



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Παγίδευση κυματισμών για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου δυναμικού

Wave trapping for the exploitation of wave potential

Συγγραφέας:

Νικόλαος Π. Μανιουδάκης

A.M.: 16054

Επιβλέπων: Δρ. Μηχ. Θωμάς Π. Μαζαράκος, Επίκουρος Καθηγητής

Αιγάλεω, 2022



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών

Διπλωματική εργασία

Τίτλος: Παγίδευση κυματισμών για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου δυναμικού

Συγγραφέας

Νικόλαος Μανιουδάκης (Α.Μ.: 16054)

Επιβλέπων

Θωμάς Π. Μαζαράκος,
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

11/03/2022

Εξεταστική Επιτροπή

Θωμάς Π. Μαζαράκος, Αλέξανδρος Θεοδουλίδης, Ιωάννης Τίγκας,
Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α. Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α. Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νικόλαος Μανιουδάκης του Παρασκευά, με αριθμό μητρώου 16054 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 31/12/2023 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών



Νικόλαος Π. Μανιουδάκης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχ. Θωμά Π. Μαζαράκο καθώς η συμβολή και η καθοδήγησή του ήταν καθοριστική στην πραγματοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ήταν ο άνθρωπος που, κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, με ώθησε και με ενέπνευσε να βαδίσω στα δικά του χνάρια. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την κατανόηση και την ψυχολογική τους υποστήριξη τόσο κατά την εκπόνηση της εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παγίδευση των θαλάσσιων κυματισμών και η εκμετάλλευσή τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες διατάξεις κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων, αξιοποιώντας τον ανοιχτό κώδικα BEM NEMOH. Σε πρώτο στάδιο, δίνεται ο ορισμός και οι προϋποθέσεις εμφάνισης του φαινομένου· η βιβλιογραφική ανασκόπηση στην έρευνα που έχουν κάνει διάφοροι μελετητές πάνω σε αυτό. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, αναλύεται η θεωρία που χρησιμοποιήθηκε, στην οποία βασίζεται ο ανοιχτός κώδικας BEM NEMOH. Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικές παράμετροι που πρέπει να οριστούν στον ανοιχτό κώδικα BEM NEMOH. Το κύριο μέρος της εργασίας είναι το κεφάλαιο των αριθμητικών αποτελεσμάτων, καθώς μελετώνται διάφορες διατάξεις κυλινδρικών σωμάτων ως προς την διερεύνηση του φαινομένου. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά το πέρας των προσομοιώσεων και δίνονται προτάσεις ανάπτυξης της εργασίας αλλά και επέκτασης του ανοιχτού κώδικα BEM NEMOH.

Λέξεις κλειδιά: παγίδευση κυματισμών, συνθήκη Neumann, συνθήκη Dirichlet, κύλινδρος, δυνάμεις διέγερσης, μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης, συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας

Abstract

The object of this dissertation is the wave trapping phenomenon and its exploitation for the production of electricity in various cylindrical body arrangements, utilizing the open source BEM NEMOH. In the first stage, the definition and the conditions of occurrence of the phenomenon are given and the bibliographic review of the researches that have been done by various scholars on it. The first chapter analyzes the theoretical background used, on which the open source BEM NEMOH is based. Next, the basic parameters to be defined in the open source BEM NEMOH are analyzed. The main part of the work is the chapter on numerical results, as various arrangements of cylindrical bodies are studied in order to investigate the phenomenon. Finally, the conclusions that emerged after the end of the simulations will be presented and suggestions will be given for further development of the work and extension of the open source BEM NEMOH.

Key words: wave trapping, Neumann trapped mode, Dirichlet trapped mode, cylinder, excitation forces, mean second order drift forces, wave energy converters

Πίνακας Περιεχομένων

Συμβολισμοί.....	1
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	2
1 Θεωρητικό υπόβαθρο	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Δυναμικό της ταχύτητας	7
1.3 Οριακές Συνθήκες.....	9
1.4 Οριακές συνθήκες Neumann και Dirichlet	10
1.5 Μάζα του σώματος και υδροστατικοί όροι επαναφοράς.....	12
1.6 Πίεση.....	14
1.7 Δυνάμεις διέγερσης και ροπές	14
1.8 Συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης.....	15
1.9 Response Amplitude Operator (RAO).....	15
1.10 Μέσες δυνάμεις και ροπές έκπτωσης δεύτερης τάξης.....	16
2 Ο κώδικας BEM NEMOH.....	18
2.1 Διακριτοποίηση κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων.....	18
2.2 Παράμετροι προβλήματος	18
3 Αποτελέσματα	20
3.1 Κατακόρυφος κύλινδρος.....	20
3.1.1 Πακτωμένος κύλινδρος.....	20
3.1.2 Πλωτός κύλινδρος.....	23
3.2 Δύο κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι.....	26
3.2.1 Μελέτη της διάταξης ως ανεξάρτητα σώματα.....	27
3.2.2 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα.....	42
3.3 Τέσσερις κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι που σχηματίζουν τετράγωνο	53
3.3.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem	54
3.3.2 Ελεύθερη ταλάντωση κυλίνδρων – radiation problem	79
3.3.3 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα.....	101
3.4 Τέσσερις κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι σε τριγωνική διάταξη	127
3.4.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem	133
3.4.2 Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem	153
3.4.3 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα.....	175
3.5 Πέντε κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι.....	209
3.5.1 Οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα	218
3.5.2 Οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα	239

3.6	Πέντε κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι.....	252
3.6.1	Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem	258
3.6.2	Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem	279
3.6.3	Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα.....	301
3.7	Έξι κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι.....	339
3.7.1	Μελέτη της διάταξης σαν ανεξάρτητα σώματα.....	344
3.7.2	Μελέτη της διάταξης σαν ένα σώμα.....	370
3.8	Οκτώ κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι	383
3.8.1	Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem	389
3.8.2	Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem	415
3.8.3	Μελέτη της διάταξης σαν ένα σώμα.....	443
3.9	Εννιά κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι	470
3.9.1	Μελέτη σαν ανεξάρτητα σώματα	476
3.9.2	Μελέτη σαν ένα σώμα	499
4	Συμπεράσματα.....	510
5	Προτάσεις.....	513
	Βιβλιογραφία	517
	Έντυπη.....	517
	Διαδικτυακή	521
	Παραρτήματα.....	522

Συμβολισμοί

β	Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	$^{\circ}$
ζ	Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας	m
ν	Κυματαριθμός για βαθύ νερό ($\nu = \omega^2/g$)	m^{-1}
ρ	Πυκνότητα νερού	kg/m^3
$\Phi(r, \theta, z, t)$	Δυναμικό της ταχύτητας	m^2/s
$\varphi(r, \theta, z)$	Πλάτος δυναμικού της ταχύτητας	m^2/s
ω	Γωνιακή ταχύτητα	r/s
d	Βάθος νερού	m
D	Διάμετρος κυλίνδρου	m
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
h	Απόσταση μεταξύ πυθμένα κυλίνδρου και πυθμένα θάλασσας	m
H	Ύψος κύματος	m
k	Κυματαριθμός για ρηχό και ενδιάμεσο βάθος νερού	m^{-1}
m	Μάζα σώματος	kg
R	Ακτίνα κυλίνδρου	m
S_B	Εμβαδό επιφάνειας ισάλου	m^2
∇	Όγκος εκτοπίσματος	m^3
(x_G, y_G, z_G)	Συντεταγμένες κέντρου βάρους του σώματος	m
(x_B, y_B, z_B)	Συντεταγμένες του κέντρου άντωσης του σώματος	m

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αλληλεπίδραση των θαλάσσιων κυματισμών με τις πλωτές κατασκευές είναι ένας τομέας που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές. Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο είναι αυτό της παγίδευσης των κυματισμών, το οποίο οφείλεται στην περίθλαση και επαναδιάθλαση των κυματισμών σε διατάξεις πολλών σωμάτων. Η παγίδευση των κυματισμών λαμβάνει χώρα σε συχνότητες κύματος όπου παρατηρείται κορυφή στις εξισώσεις κίνησης του σώματος και έχει μια ιδιαίτερη συμπεριφορά. Κατά την εμφάνιση του φαινομένου, οι υδροδυναμικές φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή είναι πολύ μεγαλύτερες έναντι άλλων συχνοτήτων, οι οποίες συνοδεύονται επίσης και από αυξημένη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι ένα μεγάλο ποσοστό της κυματικής ενέργειας συγκεντρώνεται σε ένα σημείο της διάταξης, δημιουργώντας ένα κύμα αυξημένου πλάτους. Η παγίδευση των κυματισμών χρίζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές ζημιές σε πραγματικές πλωτές κατασκευές και ιδιαίτερα στο χαμηλότερο κατάστρωμα, όπως αναφέρουν οι Swan et al. (1997). Η αμέλεια της πρόβλεψης του φαινομένου, κατά τους Bai et al. (2014), μπορεί να οφείλεται σε λανθασμένο υπολογισμό της μέγιστης ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ή ακόμα και στην υποτίμηση του ίδιου του κυματισμού.

Ανάλογα με την κίνηση του ρευστού γύρω από ένα σώμα σε κανάλι, η παγίδευση των κυματισμών διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι: η συμμετρική, η αντισυμμετρική και η ασύμμετρη (Newman J. N., 2017). Όταν τα σώματα πλέουν ελεύθερα και μπορούν να ταλαντωθούν, τότε η παγίδευση χαρακτηρίζεται ως συμμετρική ως προς το κέντρο του καναλιού. Αντίστοιχα, χαρακτηρίζεται ως αντισυμμετρική όταν τα σώματα είναι πακτωμένα ή πλήρως βυθισμένα στο νερό. Τέλος, για ειδικού τύπου σώματα, τα οποία μπορεί να μην είναι συμμετρικά ως προς κάποιο άξονα, όπως είναι οι διατομές τύπου T που είναι ασύμμετρες ως προς τον άξονα y , τότε αυτή χαρακτηρίζεται ασύμμετρη. Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών μπορεί να εμφανιστεί μόνο όταν ένα σώμα βρίσκεται εντός ενός καναλιού είτε για μια διάταξη απείρων σωμάτων (Siddorn & Taylor, 2008). Οι παγιδευμένοι κυματισμοί ονομάζονται κυματισμοί Rayleigh-Bloch ή κυματισμοί edge, με τον πρώτο όρο να έχει επικρατήσει στα ηχητικά κύματα (Chatjigeorgiou I. K., 2018). Όταν έχουμε διάταξη απείρων σωμάτων τότε υπάρχουν ορισμένοι κυματαριθμοί, όπου το πρόβλημα προσομοιάζει αυτό του ενός κυλίνδρου σε ένα κανάλι, ο οποίος μπορεί να ικανοποιεί είτε την οριακή συνθήκη Neumann είτε την οριακή συνθήκη Dirichlet (Evans & Porter, 1999). Επομένως το είδος της παγίδευσης εξαρτάται από την οριακή συνθήκη που ικανοποιεί.

Η ύπαρξη της παγίδευσης των κυματισμών έγινε αντιληπτή για πρώτη φορά από τον Ursell (1951), ο οποίος πειραματίστηκε σε έναν πακτωμένο κύλινδρο μικρής ακτίνας σε ανοικτό κανάλι. Οι Callan, Linton και Evans (1991), αξιοποιώντας την θεωρία που ανέπτυξε ο Ursell, απέδειξαν την ύπαρξη του φαινομένου και στα ακουστικά κύματα για κυματοδηγούς δύο διαστάσεων. Οι Evans, Levitin και Vassiliev (1994) συνέβαλλαν σημαντικά στο θεωρητικό κομμάτι της παγίδευσης των κυματισμών και πιο συγκεκριμένα στην υποθετική ύπαρξη του για πληθώρα διατομών.

Οι Maniar και Newman (1997) μελέτησαν την παγίδευση των κυματισμών σε εννιά πακτωμένους κυλίνδρους σε σειρά οι οποίοι βρίσκονταν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό που παρατήρησαν είναι πως για κρίσιμους κυματαριθμούς, όσο αυξανόταν ο αριθμός των κυλίνδρων τόσο αυξανόταν και η συνολική δύναμη στο μέσο της διάταξης. Οι Evans και Porter (1997a) πειραματίστηκαν με την ύπαρξη της παγίδευσης για πολλούς κυλίνδρους, καθώς επίσης και σε ποιους κυλίνδρους θα εμφανιστεί. Αυτό που παρατήρησαν είναι πως σε μια διάταξη κυλίνδρων, ο αριθμός εμφάνισης του φαινομένου είναι ίδιος με τον αριθμό των κυλίνδρων.

Οι Evans και Porter (1997b), εμπνευσμένοι από την εργασία των Maniar και Newman (1997), ασχολήθηκαν με πακτωμένους κυλίνδρους σε κυκλική διάταξη και πιο συγκεκριμένα σε διατάξεις από τέσσερις έως έξι κυλίνδρους. Μεταβάλλοντας τις αποστάσεις μεταξύ των κυλίνδρων παρατήρησαν πως όταν οι κύλινδροι βρίσκονταν σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, οι κυματισμοί άρχιζαν να παγιδεύονται στη διάταξη. Οι Evans και Porter (1998) ανέπτυξαν τη θεωρία του φαινομένου και πιο συγκεκριμένα για τα δύο είδη των οριακών συνθηκών (Neumann και Dirichlet) σε έναν πακτωμένο κύλινδρο σε κανάλι. Απέδειξαν πως κάθε είδος εμφανιζόταν για συγκεκριμένες διαστάσεις κυλίνδρου σε μια ορισμένη κυκλική συχνότητα κυματισμού. Μέχρι πρότινος, οι έρευνες που είχαν γίνει εστίαζαν στην κατανόηση του φαινομένου για διάφορες διατάξεις κυλίνδρων, με μεγαλύτερη έμφαση στις φορτίσεις που δέχονται στους κρίσιμους κυματαριθμούς. Οι Walker και Taylor (2005) ανέπτυξαν περαιτέρω την ανάλυση του φαινομένου μελετώντας την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε μια συστοιχία δέκα κυλίνδρων. Πιο συγκεκριμένα μοντελοποίησαν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για τα δύο είδη των οριακών συνθηκών (Neumann και Dirichlet) της παγίδευσης των κυματισμών.

Οι Walker et al. (2008) γνωρίζοντας τις επιπτώσεις που έχει η αμέλεια της μελέτης της παγίδευσης σε μια πραγματική πλωτή κατασκευή, τις ερεύνησαν σε μια εξέδρα βαρύτητας. Σκοπός της ανάλυσής τους ήταν να βοηθήσουν τους σχεδιαστές να εκτιμήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την απόσταση μεταξύ του κατώτατου καταστρώματος μιας πλωτής κατασκευής με την επιφάνεια του νερού, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ζημιές στην κατασκευή. Οι Grice et al. (2013) έκαναν ένα ακόμα βήμα μελετώντας όχι μόνο κυλινδρικές διατομές, αλλά και άλλα είδη διατομών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των πλωτών κατασκευών (ορθογωνικές διατομές και κυκλικές ορθογωνικές διατομές). Και αυτοί, ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών όταν αλλάζουν οι αποστάσεις μεταξύ των κολώνων, αλλά μελέτησαν και την επιρροή που θα έχει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού όταν συναντήσει ένα μη κυλινδρικό πυλώνα. Οι Bai et al. (2014) μελέτησαν τη μη γραμμική ανάλυση του φαινομένου της παγίδευσης των κυματισμών σε μια διάταξη τεσσάρων κυλίνδρων στο πεδίο του χρόνου. Το ενδιαφέρον της μελέτης τους ήταν πως όταν ο κυματισμός όδευε προς την διάταξη υπό κάποια γωνία πρόσπτωσης, παρατήρησαν πως η κατανομή των δυνάμεων ήταν διαφορετική από κύλινδρο σε κύλινδρο.

Οι Chatjigeorgiou και Katsardi (2018) πραγματεύτηκαν τις υδροδυναμικές φορτίσεις και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε διατάξεις κυλίνδρων ελλειπτικής μορφής. Η μέθοδος που αξιοποίησαν για να λύσουν το πρόβλημα ήταν η μέθοδος της αντιστροφής του πίνακα, την οποία έχουν αναλύσει και οι Mazarakos και Mazarakos (2018), έτσι ώστε να λύσουν το πρόβλημα των υδροδυναμικών φορτίσεων

πρώτης τάξης. Οι Wang et al. (2018) παρατήρησαν πως πολλές έρευνες έγιναν κάνοντας χρήση της θεωρίας δυναμικού στο πεδίο των συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό επέλεξαν να μελετήσουν την παγίδευση των κυματισμών στο πεδίο του χρόνου σε μια διάταξη τεσσάρων κυλίνδρων. Μέχρι στιγμής οι εργασίες που αναφέρθηκαν εστίασαν σε πακτωμένους κυλίνδρους, όμως επειδή στη βιομηχανία των πλωτών κατασκευών πολλές εξέδρες είναι πλωτές, υπήρχε ανάγκη να επεκταθεί η έρευνα στην παγίδευση των κυματισμών και σε διατάξεις πλωτών κυλίνδρων. Οι Porter και Evans (1998) μελέτησαν την παγίδευση των κυματισμών για τυχαίες διατάξεις βυθισμένων οριζόντιων κυλίνδρων.

Οι Evans και Porter (2007) παρατήρησαν πως όταν ένας προσδεμένος πλωτός κύλινδρος μετατοπιστεί από τη θέση ισορροπίας του και αφεθεί ελεύθερος, τότε αυτός θα ταλαντωθεί στη συχνότητα που παρατηρείται η παγίδευση. Οι Wang και Wu (2007) μελέτησαν το πρόβλημα της περίθλασης στο πεδίο του χρόνου για μια διάταξη τεσσάρων και οχτώ κυλίνδρων, είτε αυτοί είναι πλωτοί είτε πακτωμένοι. Η μέθοδος που αξιοποίησαν για να λύσουν το πρόβλημα ήταν η μέθοδος της αντιστροφής του πίνακα, την οποία έχουν αναλύσει και οι Mazarakos και Mazarakos (2019), έτσι ώστε να λύσουν το πρόβλημα των υδροδυναμικών φορτίσεων δεύτερης τάξης. Οι Siddorn και Taylor (2008) μελέτησαν τις υδροδυναμικές φορτίσεις που δέχονται διατάξεις δύο και τεσσάρων κυλίνδρων, οι οποίοι μπορούν να ταλαντωθούν ελεύθερα. Όμως η εργασία τους, πέρα από την απλή αναφορά, δεν ανέλυσε το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Οι Wolgamot et al. (2015) μελέτησαν το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε κυκλικές διατάξεις τεσσάρων και οχτώ κυλίνδρων, οι οποίοι ταλαντώνονται ελεύθερα, και ποια είναι η σύνδεση της με την ακτινοβολία των κυματισμών.

Ο Chatjigeorgiou (2018) παρατηρώντας την εξέλιξη της θεωρίας σε πακτωμένους κυλίνδρους, ερεύνησε την ύπαρξη του φαινομένου για την περίπτωση που οι κύλινδροι είναι πλωτοί. Οι διατάξεις, στις οποίες πειραματίστηκε, αποτελούνταν από κυλίνδρους με πάχος στα τοιχώματα τους και συμπαγείς κυλίνδρους. Οι Chatjigeorgiou et al. (2018) μελέτησαν την ύπαρξη του φαινομένου της παγίδευσης των κυματισμών σε μια διάταξη εννέα κυλίνδρων στη σειρά και τον τρόπο με τον οποίον μπορεί το φαινόμενο να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό που παρατήρησαν είναι πως όπως και στην περίπτωση των πακτωμένων κυλίνδρων η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων καθορίζει πόσο μεγάλες θα είναι οι φορτίσεις. Οι Ning et al. (2020) δεν εξέλιξαν περαιτέρω τη θεωρία της παγίδευσης των κυματισμών, αλλά προτίμησαν να αξιοποιήσουν το φαινόμενο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μελετώντας εννέα στην σειρά ελεύθερους κυλίνδρους παρατήρησαν πως η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών και οι αποστάσεις μεταξύ των κυλίνδρων παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, καθώς επίσης διαπίστωσαν ότι υπήρχε ανάγκη εύρεσης της βέλτιστης διάταξης για πραγματικές θάλασσες.

Οι He et al. (2020), ασχολήθηκαν με την αποφυγή της εμφάνισης του φαινομένου και την εύρεση της βέλτιστης διάταξης για τη μείωση των μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης. Παρατήρησαν, πως η συμμετρία της κατασκευής αλλοιώνεται εάν περιστρέψουν τη διάταξη σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Επιπρόσθετα, συμπέραναν πως η βέλτιστη διάταξη των κυλίνδρων, η

οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποίησαν, δεν μειώνει τις μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης μόνο στους κρίσιμους κυματαριθμούς, αλλά μπορεί να τις μειώσει σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος διάφορων κυματαριθμών. Συνοψίζοντας, έχουν γίνει πολλές έρευνες πάνω στην κατανόηση του φαινομένου, με πολλές από αυτές να επικεντρώνονται στην εκμετάλλευση του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Εισαγωγή

Η θεωρία που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η γραμμική θεωρία, γνωστή και ως Linear (Airy) Wave Theory. Μια από τις βασικές παραδοχές της θεωρίας αυτής είναι ότι το πλάτος του κύματος είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με το βάθος του νερού (Journee & Massie, 2001). Επιπρόσθετα, μια άλλη παραδοχή που γίνεται αφορά τον πυθμένα, ο οποίος θεωρείται ότι είναι επίπεδος και αδιαπέρατος. Η τελευταία παραδοχή που γίνεται αφορά το ρευστό, το οποίο θεωρείται ότι είναι ιδανικό. Ιδανικό, χαρακτηρίζεται ένα ρευστό το οποίο είναι αστρόβιλο, ασυμπίεστο και μη συνεκτικό (Evans & Porter, 1999).

