμικό σύστημα σε όρους των αγνώστων συντελεστών  $\tilde{A}_m^{(k)}$  και  $\tilde{B}_m^{(k)}$ , όπου το  $M$  είναι ο αριθμός των συντελεστών που λαμβάνονται υπόψη. Σημειώνεται ότι για το σχηματισμό των εν λόγω συστημάτων, ισχύει εξ' ορισμού ότι το  $\tilde{B}_m^{(k)}$ , όπως επίσης και το δεξιό μέρος της εξίσωσης (22) είναι ίσα με το μηδέν για  $m = 0$ .

Τέλος, μετά τον υπολογισμό των συντελεστών  $\tilde{A}_m^{(k)}$  και  $\tilde{B}_m^{(k)}$ , το συνολικό δυναμικό θα δίνεται από το άθροισμα των προσπιπτόντων κυματισμών και των κυματισμών περιθλάσης από όλα τα σώματα, όπου και τα δύο εκφράζονται με βάση το τοπικό ελλειπτικό σύστημα συντεταγμένων του σώματος  $k$ . Κατά αυτόν τον τρόπο, με χρήση των εξισώσεων (12) και (19) για υπολογιστεί το άθροισμα  $\varphi_I + \varphi_D$ , και την αντικατάσταση με των εξισώσεων (21) και (22) στο γινόμενο που προκύπτει, καταλήγουμε στην παρακάτω απλή σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \varphi(u_k, v_k, z) = & -i\omega \frac{H}{2} Z_0(z) \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} i^m \tilde{A}_m^{(k)} c e_m(v_k; q_k) \left[ Kc_m^{(k)} M c_m^{(3)}(u_k; q_k) \right. \right. \\ & \left. \left. - M c_m^{(1)}(u_k; q_k) \right] \right. \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} i^m \tilde{B}_m^{(k)} s e_m(v_k; q_k) \left[ Ks_m^{(k)} M s_m^{(3)}(u_k; q_k) \right. \\ & \left. \left. - M s_m^{(1)}(u_k; q_k) \right] \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

### 3.4 ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΥΨΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η γραμμική υδροδυναμική φόρτιση (δυνάμεις και ροπές) επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση της υδροδυναμικής πίεσης πάνω στην υγρή επιφάνεια του κάθε σώματος της διάταξης. Με χρήση μόνο του γραμμικού όρου της εξίσωσης του Bernoulli, οι υδροδυναμικές φορτίσεις κατά τον  $x$  και  $y$  άξονα (surge and sway hydrodynamic forces) που ασκούνται στο σώμα  $k$  της διάταξης, είναι



$$F_x^{(k)} = -i\omega\rho b_k \int_0^h \int_0^{2\pi} \varphi(u_{k0}, v_k, z) \cos v_k dv_k dz \quad (24)$$

$$F_y^{(k)} = -i\omega\rho a_k \int_0^h \int_0^{2\pi} \varphi(u_{k0}, v_k, z) \sin v_k dv_k dz \quad (25)$$

Καθώς και οι ροπές γύρω από τον  $x$ ,  $y$  και  $z$  άξονα (roll, pitch and yaw moments)

$$M_x^{(k)} = -i\omega\rho a_k \int_0^h \int_0^{2\pi} z \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \sin v_k dv_k dz \quad (26)$$

$$M_y^{(k)} = i\omega\rho b_k \int_0^h \int_0^{2\pi} z \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \cos v_k dv_k dz \quad (27)$$

$$M_z^{(k)} = i\omega\rho \frac{c_k^2}{2} \int_0^h \int_0^{2\pi} \phi^{(k)}(u_{k0}, v_k, z) \sin 2v_k dv_k dz \quad (28)$$

όπου το συνολικό δυναμικό  $\varphi$  δίνεται από την εξίσωση (23) για  $u_k = u_{k0}$ , και  $a_k$ ,  $b_k$  είναι ο κύριος και δευτερεύοντας ημιάξονας του εξεταζόμενου ελλειπτικού κυλίνδρου, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (24) και (25) δίνουν τις υδροδυναμικές φορτίσεις κατά τον  $x$  και  $y$  άξονα (surge and sway hydrodynamic forces) με βάση το τοπικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του κάθε σώματος, στα οποία ο άξονας  $x$  συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα συμμετρίας.

Η σχέση που παρέχει την ανύψωση του κυματισμού σε οποιοδήποτε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας του πεδίου αναφοράς, είναι

$$\eta(u_{k0}, v_k, h) = \frac{i\omega}{g} \varphi(u_{k0}, v_k, h) \quad (29)$$

ενώ η ελεύθερη επιφάνεια ακριβώς στην περίμετρο καθενός από τους ελλειπτικούς κυλίνδρους προκύπτει από την εξίσωση (29), εάν θέσουμε  $u_k = u_{k0}$ .

### 3.5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ

Όπως φαίνεται και παραπάνω ο όγκος η πολυπλοκότητα των μαθηματικών είναι σημαντικός ώστε να λυθούν στο χέρι. Για αυτό έπειτα από συνεννόησης μας δόθηκε ο κώδικας του I.K. Χατζηγεωργίου που συσχετιζόταν με την μελέτη μας και ήταν

γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και έτρεχε για λογισμικό LINUX. Ωστόσο έπρεπε να γίνει συμβατός στα δικά μας λειτουργικά συστήματα. Κάνοντας compile ο κώδικας έτρεχε πλέον σε λογισμικό WINDOWS. Έτσι έχοντας καταφέρει να είναι λειτουργικός ο κώδικας στα δικά μας λογισμικά τρέξαμε τις περιπτώσεις που μας ενδιέφεραν για τις δίκες μας διατάξεις ελλειπτικών κυλίνδρων.

## 4 . ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### 4.1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

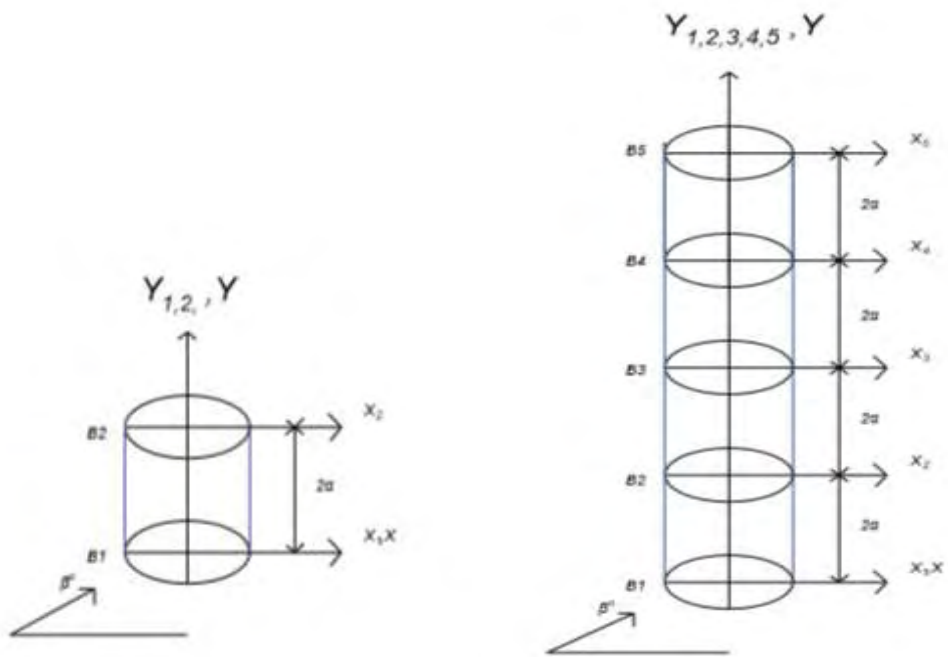
Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν πέντε διατάξεις παράλληλων κυματοθραυστών προς μελέτη. Ο κάθε κυματοθραυστής προσομοιώνεται με τη μορφή ενός ελλειπτικού κυλίνδρου. Όπως έχει ήδη επισημανθεί ο κύριος και ο δευτερεύων ημιάξονας του σώματος συμβολίζεται με  $a_k$  και  $b_k$ , αντίστοιχα.

Όλοι οι ελλειπτικοί κύλινδροι είναι ίδιων διαστάσεων, οπότε θα ισχύει  $a_1 = a_2 = \dots = a_9 = a_{10} = a$  και  $b_1 = b_2 = \dots = b_9 = b_{10} = b$ .

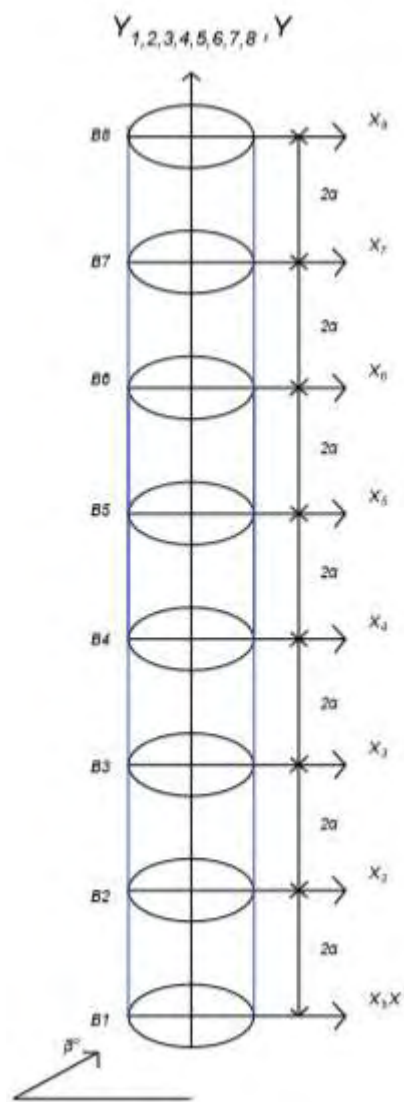
Η απόσταση 2α δηλώνει την απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο ελλειπτικών κυλίνδρων. Όπως είναι φανερό όλες οι αποστάσεις είναι κανονικοποιημένες με την απόσταση  $a$ .

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει ληφθεί ένα σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο του πρώτου ελλειπτικού κυλίνδρου. Τέλος, ο προσπίπτων κυματισμός συμβολίζεται ως  $\beta$ , και για τον οποίο έχουν ληφθεί δύο περιπτώσεις, η μία για κυματισμό που σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  με τον άξονα  $x$  και η δεύτερη για κυματισμό που σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τον άξονα  $x$ .

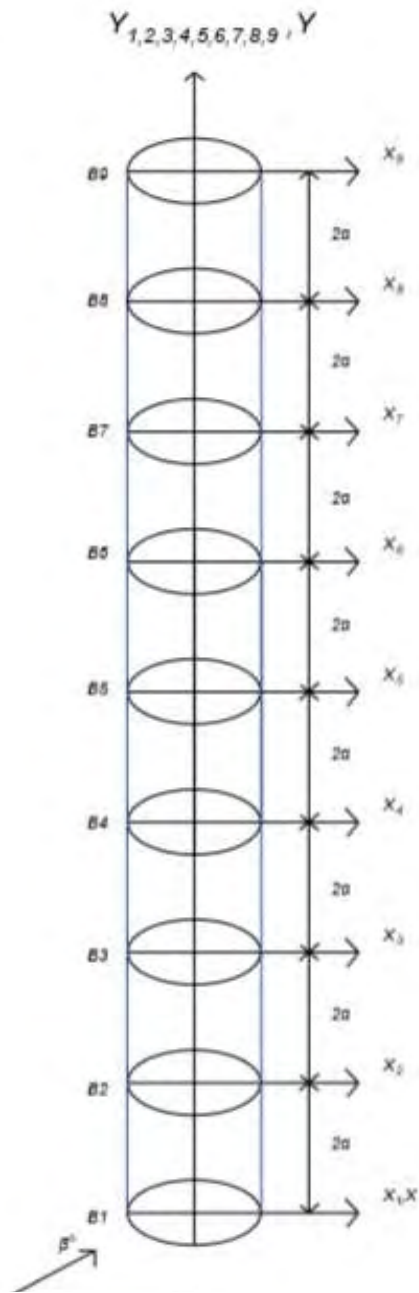
Παρακάτω γίνεται μία σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών διατάξεων:



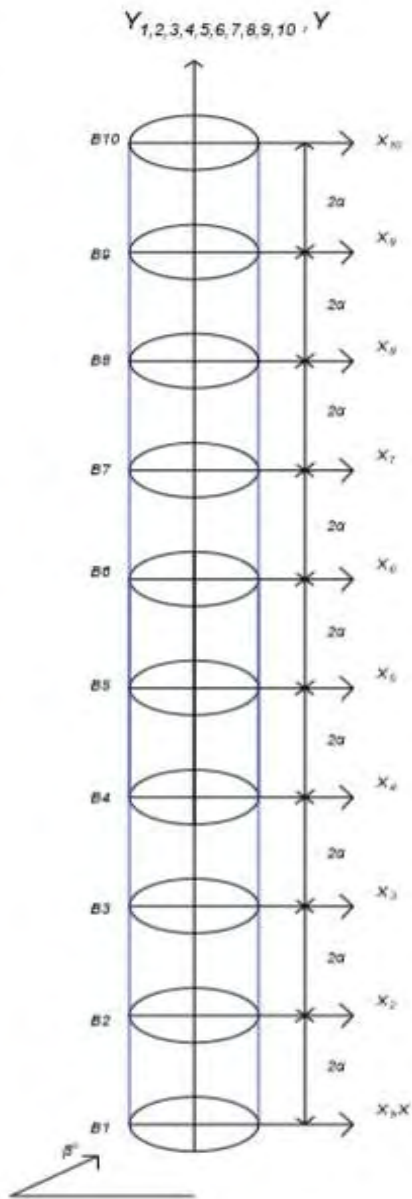
**Σχήμα 4.1:** Διάταξη δυο κυλίνδρων    **Σχήμα 4.2:** Διάταξη πέντε κυλίνδρων



Σχήμα 4.3: Διάταξη οκτώ κυλίνδρων



Σχήμα 4.4: Διάταξη εννέα κυλίνδρων



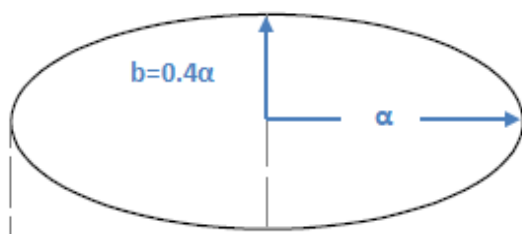
**Σχήμα 4.5:** Διάταξη δέκα κυλίνδρων

#### 4.1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΟ $b/a$

Μία παράμετρος που διερευνήθηκε είναι ο λόγος  $b/a$ , δηλαδή η διάσταση του δευτερεύοντα ημιάξονα της έλλειψης προς την διάσταση του κύριου ημιάξονα της έλλειψης.

Η περίπτωση που εξετάστηκε είναι  $b/a = 0.4$ .

Παρακάτω εμφανίζεται σχηματικά



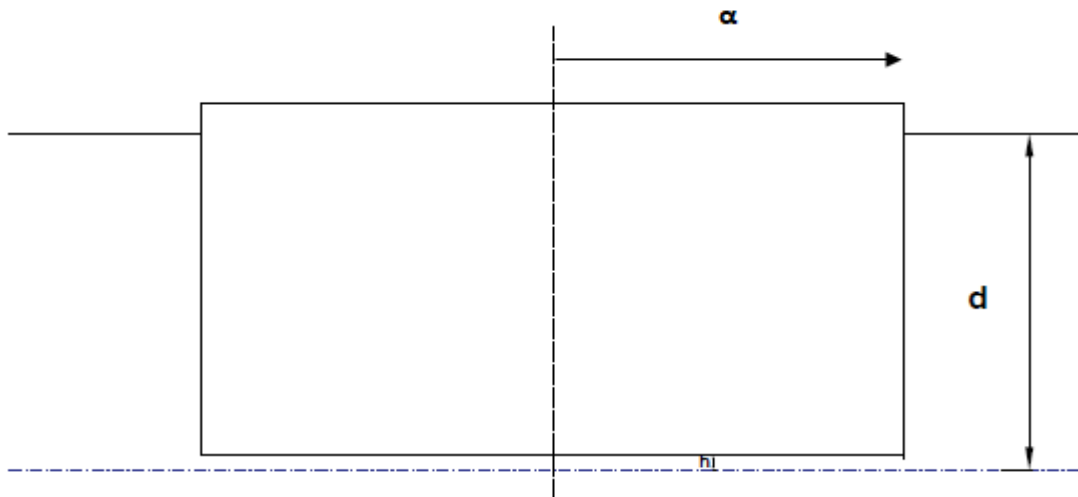
**Σχήμα 4.6:** Απεικόνιση ελλειπτικού κυλίνδρου με βάση το λόγο  $b/a$

#### 4.1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΟ $d/a$

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε η συμπεριφορά των παράλληλων ελλειπτικών κυλίνδρων σε ρηχά νερά.

Ο λόγος  $d/a$  υποδεικνύει την αναλογία του βάθους της θάλασσας σε σχέση με τον κύριο ημιάξονα του ελλειπτικού κυλίνδρου  $a$ . Στην περίπτωση που αφορά ρηχά νερά, ο λόγος λαμβάνεται ίσος με 0,8.

Παρακάτω γίνεται σχηματική απεικόνιση ενός ελλειπτικού κυματοθραύστη με κύριο ημιάξονα  $a$ , βυθισμένο σε νερά βάθους  $d$ . Με  $h$  συμβολίζεται η κάθετη απόσταση από τον κυματοθραύστη μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον ο κύλινδρος είναι θεμελιωμένος στον πυθμένα της θάλασσας, το  $h$  τείνει στο μηδέν.



**Σχήμα 4.7:**Απεικόνιση ενός ελλειπτικού κυματοθραύστη βυθισμένου σε ρηχά νερά

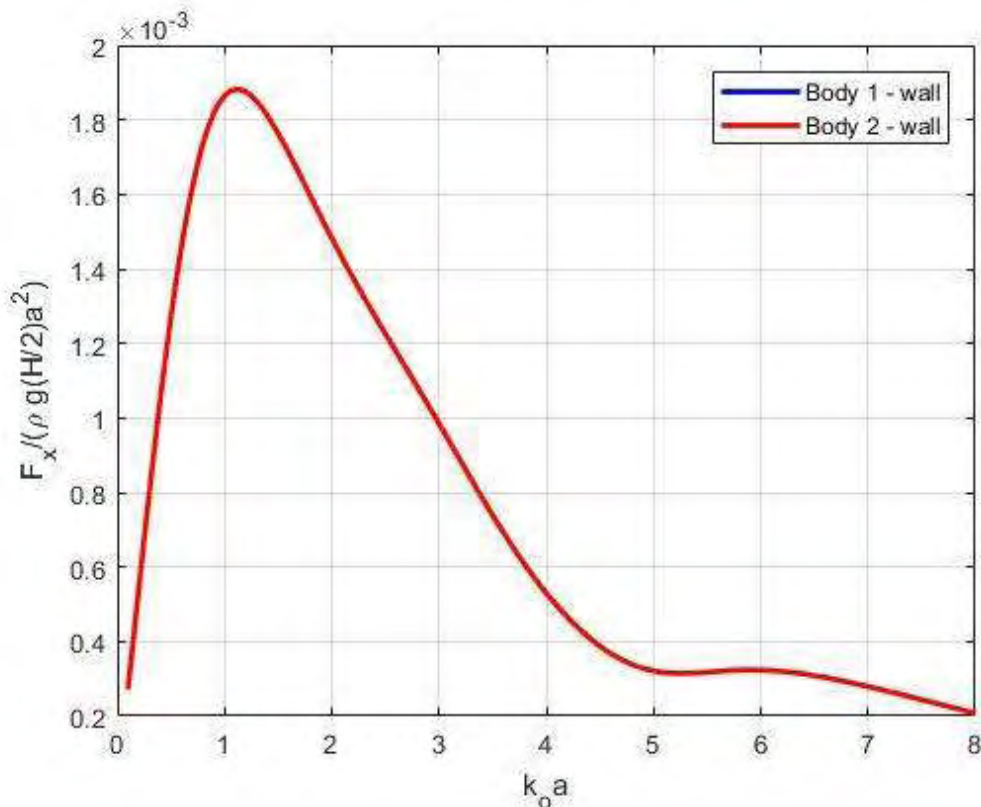
## 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις για όλες τις διατάξεις και τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά, παρατίθενται τα διαγράμματα των δυνάμεων κατά τον άξονα  $x$  και τον άξονα  $y$ , για όλες τις διατάξεις που αναφέρθηκαν παραπάνω σε 8 συχνότητες, οι οποίες είναι κανονικοποιημένες με τον κύριο άξονα της έλλειψης  $a$ . Λαμβάνεται η περίπτωση όπου οι κυματοθραύστες είναι τοποθετημένοι σε ρηχά νερά ( $d/a = 0.8$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για  $b/a = 0.4$ . Επίσης, στα διαγράμματα εμφανίζονται οι τιμές και για τις δύο επιλεγμένες γωνίες πρόσπτωσης των κυματισμών  $90^\circ$  και  $45^\circ$ . Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των ελλείψεων που λήφθηκε και σε όλες τις περιπτώσεις είναι ίση με  $2a$ . Όπως φαίνεται και στον άξονα του κάθε διαγράμματος, και οι δύο δυνάμεις  $F_x$  και  $F_y$  κανονικοποιούνται διαιρώντας τις τιμές τους με τον όρο  $\rho g \left(\frac{H}{2}\right) a^2$  ενώ η ανύψωση  $\eta$  διαιρώντας με τον όρο  $H/2$ .