Ως αποτέλεσμα της αστρόβιλης ροής είναι η ύπαρξη μιας βαθμωτής συνάρτησης του χώρου και του χρόνου με την οποία μπορούμε να περιγράψουμε το πεδίο της ταχύτητας (Maniar & Newman, 1997). Η συνάρτηση αυτή συμβολίζεται με Φ και εκφράζεται από τη σχέση:

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

Το $\varphi(x, y, z)$ ονομάζεται δυναμικό της ταχύτητας. Η πολύ σημαντική ιδιότητα του δυναμικού φ είναι ότι η παράγωγος του ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση δίνει την ταχύτητα στη διεύθυνση αυτή. Στην περίπτωση που τα σώματα είναι κυλινδρικά, τότε το δυναμικό φ εκφράζεται συναρτήσει των πολικών συντεταγμένων (Chatjigeorgiou, Chatziioannou, & Mazarakos, 2018). Δηλαδή:

$$\Phi(r, \theta, z, t) = Re[\varphi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}] \quad (2)$$

Επομένως το διάνυσμα της ταχύτητας μπορεί να γραφεί ως:

$$\vec{V} = \nabla\varphi \quad (3)$$

Η αντίστοιχα μπορεί να γραφεί ως:

$$\vec{V} = \frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial\theta} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (4)$$

Επειδή το ρευστό είναι ασυμπίεστο η εξίσωση της συνέχειας γράφεται ως:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial\theta} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

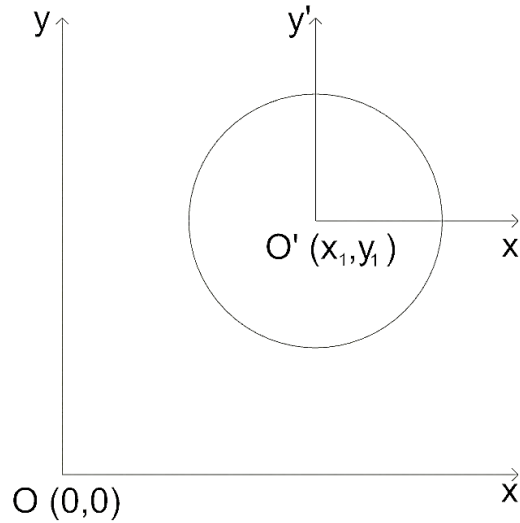
Η οποία μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση του φ :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \xLeftrightarrow{\vec{V}=\nabla\varphi} \nabla \cdot \nabla\varphi = 0 \Leftrightarrow \nabla^2\varphi = 0 \quad (6)$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση Laplace, και μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

1.2 Δυναμικό της ταχύτητας



Εικόνα 1: Συντεταγμένες κυλίνδρου ως προς την αρχή των αξόνων στο επίπεδο xy

Το συνολικό δυναμικό της ταχύτητας φ προκύπτει από το άθροισμα του δυναμικού του κυματισμού με το δυναμικό περίθλασης και το δυναμικό ακτινοβολίας (Kling, 2021). Συνεπώς, μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_D + \varphi_R \quad (8)$$

Το δυναμικό του κυματισμού, φ_I , αφορά τις δυνάμεις που ασκούν οι κυματισμοί θεωρώντας ότι δεν υπάρχει το σώμα. Το δυναμικό της περίθλασης, φ_D , αφορά τις δυνάμεις που δέχεται ένα σώμα όταν αυτό είναι ακίνητο. Τέλος, το δυναμικό ακτινοβολίας αφορά τις δυνάμεις που δέχεται ένα σώμα όταν αυτό κινείται (Mazarakos T. P., 2020).

Το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού σε πολικές συντεταγμένες για ενδιάμεσο βάθος νερού εκφράζεται από την παρακάτω σχέση (Journée & Massie, 2001):

$$\varphi_I = -i \frac{g H}{\omega^2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} e^{-ik(x_1 \cos \beta + y_1 \sin \beta)} \quad (9)$$

Ενώ για βαθύ νερό, εκφράζεται από τη σχέση (Lewis, 1989):

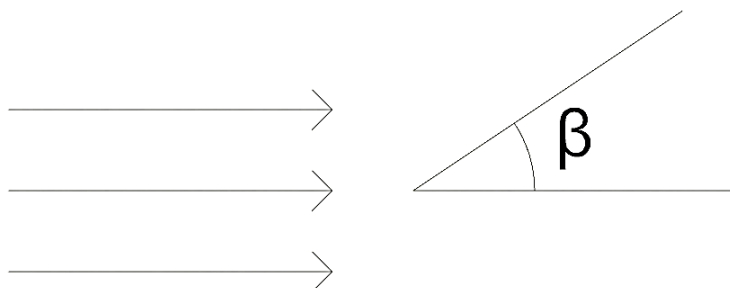
$$\varphi_I = -i \frac{g H}{\omega^2} e^{kz} e^{-ik(x_1 \cos \beta + y_1 \sin \beta)} \quad (10)$$

Όπου $H/2$ είναι το πλάτος του κύματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, d το βάθος του νερού, k ο κυματαριθμός που υπολογίζεται από την εξίσωση διασποράς, β η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, ω η συχνότητα του κύματος και (x_1, y_1) οι συντεταγμένες του σώματος ως προς την αρχή των αξόνων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Η εξίσωση της διασποράς για ενδιάμεσο βάθος δίνεται από την σχέση (Chatjigeorgiou, Chatziioannou, & Mazarakos, 2018):

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad (11)$$

Εισάγοντας τον κυματαριθμό για βαθύ νερό, $\nu = \frac{\omega^2}{g}$, τότε η εξίσωση (11) γράφεται ως:

$$\nu = k \tanh(kd) \quad (12)$$



Εικόνα 2: Φορά γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού

Το δυναμικό της ακτινοβολίας, στη γενική του μορφή, υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους δυναμικών της ταχύτητας του σώματος σε κάθε βαθμό ελευθερίας ανά μονάδα πλάτους του κύματος (Xiros & Dhanak, 2016). Δηλαδή:

$$\varphi_R = \sum_{j=1}^6 \bar{X}_j(\omega) \varphi_i \quad (13)$$

Όπου $j = 1, 2, \dots, 6$ για κάθε βαθμό ελευθερίας. Ο όρος $\bar{X}_j(\omega)$ είναι το πλάτος της κίνησης του σώματος ως προς κάποιο βαθμό ελευθερίας και φ_i είναι τα δυναμικά της ταχύτητας λόγω της ταλάντωσης του σώματος ανά μονάδα πλάτους του κύματος.

Επειδή ο υπολογισμός του δυναμικού της περίθλασης είναι περίπλοκος, θα κάνουμε χρήση των συναρτήσεων Kochin και θα εκφράσουμε το δυναμικό της ακτινοβολίας και περίθλασης συναρτήσει αυτών (Kim, 1993). Επομένως, τα δυναμικά υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{cases} \varphi_D = \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})} H_D(\theta) \\ \varphi_R = \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})} H_R(\theta) \end{cases} \quad (14)$$

Όπου οι συναρτήσεις Kochin $H_D(\theta)$ και $H_R(\theta)$ υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} H_D(\theta) = \iint_{S_B} \left(\frac{\partial \varphi_D}{\partial n} - \varphi_D \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{ik(x_1 \cos \beta + y_1 \sin \beta)} dS \\ H_R(\theta) = \iint_{S_B} \left(\frac{\partial \varphi_R}{\partial n} - \varphi_R \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{ik(x_1 \cos \beta + y_1 \sin \beta)} dS \end{cases} \quad (15)$$

1.3 Οριακές Συνθήκες

Θεωρούμε πως ο πυθμένας είναι οριζόντιος και αδιαπέρατος. Αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι ίση με μηδέν, οπότε (Clauss, Lehmann, & Østergaard, 1992):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{για } z = -d \quad (16)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί την οριακή συνθήκη στον πυθμένα.

Το ρευστό θα πρέπει να ικανοποιεί δύο οριακές συνθήκες στην επιφάνεια της θάλασσας. Επειδή η πίεση στην επιφάνεια του νερού πρέπει να είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, τότε για μικρά πλάτη κύματος προκύπτει η γραμμικοποιημένη δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Xiros & Dhanak, 2016):

$$\zeta(x, y, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (17)$$

Όπου ζ είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Η συνθήκη αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli στην ελεύθερη επιφάνεια. Επιλύοντας τη (17) μπορούμε να υπολογίσουμε την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε όλο το πεδίο του δυναμικού. Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δίνεται από τη σχέση (Journee & Massie, 2001):

$$\zeta(x, y, t) = \frac{H}{2} e^{-ik(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)} e^{-i\omega t} \quad (18)$$

Όπου (x_0, y_0) είναι οι συντεταγμένες ενός σημείου της ελεύθερης επιφάνειας που θέλουμε να υπολογίσουμε την ανύψωση του.

Η κατακόρυφη ταχύτητα ενός μορίου του ρευστού στην ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να είναι ίση με την κατακόρυφη ταχύτητα της ελεύθερης επιφάνειας. Έτσι προκύπτει η κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Karadeniz, 2013):

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (19)$$

Όταν το βάθος του νερού είναι άπειρο, τότε η κατακόρυφη ταχύτητα πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (Newman J., 2017). Δηλαδή:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \nu \varphi = 0 \quad \text{για } z = 0 \quad (20)$$

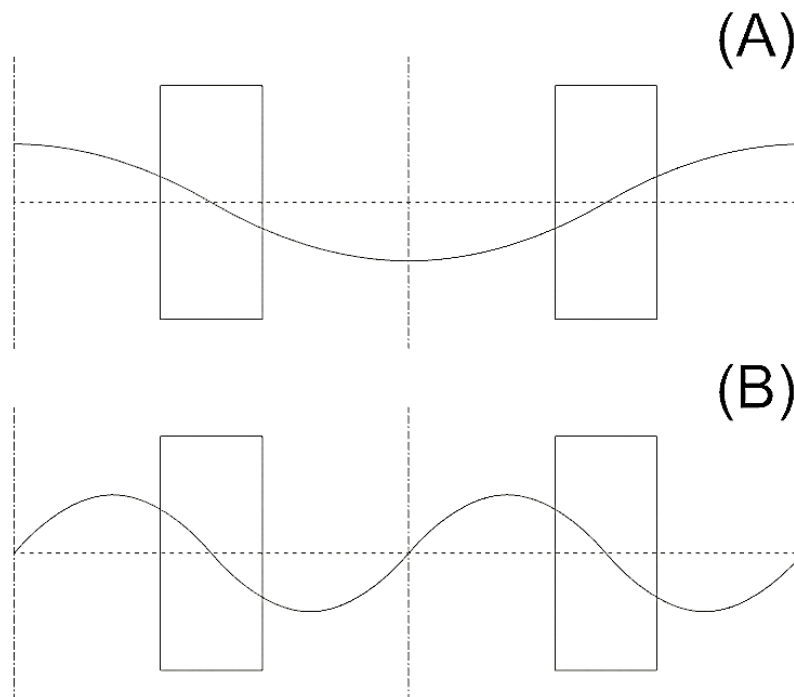
Όπου $\nu = \frac{\omega^2}{g}$ είναι ο κυματαριθμός για βαθύ νερό και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτή η οριακή συνθήκη ονομάζεται κινηματική και δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας.

Το δυναμικό της ταχύτητας θα πρέπει να ικανοποιεί την οριακή συνθήκη πάνω στο σώμα (Chatjigeorgiou, Chatziioannou, & Mazarakos, 2018):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{για } r = R \quad (21)$$

Δηλαδή, η ταχύτητα του ρευστού στα τοιχώματα του κυλίνδρου θα πρέπει να είναι ίση με το μηδέν.

1.4 Οριακές συνθήκες Neumann και Dirichlet



Εικόνα 3: (A) Οριακή συνθήκη Neumann και (B) οριακή συνθήκη Dirichlet. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τα «υποθετικά» τοιχώματα του καναλιού (Maniar & Newman, 1997)

Η παράγωγος της ταχύτητας στη βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου θα πρέπει να είναι ίση με το μηδέν. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται οριακή συνθήκη Neumann (Chatjigeorgiou, Chatziioannou, & Mazarakos, 2018):

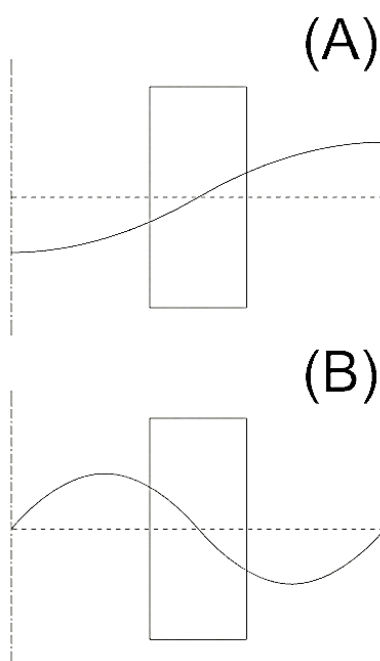
$$\frac{d\varphi}{dr} = 0 \quad \text{για } \begin{cases} r = R \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (22)$$

Αν ο κύλινδρος βρίσκεται εντός ενός καναλιού, τότε η οριακή συνθήκη Neumann ισχύει και για τα τοιχώματα του καναλιού. Αν ο κύλινδρος δεν βρίσκεται σε κανάλι τότε η παράγωγος του δυναμικού της ταχύτητας είναι μια συνεχής συνάρτηση (Maniar & Newman, 1997).

Εάν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος σε ένα κανάλι, τότε η ταχύτητα του ρευστού θα πρέπει να είναι ίση με το μηδέν. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται οριακή συνθήκη Dirichlet (Maniar & Newman, 1997):

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{για } z = 0 \quad (23)$$

Στην Εικόνα 3 διακρίνουμε ένα παράδειγμα ενός μέρους μιας διάταξης N κυλίνδρων όπου στην περίπτωση (A) ικανοποιείται η οριακή συνθήκη Neumann και στη (B) η οριακή συνθήκη Dirichlet. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές, οι οποίες βρίσκονται ενδιάμεσα των κυλίνδρων προσομοιάζουν τα «τοιχώματα» του καναλιού που σχηματίζεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Το «κανάλι» που σχηματίζεται εντός της διάταξης

Η οριακή συνθήκη Neumann ικανοποιείται διότι η παράγωγος του δυναμικού της ταχύτητας είναι μια συνεχής συνάρτηση, καθώς η λύση της συνθήκης συμπίπτει με το κέντρο του κυλίνδρων. Η οριακή συνθήκη Dirichlet ικανοποιείται καθώς μεταξύ των κυλίνδρων, που είναι και οι θέσεις των «τοιχωμάτων», το δυναμικό της ταχύτητας μηδενίζεται.

1.5 Μάζα του σώματος και υδροστατικοί όροι επαναφοράς

Με τον όρο μάζα του σώματος εννοούμε τον πίνακα 6×6 που περιέχει την μάζα του σώματος και τις ροπές όγκου του (Newman J., 2017). Δηλαδή είναι ο πίνακας:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Όπου:

- x_G, y_G, z_G : οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους (m)
- m : η μάζα του σώματος (kg)
- I_{ij} : οι ροπές όγκου ως προς το κέντρο του σώματος (kgm^2)

Οι ροπές όγκου υπολογίζονται σύμφωνα με τα ακόλουθα ολοκληρώματα:

$$I_{11} = \int_m (y^2 + z^2) dm \quad (25)$$

$$I_{22} = \int_m (x^2 + z^2) dm \quad (26)$$

$$I_{33} = \int_m (x^2 + y^2) dm \quad (27)$$

$$I_{12} = I_{21} = - \int_m xy dm \quad (28)$$

$$I_{13} = I_{31} = - \int_m xz dm \quad (29)$$

$$I_{23} = I_{32} = - \int_m yz dm \quad (30)$$

Οι υδροστατικοί όροι επαναφοράς είναι ένας πίνακας διαστάσεων 6×6 , ο οποίος γράφεται ως (Xiros & Dhanak, 2016):

$$K_H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Οι όροι του πίνακα υπολογίζονται με τα ακόλουθα ολοκληρώματα:

$$K_{33} = \rho g S_B \left(\frac{N}{m} \right) \quad (32)$$

$$K_{34} = K_{43} = -\rho g \iint_{S_B} y dA \left(\frac{N}{rad} \right) \quad (33)$$

$$K_{35} = K_{53} = -\rho g \iint_{S_B} x dA \left(\frac{N}{rad} \right) \quad (34)$$

$$K_{44} = \rho g \iint_{S_B} y^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \left(\frac{Nm}{rad} \right) \quad (35)$$

$$K_{45} = K_{54} = -\rho g \iint_{S_B} xy dA \left(\frac{Nm}{rad} \right) \quad (36)$$

$$K_{46} = \rho g \nabla (x_G - x_B) \left(\frac{Nm}{rad} \right) \quad (37)$$

$$K_{55} = \rho g \iint_{S_B} x^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \left(\frac{Nm}{rad} \right) \quad (38)$$

$$K_{56} = \rho g \nabla (y_G - y_B) \left(\frac{Nm}{rad} \right) \quad (39)$$

Όπου:

- x_B, y_B, z_B : οι συντεταγμένες του κέντρου άνωσης (m)
- S_B : το εμβαδό της επιφάνειας ισάλου (m^2)
- ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
- ∇ : ο όγκος εκτοπίσματος (m^3)

1.6 Πίεση

Το συνολικό πεδίο της πίεσης περιγράφεται από την εξίσωση Bernoulli (Journée & Massie, 2001):

$$P = -\rho \left(gz + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \quad (40)$$

Η συνολική πίεση μπορεί να γραφεί και ως (Newman J., 2017):

$$P = -\rho Re \left[\left(\frac{H}{2} (\varphi_I + \varphi_D) + \varphi_R \right) i\omega e^{i\omega t} \right] - \rho gz \quad (41)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, $H/2$ το πλάτος του κύματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, ω η κυκλική συχνότητα, φ_I το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού, φ_D το δυναμικό περίθλασης και φ_R το δυναμικό ακτινοβολίας. Το πεδίο της πίεσης του προσπίπτοντος κυματισμού υπολογίζεται από τη σχέση (Xiros & Dhanak, 2016):

$$P_I = -\rho \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} = Re \left(\rho g \frac{H \cosh(k(z+d))}{2 \cosh(kd)} e^{-ik(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)} \right) \quad (42)$$

Αντίστοιχα, η πίεση λόγω του δυναμικού της περίθλασης, η οποία είναι και η πίεση που ασκείται στο σώμα, υπολογίζεται από τη σχέση (Delhommeau G., 2021):

$$P_D = -\rho \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \quad (43)$$

Τέλος, η πίεση λόγω του δυναμικού της ακτινοβολίας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (Delhommeau G., 2021):

$$P_R = -\rho \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \quad (44)$$

1.7 Δυνάμεις διέγερσης και ροπές

Οι δυνάμεις διέγερσης ισούνται με το άθροισμα των δυνάμεων του προσπίπτοντος κυματισμού, F_{e_i} , και των κυματισμών λόγω περίθλασης, F_{e_D} (Lewis, 1989). Δηλαδή:

$$F_{e_i} = F_{e_{I_i}} + F_{e_{D_i}} \quad (45)$$

Όπου $i = 1, 2, \dots, 6$ και υποδηλώνει την κίνηση του σώματος ως προς κάποιον βαθμό ελευθερίας. Εισάγοντας το δυναμικό της ταχύτητας του προσπίπτοντος κυματισμού φ_I και περίθλασης φ_D , η παραπάνω σχέση γράφεται ως (Delhommeau G., 2021):

$$F_{e_i} = -i\rho\omega \frac{H}{2} \iint_{S_B} (\varphi_I + \varphi_D) \frac{\partial \varphi_{R_i}}{\partial n} dS \quad (46)$$

Όπου $i = 1, 2, \dots, 6$ και υποδηλώνει την κίνηση του σώματος ως προς κάποιον βαθμό ελευθερίας.

Παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις διέγερσης εξαρτώνται από το δυναμικό περίθλασης, φ_D . Ο Haskind βρήκε ένα τρόπο να τις υπολογίσει παραλείποντας το δυναμικό περίθλασης, φ_D και αντικαθιστώντας το με το δυναμικό της ακτινοβολίας, φ_R (Haskind, 1957). Επομένως οι δυνάμεις διέγερσης υπολογίζονται από τη σχέση του Haskind:

$$F_{e_i} = -i\rho\omega \frac{H}{2} \iint_{S_B} \left(\varphi_I \frac{\partial \varphi_{R_i}}{\partial n} - \varphi_{R_i} \frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \right) dS \quad (47)$$

Όπου για $i = 1, 2, 3$ υπολογίζονται τις δυνάμεις διέγερσης και για $i = 4, 5, 6$ υπολογίζονται οι αντίστοιχες ροπές.

1.8 Συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης

Ο συντελεστής της πρόσθετης μάζας είναι ένας πίνακας 6x6, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με το ακόλουθο ολοκλήρωμα (Delhommeau G., 2021):

$$A_{ij} = -\rho Re \iint_{S_B} \varphi_{R_i} \frac{\partial \varphi_{R_j}}{\partial n} dS \quad (48)$$

Αντίστοιχα ο συντελεστής απόσβεσης υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα (Journée & Massie, 2001):

$$B_{ij} = -\rho\omega Im \iint_{S_B} \varphi_{R_i} \frac{\partial \varphi_{R_j}}{\partial n} dS \quad (49)$$

Οι δείκτες $i, j = 1, 2, \dots, 6$ εκφράζουν την κίνηση του σώματος ως προς κάποιο βαθμό ελευθερίας, λόγω κάποιας ασκούμενης δύναμης σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα εκφράζουν την κίνηση που κάνει το σώμα ως προς την διεύθυνση j , όταν αυτό κινείται προς την διεύθυνση i .

1.9 Response Amplitude Operator (RAO)

Από την διαφορική εξίσωση της κίνησης του σώματος έχουμε ότι (Delhommeau G., 2021):

$$[M + A]\ddot{X}(\omega) + [B]\dot{X}(\omega) + [K_H]X(\omega) = F(\omega) \quad (50)$$

Όπως έχει αναφερθεί στις σημειώσεις του μαθήματος «Δυναμική και Ταλαντώσεις Ναυπηγικών Κατασκευών» (Mazarakos T. P., 2020), όταν υπάρχει απόσβεση στο σύστημα, τότε εκφράζουμε τις κινήσεις του σώματος και τις δυνάμεις διέγερσης σε μιγαδική μορφή. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή το σύστημα γίνεται πολύ πιο απλό και ευκολότερο στο να επιλυθεί. Επομένως για τις κινήσεις του σώματος έχουμε ότι:

$$X(\omega) = \bar{X}(\omega)e^{-i\omega t} \quad (51)$$

Και για τις δυνάμεις διέγερσης:

$$F(\omega) = F_e(\omega)e^{-i\omega t} \quad (52)$$

Επομένως, η (50), λόγω των (51) και (52), γράφεται ως:

$$\begin{aligned} -\omega^2[M + A]\bar{X}(\omega)e^{-i\omega t} - i\omega[B]\bar{X}(\omega)e^{-i\omega t} + [K_H]\bar{X}(\omega)e^{-i\omega t} &= F_e(\omega)e^{-i\omega t} \\ -\omega^2[M + A]\bar{X}(\omega) - i\omega[B]\bar{X}(\omega) + [K_H]\bar{X}(\omega) &= F_e(\omega) \\ \bar{X}(\omega)[- \omega^2[M + A] - i\omega[B] + [K_H]] &= F_e(\omega) \\ \bar{X}(\omega) &= \frac{F_e(\omega)}{-\omega^2[M + A] - i\omega[B] + [K_H]} \end{aligned} \quad (53)$$

Όπου $[M + A]$ είναι ο πίνακας της μάζας και της πρόσθετης μάζας για κάθε συχνότητα ω , $[B]$ είναι ο πίνακας των συντελεστών υδροδυναμικής απόσβεσης για κάθε συχνότητα και $[K_H]$ είναι ο πίνακας των υδροστατικών όρων επαναφοράς του σώματος.

Διαιρώντας το πλάτος της κίνησης του σώματος με το πλάτος του κυματισμού, τότε προκύπτει μια σχέση η οποία μας δίνει τους συντελεστές απόκρισης του σώματος για κάθε βαθμό ελευθερίας και συχνότητα:

$$RAO_j = \frac{\bar{X}_j(\omega)}{\frac{H}{2}} \cong \frac{F_{e_j}(\omega)}{K_{H_{ij}} - \omega^2 (M_{ij} + A_{ij}(\omega)) - i\omega B_{ij}(\omega)} \quad (54)$$

Όπου $i, j = 1, 2, \dots, 6$ για κάθε βαθμό ελευθερίας, $K_{H_{ij}}$ είναι ο υδροστατικός όρος επαναφοράς, M_{ij} η μάζα του σώματος, A_{ij} η πρόσθετη μάζα, B_{ij} ο συντελεστής απόσβεσης και F_{e_j} η δύναμη διέγερσης.

1.10 Μέσες δυνάμεις και ροπές έκπτωσης δεύτερης τάξης

Οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης και η ροπή υπολογίζονται με τη μέθοδο της μεταβολής της ορμής (Newman J. N., 1967). Δηλαδή:

$$F_{dx} = \iint_{S_B} P \cos(n, x) dS \quad (55)$$

$$F_{dy} = \iint_{S_B} P \cos(n, y) dS \quad (56)$$

$$M_{dz} = \iint_{S_B} P (r \times n)_z dS \quad (57)$$

Αναπτύσσοντας τις εξισώσεις (55) και (56), οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης γράφονται ως (Newman J. N., 1967):

$$\begin{bmatrix} F_{dx} \\ F_{dy} \end{bmatrix} = -\rho\omega \frac{H}{2} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \text{Im}(H(\pi + \beta)) + \frac{\rho\nu^2}{8\pi} \int_0^{2\pi} |H(\theta)|^2 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta \quad (58)$$

Οι μέσες δυνάμεις δεύτερης τάξης μπορούν να γραφούν και ως (Delhommeau G., 2021):

$$\begin{bmatrix} F_{dx} \\ F_{dy} \end{bmatrix} = -2\pi\rho\omega \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \text{Im}(H(\beta)) - 2\pi\rho \frac{k(\nu d)^2}{d[(kd)^2 - (\nu d)^2 + \nu d]} \int_0^{2\pi} |H(\theta)|^2 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta \quad (59)$$

Όπου $H(\theta)$ είναι η συνάρτηση Kochin του συνολικού δυναμικού (Newman J. N., 1967):

$$H(\theta) = \iint_{S_B} \left(\frac{\partial(\varphi_D + \varphi_R)}{\partial n} - (\varphi_D + \varphi_R) \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{Kz + (Kx \cos(\theta) + Ky \sin(\theta))i} dS \quad (60)$$

Η συνάρτηση Kochin μπορεί να γραφεί και ως συνάρτηση των συναρτήσεων Kochin του δυναμικού περίθλασης, φ_D , και του δυναμικού ακτινοβολίας, φ_R . Δηλαδή:

$$H(\theta) = H_D(\theta)e^{i\frac{\pi}{2}} + i\omega \sum_{j=1}^6 \bar{X}_j(\omega) H_{R_j}(\theta) e^{-i\frac{\pi}{2}} \quad (61)$$

Η εξίσωση (59) είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης στο κεφάλαιο 3.

Αναπτύσσοντας τη σχέση (57) η ροπή των δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης ως προς τον κατακόρυφο άξονα υπολογίζεται ως (Newman J. N., 1967):

$$M_{dz} = -\frac{\rho\omega}{2\nu} \text{Re}(H'(\pi + \beta)) - \frac{\rho\nu}{8\pi} \text{Im} \left(\int_0^{2\pi} \bar{H}(\theta) H'(\theta) d\theta \right) \quad (62)$$

Όπου ο όρος $\bar{H}(\theta)$ είναι ο συζυγής μιγαδικός αριθμός της συνάρτησης Kochin και αντίστοιχα ο όρος $H'(\theta)$ είναι η παράγωγος της συνάρτησης (Newman J. N., 1967).

2 Ο κώδικας BEM NEMOH

2.1 Διακριτοποίηση κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων

Η θέση του κυλίνδρου μέσα στο νερό είναι καθοριστική για τη διακριτοποίησή του, διότι το NEMOH (Babarit & Delhommeau, 2015) απαιτεί το πλέγμα μέχρι τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος προκειμένου να γίνει η προσομοίωση. Ως βρεχόμενη επιφάνεια χαρακτηρίζεται η επιφάνεια του σώματος που έρχεται σε απευθείας σύνδεση με το νερό. Επομένως, αν ο κύλινδρος είναι πακτωμένος, τότε η βρεχόμενη επιφάνεια είναι τα τοιχώματα του και όχι ο πυθμένας του. Αντίστοιχα, αν βρίσκεται ημιβυθισμένος στην επιφάνεια της θάλασσας, τότε η βρεχόμενη επιφάνεια είναι το βυθισμένο τμήμα του. Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιήσουμε για τη δημιουργία του πλέγματος είναι το Rhinoceros, το οποίο μας δίνει και την δυνατότητα να ορίσουμε τον επιθυμητό αριθμό στοιχείων (Rhinoceros, 2021).

Ο αριθμός των στοιχείων εξαρτάται από δύο αλληλένδετα κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο είναι ο χρόνος, δηλαδή, μεγάλος αριθμός στοιχείων οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του χρόνου των υπολογισμών. Το δεύτερο κριτήριο είναι οι διαστάσεις του κυλίνδρου, οι οποίες επηρεάζουν τον ελάχιστο αριθμό στοιχείων (panels) που απαιτούνται για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα.

Αφού ορίσουμε το πλέγμα και το μετατρέψουμε στην μορφή «.dat» (αρχείο εισόδου για το NEMOH), μέσω του προγράμματος BEM Rosetta, πρέπει να ορίσουμε το αρχείο «Nemoh.cal» ώστε να εκτελέσουμε την προσομοίωση (BEMRosetta, 2021).

2.2 Παράμετροι προβλήματος

Στη θεωρία που αναπτύξαμε στην παράγραφο 1.10, οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης υπολογίζονται κάνοντας χρήση των συναρτήσεων Kochin, τις οποίες εκφράζουμε συναρτήσεως του δυναμικού ακτινοβολίας και του δυναμικού περίθλασης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (59). Στην περίπτωση που ο κύλινδρος είναι πακτωμένος ή είναι πλωτός αλλά δεν τον αφήνουμε να ταλαντωθεί τότε δεν χρειάζεται να γίνει υπολογισμός του δυναμικού της ακτινοβολίας. Εάν όμως ο πλωτός κύλινδρος μπορεί να ταλαντωθεί, τότε θα πρέπει να υπολογίσουμε και τις κινήσεις του, σύμφωνα με την εξίσωση (54).

Το NEMOH έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τον πίνακα της μάζας και των υδροστατικών συντελεστών επαναφοράς, αλλά αν δεν έχουμε κάνει ικανοποιητική διακριτοποίηση του μοντέλου, τότε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν πιθανότατα να έχουν αποκλίσεις συγκρινόμενα με τα πραγματικά. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός τους γίνεται αναλυτικά. Αφού υπολογίσουμε τις δυνάμεις διέγερσης σύμφωνα με την εξίσωση (47), τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τις κινήσεις του σώματος και κατά συνέπεια τις δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης. Ο υπολογισμός των δυνάμεων διέγερσης γίνεται από το πρόγραμμα. Κάνοντας παραμετρική ανάλυση των δυνάμεων

για διάφορους αριθμούς στοιχείων, επιλέγουμε τον αριθμό εκείνο για τον οποίον όσο τα αυξάνουμε, τα αποτελέσματα συγκλίνουν.

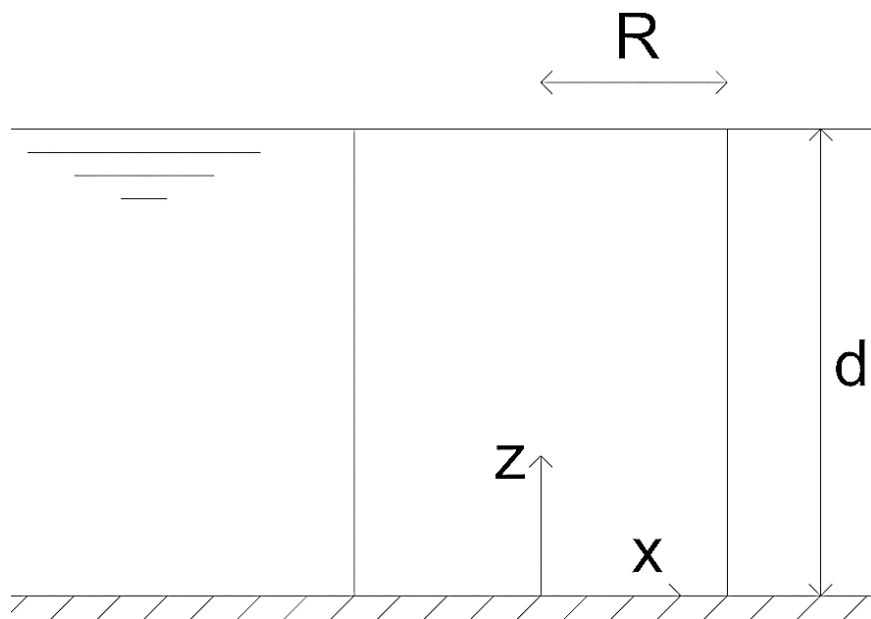
Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος δεν εξαρτάται μόνο από τον τρόπο με τον οποίο θα κάνουμε διακριτοποίηση το σώμα μας, αλλά εξαρτάται και από το αν επιθυμούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της πίεσης στο σώμα και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Εφόσον έχουμε ορίσει το πρόβλημα που θέλουμε να μελετήσουμε και ποια αποτελέσματα θέλουμε να λάβουμε, τότε μπορούμε να ξεκινήσουμε την προσομοίωση. Οι προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας έγιναν σε ένα φορητό υπολογιστή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: *Intel i5 – 7200U 2.5GHz with Turbo Boost up to 3.1GHz*
- Κάρτα γραφικών: *NVIDIA GeForce 940MX with 2GB Dedicated VRAM*
- Μνήμη RAM: *8GB DDR4*

3 Αποτελέσματα

3.1 Κατακόρυφος κύλινδρος

3.1.1 Πακτωμένος κύλινδρος



Εικόνα 5: Σκαρίφημα πακτωμένου κυλίνδρου

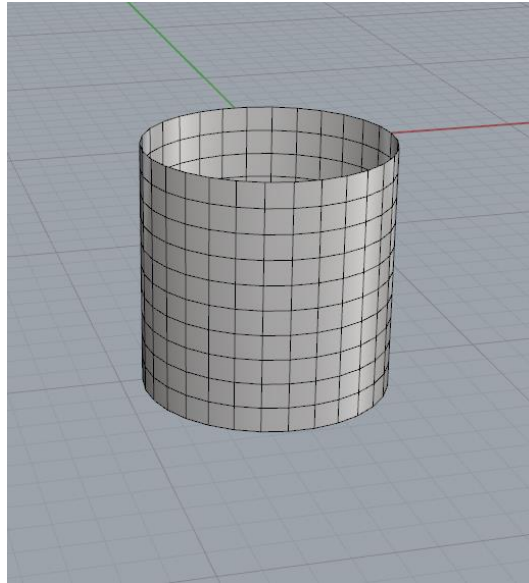
Έστω ένας κατακόρυφος κύλινδρος ακτίνας R , ο οποίος βρίσκεται πακτωμένος σε βάθος νερού d , όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Οι διαστάσεις του κυλίνδρου εκφράζονται σύμφωνα με το λόγο:

$$\frac{d}{R} = 2$$

Θα κάνουμε διακριτοποίηση για την βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου. Θεωρούμε ότι ο κύλινδρος έχει τις εξής διαστάσεις:

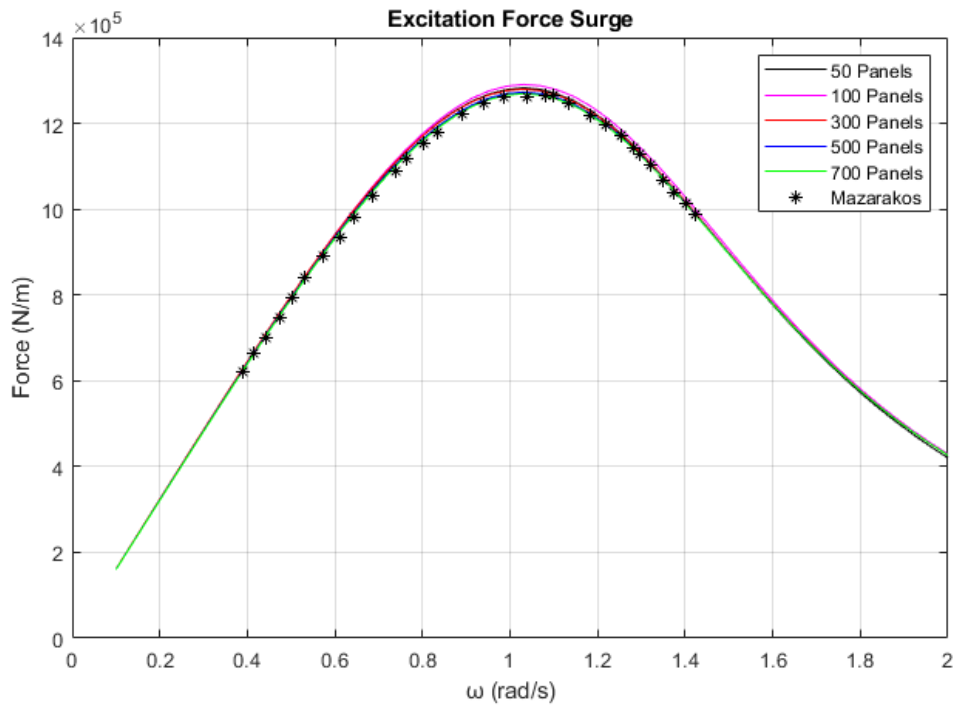
- $R = 5m$
- $d = 10m$

Στην Εικόνα 6 φαίνεται ένα παράδειγμα της διακριτοποίησης του κυλίνδρου.

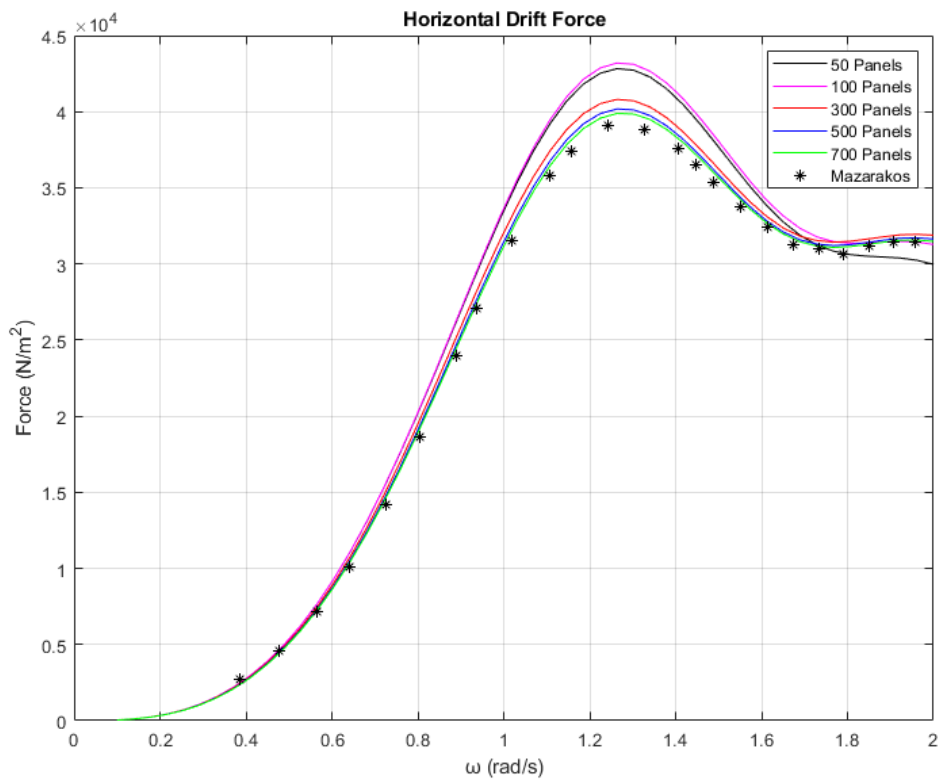


Εικόνα 6: Διακριτοποίηση κατακόρυφου πακτωμένου κυλίνδρου με 300 στοιχεία και 330 σημεία

Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξάνουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τον κατακόρυφο πακτωμένο κύλινδρο για 50, 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά του Mazarakos (2010), που κάνει χρήση αναλυτικών λύσεων για κατακόρυφα αξονοσυμμετρικά σώματα, άρα τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει έλεγχος της ακρίβειας των λύσεων του κώδικα BEM. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης και στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης. Άξιο αναφοράς είναι πως στον Mazarakos (2010), δίνονται οι αναλυτικές εκφράσεις τόσο των πρωτοτάξιων όσο και των μέσω δευτεροτάξιων δυνάμεων έκπτωσης. Οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης υπολογίζονται τόσο με τη μέθοδο της απ' ευθείας ολοκλήρωσης πάνω στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος όσο και με τη μέθοδο της μεταβολής της ορμής. Το πρόγραμμα NEMOH μετά από τη διόρθωση που έγινε από τον επιβλέποντα καθηγητή στην υπορουτίνα του Arpa1, υπολογίζει τις δυνάμεις έκπτωσης μόνο με την μέθοδο της μεταβολής της ορμής, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 1.10.



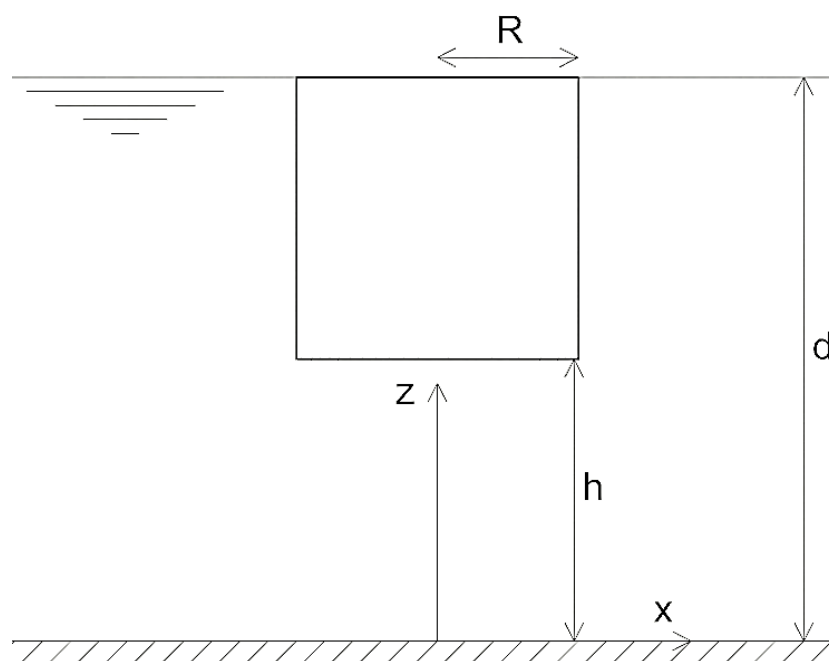
Εικόνα 7: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης



Εικόνα 8: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης

Από την Εικόνα 7 και Εικόνα 8 παρατηρούμε πως όσο αυξάνουμε τον αριθμό των στοιχείων τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα NEMOH συγκλίνουν αρκετά με αυτά του Mazarakos (2010). Πιο συγκεκριμένα όταν ο αριθμός των στοιχείων γίνει μεγαλύτερος των 500, τότε παρατηρείται η μικρότερη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων που δίνει το πρόγραμμα για τα 500 στοιχεία και τα 700 αντίστοιχα.

3.1.2 Πλωτός κύλινδρος

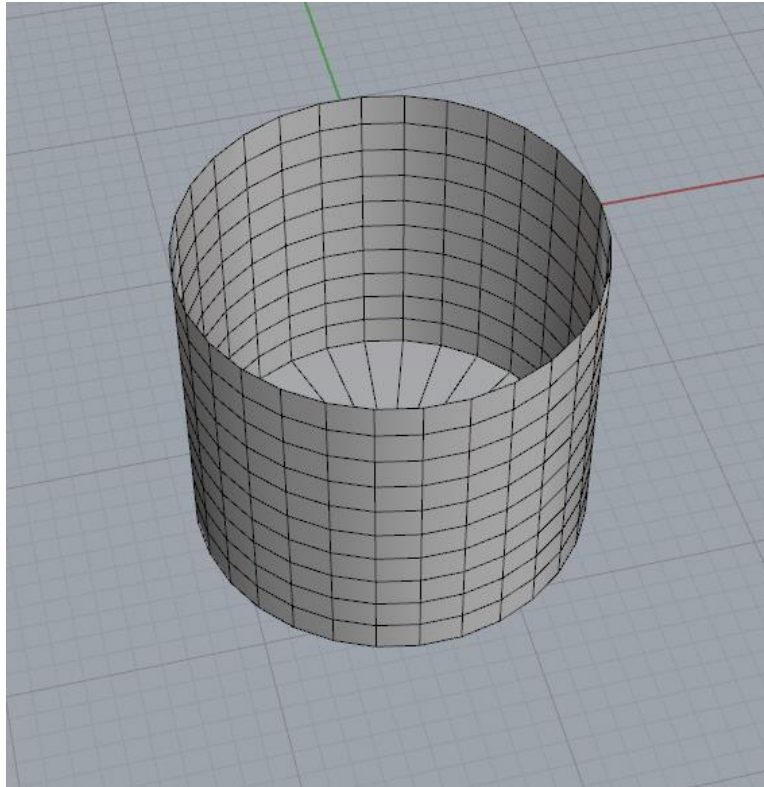


Εικόνα 9: Σκαρίφημα πλωτού κυλίνδρου

Έστω ένας πλωτός κατακόρυφος κύλινδρος ακτίνας R σε βάθος περιοχής εγκατάστασης d , οποίος βρίσκεται σε απόσταση h από τον πυθμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. Οι διαστάσεις του κυλίνδρου εκφράζονται σύμφωνα με τους λόγους:

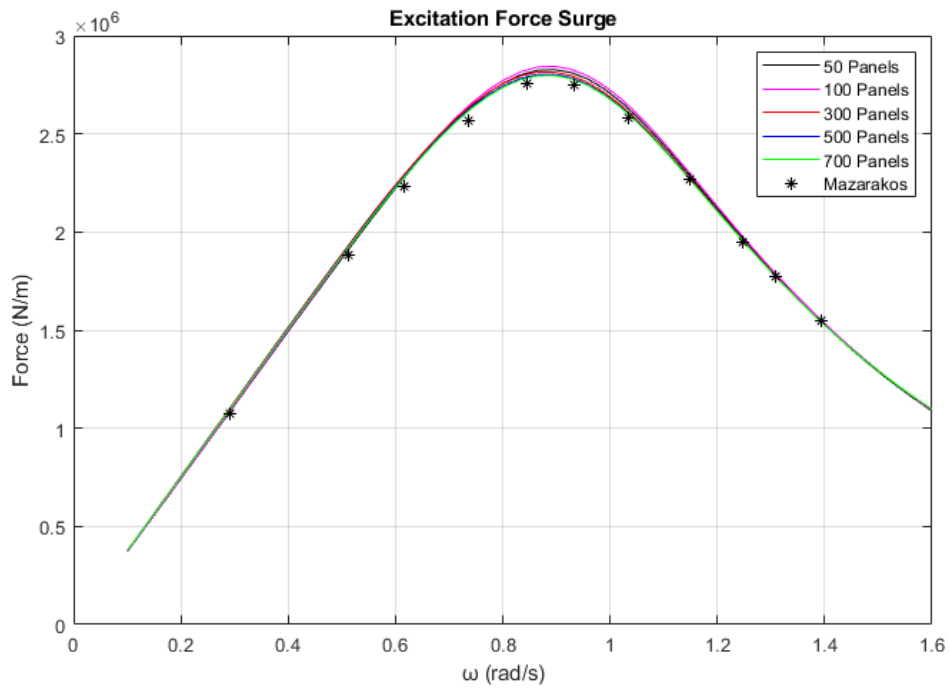
$$\frac{d}{R} = 2 \text{ και } \frac{h}{d} = 0.5$$

Θα κάνουμε διακριτοποίηση για τη βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου, όπου για τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα τοιχώματα και ο πυθμένας του. Θεωρούμε ότι ο κύλινδρος έχει ακτίνα $R = 10m$ και βρίσκεται σε βάθος $d = 20m$. Ο πυθμένας του κυλίνδρου απέχει από τον πυθμένα της θάλασσας $h = 10m$. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρούμε πως ο κύλινδρος είναι ακίνητος, δηλαδή, το δυναμικό της ακτινοβολίας είναι μηδέν. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της διακριτοποίησης του κυλίνδρου.