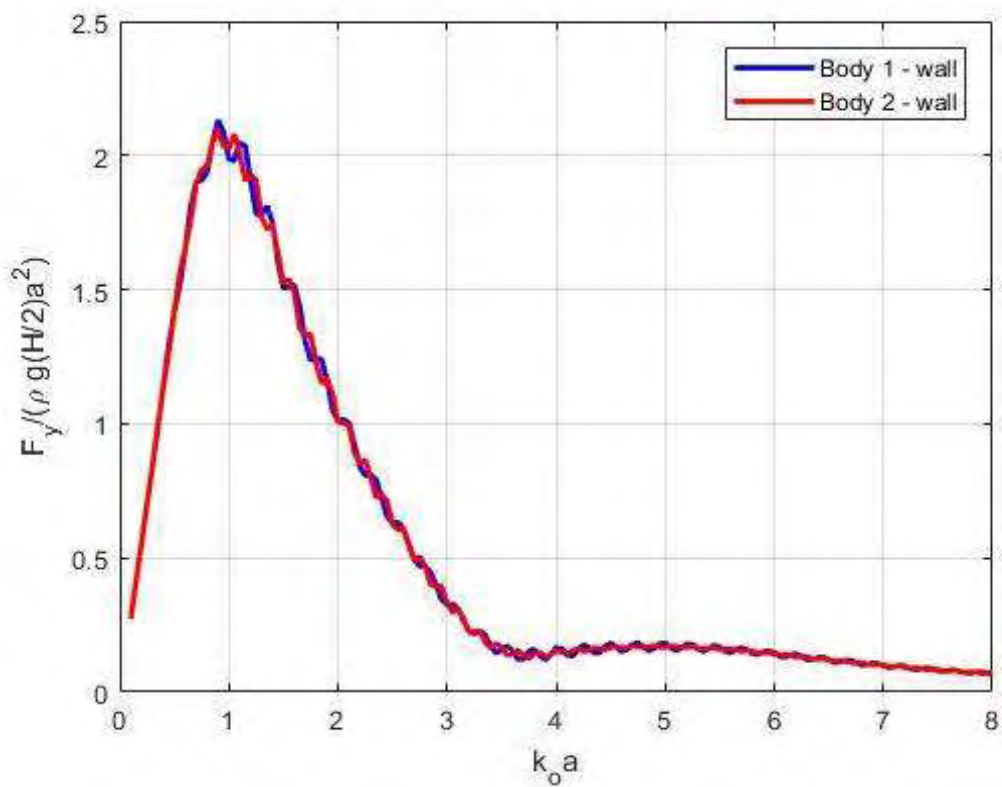
### 4.2.1 ΕΝΑ ΣΩΜΑ ΤΟΙΧΟΣ

Σε αυτήν την περίπτωση μελετήθηκαν δυο πεπλατυσμένα σώματα τα οποία έχουν λόγο  $b/a = 0.001$  και μεταξύ τους απόσταση  $dx = 1000a$  και  $dy = 1000a$  ώστε να μην επηρεάζονται μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.

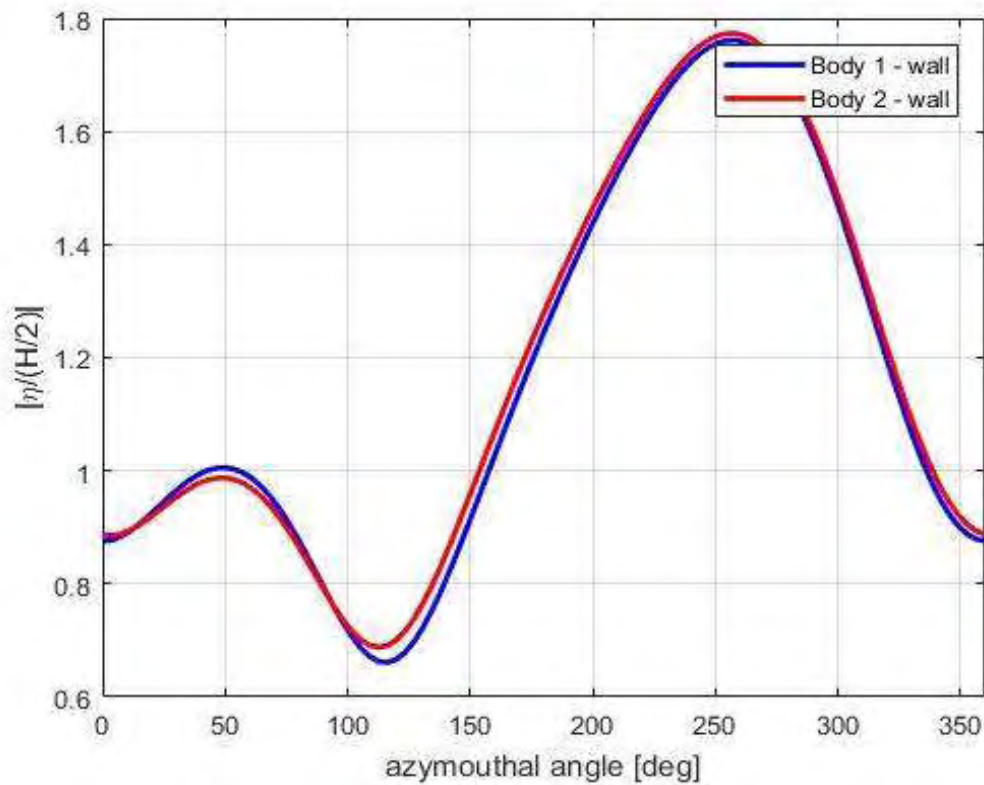


Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$

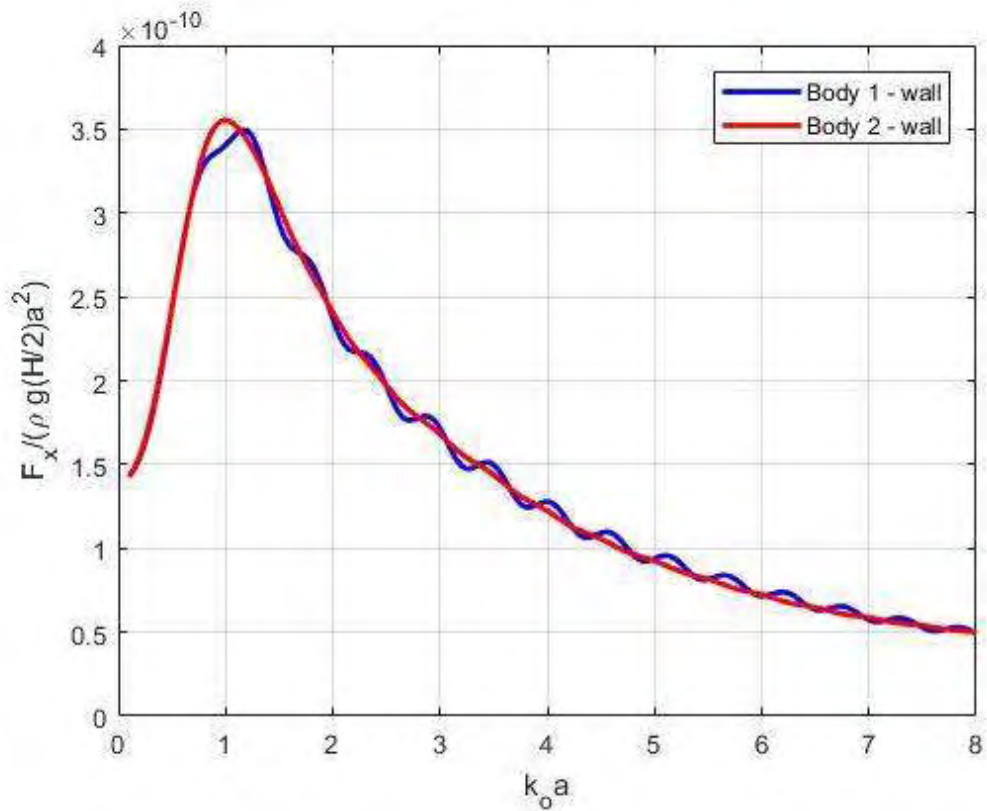




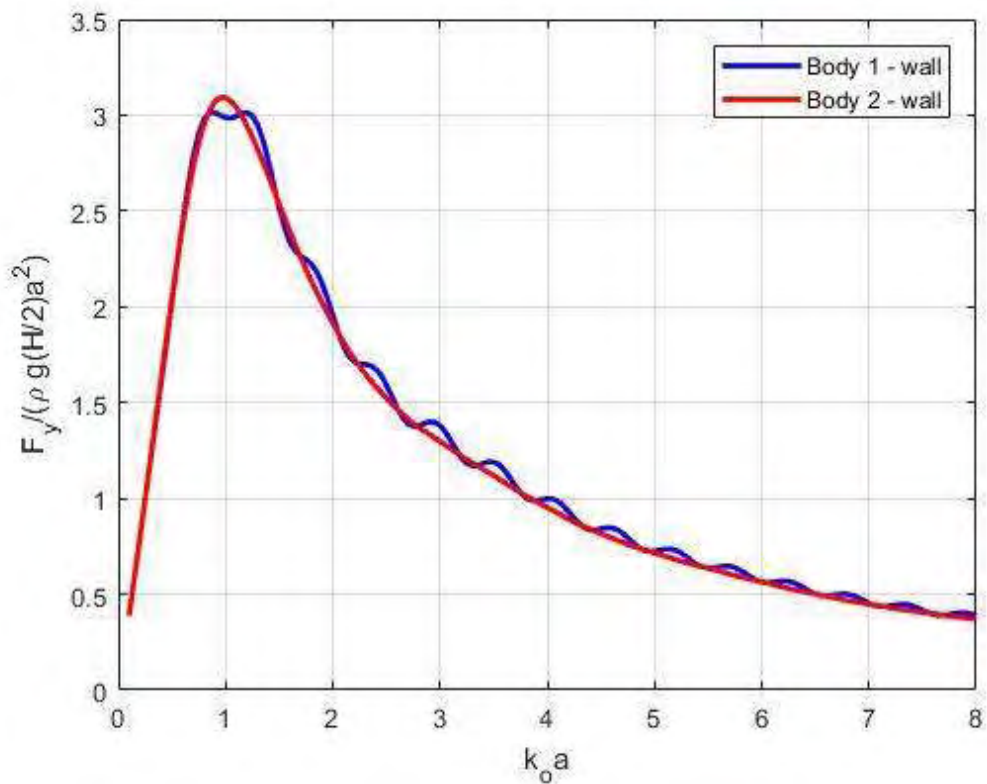
**Διάγραμμα 4.2:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$



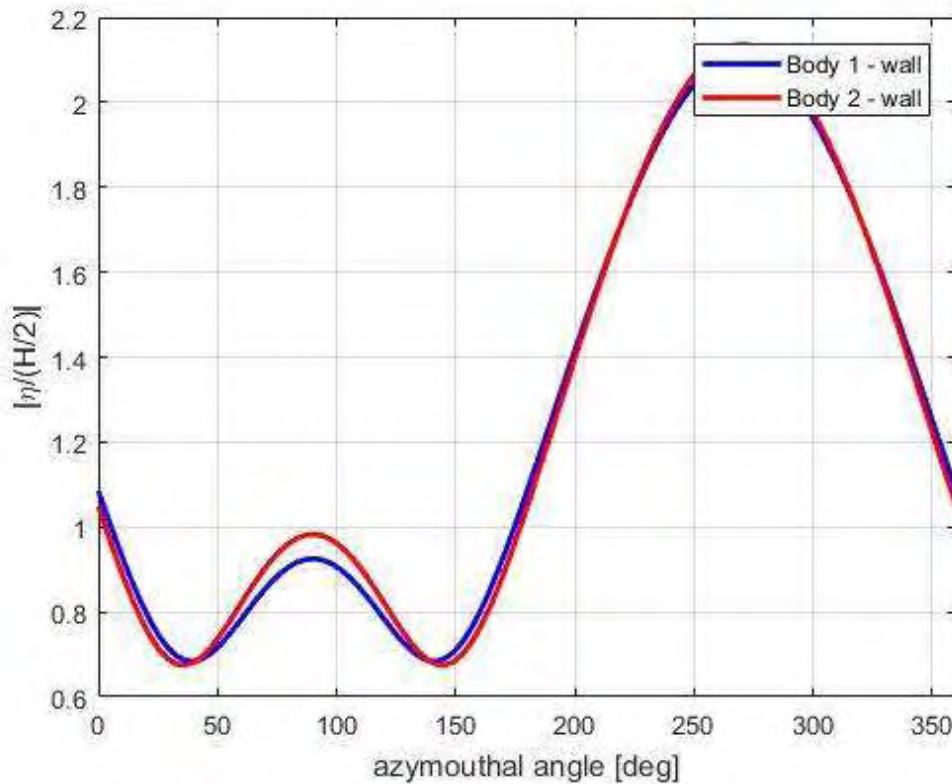
**Διάγραμμα 4.3:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (0-360 μοίρες)



**Διάγραμμα 4.4:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$



**Διάγραμμα 4.5:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$

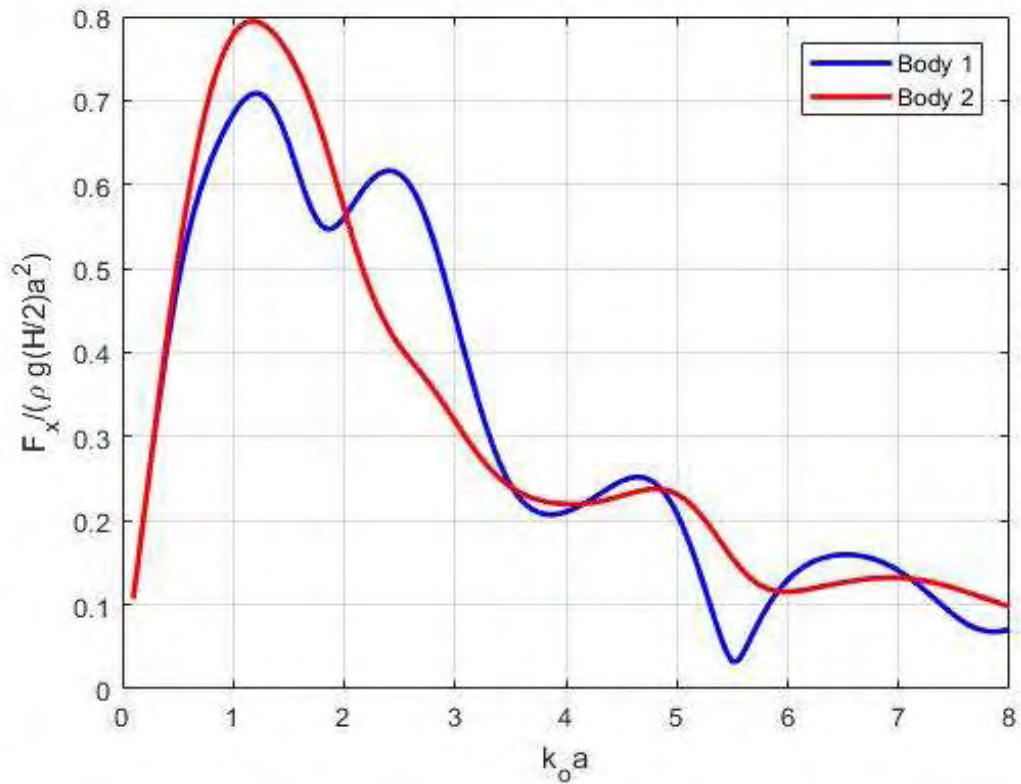


**Διάγραμμα 4.6:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (0-360 μοίρες)

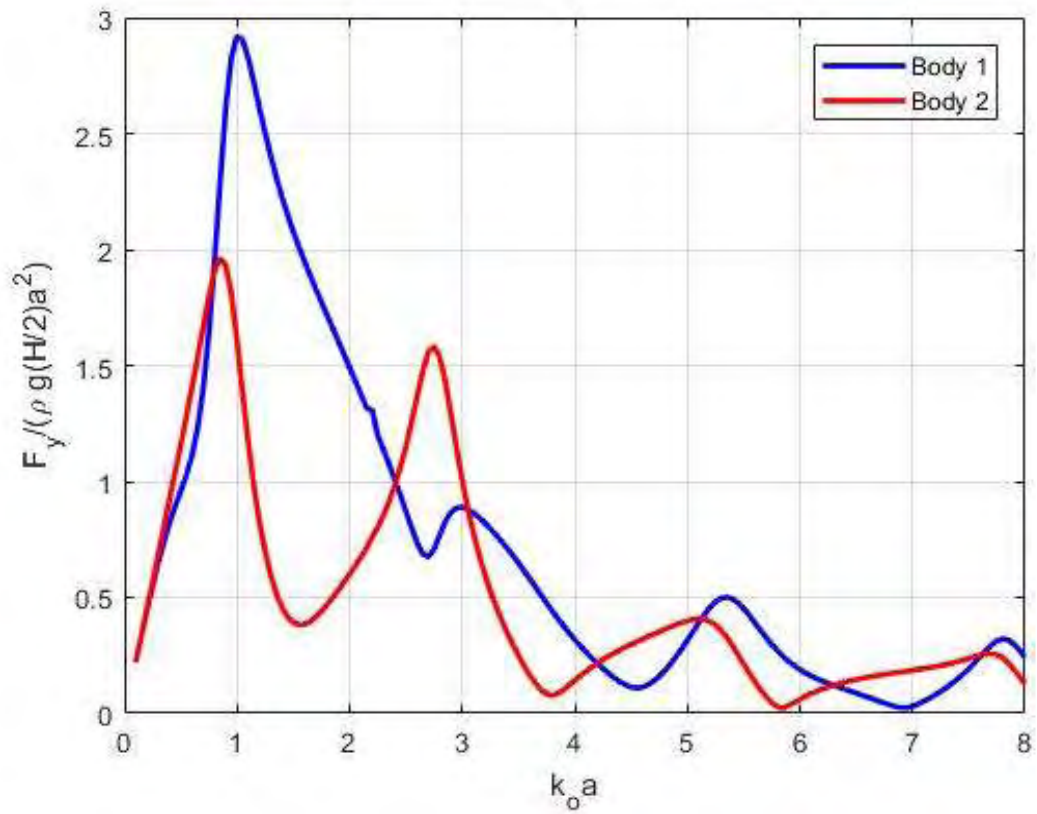
Αν και υποθετικά τα δυο σώματα θα έπρεπε να συμπίπτουν ακριβώς σαν εάν εδώ παρατηρούμε μια μικρή διαφορά , η οποία ίσως οφείλεται σε ελλείψεις αριθμητικό μοντέλο .Ωστόσο παρατηρείται η διπλασιάσει της επιφάνειας του ρευστού , όπως και στο clarotis .Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν δυο σώματα και όχι ένα καθώς ο κώδικας δεν είναι λειτουργικός για ένα μεμονωμένο σώμα.