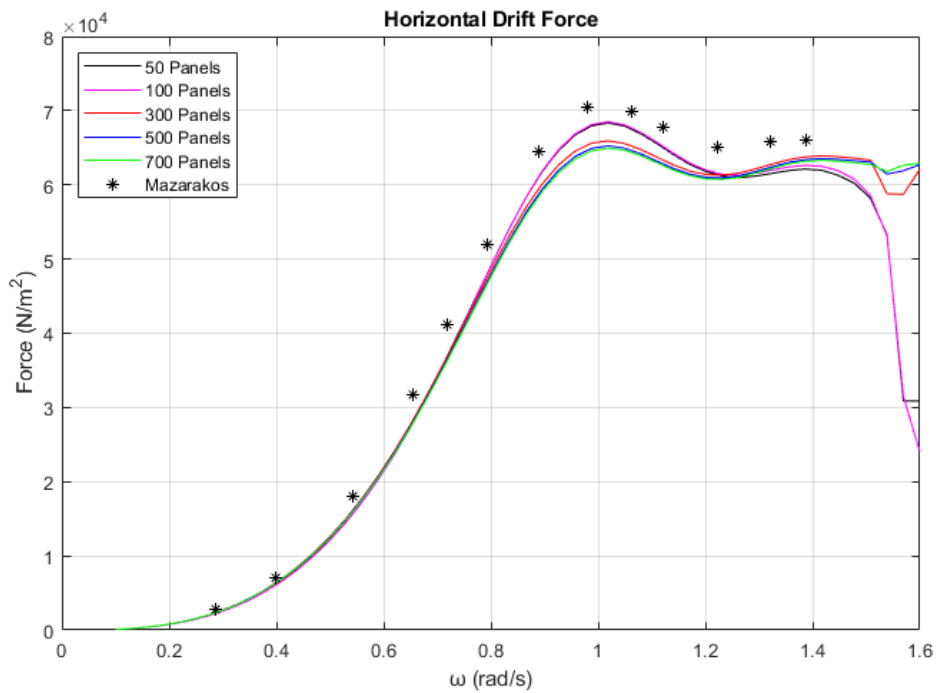


Εικόνα 10: Διακριτοποίηση κατακόρυφου πλωτού κυλίνδρου με 330 στοιχεία και 331 σημεία

Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τον κατακόρυφο πλωτό κύλινδρο για 50, 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Mazarakos και Mantrakos (2013), που κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης και στην Εικόνα 12 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης.

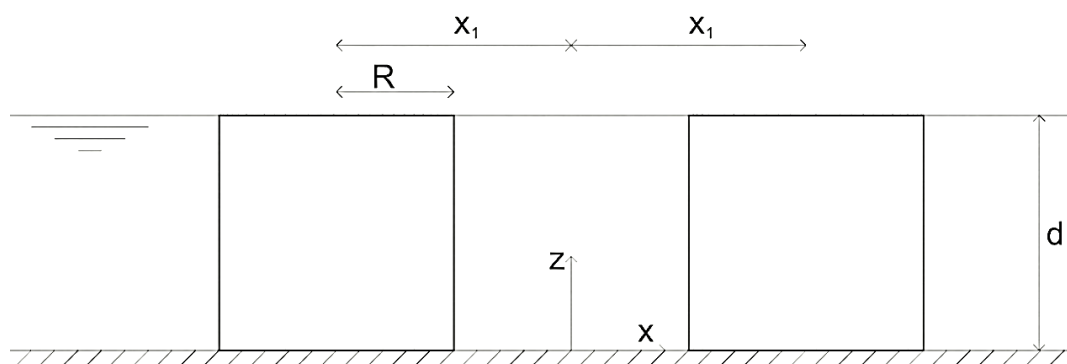


Εικόνα 11: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης κατακόρυφου πλωτού κυλίνδρου



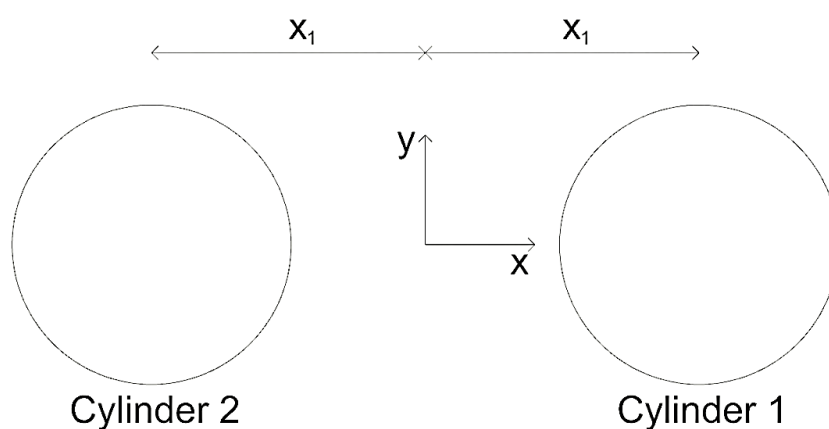
Εικόνα 12: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης κατακόρυφου πλωτού κυλίνδρου

3.2 Δύο κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι



Εικόνα 13: Πλάγια όψη των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων

Θεωρούμε δύο κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους ακτίνας R σε βάθος d , όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, οι οποίοι ισαπέχουν κατά x_1 ως προς το σύστημα συντεταγμένων (x,y) , όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.

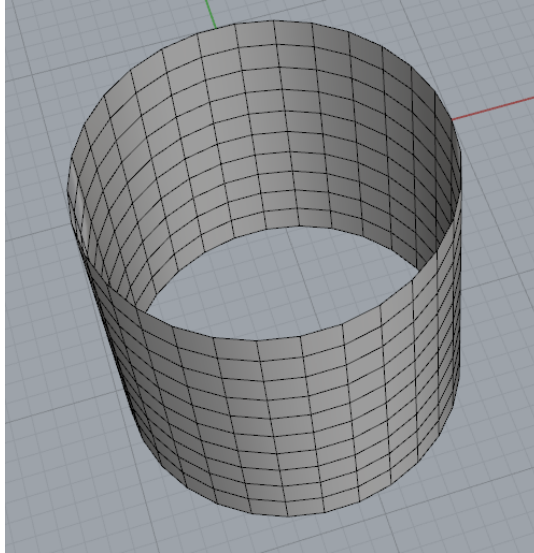


Εικόνα 14: Κάτοψη διάταξης των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων

Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 10m$ και βρίσκονται σε βάθος περιοχής εγκατάστασης $d = 20m$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 $(25,0)$
- Κύλινδρος 2 $(-25,0)$

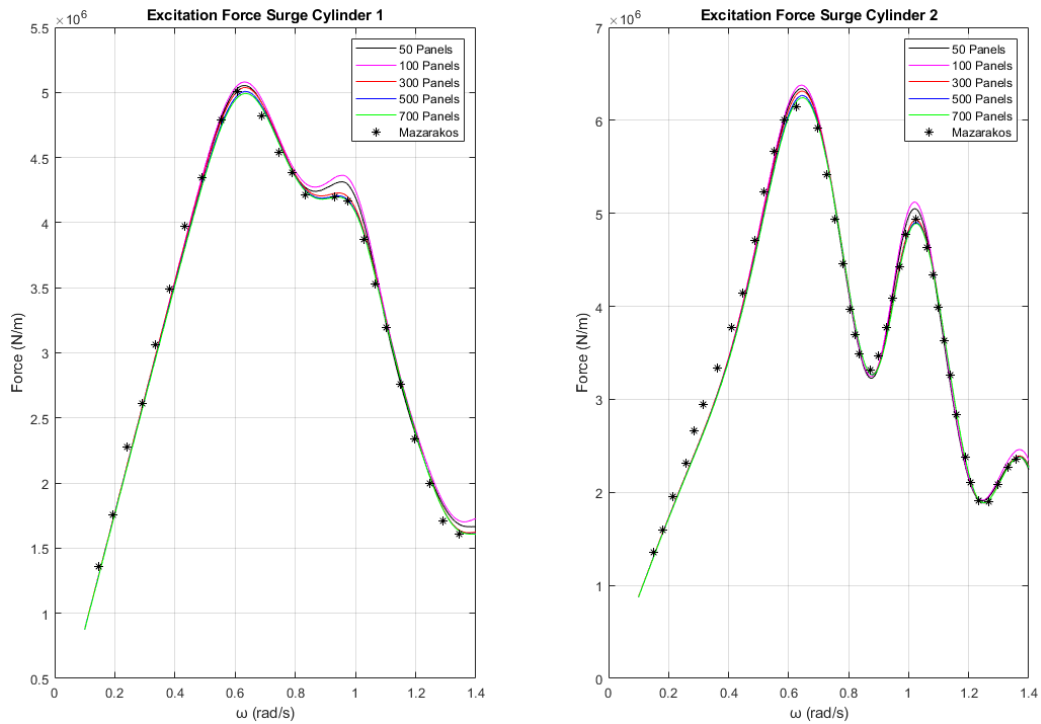
Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα από τη διακριτοποίηση ενός κυλίνδρου ίδιων διαστάσεων με τους κυλίνδρους του προβλήματος.



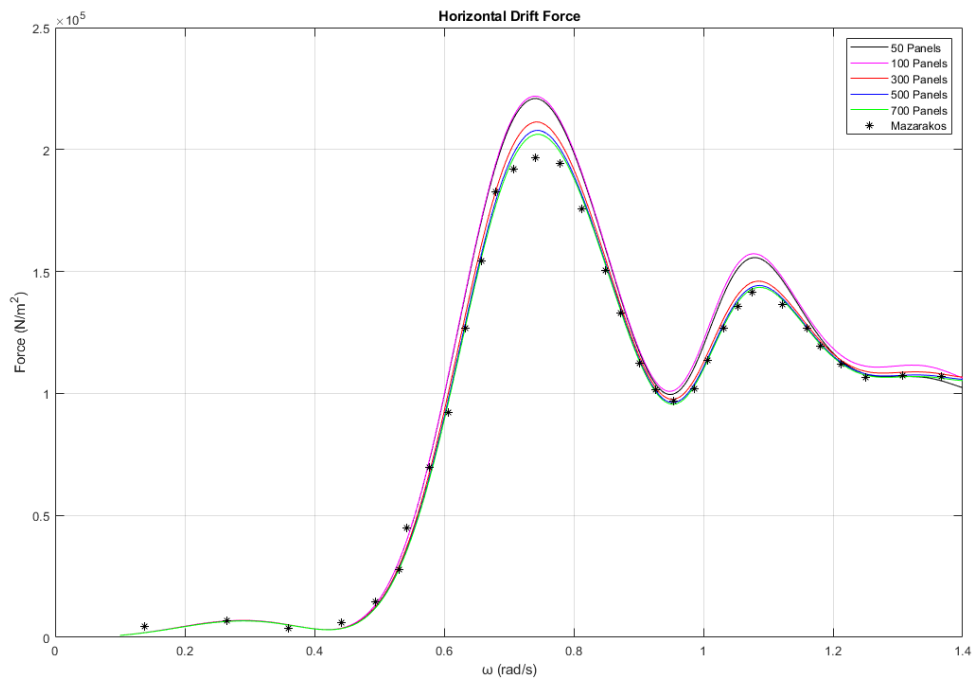
Εικόνα 15: Διακριτοποίηση ενός εκ των κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων, με 330 στοιχεία και 331 σημεία

3.2.1 Μελέτη της διάταξης ως ανεξάρτητα σώματα

Θα μελετήσουμε τους κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους για 50, 100, 300, 500 και 700 στοιχεία για κάθε κύλινδρο σε γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά του Mazarakos (2010), που κάνει χρήση αναλυτικών λύσεων για κατακόρυφα αξονοσυμμετρικά σώματα. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης και στην Εικόνα 17 παρουσιάζονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης.



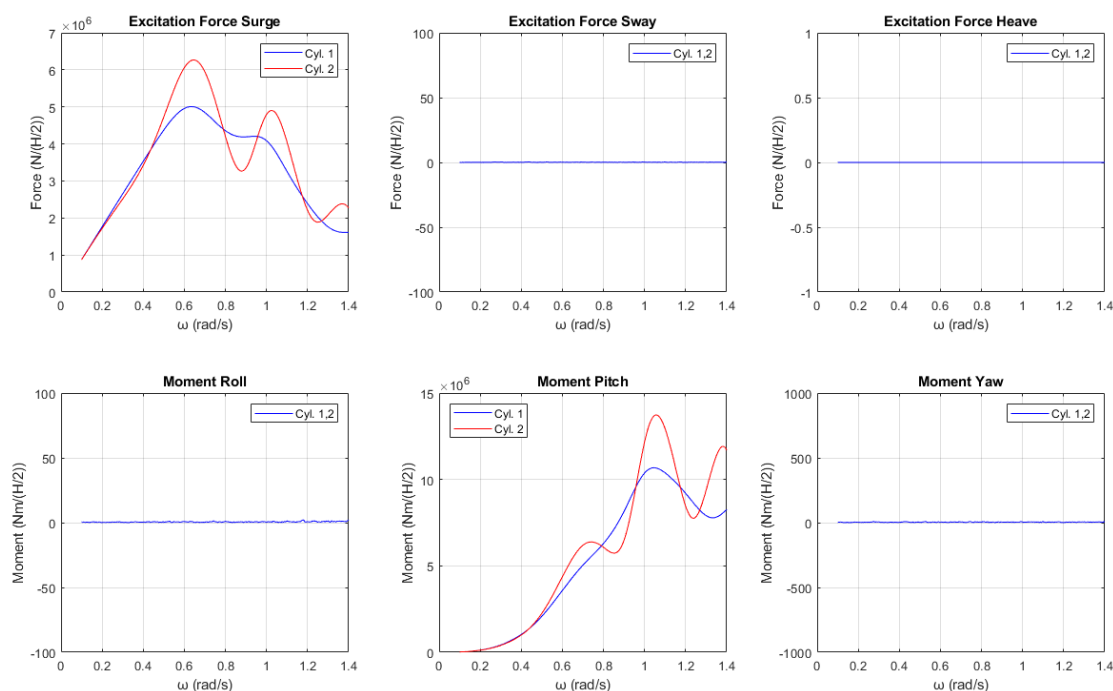
Εικόνα 16: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης κάθε κυλίνδρου



Εικόνα 17: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης, F_{xd} , της συνολικής διάταξης

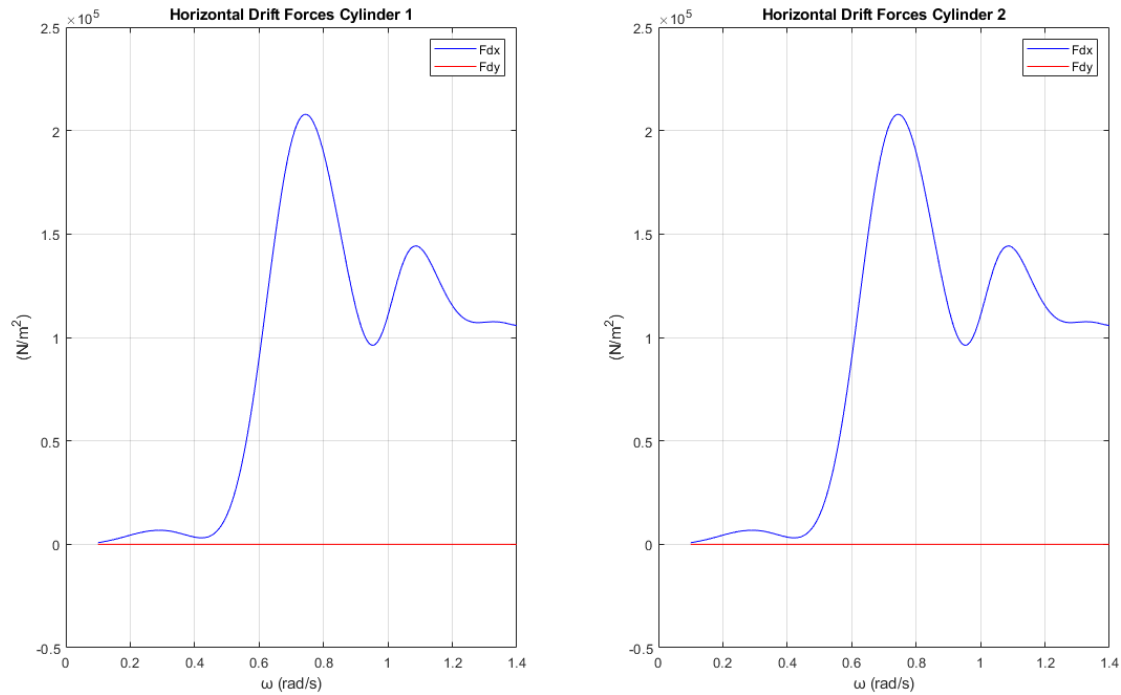
Από την Εικόνα 16 και Εικόνα 17 παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα BEM NEMOH για 500 και τα 700 στοιχεία έχουν πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Άξιο αναφοράς είναι η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του προγράμματος BEM NEMOH για τα 500 στοιχεία με αυτά του Mazarakos (2010) που δείχνει την

αξιοπιστία που έχει το πρόγραμμα BEM NEMOH. Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης φαίνονται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης

Από την Εικόνα 18 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται εντονότερα στο δεύτερο κύλινδρο της διάταξης, όπου παρατηρούνται δύο κορυφές ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης. Η πρώτη κορυφή που σχηματίζεται και ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις, είναι αυτή στην οποία ικανοποιείται η συνθήκη Neumann και εντοπίζεται στην συχνότητα $\omega \cong 0.65 \text{ r/s}$. Αντίστοιχα, στη δεύτερη κορυφή που παρατηρείται ικανοποιείται η συνθήκη Dirichlet στην συχνότητα $\omega \cong 1.02 \text{ r/s}$. Ομοίως και για τον πρώτο κύλινδρο της διάταξης. Στην Εικόνα 19 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.

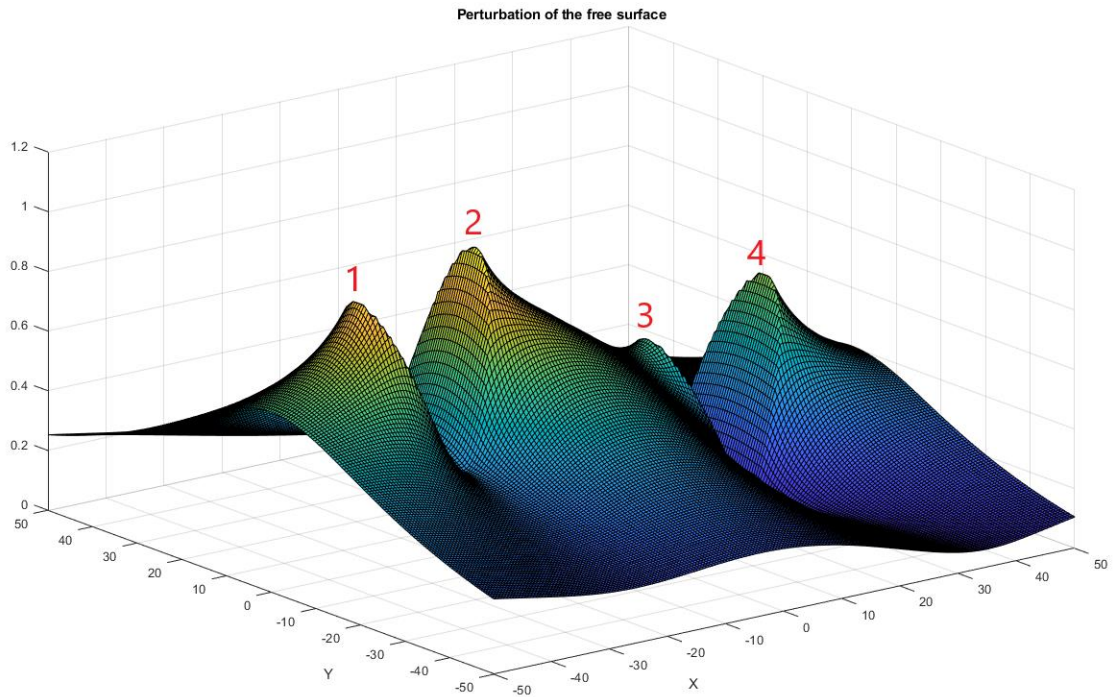


Εικόνα 19: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στην διάταξη

Στην Εικόνα 20 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 1 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 21 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$.

Πίνακας 1: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.91 m
2	1.01 m
3	0.57 m
4	0.71 m

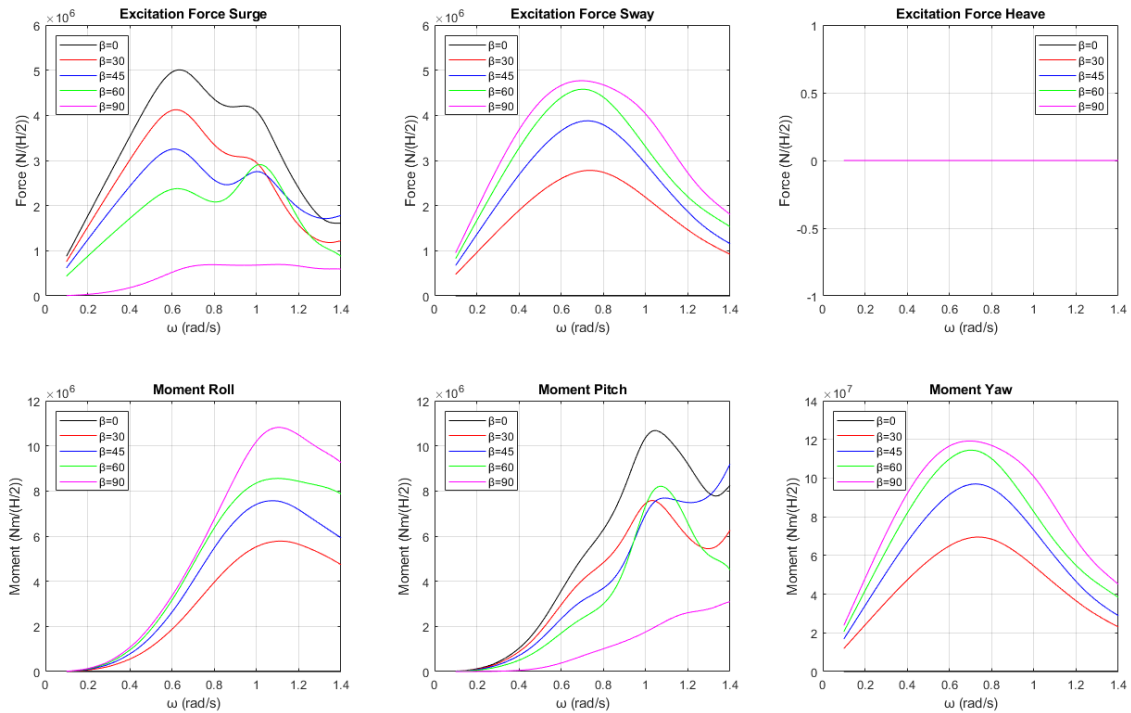


Εικόνα 20: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

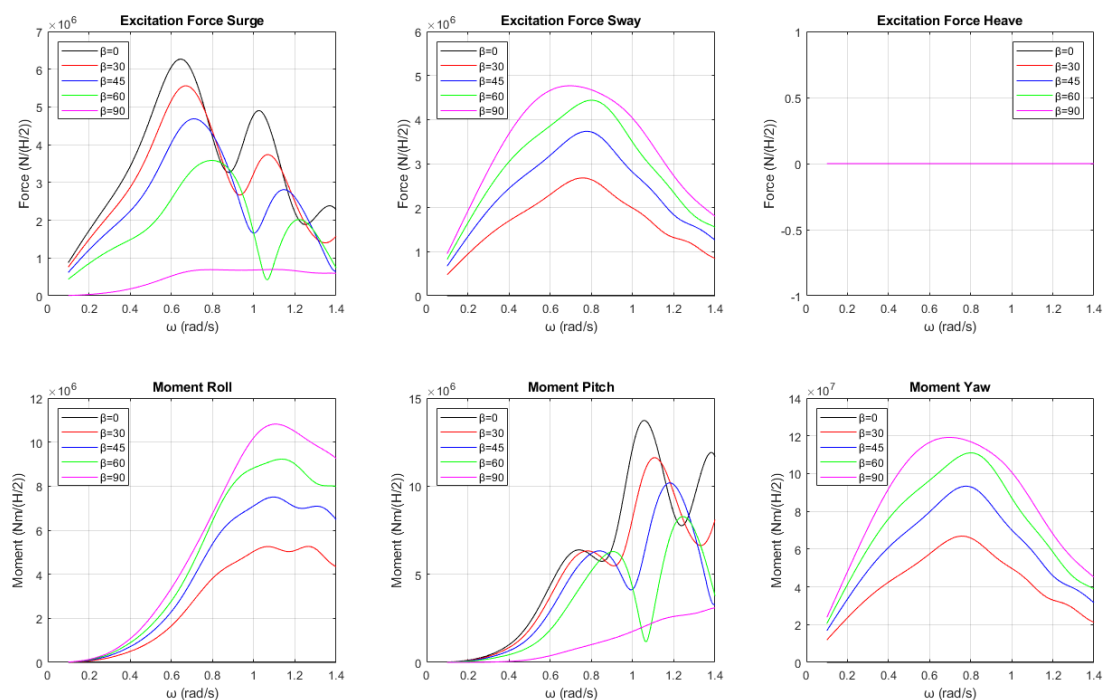


Εικόνα 21: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Προκειμένου να ελέγξουμε πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών και συνάμα την κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, θα μελετήσουμε την παραπάνω διάταξη για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού ίσες με $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 22 και 23 φαίνονται οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 22: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 23: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 22 και 23 παρατηρούμε πως η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού επηρεάζει όχι μόνο τη συχνότητα που θα εμφανιστεί η παγίδευση των κυματισμών,

αλλά και σε ποιον κύλινδρο. Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Στον Πίνακα 2 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x .

Πίνακας 2: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.02$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.65$	$\cong 1.02$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.67$	$\cong 1.07$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.71$	$\cong 1.14$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.80$	$\cong 1.22$
$\beta = 90^\circ$	–	–

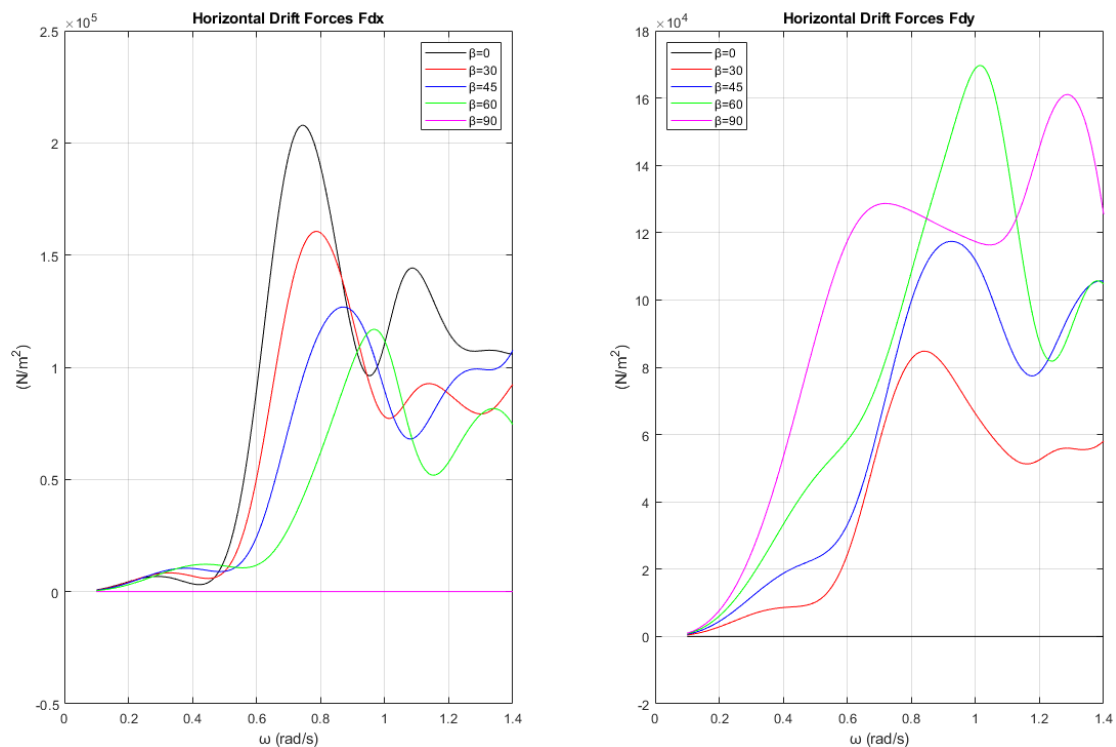
Από τον Πίνακα 2 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, με εξαίρεση τη γωνία $\beta = 90^\circ$. Στον Πίνακα 3 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ανάλογα την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y .

Πίνακας 3: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

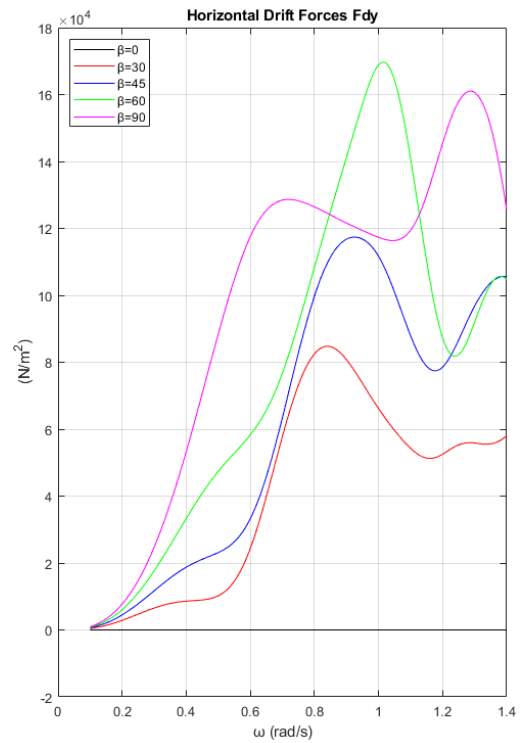
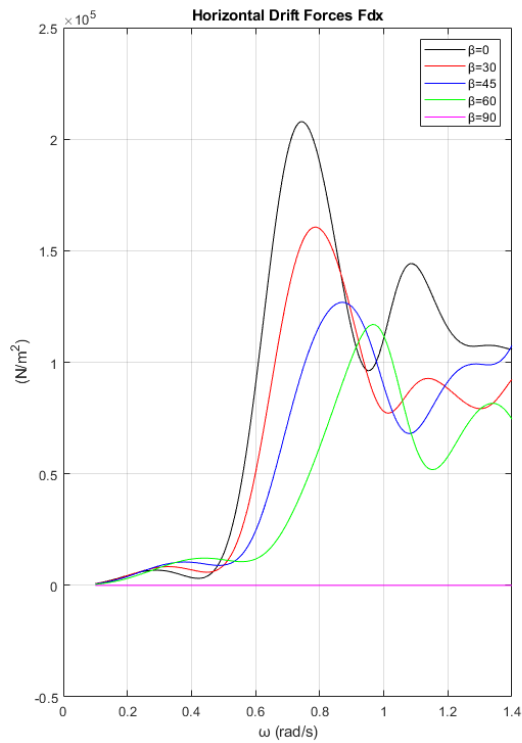
Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–

$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—

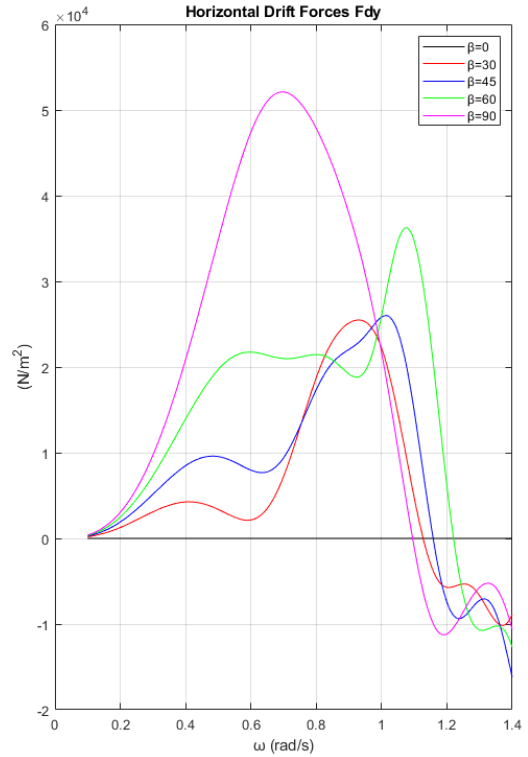
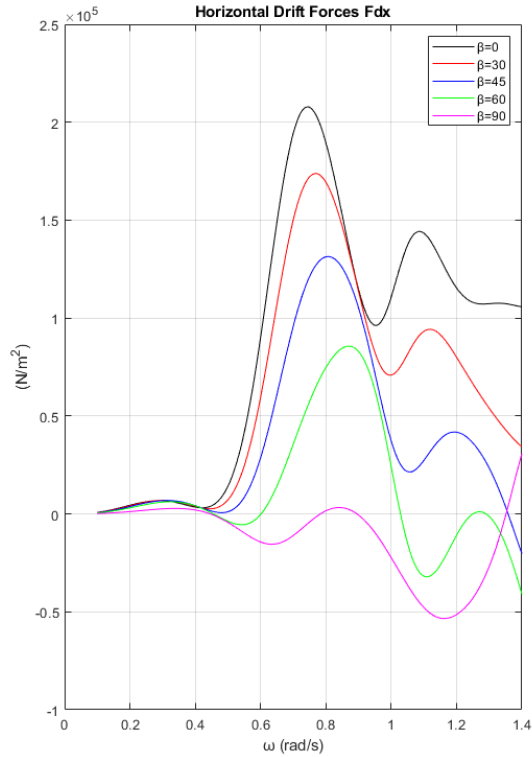
Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε πως δεν ικανοποιείται καμία συνθήκη ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y σε κανέναν κύλινδρο της διάταξης. Συγκρίνοντας τον Πίνακα 2 με τον Πίνακα 3 συμπεραίνουμε πως ο κύλινδρος 2 της διάταξης είναι δυνητικά υποψήφιος για την εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Στην Εικόνα 24 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 25 και 26 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



Εικόνα 24: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 25: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 26: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών συνοδεύεται όχι μόνο από τις κορυφές στις εξισώσεις κίνησης του σώματος αλλά και από μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο. Στον Πίνακα 4 φαίνονται ως προς ποιον κύλινδρο και ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann, πού έχουμε και την μεγαλύτερη τιμή της οριζόντιας δύναμης.

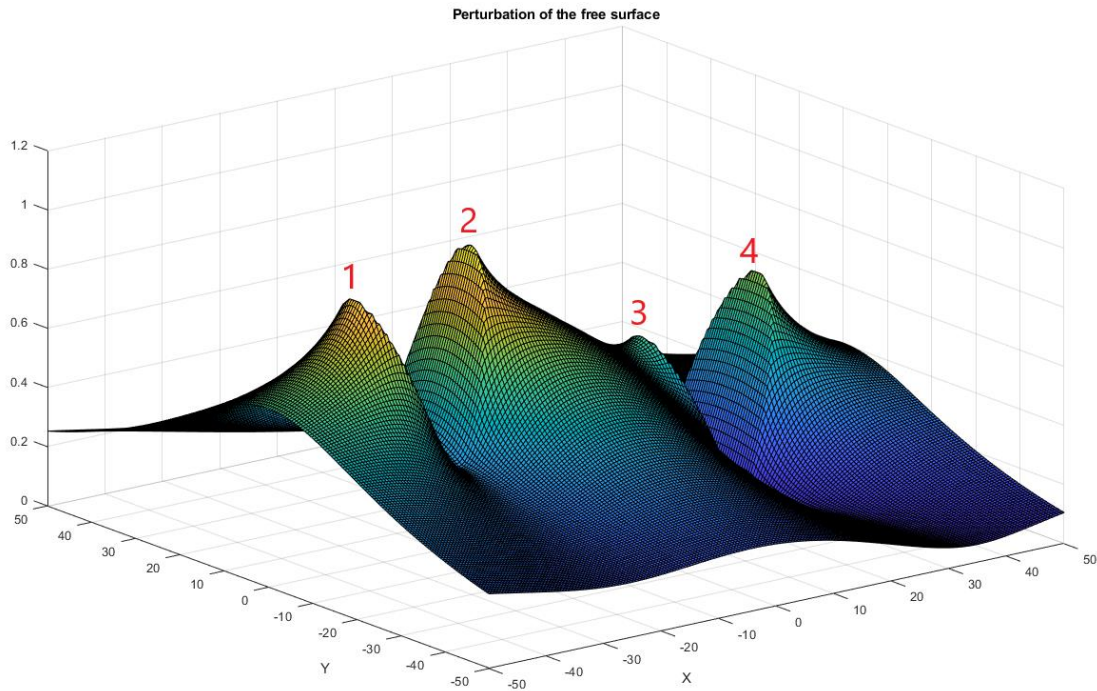
Πίνακας 4: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.65$	Κύλινδροι 2	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.67$	Κύλινδρος 2	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.71$	Κύλινδρος 2	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.71$	Κύλινδρος 1	F_y	ΟΧΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.69$	Κύλινδροι 1,2	F_y	ΟΧΙ

Στην Εικόνα 27 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ για την συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 5 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 28 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$.

Πίνακας 5: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.91 m
2	1.01 m
3	0.57 m
4	0.71 m



Εικόνα 27: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για την συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

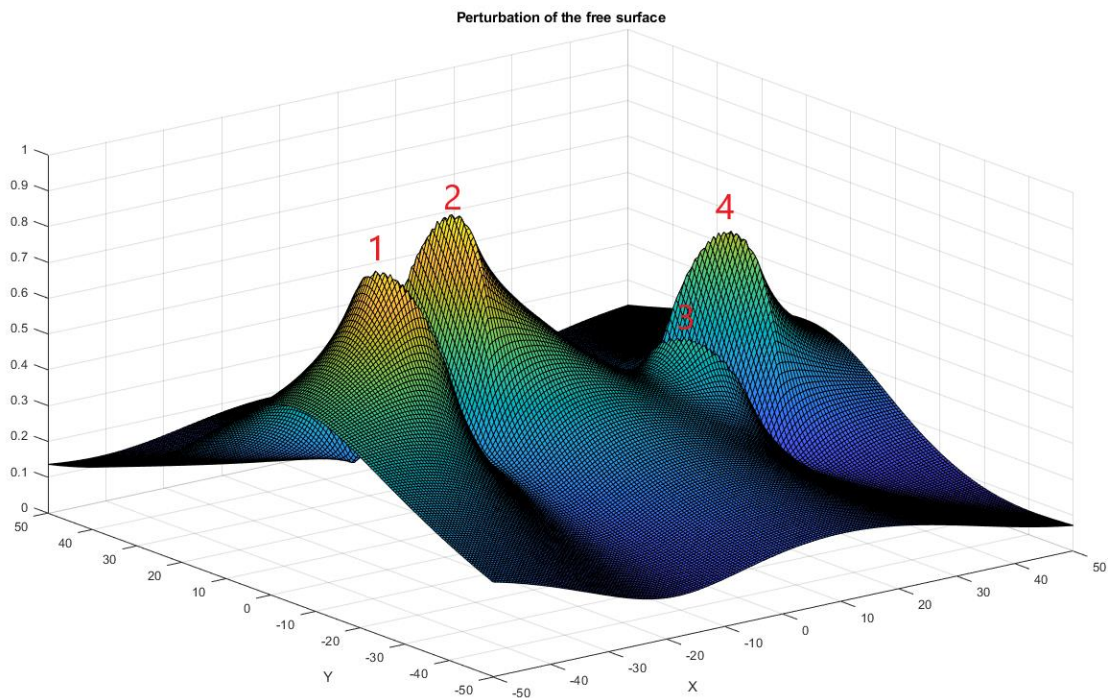


Εικόνα 28: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 29 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 6 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 30 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$.

Πίνακας 6: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.87 m
2	0.92 m
3	0.51 m
4	0.69 m



Εικόνα 29: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

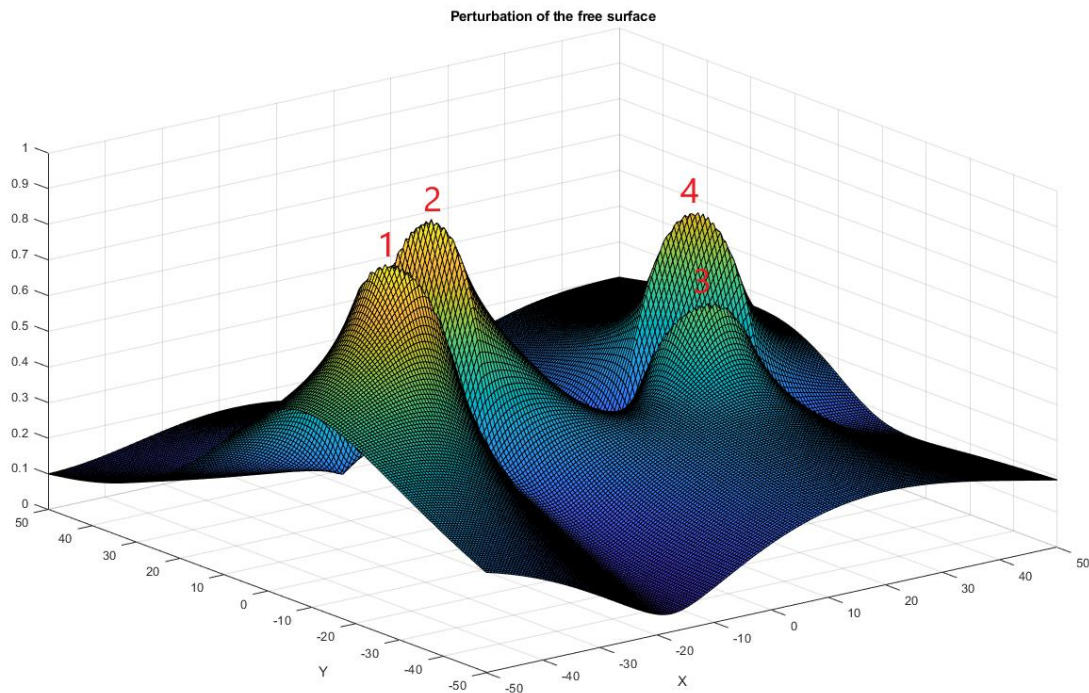


Εικόνα 30: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 31 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 7 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 32 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$.

Πίνακας 7: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.88 m
2	0.90 m
3	0.60 m



Εικόνα 31: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



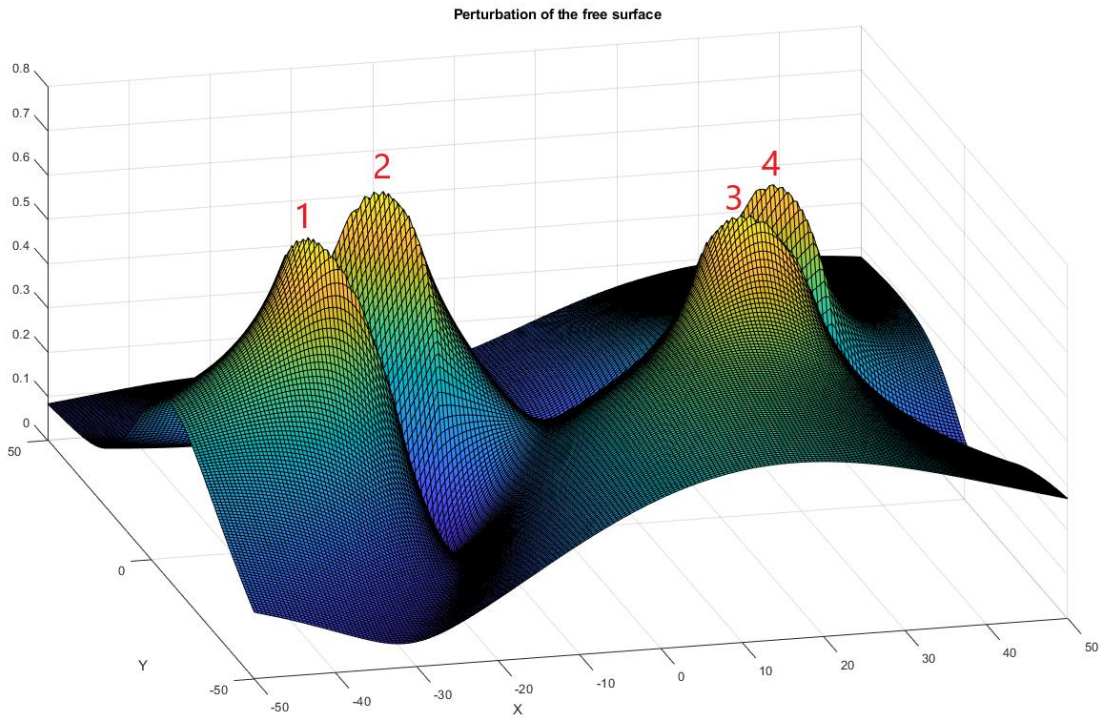
Εικόνα 32: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 33 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 60^\circ$ για την συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 8 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 34 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$.