#### 4.2.2 ΔΥΟ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

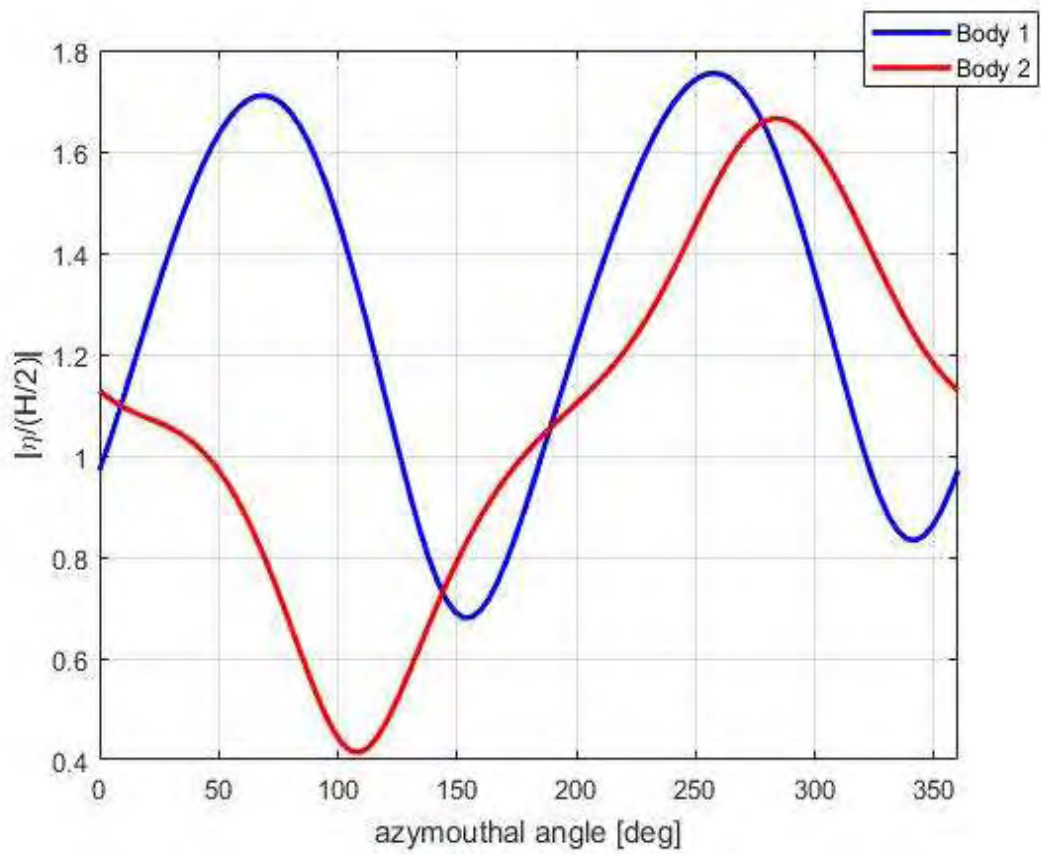
Σε αυτήν την περίπτωση τοποθετήθηκαν δυο σώματα με απόσταση μεταξύ τους  $dx = 0$  και  $dy = 2a$  (Σχήμα 4.1) έχοντας λόγο  $b/a = 0.4$ . Παρακάτω παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.



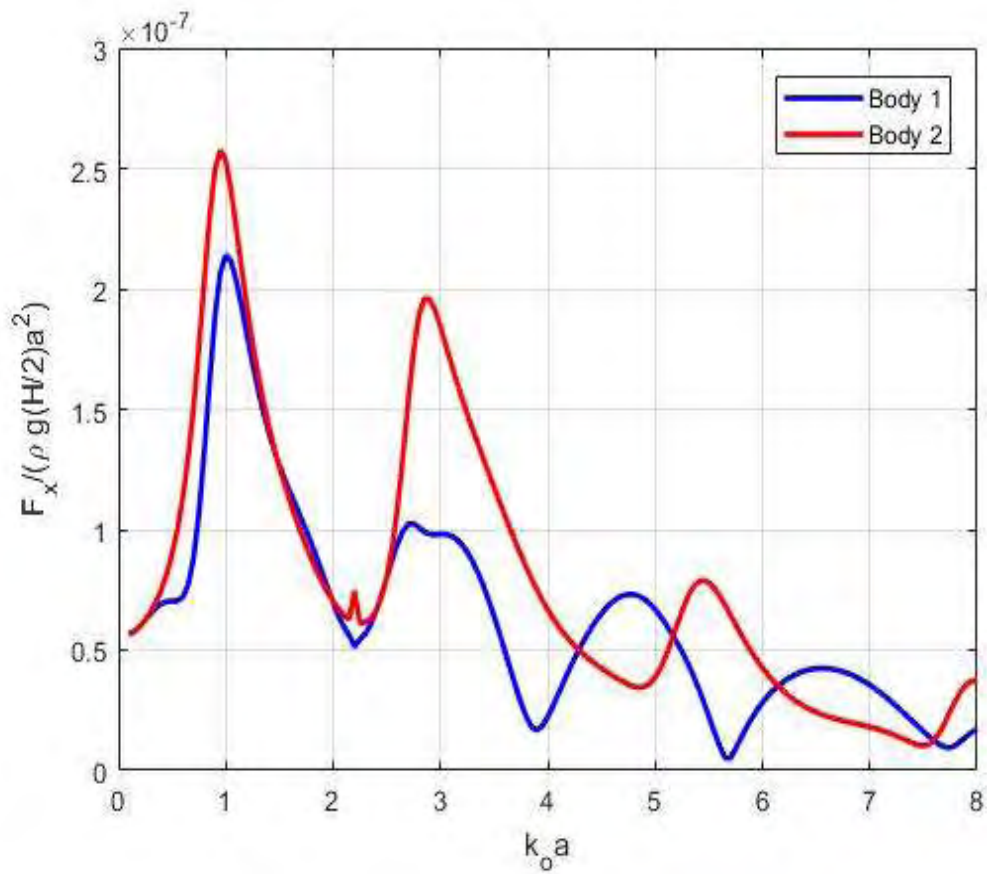
**Διάγραμμα 4.7:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 2 ελλειπτικών κυλίνδρων



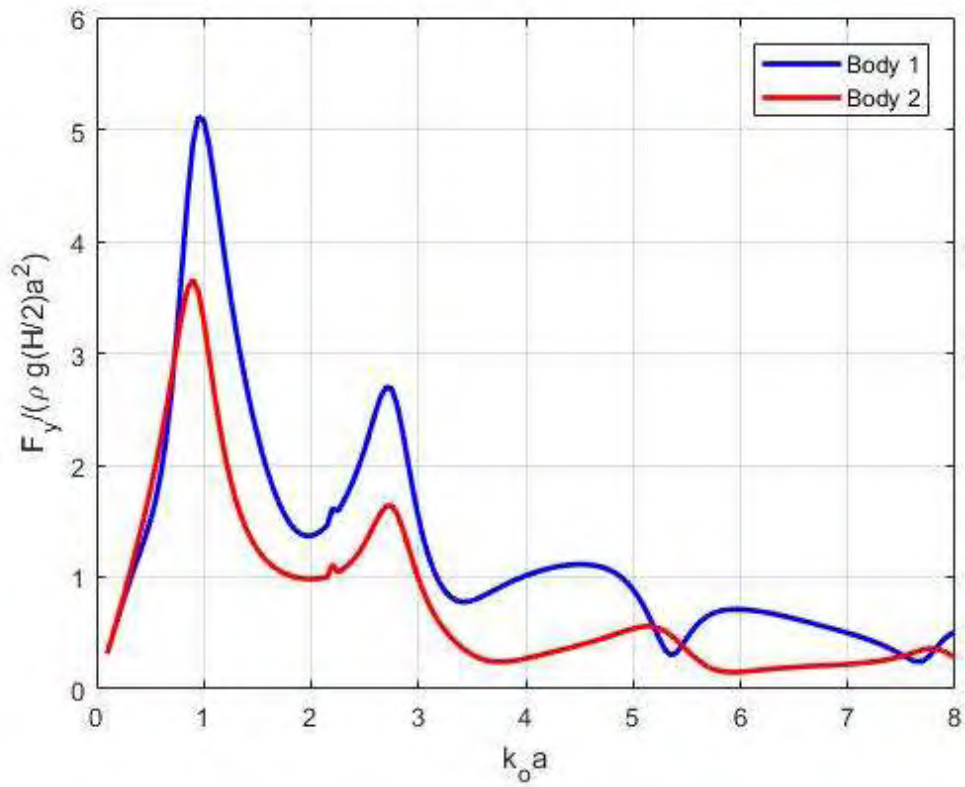
**Διάγραμμα 4.8:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 2 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.9:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

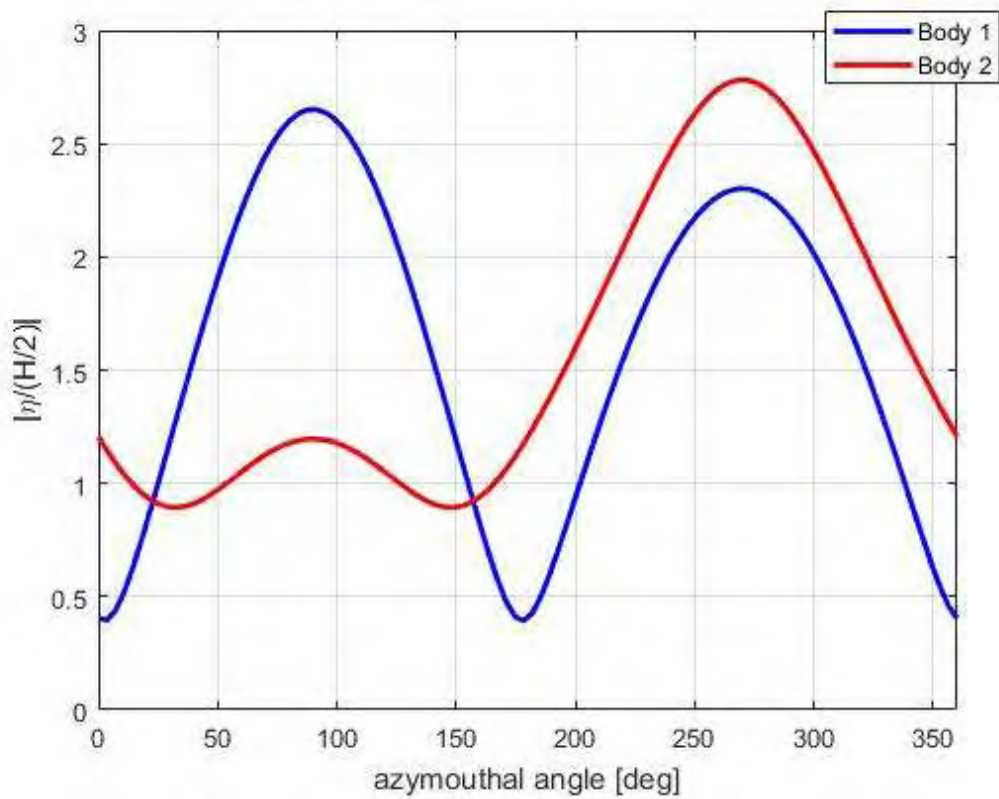


**Διάγραμμα 4.10:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 2 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.11:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 2 ελλειπτικών κυλίνδρων



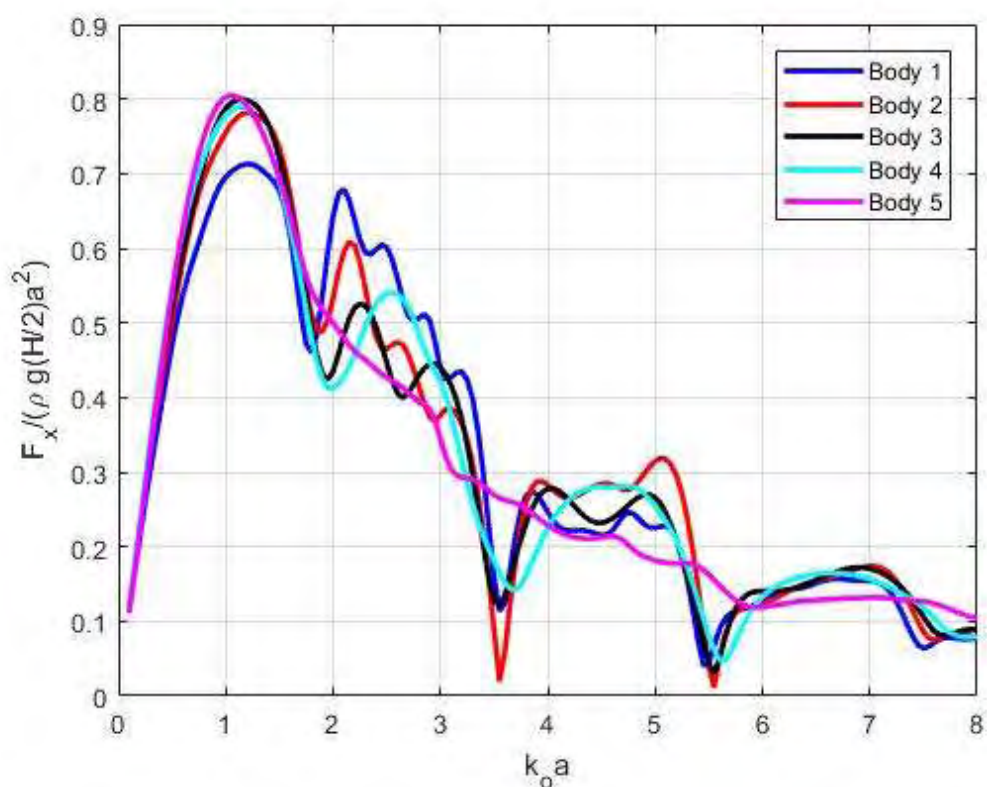


**Διάγραμμα 4.12:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

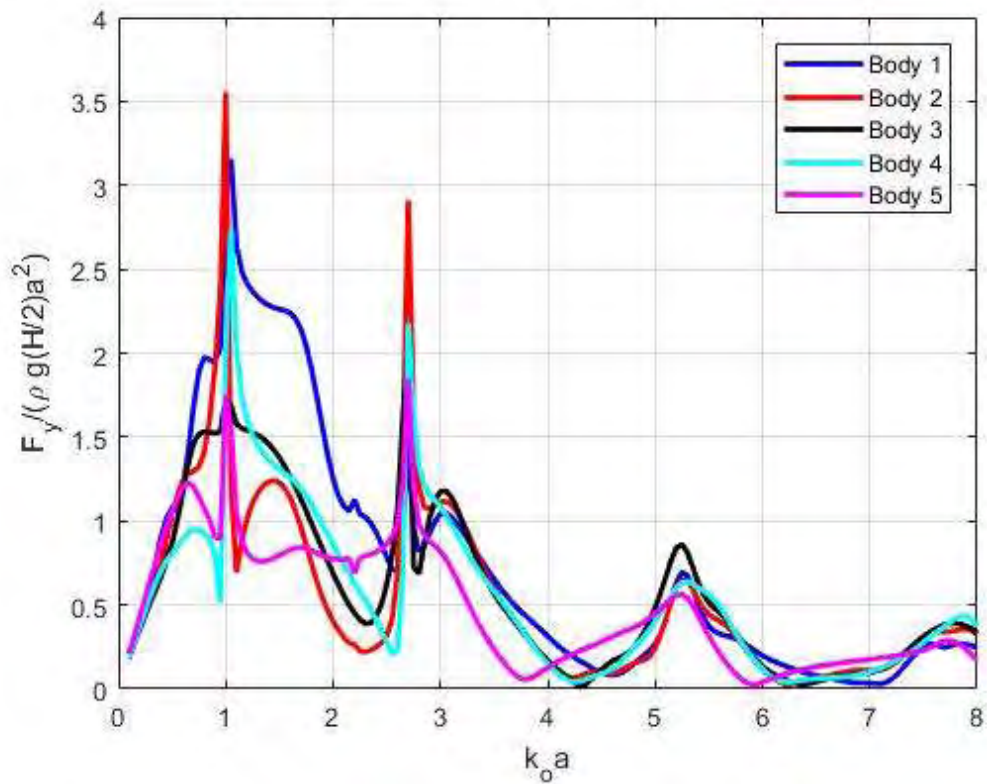
Είναι φανερό πως παρατηρείται αύξηση της ανύψωσης επιφάνειας του ρευστού, εφόσον τώρα τείνει να τριπλασιαστεί. Έτσι παρατηρούμε ότι εμφανίζονται τα πρώτα δείγματα της παγίδευσης.

### 4.2.3 ΠΕΝΤΕ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

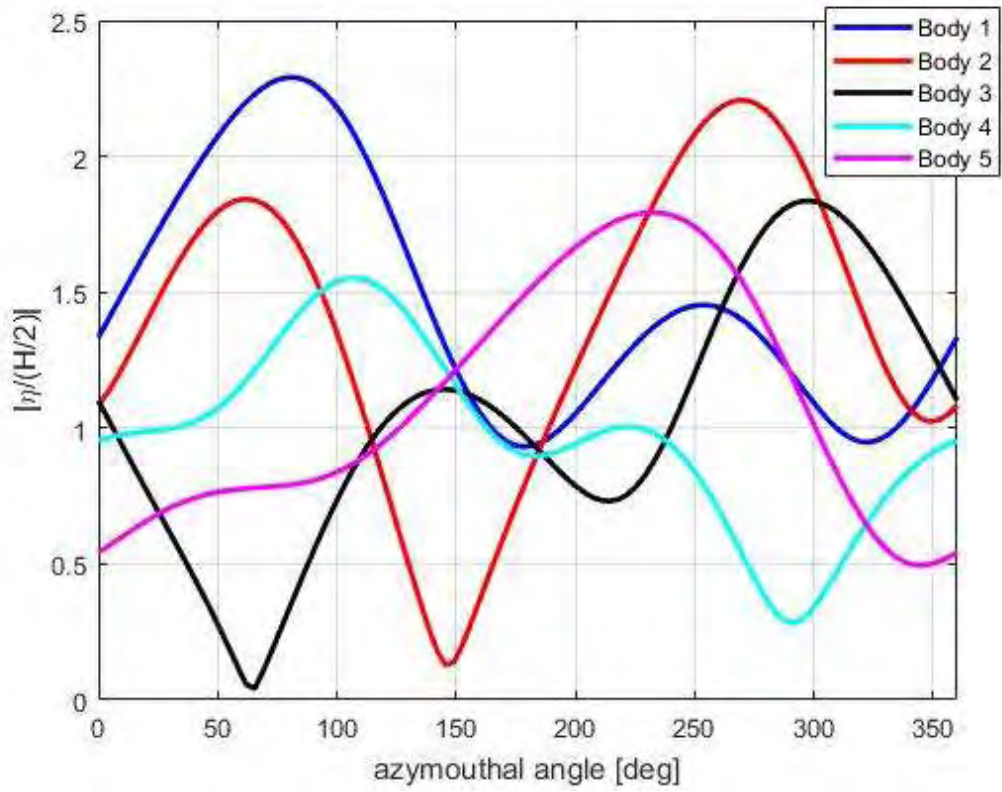
Σε αυτήν την περίπτωση τοποθετήθηκαν πέντε σώματα με απόσταση μεταξύ τους  $dx = 0$  και  $dy = 2a$  το καθένα και στο σύνολο  $dy = 10a$  (Σχήμα 4.2) έχοντας  $b/a=0.4$ . Παρακάτω παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.



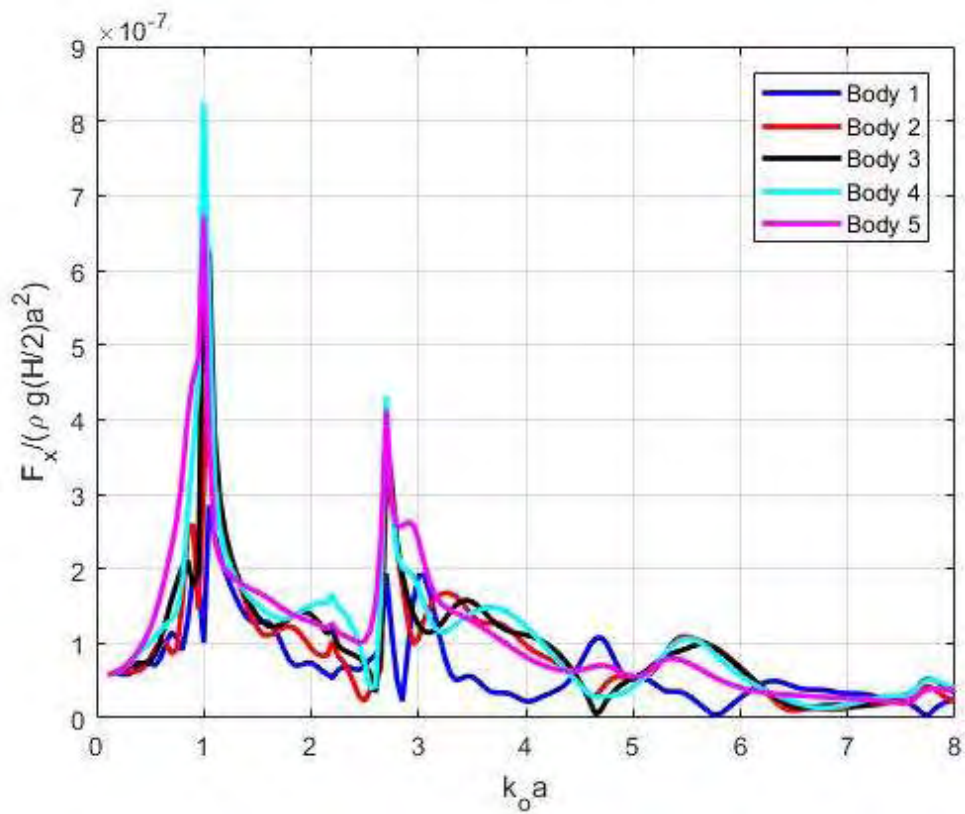
**Διάγραμμα 4.13:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 5 ελλειπτικών κυλίνδρων



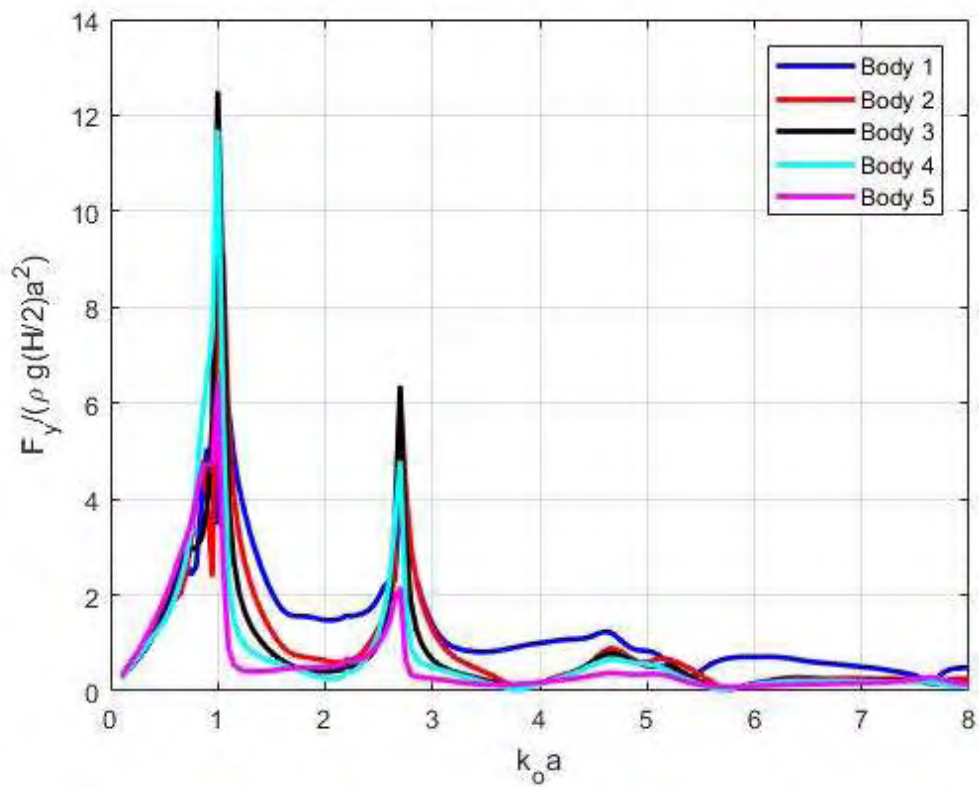
**Διάγραμμα 4.14:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 5 ελλειπτικών κυλίνδρων



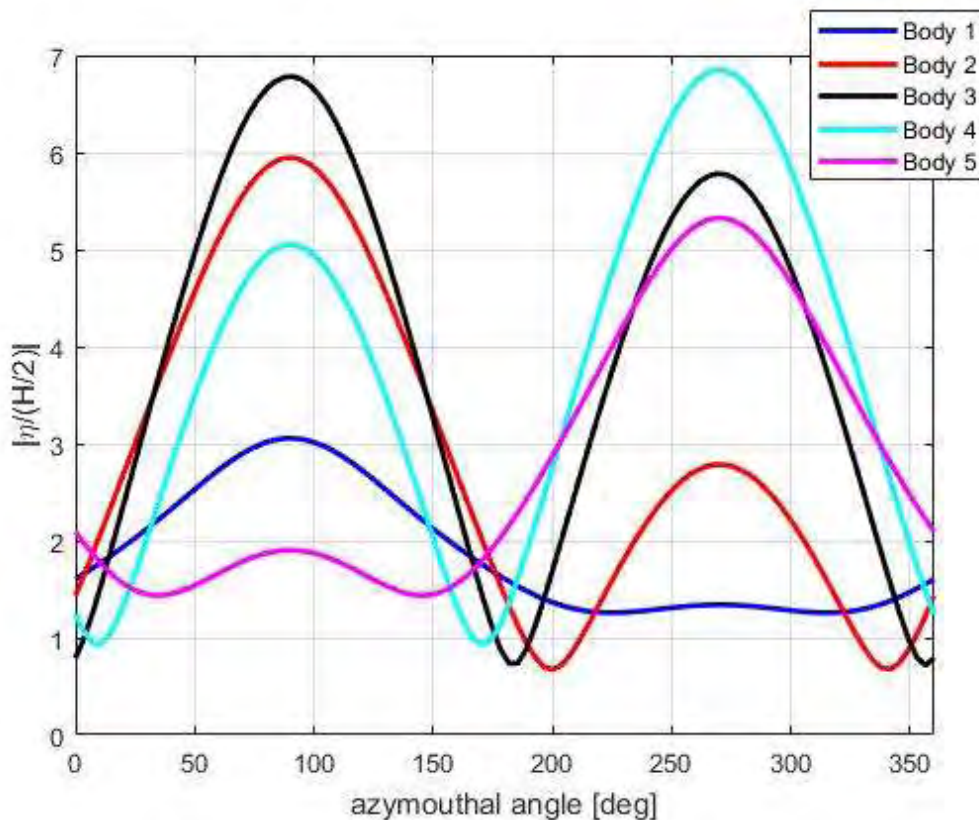
**Διάγραμμα 4.15:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)



**Διάγραμμα 4.16:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 5 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.17:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 5 ελλειπτικών κυλίνδρων

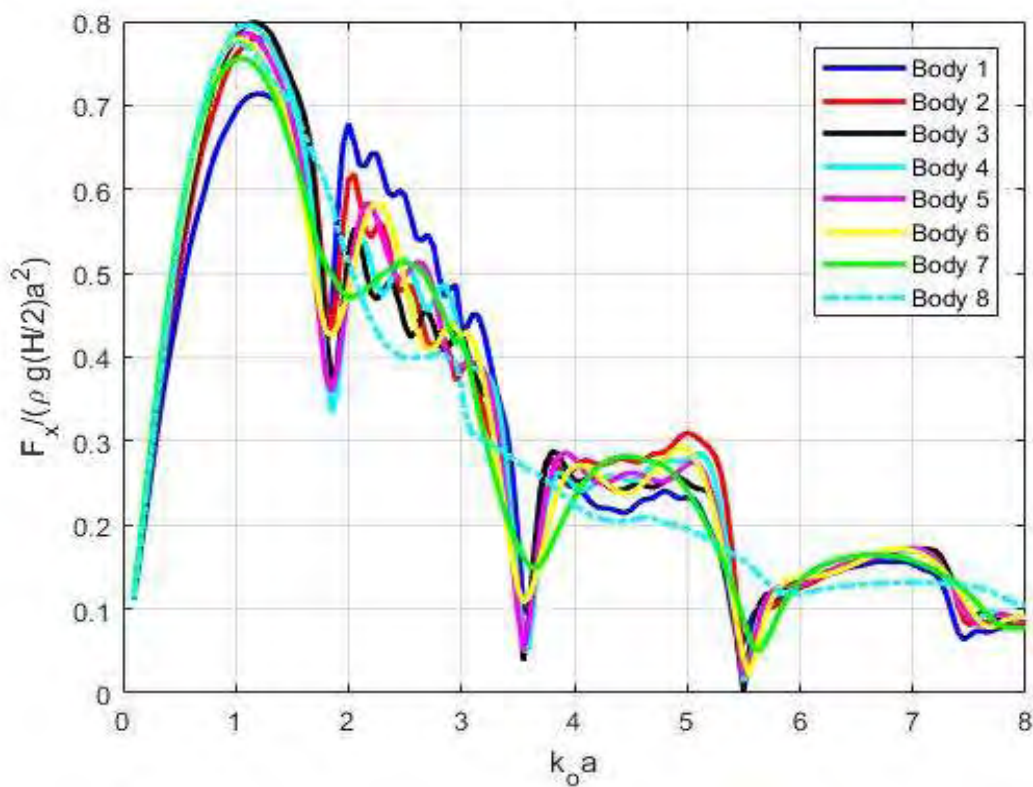


**Διάγραμμα 4.18:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

Παρατηρείται ότι στην διάταξη πέντε κυλίνδρων έχουμε σημαντική αύξηση της  $F_y$  καθώς και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, η οποία σε κυματισμό που προσπίπτει με  $90^\circ$  τείνει να επταπλασιαστεί. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την ερευνά καθώς αντιλαμβανόμαστε πως το φαινόμενο της παγίδευσης όχι μόνο δεν παύει να λειτουργεί αλλά δίνει και καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, στο Διάγραμμα 4.17 των  $F_y$  παρατηρούνται δυο peaks όπου γίνεται συντονισμός. Το πρώτο, το οποίο είναι και μεγαλύτερο αντιστοιχεί σε συνθήκες Neumann ενώ το δεύτερο αντιστοιχεί σε συνθήκες Dirichlet.

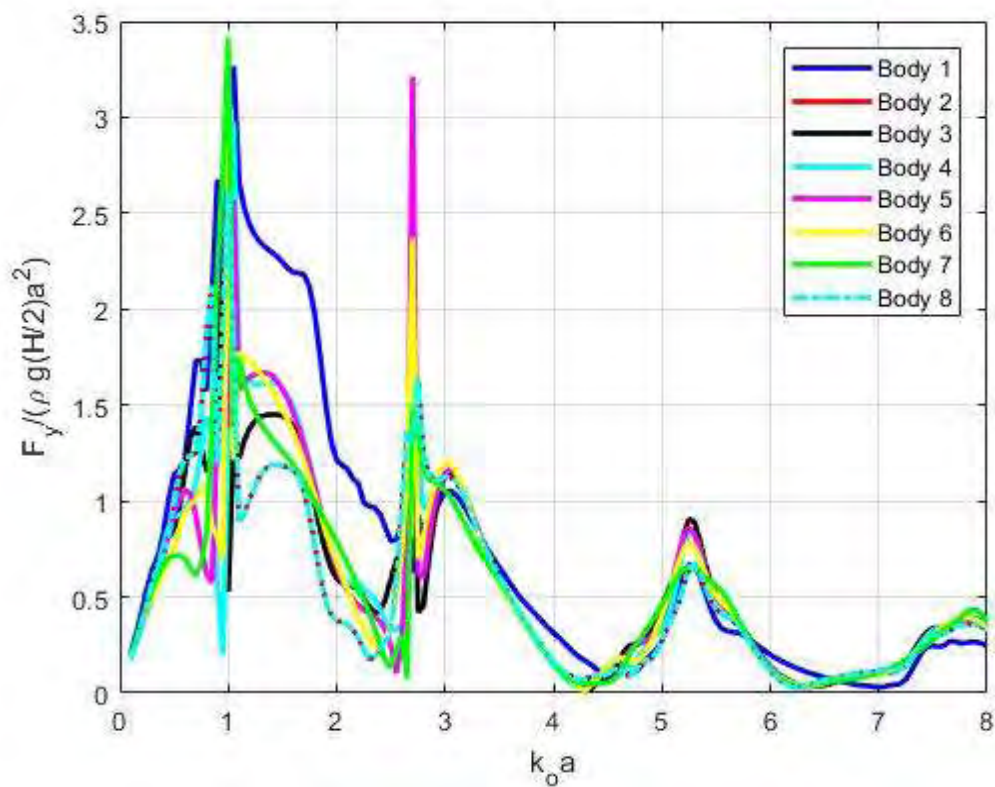
### 4.2.3 ΟΚΤΩ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

Εφόσον προηγούμενος παρατηρήθηκε πως η παγίδευση συνεχίζεται και οι δυνάμεις αυξάνονται συνεχίστηκε η μελέτη με την τοποθέτηση περισσότερων σωμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση τοποθετήθηκαν οχτώ σώματα με απόσταση μεταξύ τους  $dx = 0$  και  $dy = 2a$  το καθένα και στο σύνολο  $dy = 16a$  (Σχήμα 4.3) έχοντας  $b/a = 0.4$ . Παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.

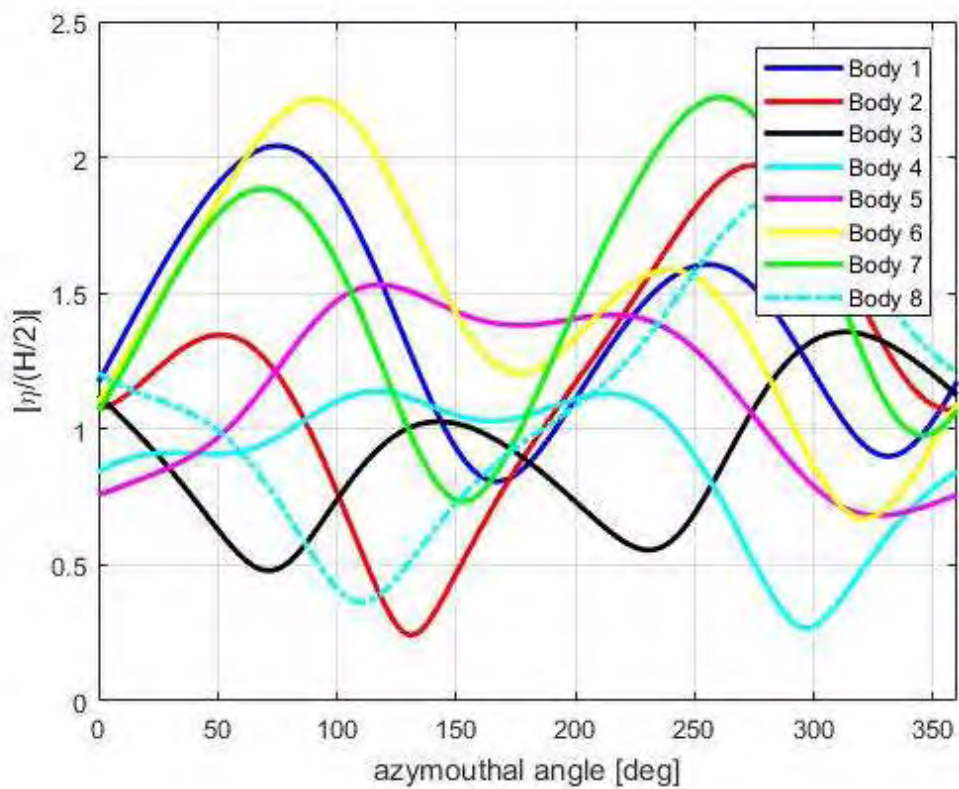


**Διάγραμμα 4.19:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 8 ελλειπτικών κυλίνδρων

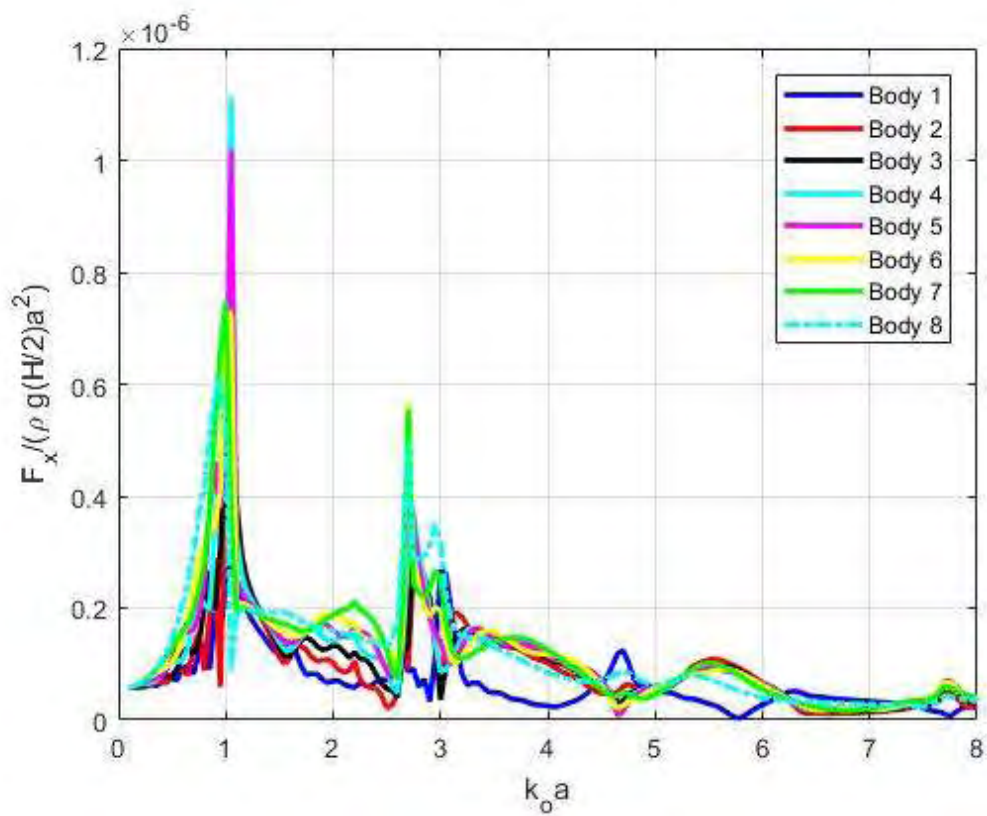




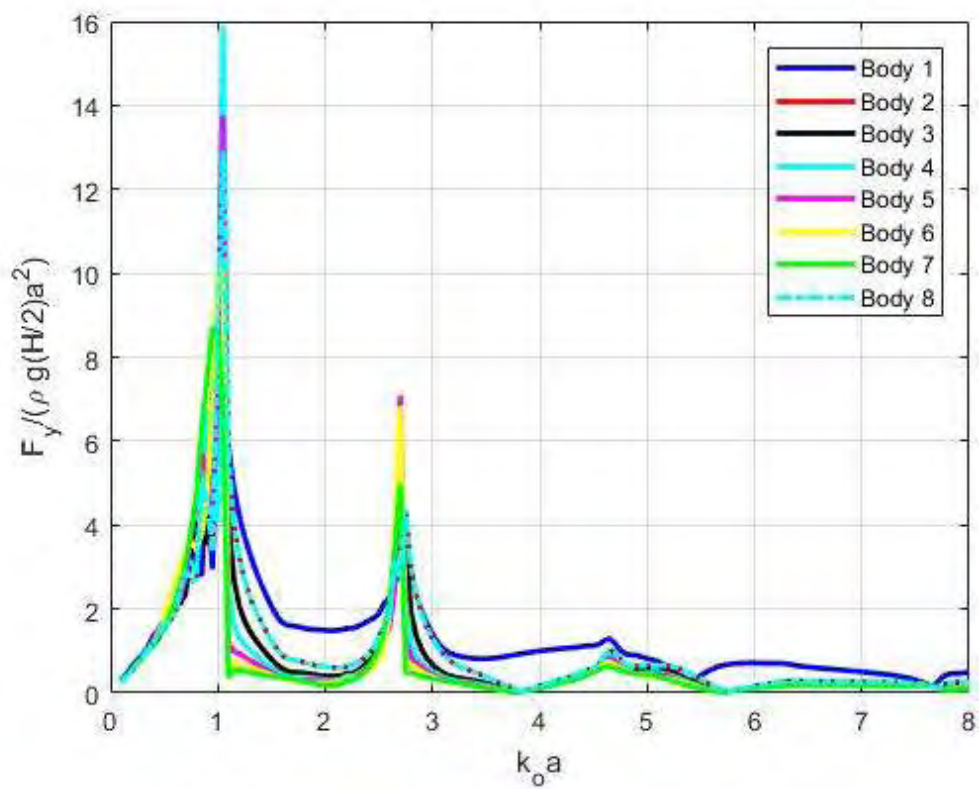
**Διάγραμμα 4.20:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 8 ελλειπτικών κυλίνδρων



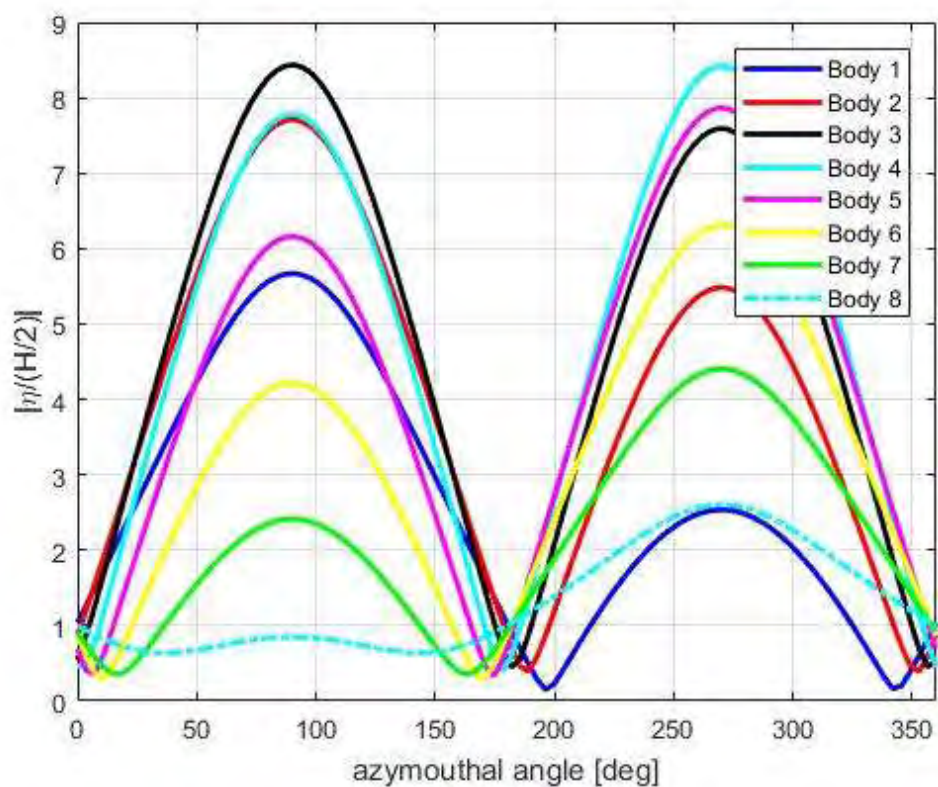
**Διάγραμμα 4.21:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)