Πίνακας 8: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.74 m

2	0.75 m
3	0.73 m
4	0.69 m



Εικόνα 33: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

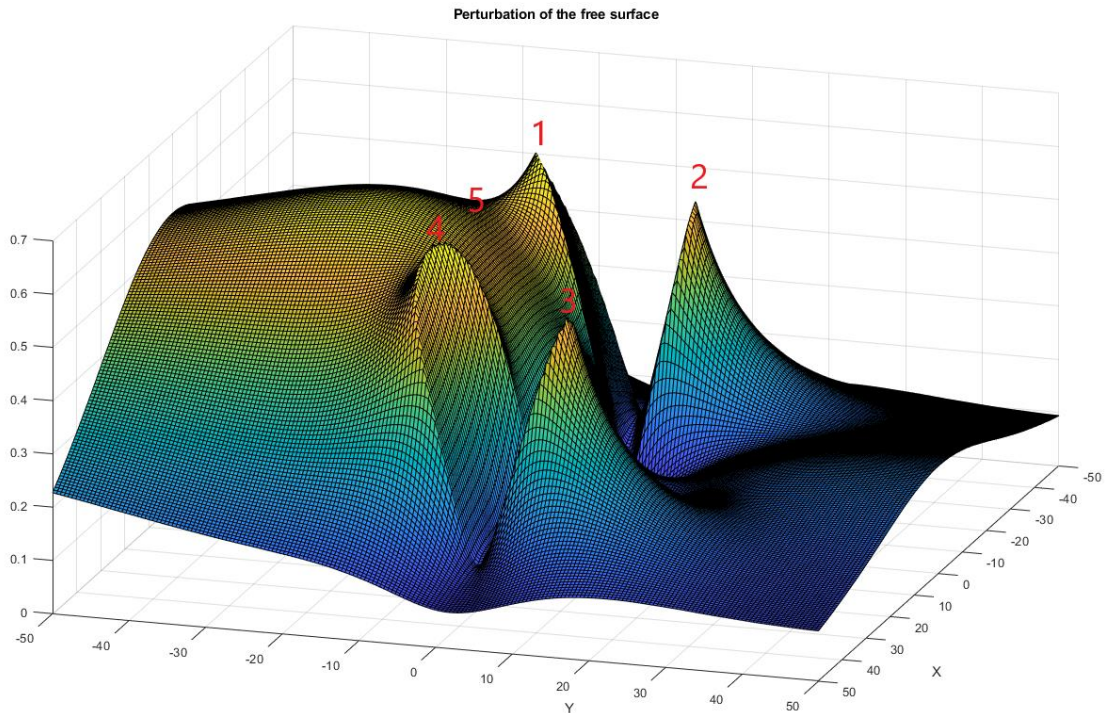


Εικόνα 34: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

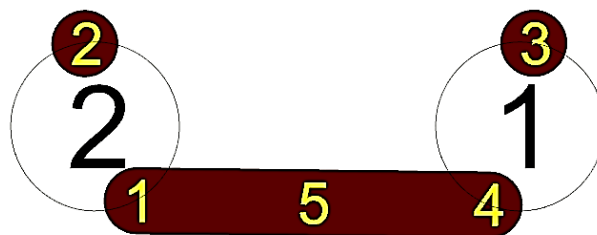
Στην Εικόνα 35 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 9 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 36 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$.

Πίνακας 9: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.63 m
2	0.54 m
3	0.54 m
4	0.63 m
5	0.63 m



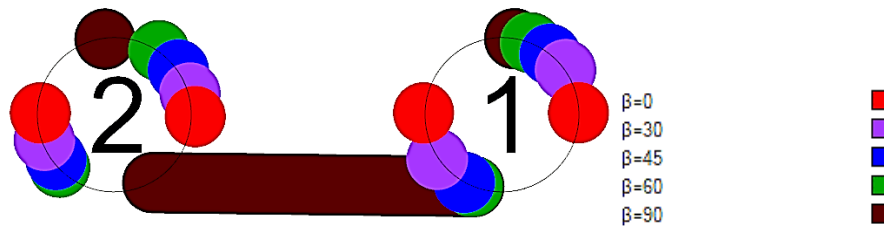
Εικόνα 35: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



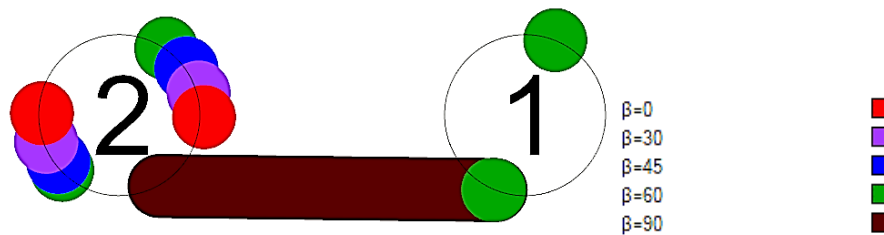
Εικόνα 36: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 37 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 38 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα

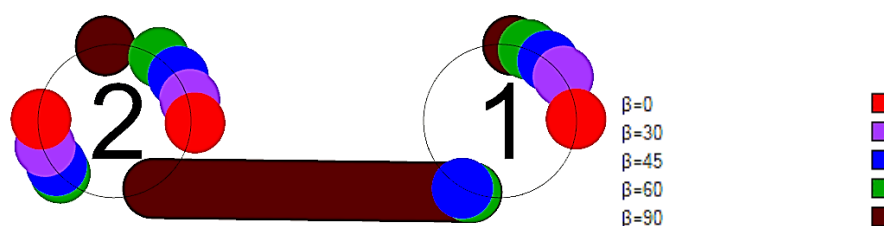
38 παρατηρούμε πως στη διάταξη μπορεί να εγκατασταθεί μία συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 2, όπως ακριβώς είχαμε υποθέσει. Όμως, επειδή η Εικόνα 38 αποτελεί έναν οδηγό για το που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες κορυφές, τότε προκύπτει η Εικόνα 39 όπου φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 39 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, με αυτήν του κυλίνδρου 2 να έχει την μεγαλύτερη απόδοση.



Εικόνα 37: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 38: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

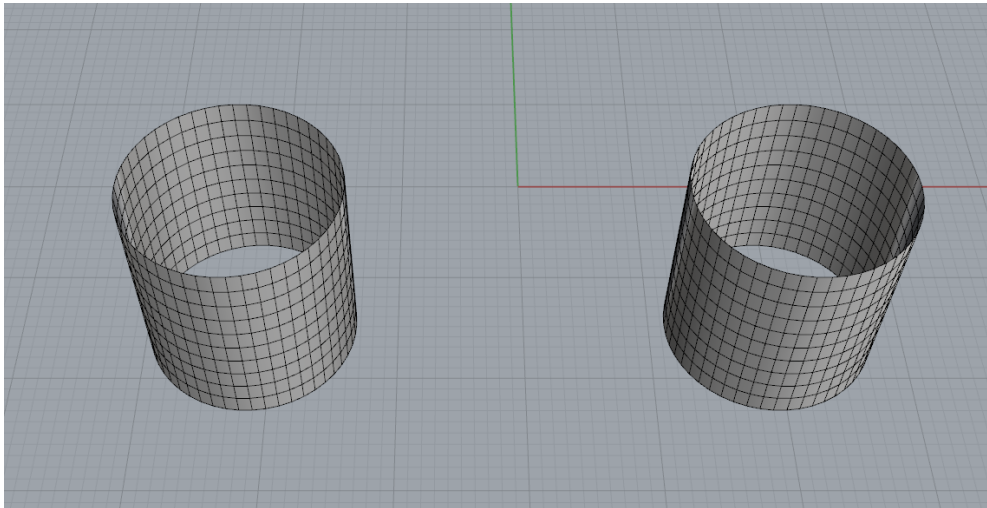


Εικόνα 39: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.2.2 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα

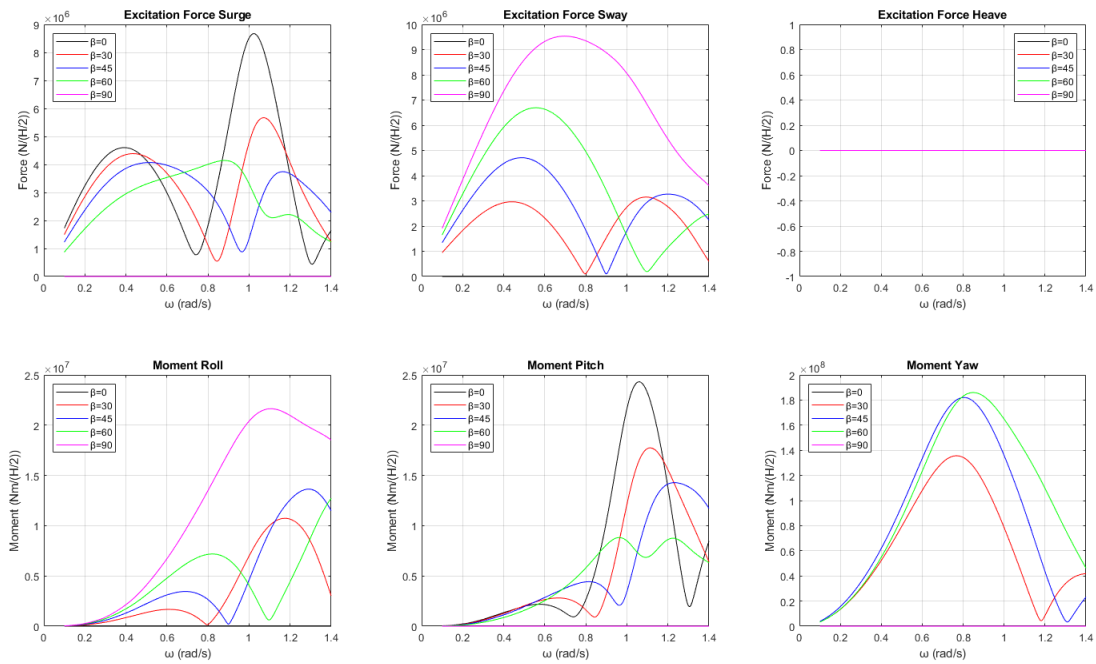
Τα αποτελέσματα του προγράμματος BEM NEMOH προέκυψαν από τη μελέτη των σωμάτων σαν δύο ανεξάρτητα σώματα. Είναι προφανές ότι αν εκτελέσουμε την ίδια προσομοίωση με τους κύλινδρους να συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, τότε το πρόγραμμα BEM NEMOH θα υπολογίσει τις συνολικές δυνάμεις διέγερσης που

ασκούνται στη διάταξη. Όμως, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η διάταξη σαν ένα σώμα, προκειμένου να ελέγξουμε αν το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι ίδιο με αυτό που υπολόγισε το πρόγραμμα. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα 500 στοιχεία δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό θα μελετήσουμε τη διάταξη των δύο κατακόρυφων κυλίνδρων σαν ένα σώμα, το οποίο αποτελείται από 1000 στοιχεία και 1100 σημεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40.



Εικόνα 40: Διακριτοποίηση κυλίνδρων σαν ένα σώμα που αποτελείται από 1000 στοιχεία και 1100 σημεία

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους δύο κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στην Εικόνα 41. Στον Πίνακα 10 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν συνθήκες Neumann και Dirichlet αντίστοιχα ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Από τον Πίνακα 10 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται μόνο στις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x όταν η γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίσες με $\beta = 0^\circ$ και 30° , κάτι που οφείλεται στη γεωμετρία της διάταξης.

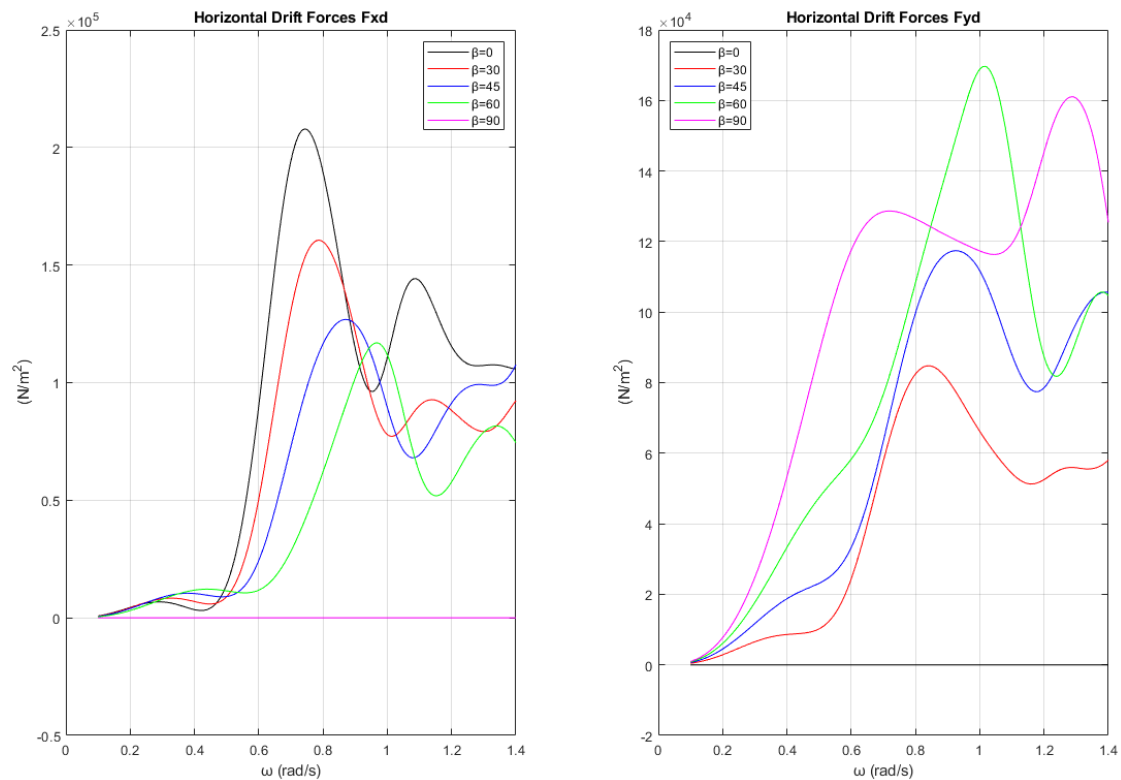


Εικόνα 41: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα

Πίνακας 10: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.02$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.07$	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη φαίνονται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Όπως και προηγουμένως, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 11 φαίνονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

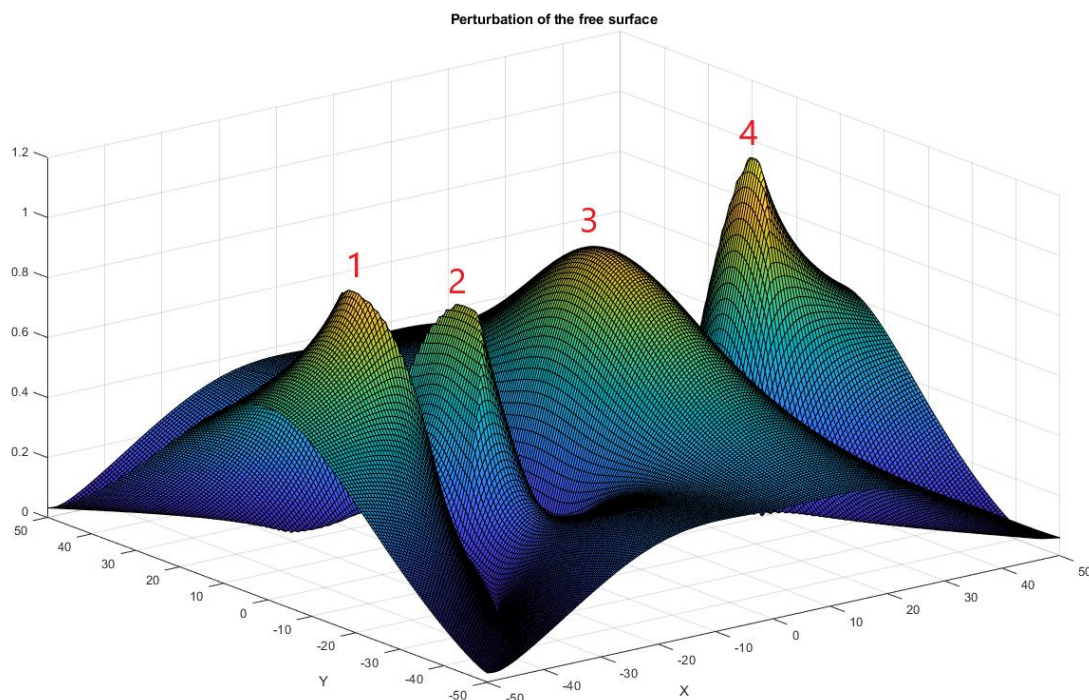
Πίνακας 11: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.02$	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.07$	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.49$	F_y	ΟΧΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.55$	F_y	ΟΧΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.70$	F_y	ΟΧΙ

Στην Εικόνα 43 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 12 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 44 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$.

Πίνακας 12: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.96 m
2	0.83 m
3	0.92 m
4	1.11 m



Εικόνα 43: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

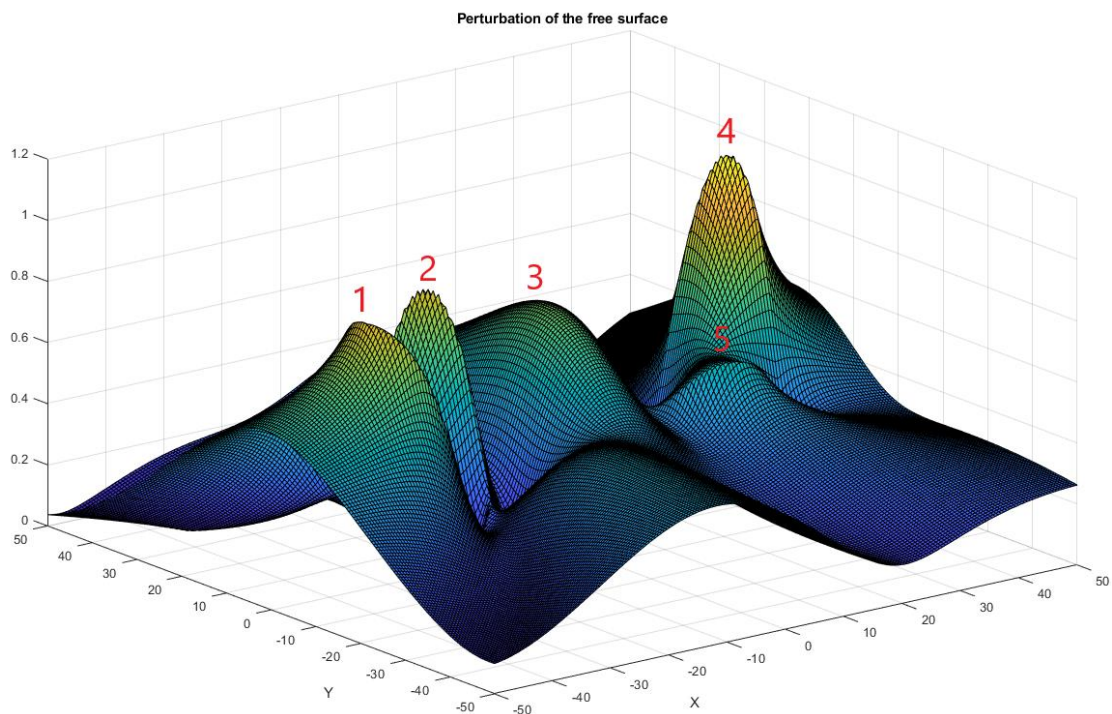


Εικόνα 44: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

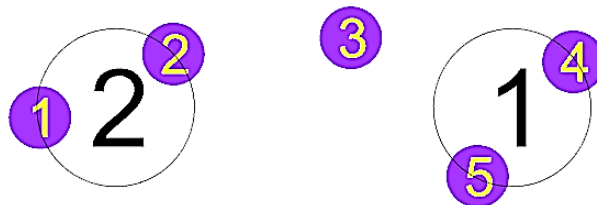
Στην Εικόνα 45 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 13 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 46 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$.

Πίνακας 13: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.88 m
2	0.88 m
3	0.72 m
4	1.10 m
5	0.55 m



Εικόνα 45: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



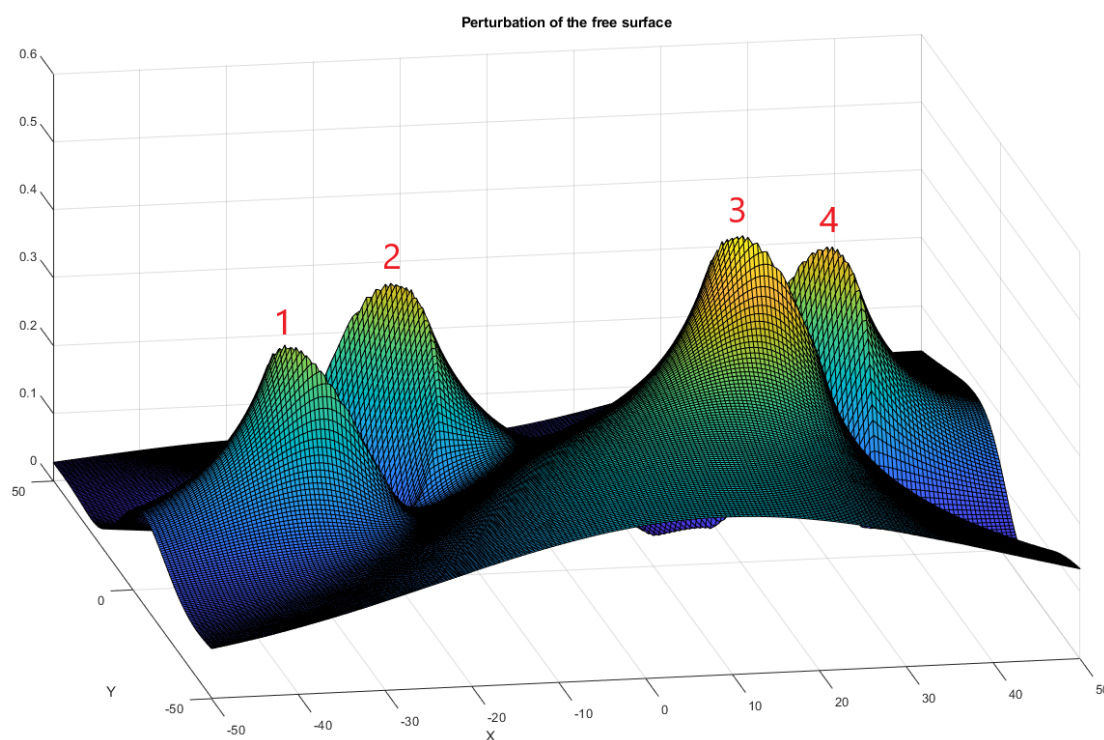
Εικόνα 46: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 47 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 14 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 48 φαίνονται

οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$.