**Διάγραμμα 4.22:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 8 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.23:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 8 ελλειπτικών κυλίνδρων

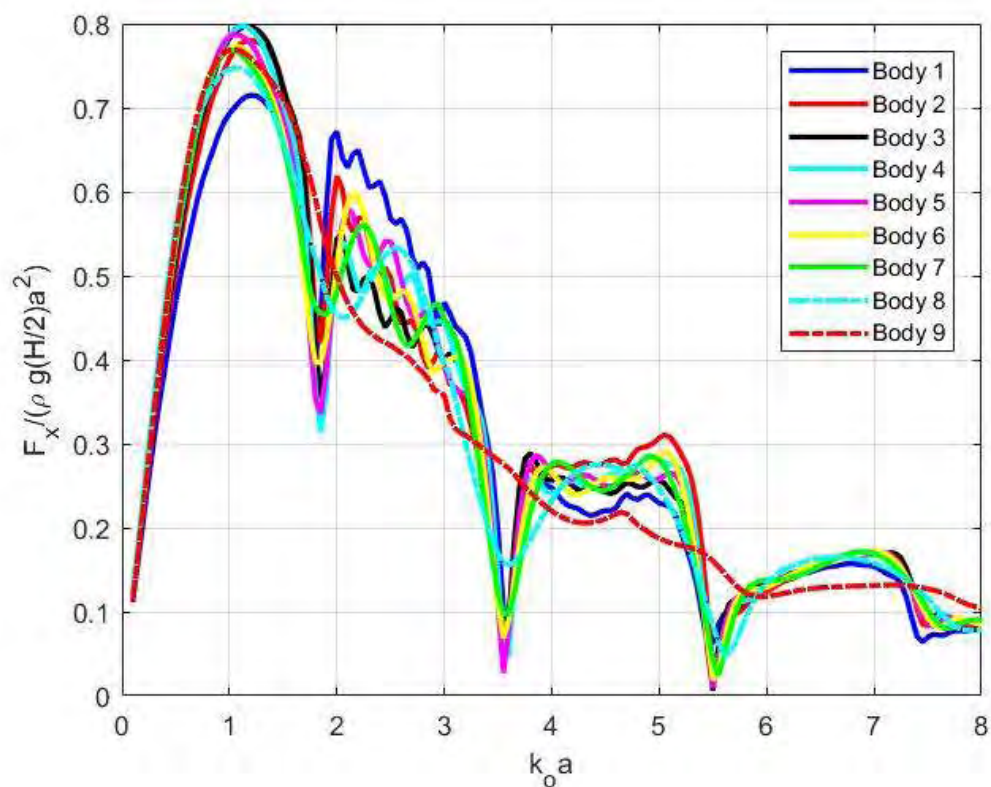


**Διάγραμμα 4.24:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

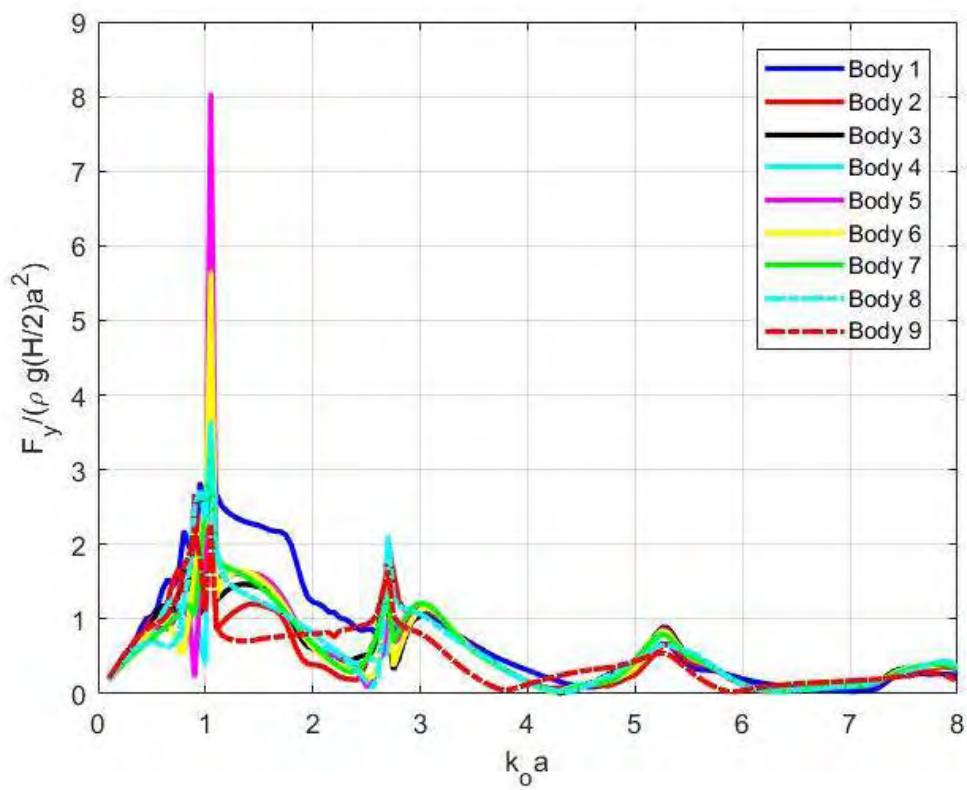
Αν και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αύξηση των δυνάμεων και της ανύψωσης της στάθμης, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σχέση με την προηγούμενη συστοίχια, καθώς με την αύξηση τριών σωμάτων η ανύψωση τείνει να εννεαπλασιαστεί ενώ με πέντε σώματα έτεινε να επταπλασιαστεί. Για τον λόγο αυτό η μελέτη θα συνεχιστεί με περεταίρω δοκιμές σε διάταξη που απαρτίζεται από μεγαλύτερο αριθμό κυλίνδρων.

#### 4.2.4 ΕΝΝΕΑ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

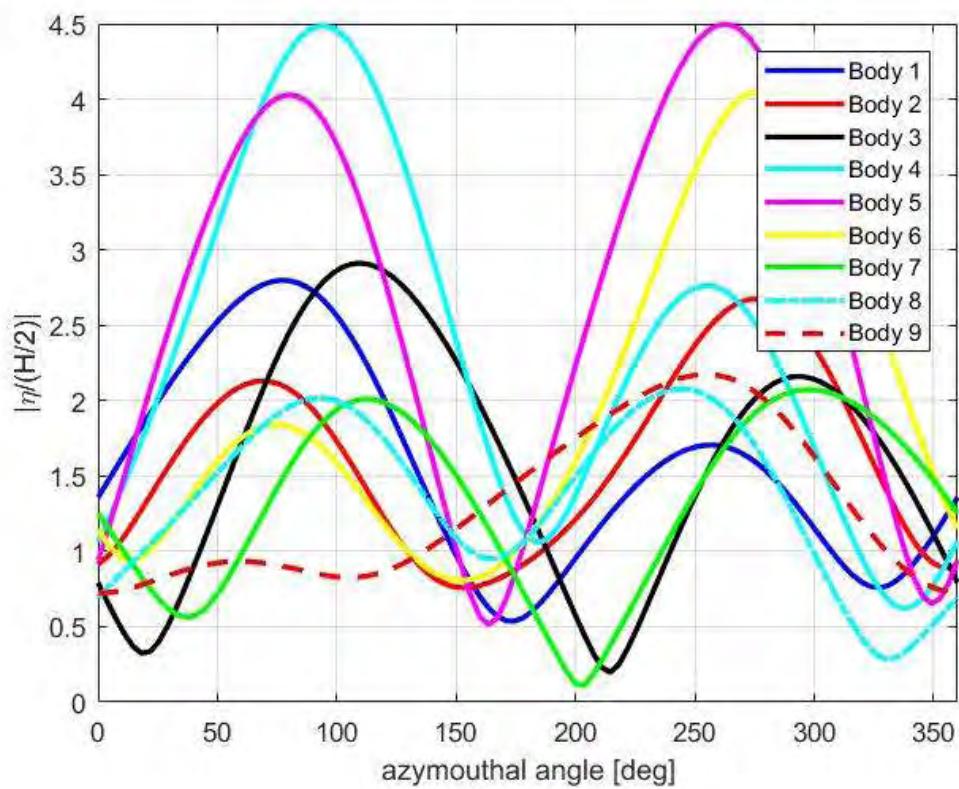
Επιλέγεται διάταξη εννέα σωμάτων με απόσταση μεταξύ τους  $dx = 0$  και  $dy = 2a$  το καθένα και στο σύνολο  $dy = 18a$  (Σχήμα 4.4) έχοντας  $b/a = 0.4$ . Παρακατω παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 4.25:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 9 ελλειπτικών κυλίνδρων

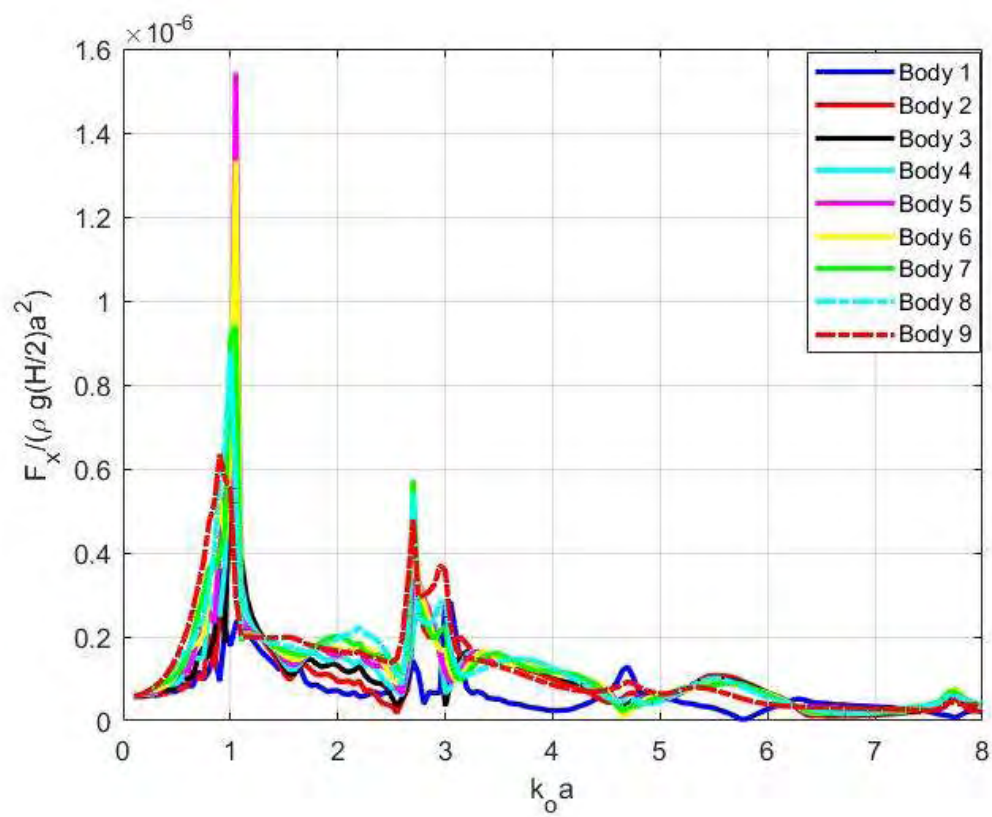


**Διάγραμμα 4.26:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 9 ελλειπτικών κυλίνδρων

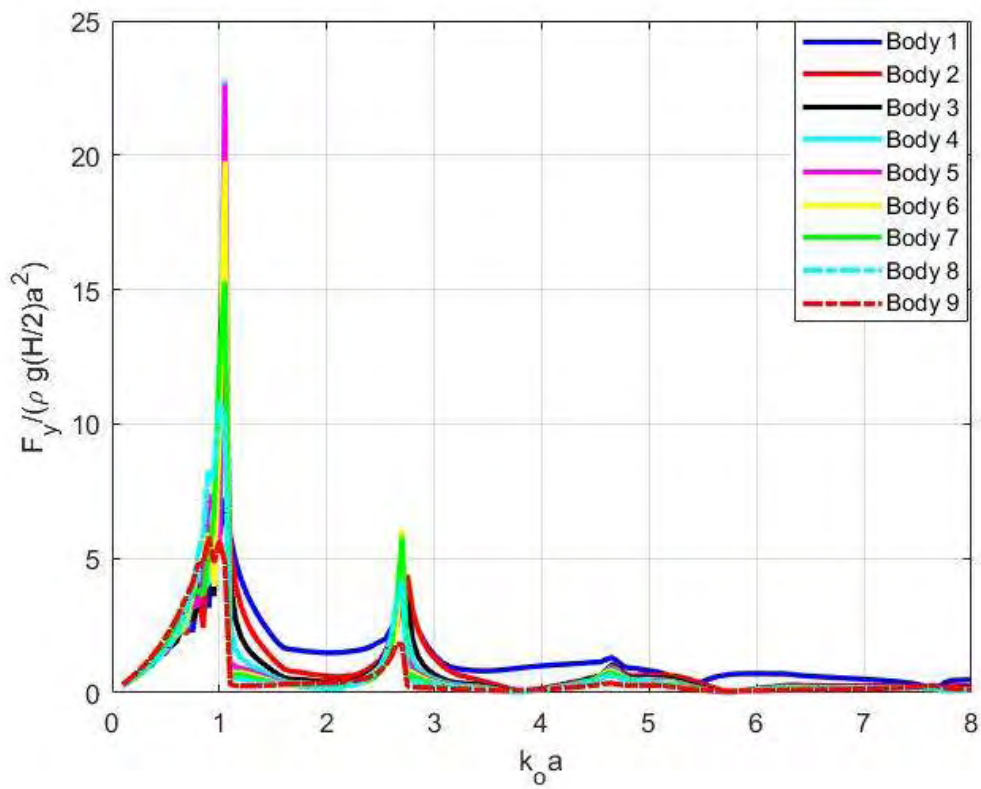


**Διάγραμμα 4.27:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

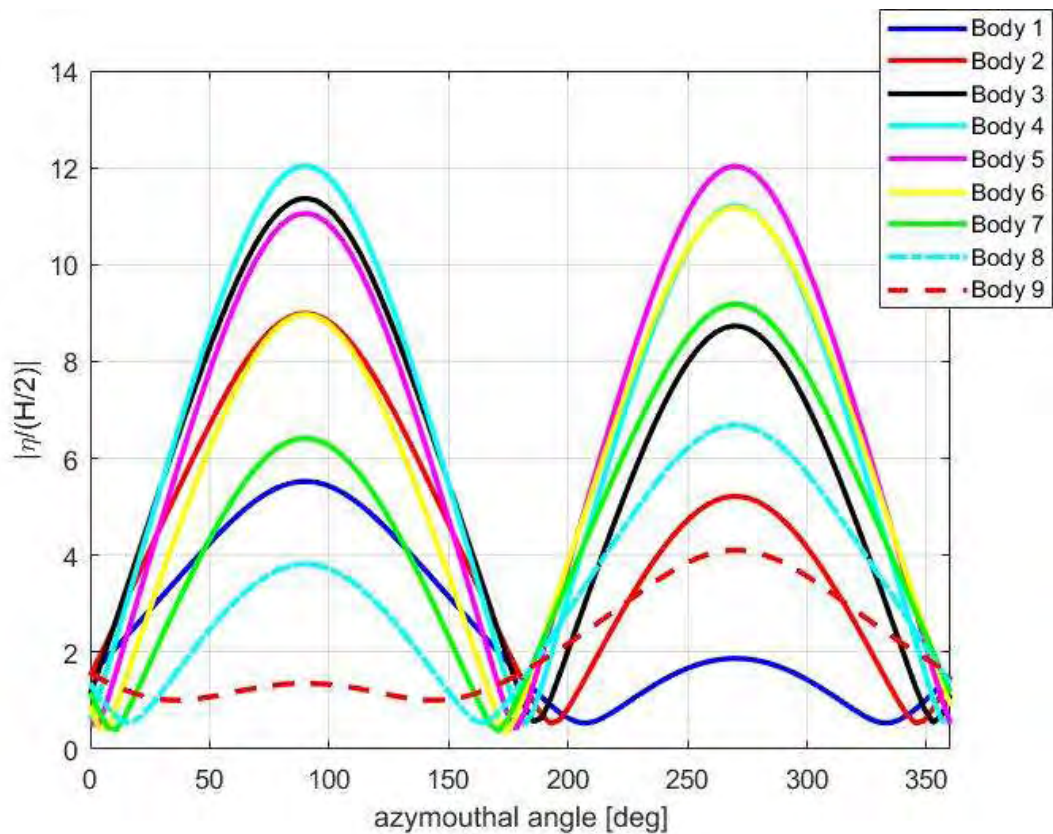




**Διάγραμμα 4.28:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 9 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.29:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 9 ελλειπτικών κυλίνδρων

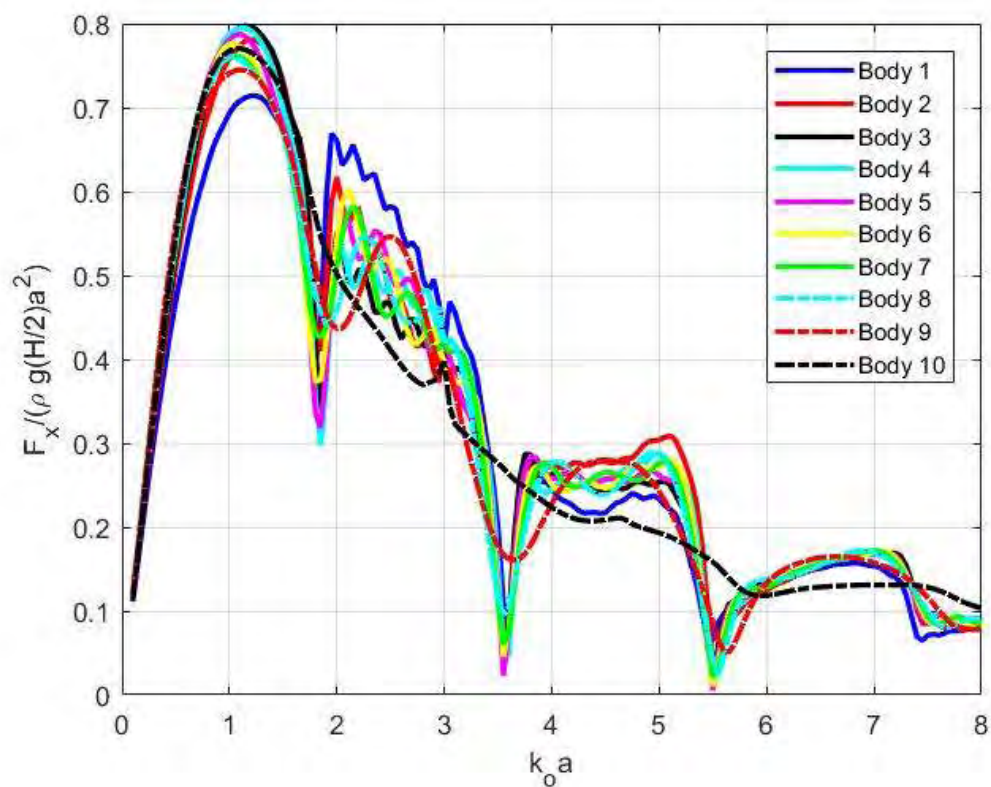


**Διάγραμμα 4.30:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

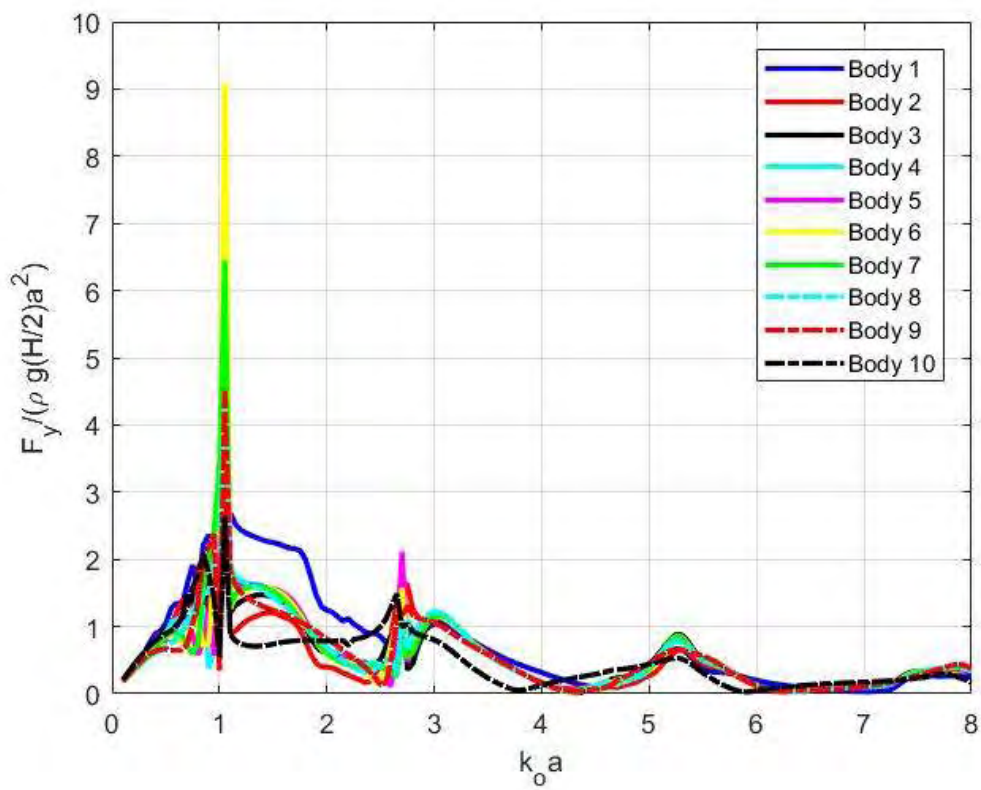
Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται πως με την πρόσθεση ενός σώματος υπάρχει σημαντική αύξηση και στις δυνάμεις και στην ανύψωση της στάθμης η οποία τείνει να δωδεκαπλασιαστεί ενώ στην προηγούμενη συστοιχία έτεινε να εννεαπλασιαστεί . Βασιζόμενοι σε αυτό διεξάχθηκε ακόμα μια δοκιμή με την προσθήκη ενός ακόμα σώματος .