Πίνακας 14: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.37 m
2	0.41 m
3	0.51 m
4	0.43 m



Εικόνα 47: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



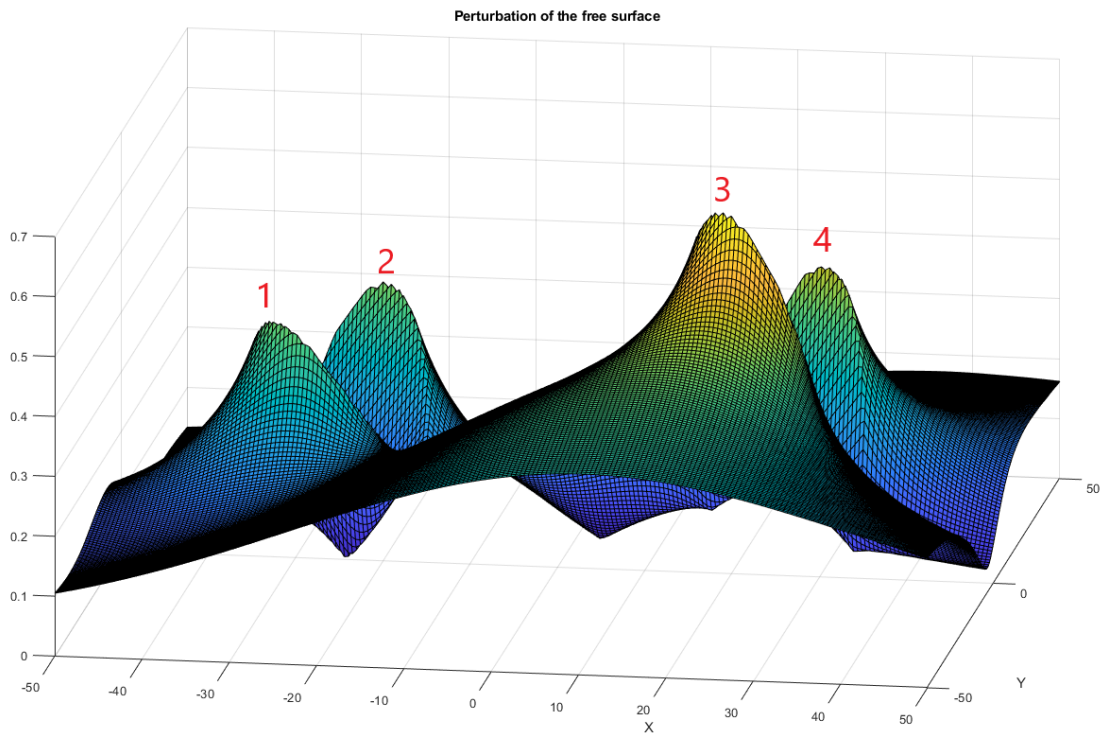
Εικόνα 48: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 49 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που

παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 15 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 50 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$.

Πίνακας 15: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.42 m
2	0.43 m
3	0.63 m
4	0.48 m



Εικόνα 49: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

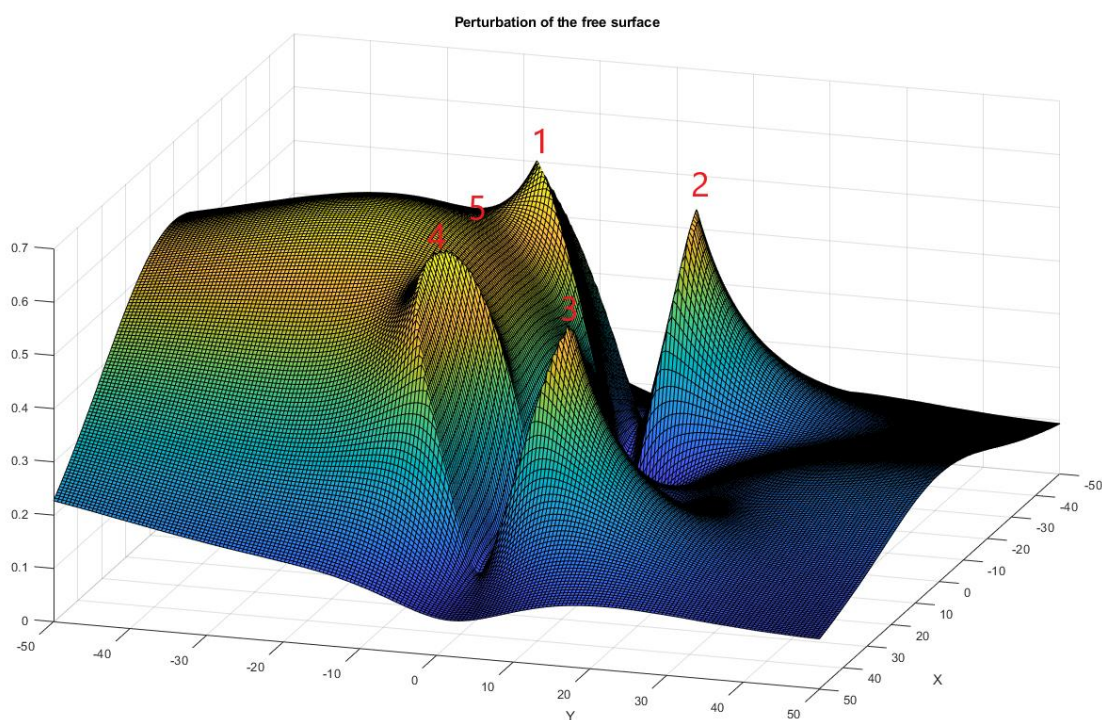


Εικόνα 50: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

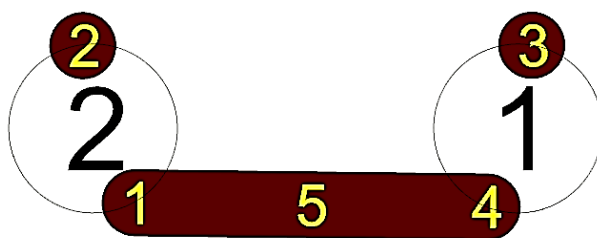
Στην Εικόνα 51 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 16 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 52 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$.

Πίνακας 16: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.62 m
2	0.55 m
3	0.55 m
4	0.62 m
5	0.63 m

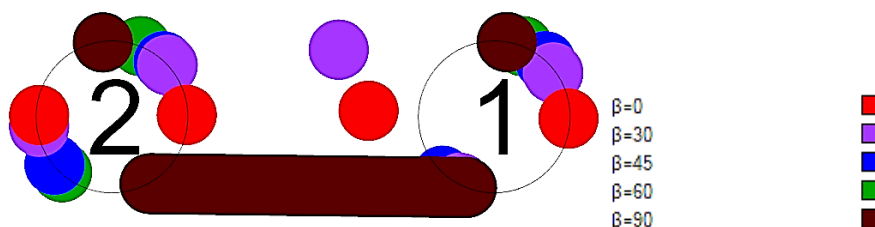


Εικόνα 51: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

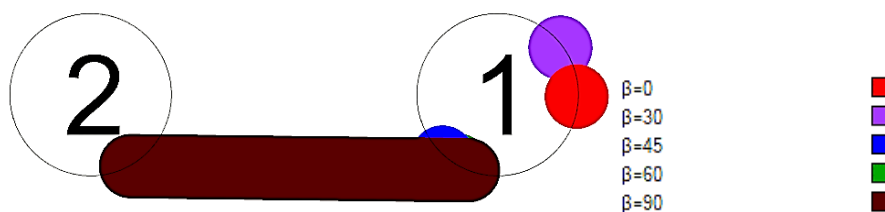


Εικόνα 52: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

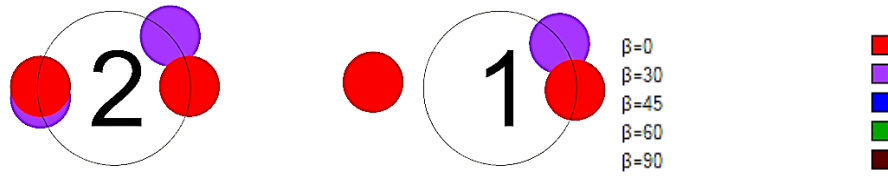
Στην Εικόνα 53 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 54 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 54 παρατηρούμε πως μπορεί να εγκατασταθεί μία συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 1 της διάταξης. Επειδή η Εικόνα 54 αποτελεί έναν οδηγό για το που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες κορυφές, τότε προκύπτει η Εικόνα 55 που φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 55, παρατηρούμε πως παρόλο που μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, αυτές περιορίζονται στις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού $\beta = 0^\circ$ και 30° .



Εικόνα 53: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

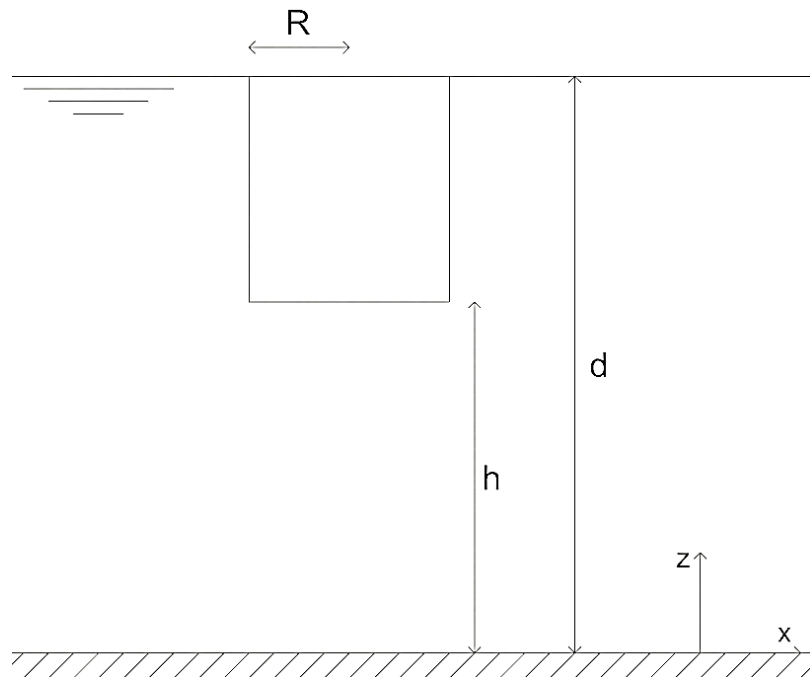


Εικόνα 54: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



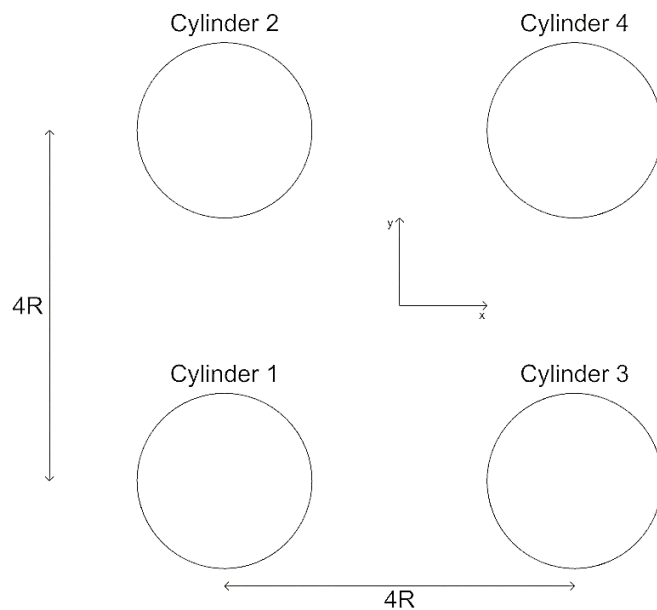
Εικόνα 55: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.3 Τέσσερις κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι που σχηματίζουν τετράγωνο



Εικόνα 56: Πλάγια όψη τυχαίου πλωτού κυλίνδρου της διάταξης

Θεωρούμε τέσσερις κατακόρυφους πλωτούς κυλίνδρους ακτίνας R σε βάθος περιοχής εγκατάστασης d με τον πυθμένα τους να απέχει απόσταση h από τον πυθμένα της θάλασσας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 56 για έναν τυχαίο κύλινδρο της διάταξης.



Εικόνα 57: Κάτοψη διάταξης τεσσάρων πλωτών κυλίνδρων

Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι σε τετραγωνική μορφή με τα κέντρα τους να ισαπέχουν $2R$ από το κέντρο της διάταξης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 57. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων εκφράζονται από τους ακόλουθους λόγους:

$$\frac{d}{R} = 4 \quad \text{και} \quad \frac{h}{R} = 2$$

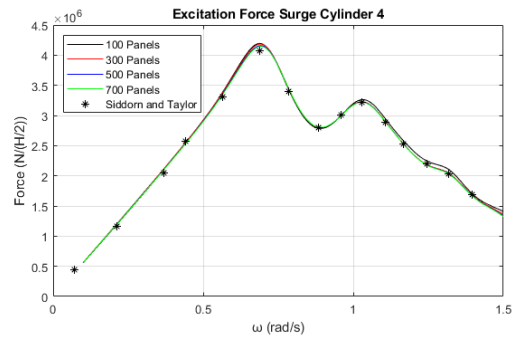
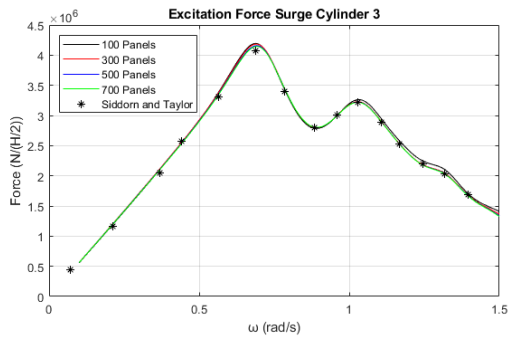
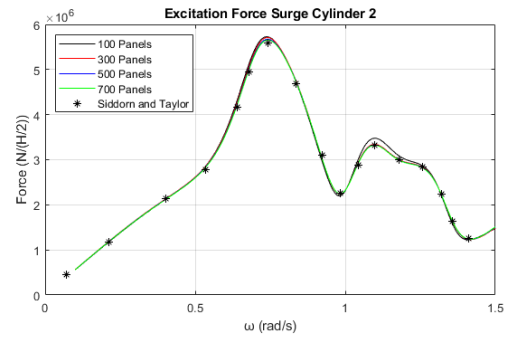
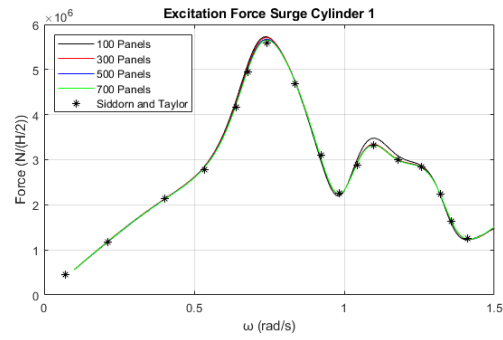
Όπως και στην περίπτωση του πλωτού κατακόρυφου κυλίνδρου που μελετήσαμε στην παράγραφο 3.1.2 έτσι και εδώ κάνουμε διακριτοποίηση στα τοιχώματα και στον πυθμένα των κυλίνδρων. Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 10m$, βρίσκονται σε βάθοςπεριοχής εγκατάστασης $d = 40m$, ο πυθμένας τους απέχει από τον πυθμένα της θάλασσας $h = 20m$ και η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 $(-20, -20)$
- Κύλινδρος 2 $(-20, 20)$
- Κύλινδρος 3 $(20, -20)$
- Κύλινδρος 4 $(20, 20)$

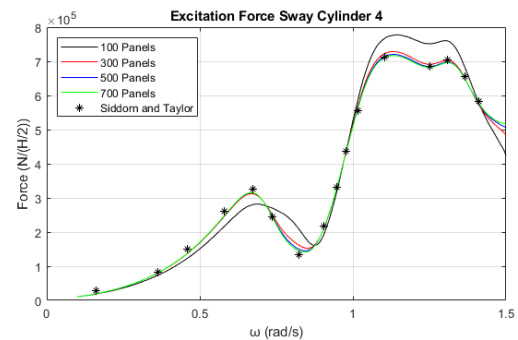
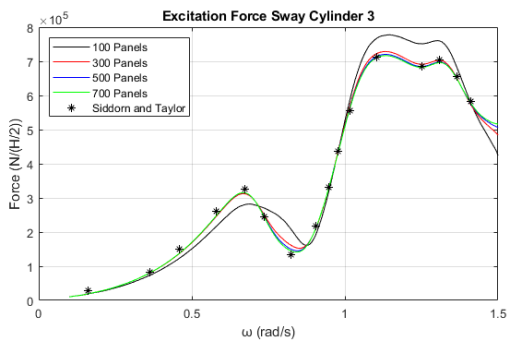
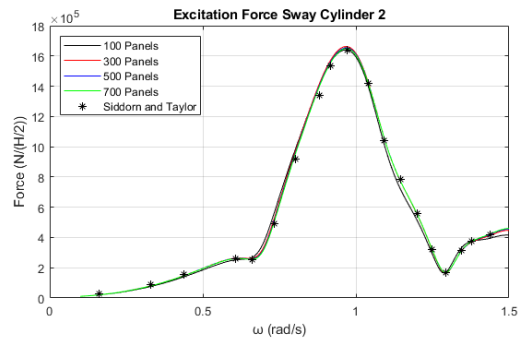
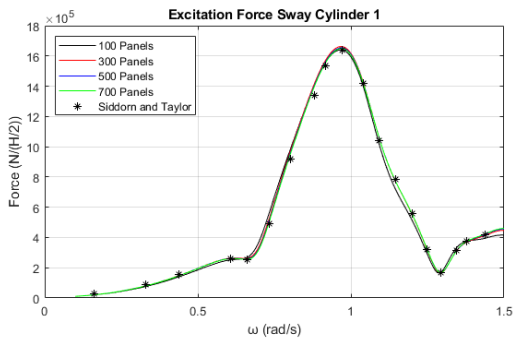
Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τη διάταξη των τεσσάρων πλωτών κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Siddorn και Taylor (2008). Οι Siddorn και Taylor (2008) θεώρησαν ότι οι κύλινδροι μπορούν να ταλαντωθούν ελεύθερα, όμως στην συγκεκριμένη περίπτωση θα μελετήσουμε τη διάταξη διαχωρίζοντας την μελέτη σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θεωρούμε πως οι κύλινδροι είναι ακίνητοι (diffraction problem), ενώ στην δεύτερη μπορούν να εκτελέσουν ελεύθερη ταλάντωση (radiation problem). Με τον τρόπο αυτό, θα ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζει η κατανομή του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών.

3.3.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem

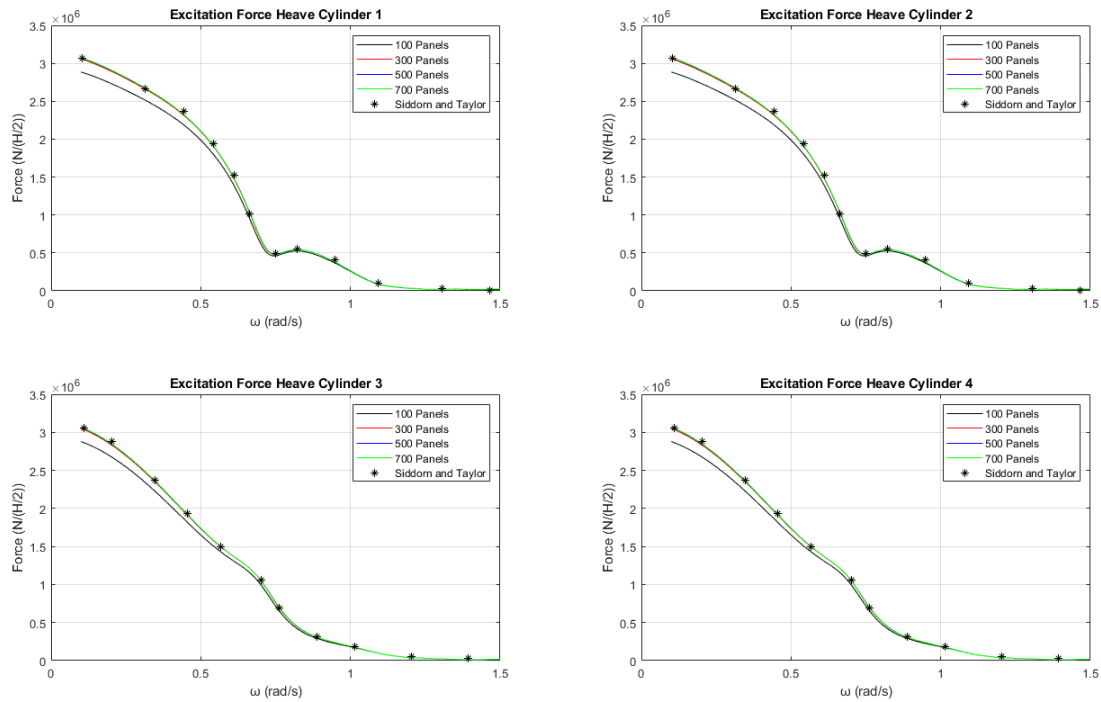
Στην Εικόνα 58 παρουσιάζονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x , στην Εικόνα 59 οι οριζόντιες F_y και αντίστοιχα στην Εικόνα 60 οι κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης F_z .