#### 4.2.5 ΔΕΚΑ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ

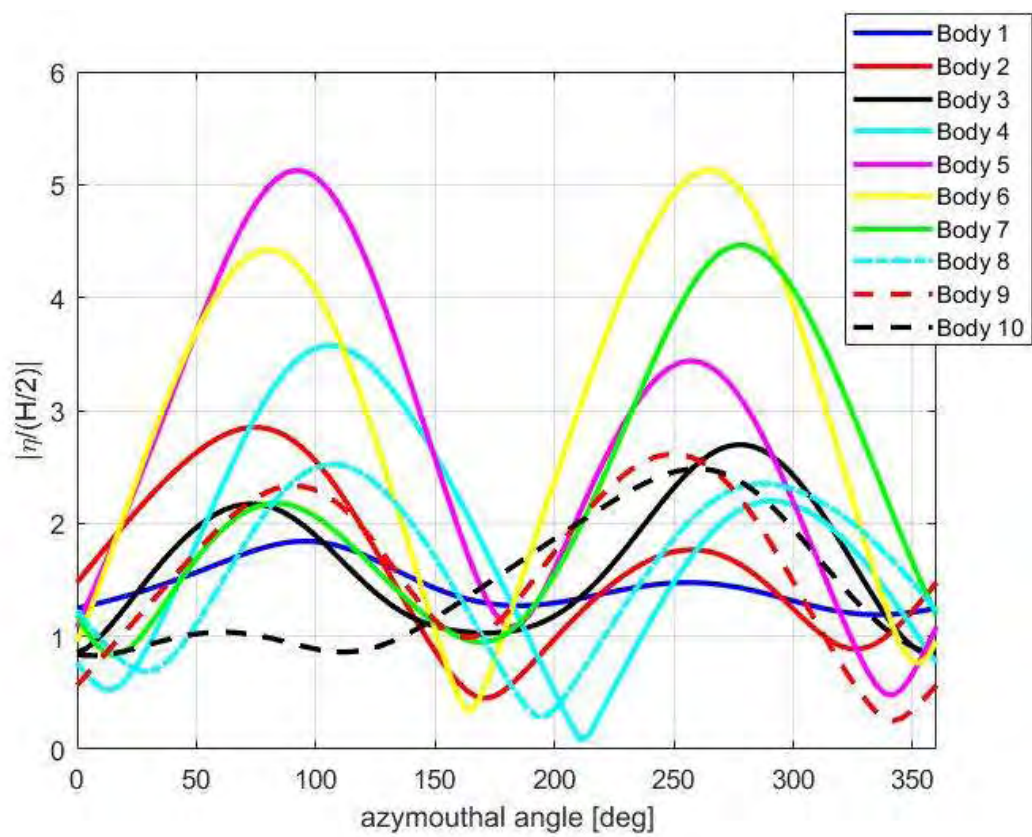
Τοποθετούνται δέκα σώματα με απόσταση μεταξύ τους  $dx = 0$  και  $dy = 2a$  το καθένα και στο σύνολο  $dy = 20a$  (Σχήμα 4.5) έχοντας  $b/a = 0.4$ . Παρακατω παρουσιάζονται οι  $F_x$ ,  $F_y$  και  $\eta$  για κύμα που προσπίπτει με  $45^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα.



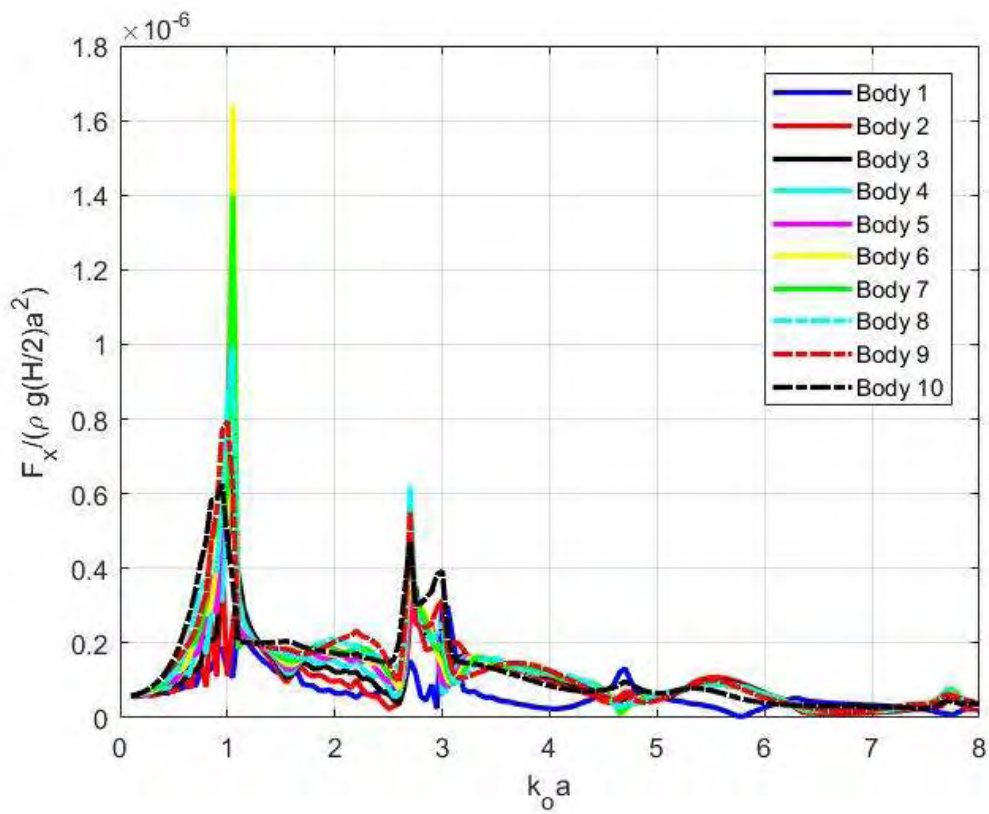
**Διάγραμμα 4.31:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 10 ελλειπτικών κυλίνδρων



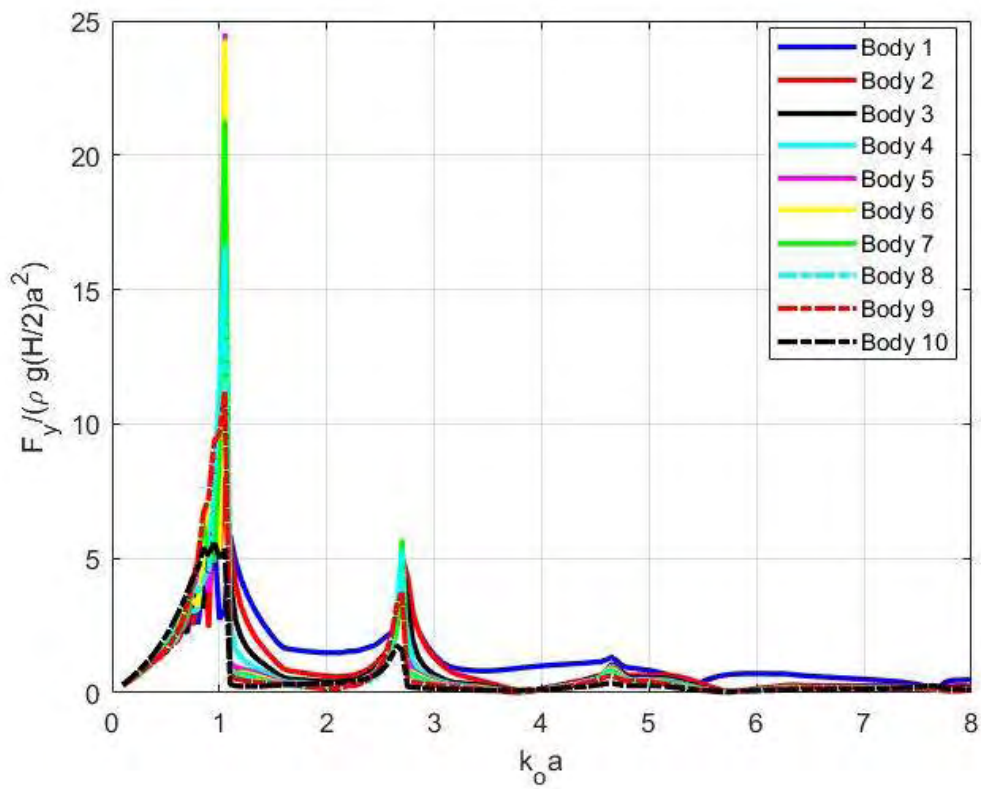
**Διάγραμμα 4.32:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 10 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.33:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

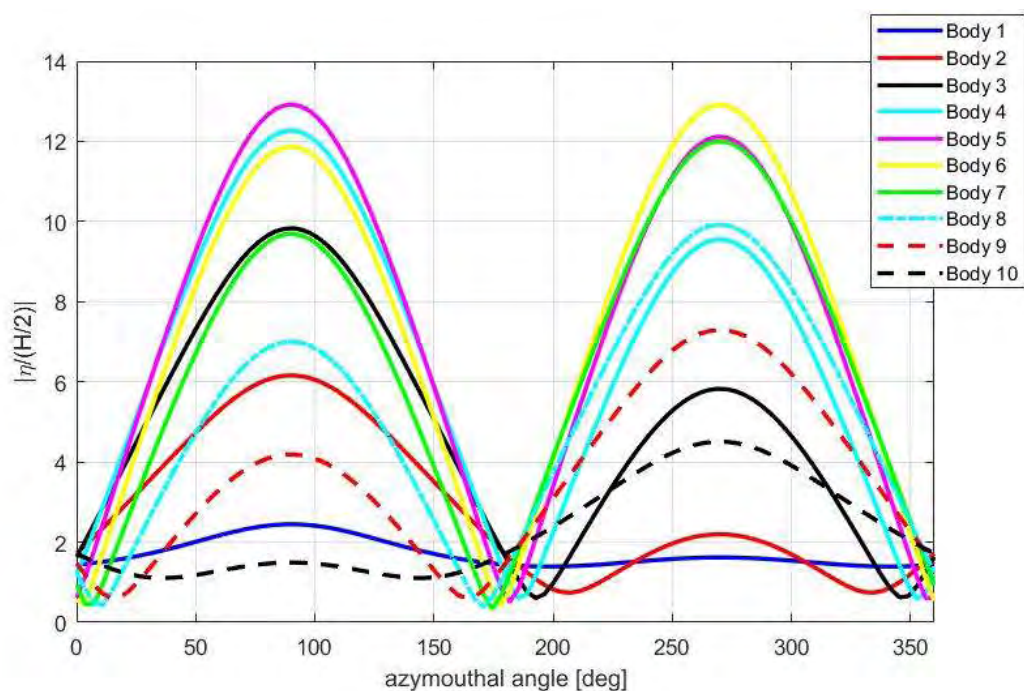


**Διάγραμμα 4.34:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_x$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 10 ελλειπτικών κυλίνδρων



**Διάγραμμα 4.35:** Αποτελέσματα δυνάμεων  $F_y$  για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$  και απόσταση  $2a$  μεταξύ 10 ελλειπτικών κυλίνδρων





**Διάγραμμα 4.36:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας στον κάθε κύλινδρο (0-360 μοίρες)

Παρατηρείτε πως και πάλι υπάρχει αύξηση της ανύψωσης και των δυνάμεων. Σε σύγκριση με την προηγούμενη συστοιχία η αύξηση για προσπίπτων κυματισμό με  $90^\circ$  δεν χαρακτηρίζεται ως σημαντική οπότε επιλέγουμε να μην διεξάγουμε άλλη δοκιμή.

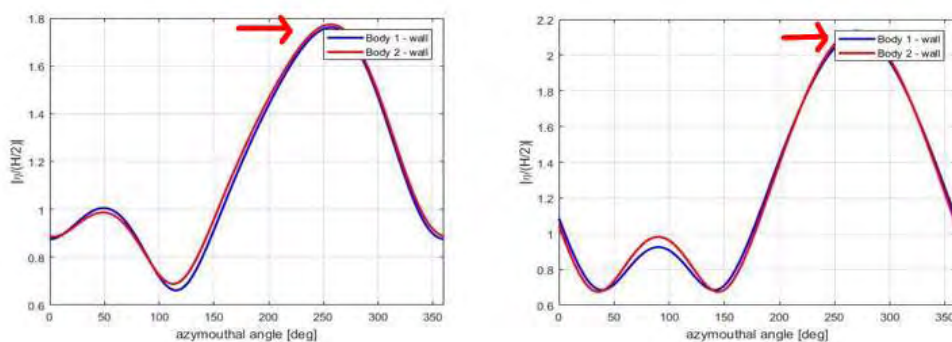
Έχοντας πραγματοποιήσει τις παραπάνω δοκιμές παρατηρούμε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των σωμάτων αυξάνεται και η δύναμη  $F_y$ . Η μεγαλύτερη  $F_y$  θα εμφανιζόταν σε μια διάταξη αποτελούμενη από απείρους κυλίνδρους όπου το κύμα θα παγιδευόταν αναμεσα χωρίς να μπορεί να «ξεφύγει»(τελεία παγίδευση) . Ένας τέτοιος σχεδιασμός στην πραγματικότητα δεν είναι εφικτός. Ακόμα ένας παράγοντας

σημαντικός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι με την αύξηση των σωμάτων αυξάνεται ανάλογα και το κόστος του έργου.

## 5. ΣΧΟΛΙΑΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

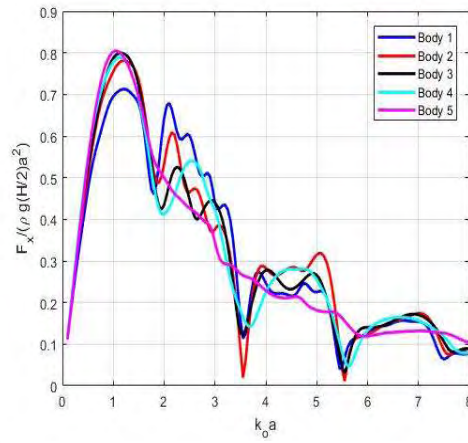
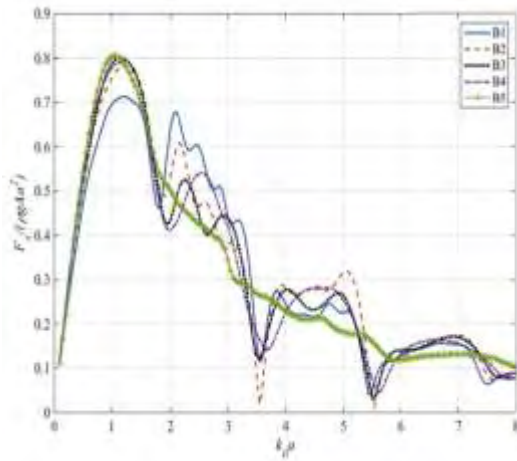
Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση ενός σώματος με πολύ μεγάλο πλάτος, ώστε να προσεγγίζει απότομο τοίχο, δηλαδή  $b/a = 0.001$  είναι πολύ κοντά στον κυματισμό clarotis. Η ανύψωση και για  $45^\circ$  και για  $90^\circ$  είναι κοντά στο 1.8 και 2 αντίστοιχα τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την τιμή 2 όπου εμφανίζεται στο clarotis.



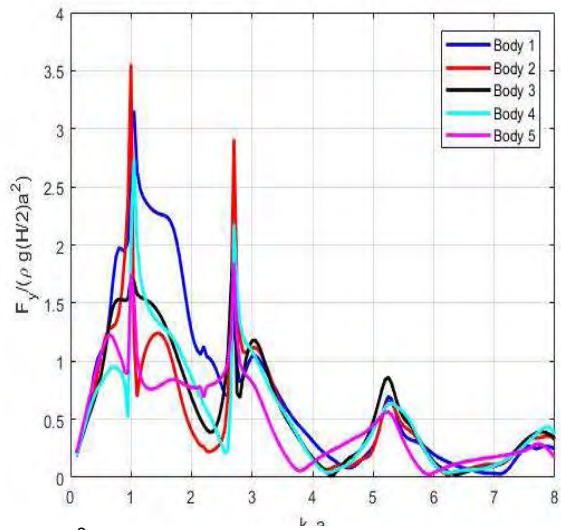
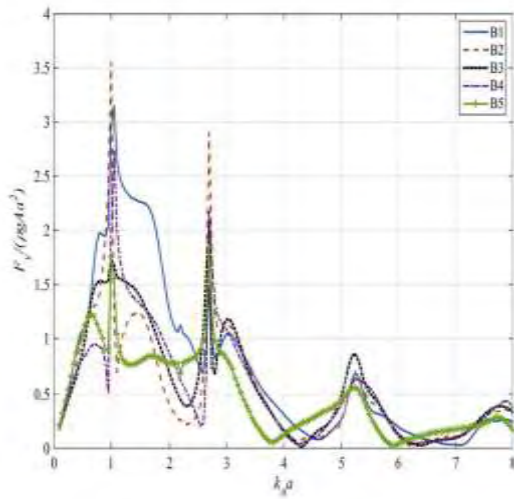
**Διάγραμμα 5.1:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας για  $45^\circ$  (αριστερά) και για  $90^\circ$  (δεξιά)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σύγκρισης με το clarotis επιβεβαιώνεται η ορθότητα τους καθώς προσεγγίζουν φυσικά φαινόμενα.

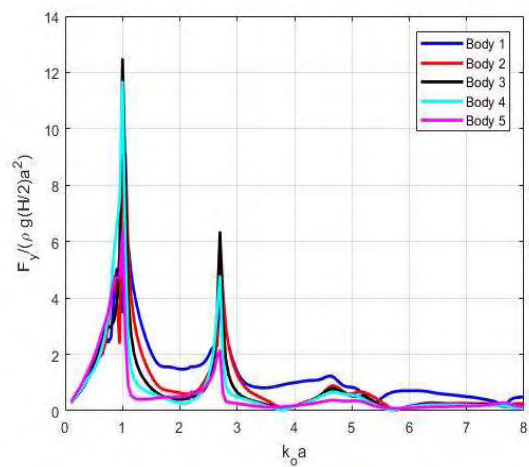
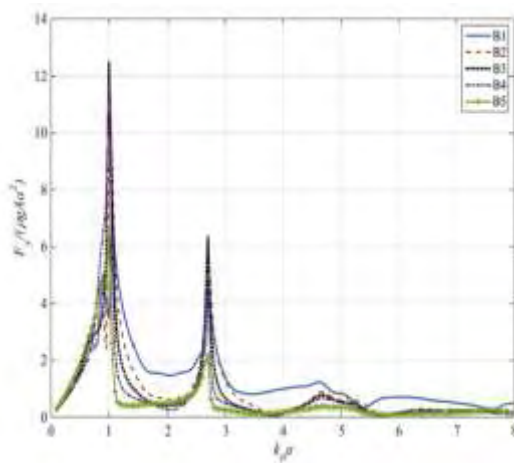
Επιπρόσθετα, η ορθότητα των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται διπλά και στην περίπτωση των πέντε σωμάτων καθώς ταυτίζονται με αποτελέσματα για πέντε ελλειπτικά σώματα σε σχετική δημοσίευση (Chatjigeorgiou and Katsardi, 2018).



Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων  $F_x$  για  $45^\circ$



Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων  $F_y$  για  $45^\circ$



Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων  $F_y$  για  $90^\circ$

## 5.2 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

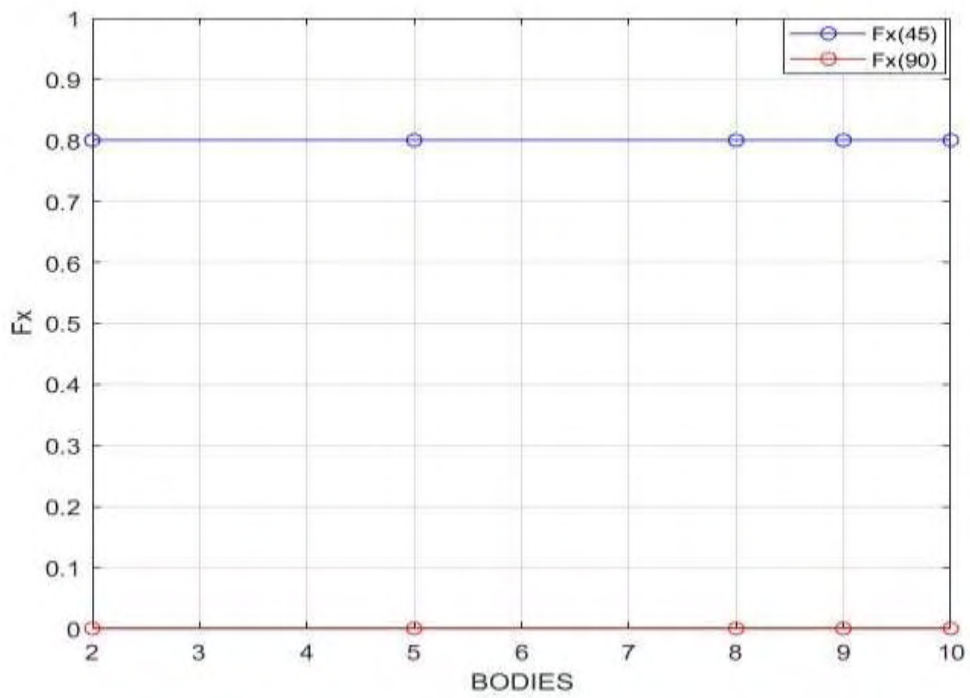
### 5.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Σε κάθε περίπτωση ενδιαφερόμαστε να βρούμε τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων.

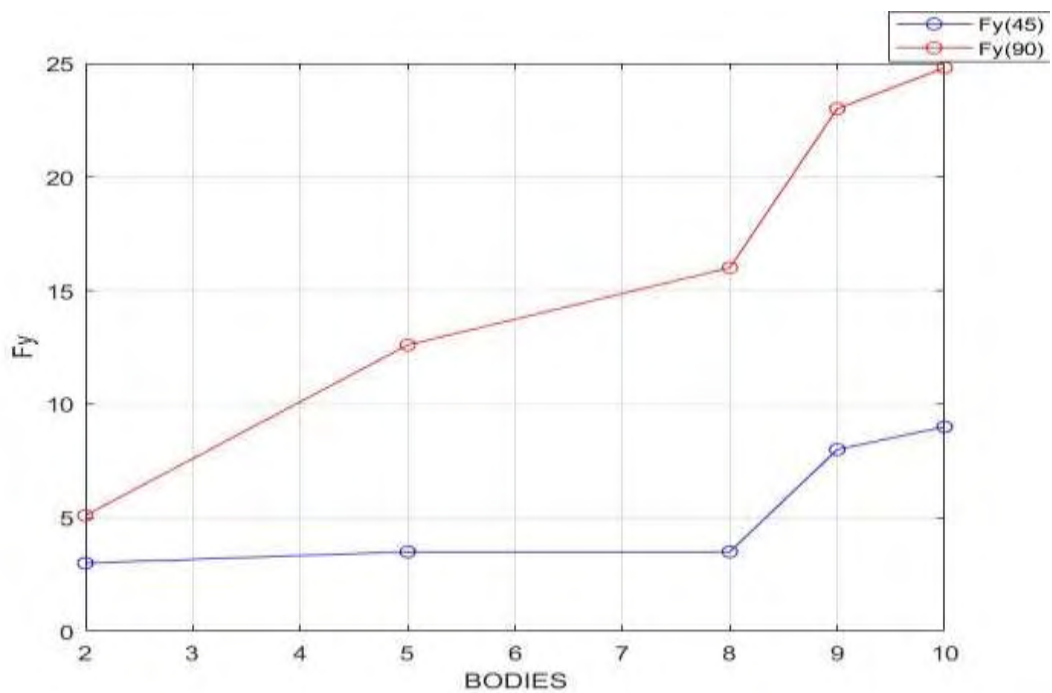
Τα αποτελέσματα για τις μέγιστες τιμές των δυνάμεων(peaks) ομαδοποιούνται στον παρακάτω πίνακα :

	$F_x(45^\circ)$	$F_x(90^\circ)$	$F_y(45^\circ)$	$F_y(90^\circ)$
2 BODIES	0.8	2.6E-07	3	5.1
5 BODIES	0.8	8.2E-07	3	12.6
8 BODIES	0.8	1.1E-06	3.5	16
9 BODIES	0.8	1.6E-06	8	23
10 BODIES	0.8	1.61E-06	9	24.8

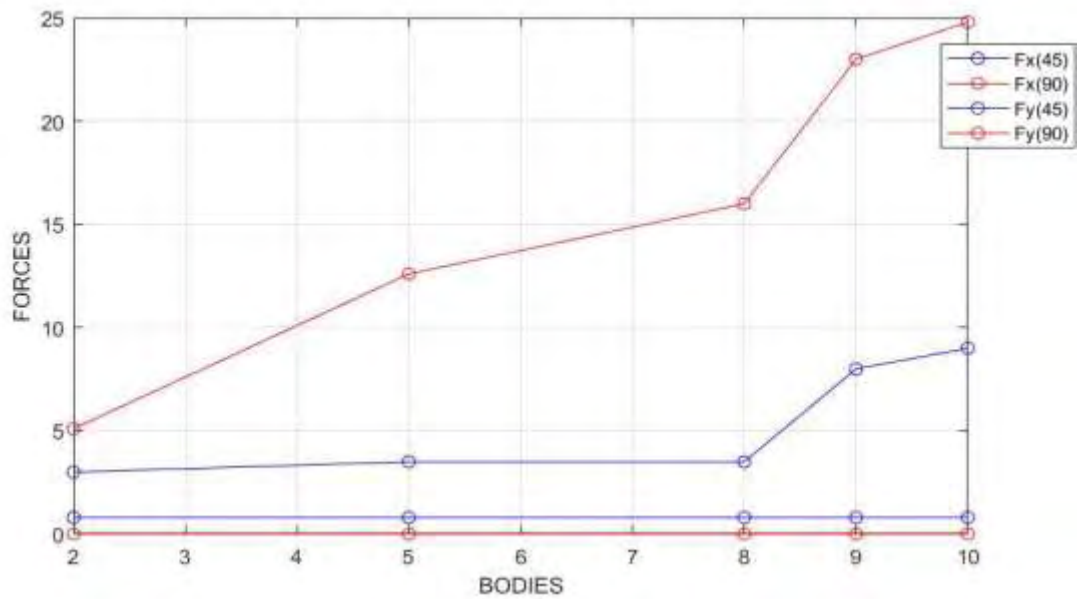
**Πίνακας 5.1:** Ομαδοποίηση των μέγιστων δυνάμεων



**Διάγραμμα 5.5:** Σύγκριση μέγιστων  $F_x$



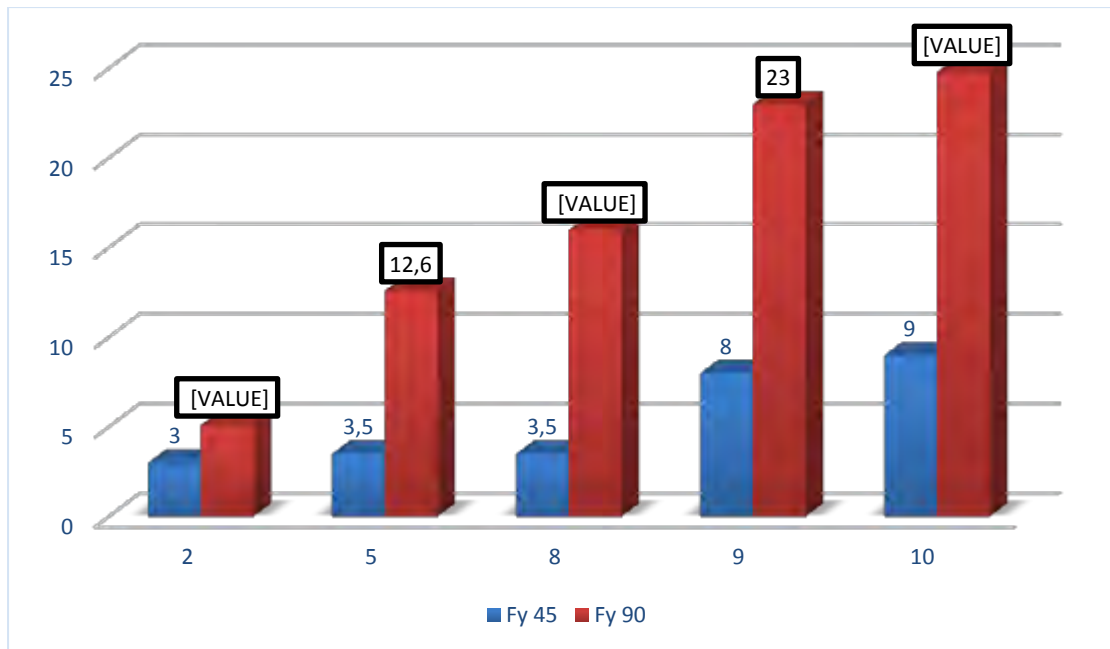
**Διάγραμμα 5.6:** Σύγκριση μέγιστων  $F_y$



**Διάγραμμα 5.7:** Σύγκριση όλων των μέγιστων δυνάμεων

### 5.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΥΞΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Οι δυνάμεις που μας ενδιαφέρουν είναι οι Fy. Παρατηρούμε από την παραπάνω μελέτη πως για την πρόσπτωσης  $90^\circ$  εμφανίζει μεγαλύτερες συγκεκριμένη διάταξη που έχουμε δημιουργήσει ο κυματισμός με γωνιά τιμές της Fy από τον κυματισμό με γωνιά πρόσπτωσης  $45^\circ$ .

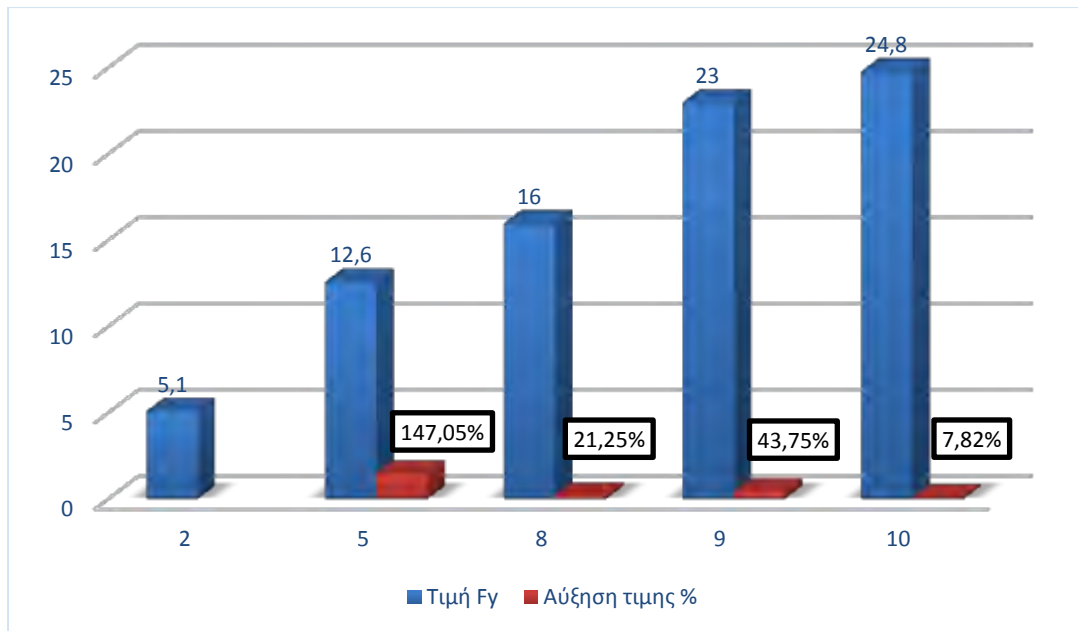


**Γράφημα 5.1:** Μέγιστες τιμές Fy με κυματισμό 45° και 90°

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση των σωμάτων αυξάνεται και η τιμή της δύναμης. Ωστόσο το ποσοστό αύξησης της δύναμης δεν είναι ανάλογο με την αύξηση των σωμάτων .

Αναλυτικά:

- Από 2 σώματα σε 5 σώματα είναι : 147.05%
- Από 5 σώματα σε 8 σώματα είναι : 21.25%
- Από 8 σώματα σε 9 σώματα είναι : 43.75%
- Από 9 σώματα σε 10 σώματα είναι : 7.82%



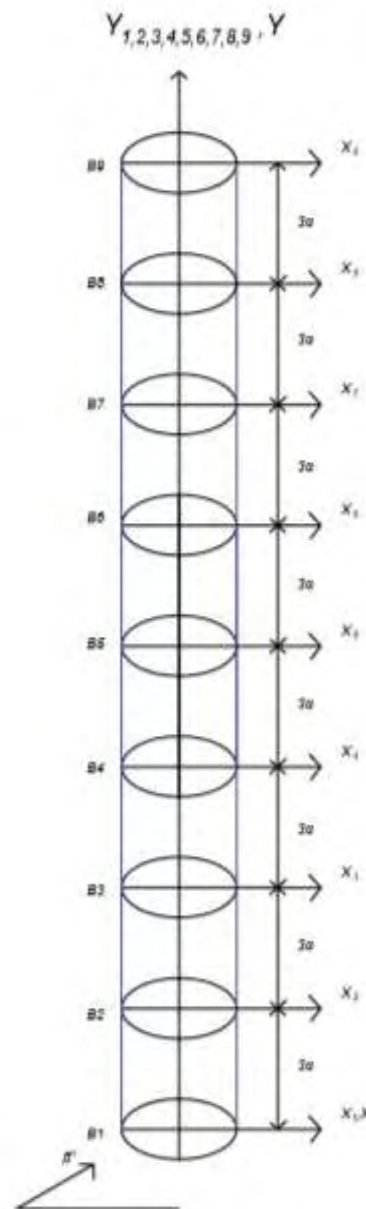
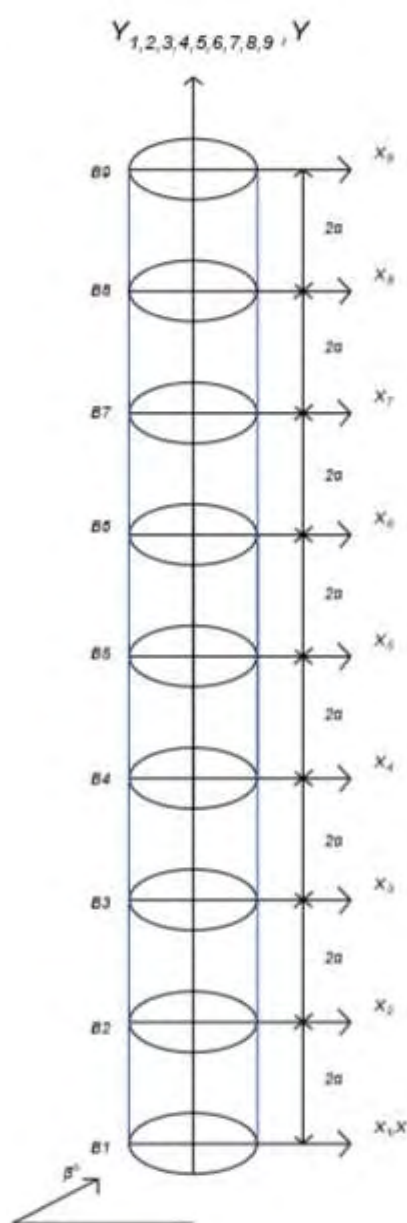
**Γράφημα 5.2:** Μέγιστη τιμή Fy και ποσοστό αύξησης της τιμής

Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται από δυο σε πέντε σώματα. Η δύναμη όμως είναι αρκετά μικρή. Μέγιστη τιμή δύναμης παρατηρείται στους δέκα κυλίνδρους ωστόσο η αύξηση της τιμής είναι σχετικά μικρή κάτι το οποίο καθιστά την επιλογή αυτή αντισυμβαλλόμενη. Συνεπώς καταλήγουμε στην διάταξη των εννέα ελλειπτικών κυλίνδρων που έχω ικανοποιητική τιμή μέγιστης δύναμης και έχει παρατηρηθεί αύξηση τάξης 43,75% από την προηγούμενη διάταξη των οκτώ κυλίνδρων. Αυτή η πρόταση είναι η πιο οικονομική, καθώς και η βέλτιστη για να έχουμε την μεγαλύτερη ανύψωση ώστε να τοποθετηθούν οι κατάλληλες συσκευές για την εκμετάλλευση της ενέργειας (value for money).

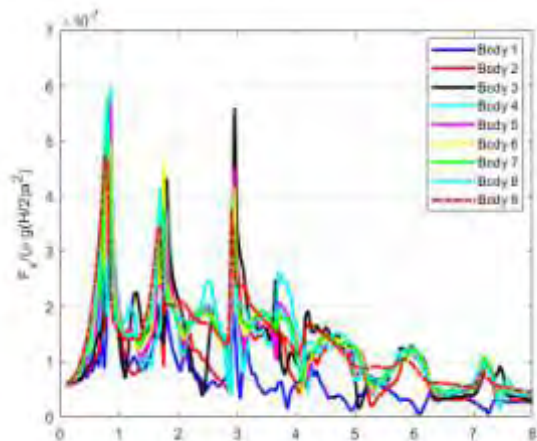
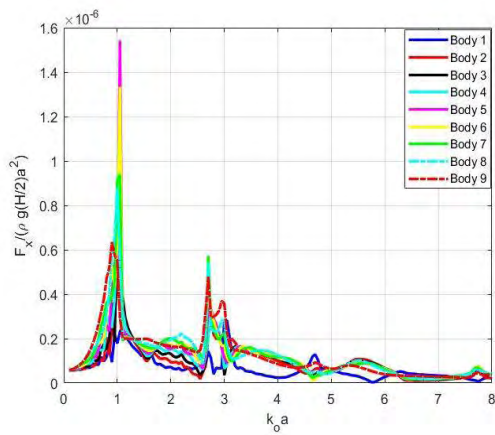


### 5.2.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

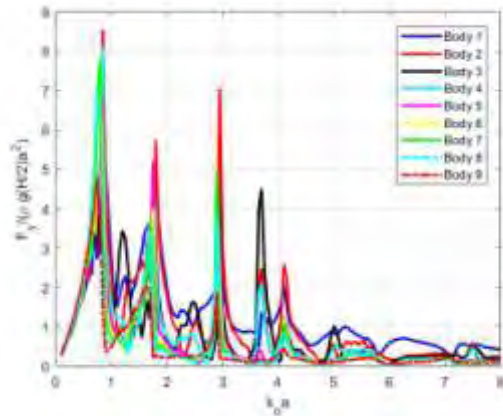
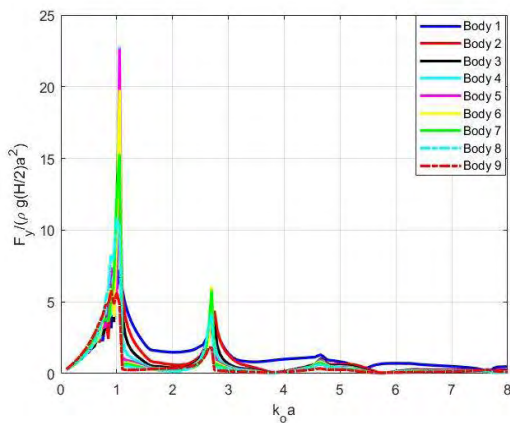
Έχοντας καταλήξει ως βέλτιστο αριθμό κυλίνδρων εννέα σε σειρά με κυματισμό σε γωνιά  $90^\circ$  θέλουμε να εξετάσουμε μεταξύ τους απόσταση. Μέχρι στιγμής όλες οι δοκιμές έγιναν με απόσταση κυλίνδρων την ελάχιστη επιτρεπτή  $2a$ . Τώρα θα εξετάσουμε να αυξήσουμε την απόσταση κατά  $a$  και να την πάμε στα  $3a$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην συνέχεια.



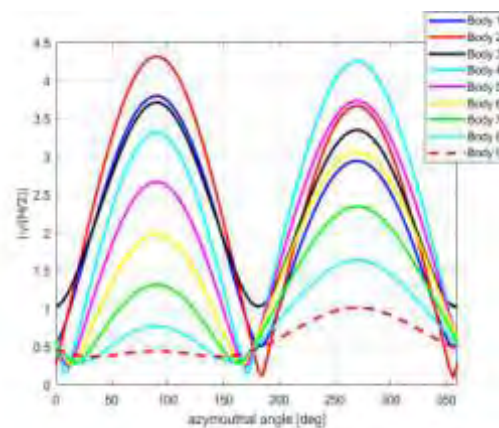
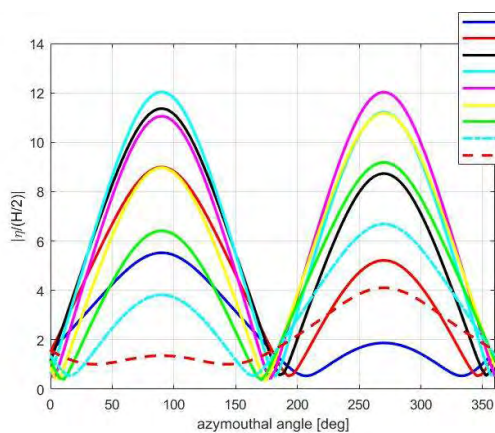
**Σχήμα 5.1:** 9 κύλινδροι με απόσταση  $2a$     **Σχήμα 5.2:** 9 κύλινδροι με απόσταση  $3a$



**Διάγραμμα 5.8:** Σύγκριση  $F_x$  για διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $2a$ (αριστερά) με διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $3a$ (δεξιά)



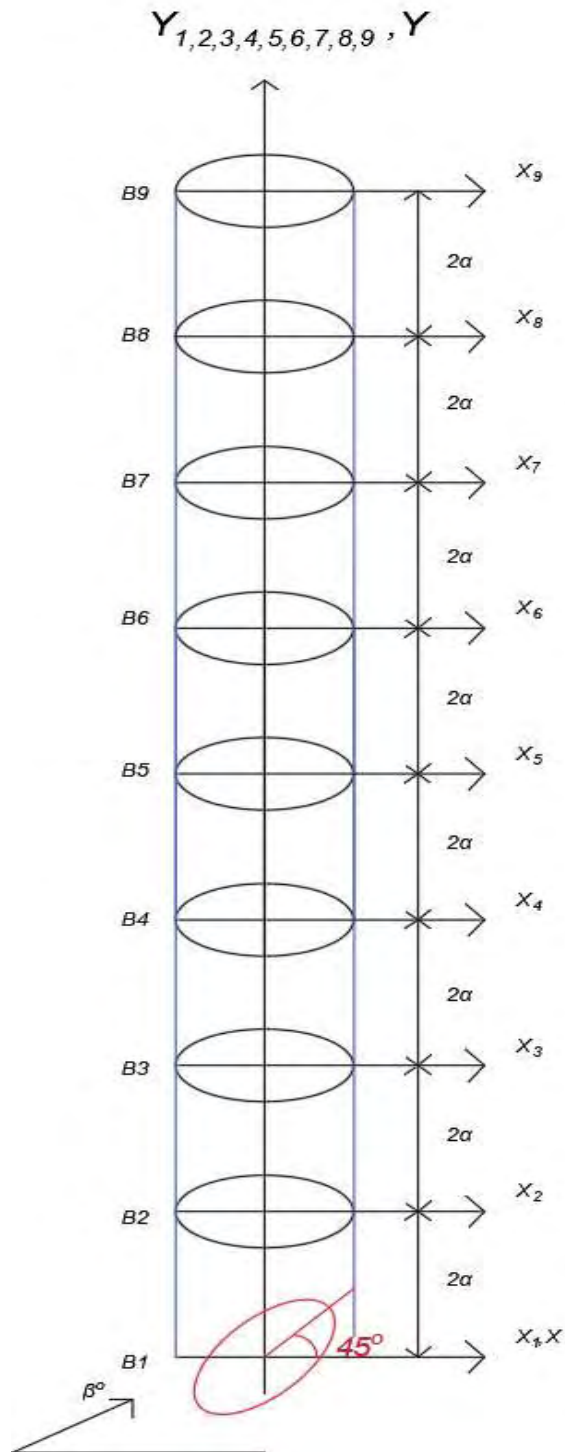
**Διάγραμμα 5.9:** Σύγκριση  $F_y$  για διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $2a$ (αριστερά) με διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $3a$ (δεξιά)



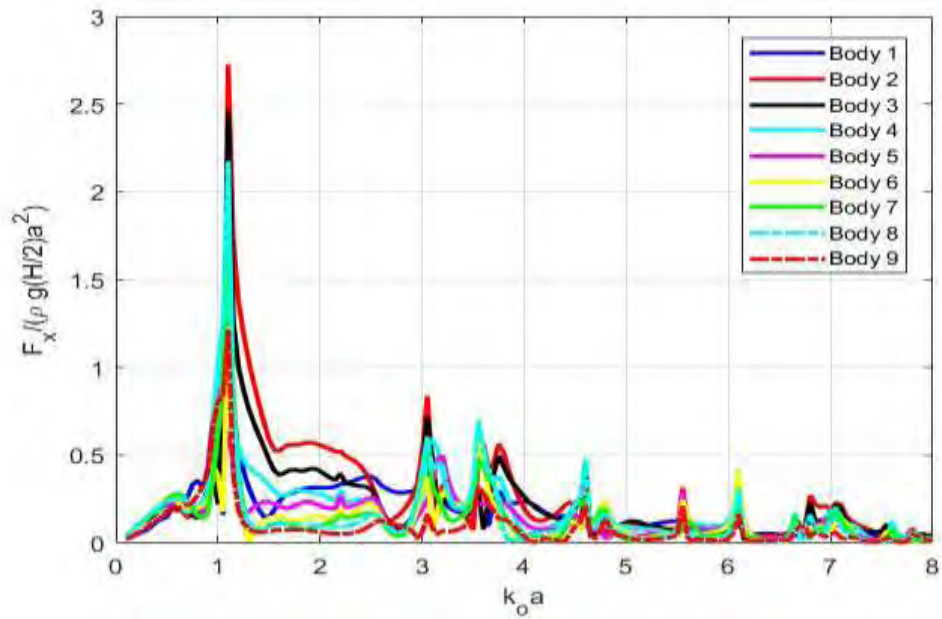
**Διάγραμμα 5.10:** Σύγκριση ανύψωσης στάθμης για διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $2a$ (αριστερά) με διάταξη 9 κυλίνδρων με μεταξύ τους απόσταση  $3a$ (δεξιά)

Από ότι φαίνεται παραπάνω στην περίπτωση 2α παρατηρείται μεγαλύτερη  $F_y$  και μεγαλύτερη ανύψωση σε σχέση με την 3α , επομένως βέλτιστη επιλογή για την απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων ώστε να εξαγάγουμε περισσότερη ενέργεια είναι η 2α

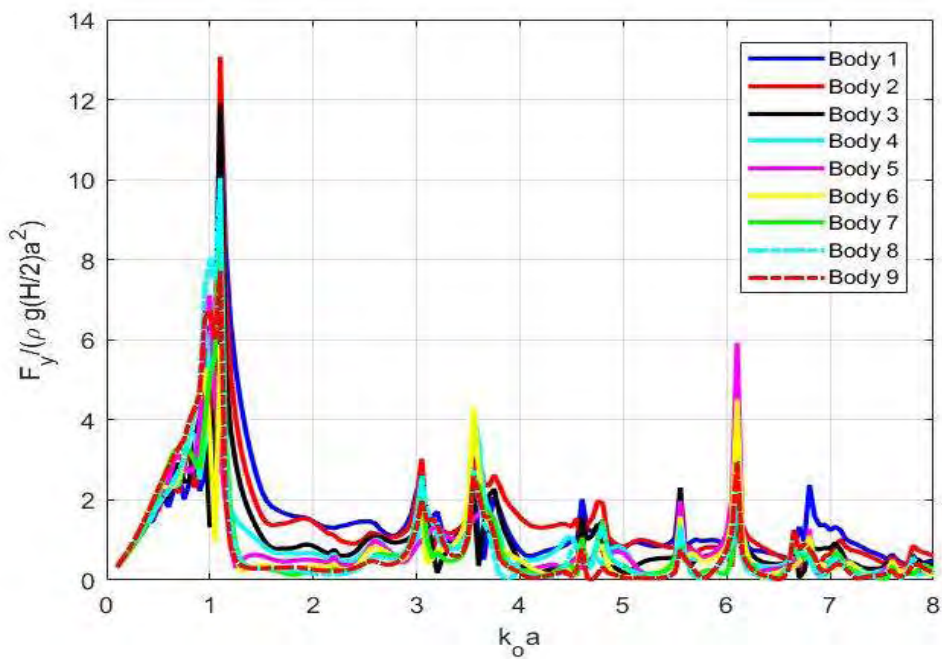
Μια ακόμη ενδιαφέρων περίπτωση θα ήταν να δούμε τι θα συμβεί με το φαινόμενο της παγίδευσης στην διάταξη που έχουμε επιλέξει αν στρέψουμε το πρώτο κύλινδρο κατά  $45^\circ$  όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα .



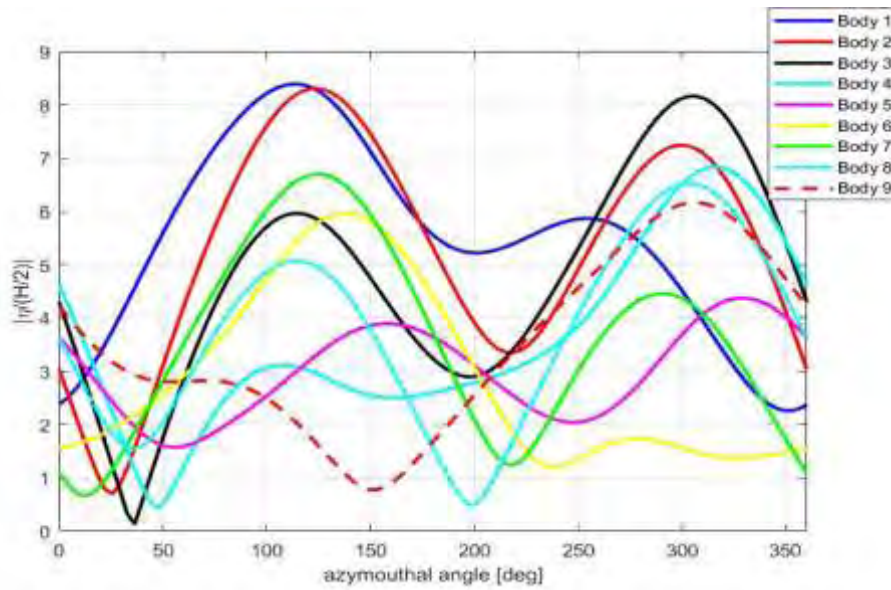
**Σχήμα 5.3:** διάταξη εννέα ελλειπτικών κυλίνδρων έχοντας στρέψει τον πρώτο κύλινδρο κατά  $45^\circ$



**Διάγραμμα 5.11:**  $F_x$  της διάταξης με τον πρώτο κύλινδρο στραμμένο κατά  $45^\circ$

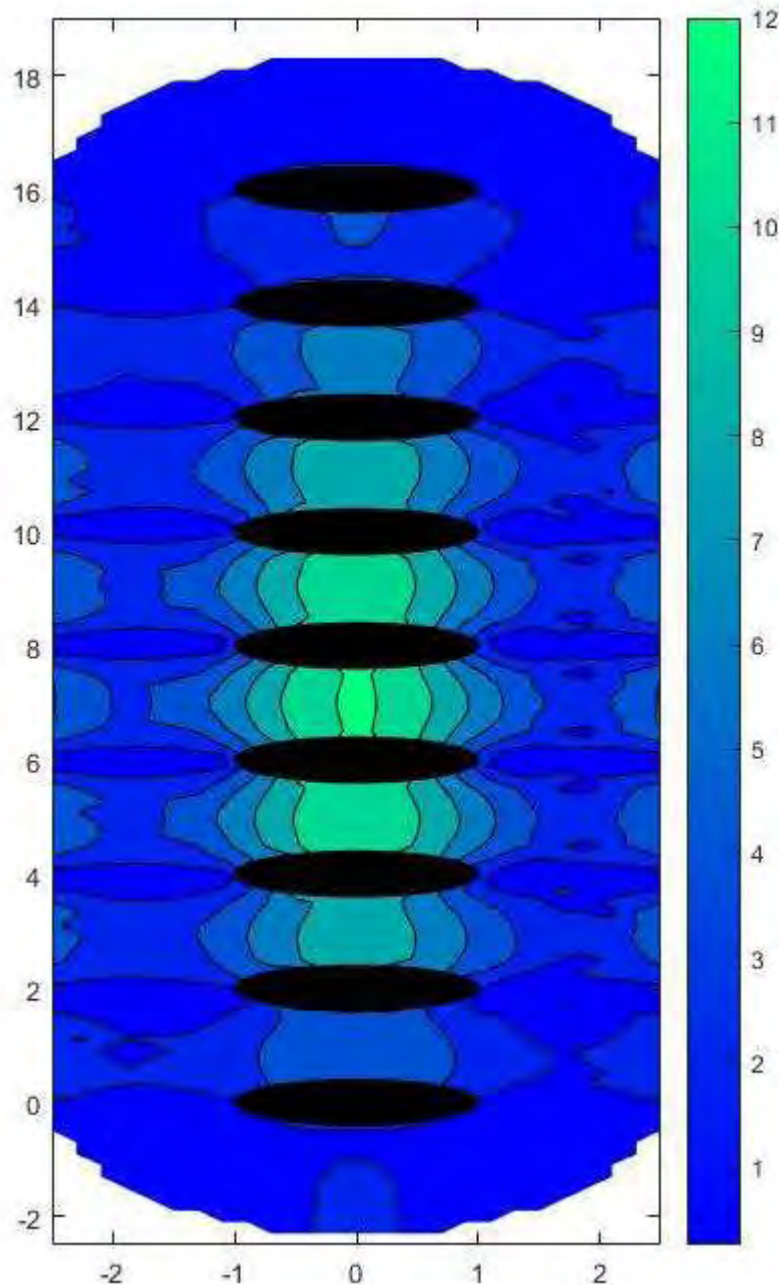


**Διάγραμμα 5.12:**  $F_y$  της διάταξης με τον πρώτο κύλινδρο στραμμένο κατά  $45^\circ$



**Διάγραμμα 5.13:** Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας της διάταξης με τον πρώτο κύλινδρο στραμμένο κατά  $45^\circ$

Πάρα την διερεύνηση και αυτών των περιπτώσεων η τελική μας πρόταση παραμένει η ίδια εφόσον το διάγραμμα των  $F_y$  είναι αρκετά μειωμένη για 9 σώματα. Η βέλτιστη σειρά ελλειπτικών κυλίνδρων για την αξιοποίηση ενέργειας είναι η διάταξη εννέα ελλειπτικών κυλίνδρων με απόσταση  $2a$  και με γωνιά πρόσπτωσης του κύματος  $90^\circ$  καθώς εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις και η μεγαλύτερη ανύψωση της στάθμης. Παρακάτω απεικονίζεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας με έναν διαφορετικό τρόπο από ότι πριν.



**Διάγραμμα 5.14** Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για απόσταση μεταξύ των κέντρων των ελλείψεων ίση με  $2a$ , αρχικά για γωνία πρόσπτωσης  $90^\circ$

Από το παραπάνω διάγραμμα καταλήγουμε σε ένα αρκετά ενδιαφέρον συμπέρασμα. Μετά το τέλος των κυλίνδρων η επιφάνεια της θάλασσάς έρχεται σε ηρεμία .Με βάση αυτό το συμπέρασμα θα μπορούσε να εξελίξουμε την ερευνά μας και να θέσουμε υλικό για άλλες έρευνες, για το πως θα μπορούσε να λειτουργήσει και σαν κυματοθραύστης η συστοιχία κυλίνδρων με μια πιο φιλική προς το περιβάλλον οπτική γωνιά ,καθώς επιτρέπει και την κίνηση της θάλασσας με αποτέλεσμα την ανανέωση των υδάτων .

### 5.3 ΣΥΓΓΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με δεδομένα την μικρή απόσταση από την ακτή, σχετικά μικρό βάθος και μικρή ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή συσκευής μετατροπής κυματικής ενέργειας . Εμείς προτείνουμε την τοποθέτηση point absorber καθώς χαρακτηρίζεται από μικρό το μέγεθος του και την εκμετάλλευση όλων των κινήσεων της επιφάνειας . Επίσης , η τοποθέτηση τους θα γίνει στα σημεία με την μεγαλύτερη ανύψωση , δηλαδή τρεις συσκευές αναμεσα από τους κυλίνδρους τρία – τέσσερα , τέσσερα - πέντε και πέντε - έξι αντίστοιχα.

Εν κατακλείδι, τα συμπεράσματα της μελέτης που κάναμε είναι τα εξής. Πρώτον, αποδείξαμε πως υπάρχει παγίδευση κυμάτων και σημαντική αύξηση της κυματικής ενέργειας με σχετικά μικρής σειρά κυλίνδρων . Δεύτερον , με την κατάλληλη τοποθέτηση συσκευών μετατροπής κυματικής ενέργειας είναι δυνατή η τροφοδότηση με ενέργεια παράκτιων περιοχών όπως λιμάνια ,και σε σημείο που να μπορούν να αυτοσυντηρηθούν. Τρίτον, είναι εφικτό να λειτουργήσει και ως κυματοθραύστης επιτρέποντας την ανανέωση των υδάτων δημιουργώντας μία πιο καθαρή και βιώσιμη παράκτια περιοχή. Τέλος , πιστεύουμε πως είναι μια αρκετά καλή πηγή ανανεώσιμης ενέργειας με σχετικά μικρό κατασκευής και φιλικής προς το περιβάλλον.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. N. Williams, M. K. Darwiche ,1990 Wave Radiation by Truncated Elliptical Cylinder

Chen HS, Mei CC, Scattering and radiation of gravity waves by an elliptical cylinde

Chen Hs, Mei CC, 1973 Wave forces on stationary platform of elliptical shape

K.A.Belibassakis , G.Arnaud , V.Rey ,J.Touboul ,1971 Propagation and scattering of waves by dense arrays of impenetrable cylinders in a waveguide ,2018

Kevin L.Williams, Phillip L.Marston ,1985, Axially focused scattering due to surface waves generated on spheres :Model and experimental confirmation using tungsten carbide spheres

I. K. Chatjigeorgiou, Spyros A. Mavrakos,2019, *An analytical approach for the solution of the hydrodynamic diffraction by arrays of elliptical cylinders*

I.K. Chatjigeorgiou,2012 *The hydrodynamics of arrays of truncated elliptical cylinders*

I.K. Chatjigeorgiou, V. Katsardi ,2018, Hydrodynamics and near trapping effects in arrays of multipleelliptical cylinders in waves

I.K. Chatjigeorgiou , Analytical Methods in Marine Hydrodynamics 2018, Cambridge University Press

V. Rey, G. Arnaud, J.Touboul, K. Belibassakis ,2018,Water wave scattering by dense or sparse arrays of surface-piercing bodies by integral matching method



V.Katsardi,Th.Grammenos,St.Katifeoglou,Sp.A.Mavrakos,I.K.Chatjigeorgiou,2016 Hydrodynamic Loading and Wave Run-up on “Elliptical” Breakwaters

Efi Charisi,2018, Προσομοίωση σειράς κυματοθραυστών με σειρά ελλειπτικών κυλίνδρων για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας τους στην προστασία ακτών

[https://blogs.sch.gr/lyk-aei/files/2014/04/KYMATIKI\\_ENERGEIA.pdf](https://blogs.sch.gr/lyk-aei/files/2014/04/KYMATIKI_ENERGEIA.pdf)