Εικόνα 58: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο

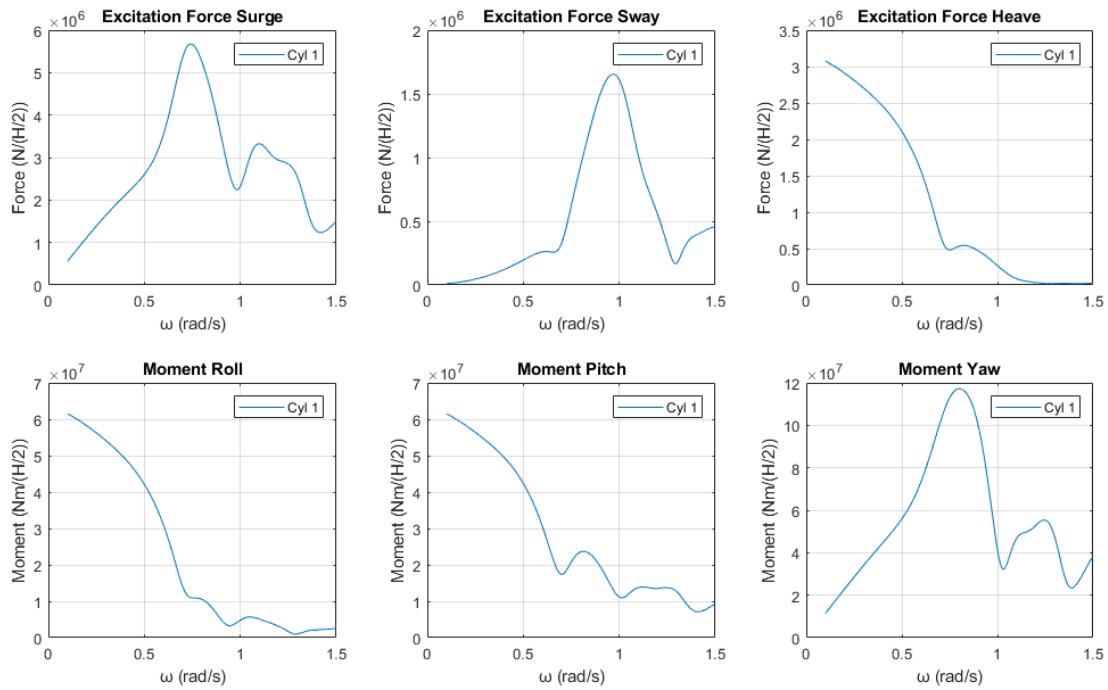


Εικόνα 59: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο

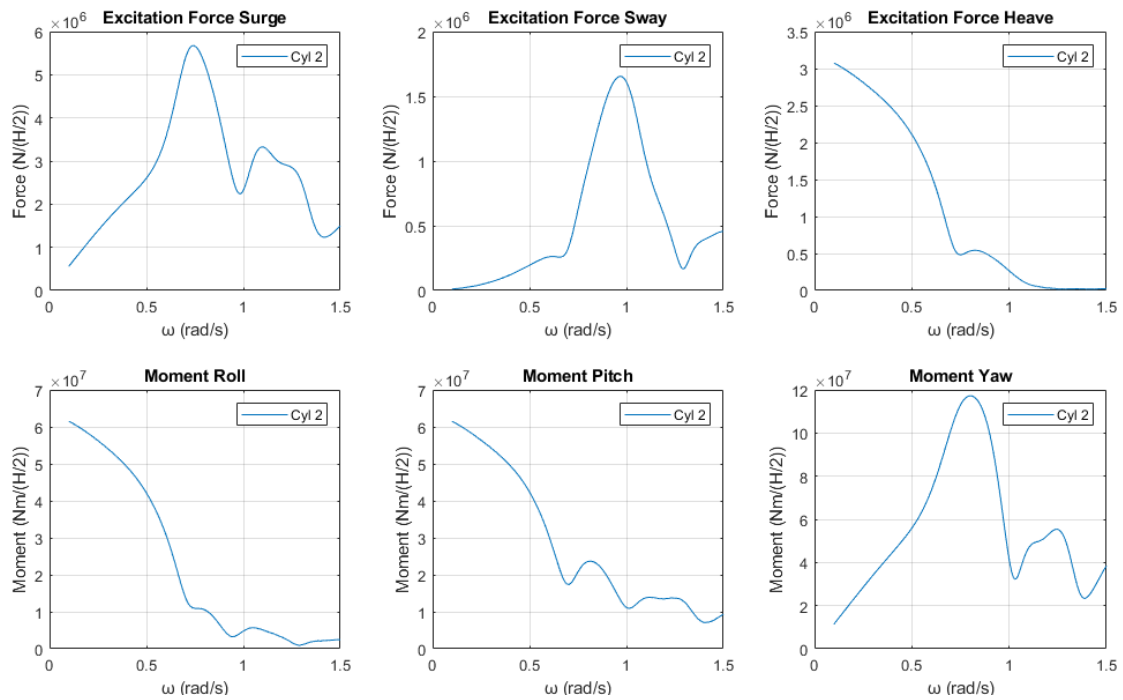


Εικόνα 60: Κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης F_z που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο

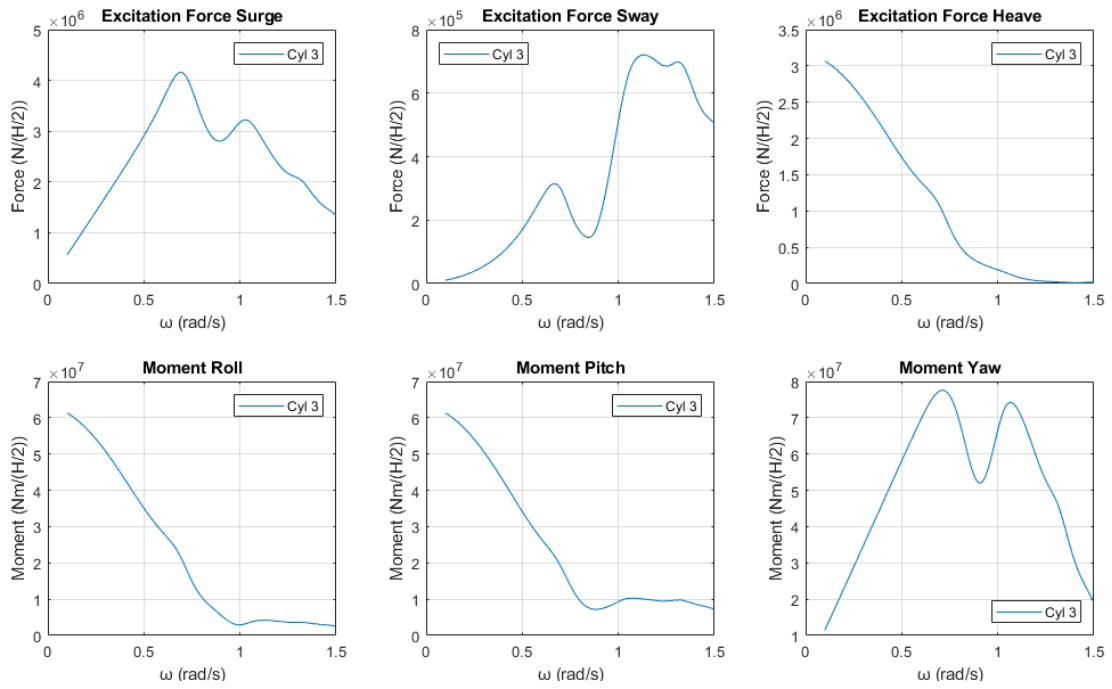
Από τις Εικόνες 58-60 παρατηρούμε πως τα 500 και τα 700 στοιχεία δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα του BEM NEMOH συγκλίνουν με αυτά των Siddorn και Taylor (2008), αποδεικνύοντας την αξιοπιστία του. Στις Εικόνες 61-65 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



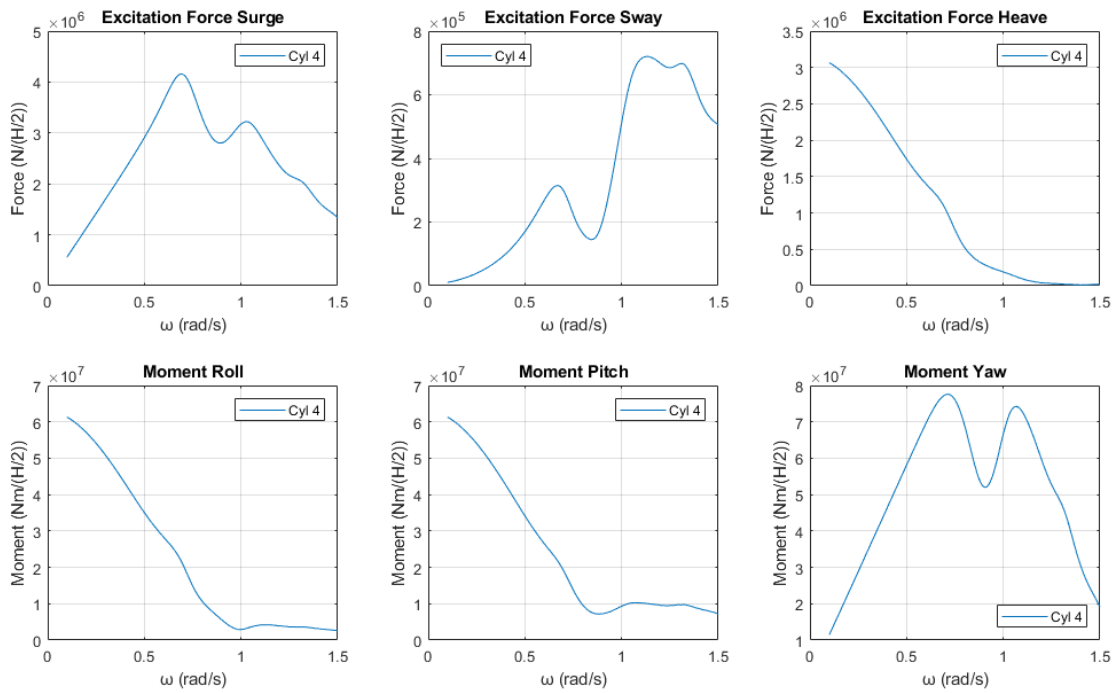
Εικόνα 61: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης



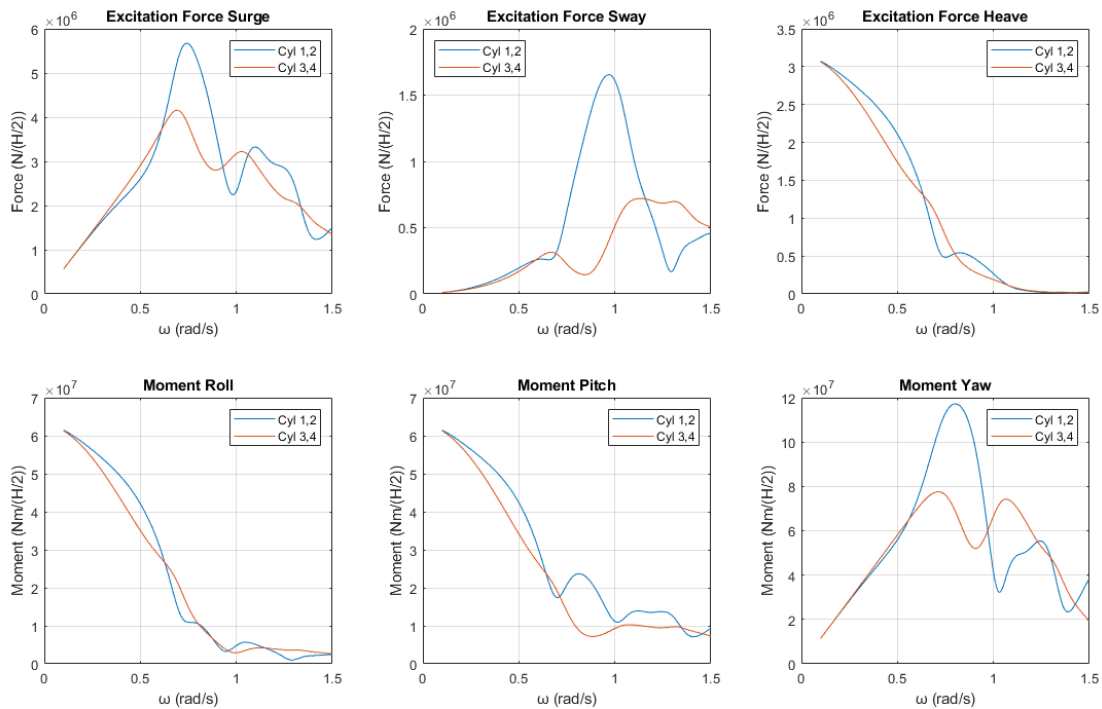
Εικόνα 62: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης



Εικόνα 63: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης

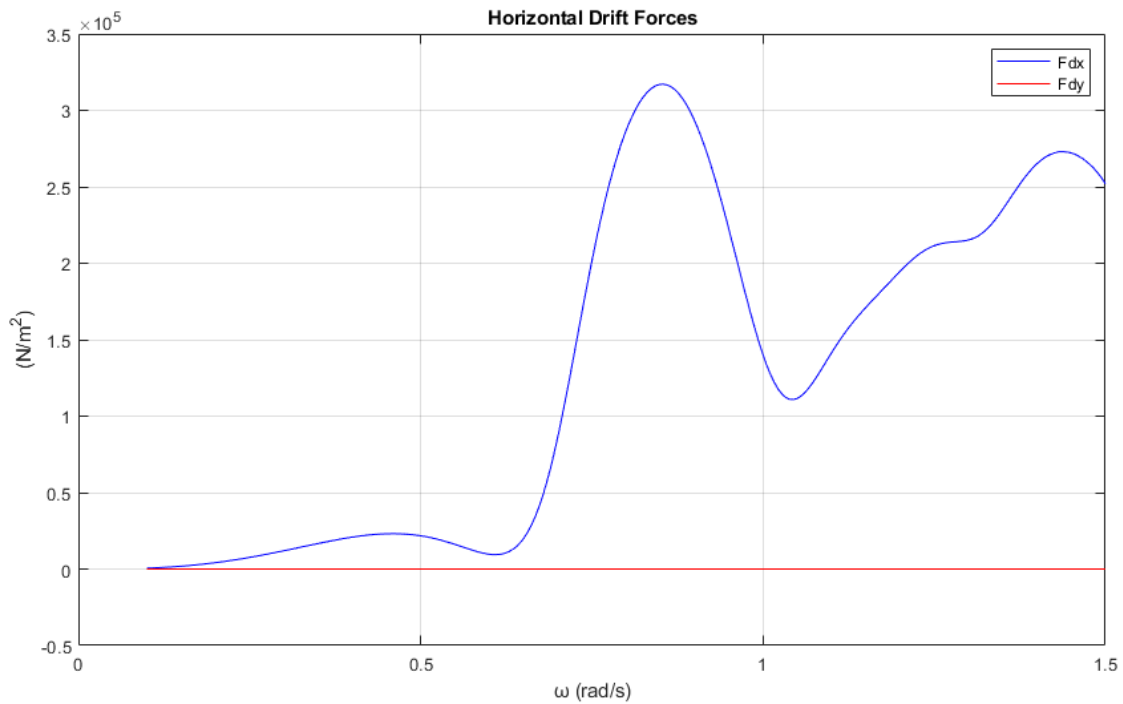


Εικόνα 64: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης



Εικόνα 65: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης

Από την Εικόνα 65 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης σε διαφορετικές συχνότητες. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x , η συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 2 ικανοποιείται για τη συχνότητα $\omega \cong 0.74 \text{ r/s}$ και η συνθήκη Dirichlet ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.10 \text{ rad/s}$. Αντίστοιχα για τους κυλίνδρους 3 και 4 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται για τη συχνότητα $\omega \cong 0.69 \text{ r/s}$ και η συνθήκη Dirichlet ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.03 \text{ r/s}$. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y ικανοποιείται μόνο η συνθήκη Neumann στη συχνότητα $\omega \cong 0.97 \text{ r/s}$. Επίσης, το φαινόμενο εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους και παρατηρούμε πως οι φορτίσεις που δέχονται οι κύλινδροι 1 και 2 είναι μεγαλύτερες από αυτές που δέχονται οι κύλινδροι 3 και 4. Επομένως, για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης κυματισμού περιμένουμε και τις μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στους κυλίνδρους αυτούς. Στην Εικόνα 66 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται στην διάταξη, όταν οι κύλινδροι θεωρούνται ακίνητοι.

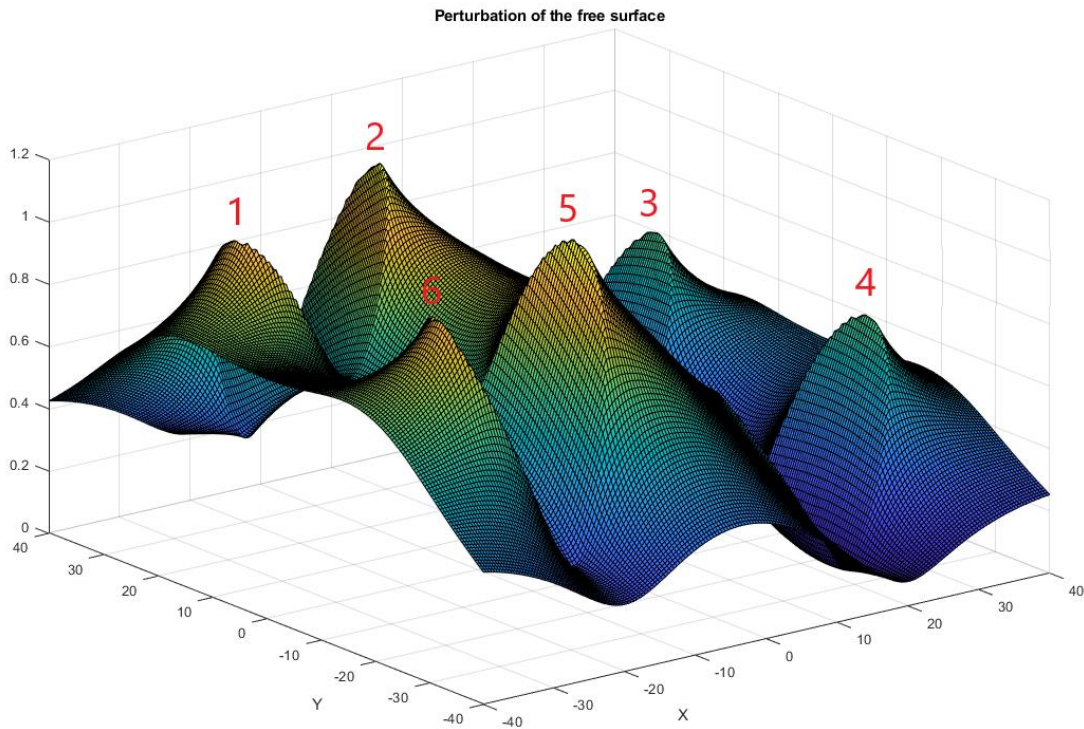


Εικόνα 66: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στη διάταξη

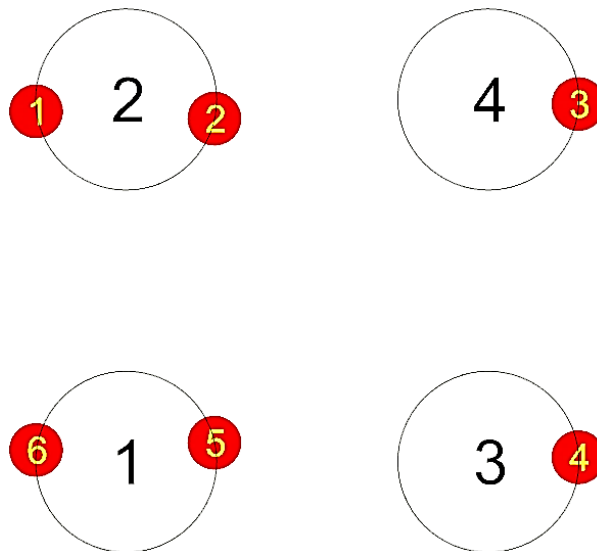
Στην Εικόνα 67 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann στους κυλίνδρους 1 και 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 17 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 68 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 17: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.03m
2	1.18 m
3	0.74 m
4	0.74 m
5	1.18 m
6	1.03 m

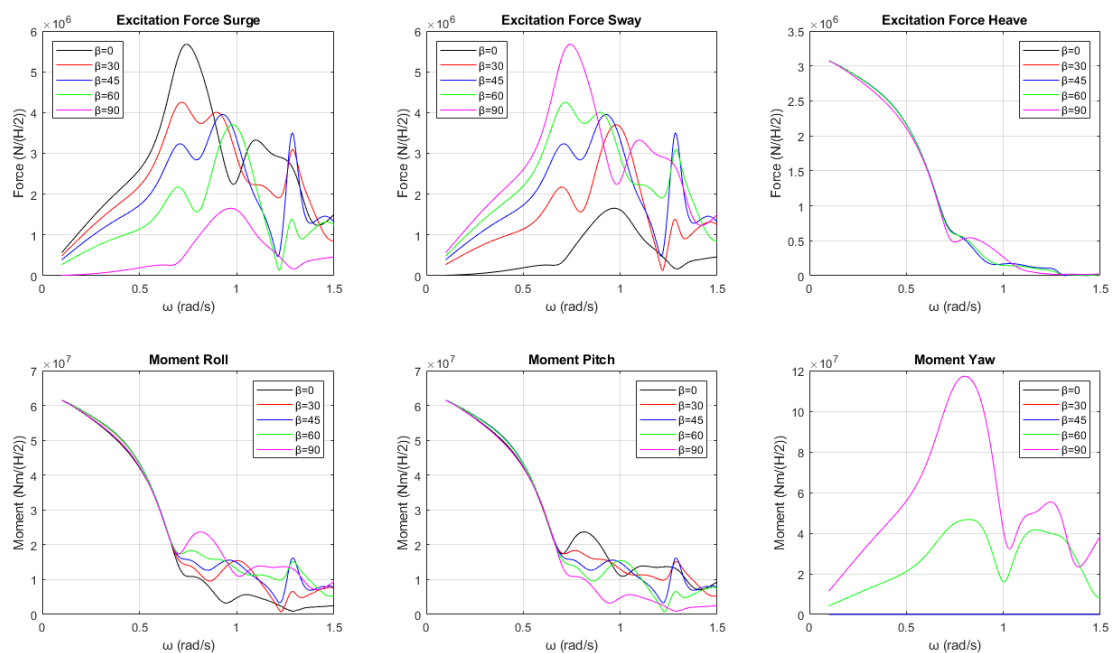


Εικόνα 67: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann των κυλίνδρων 1 και 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

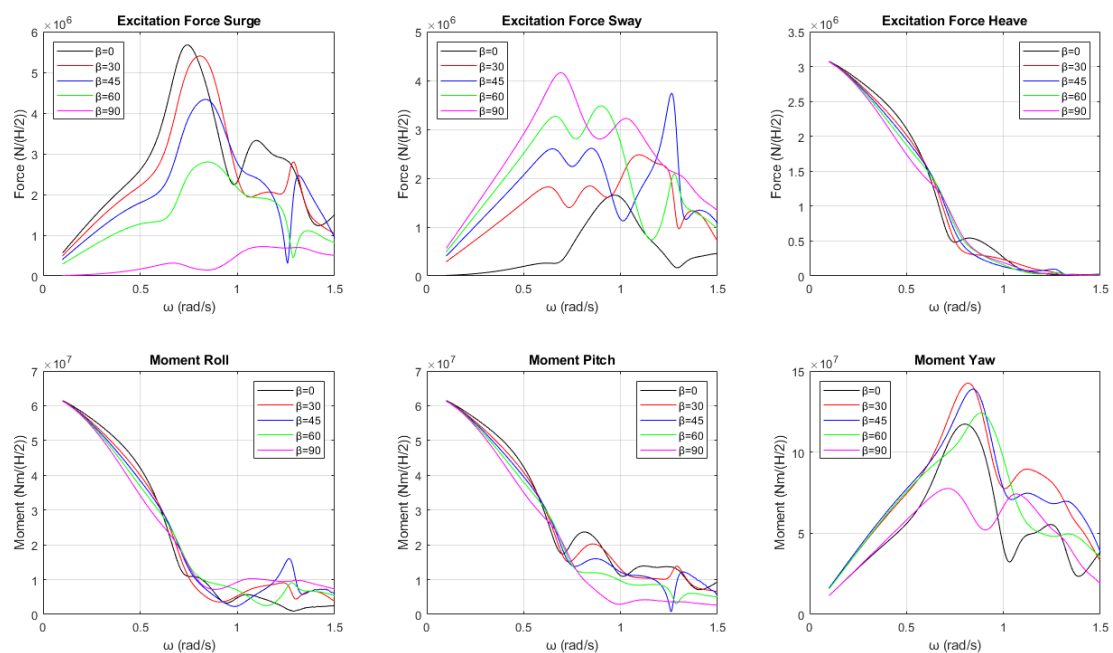


Εικόνα 68: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

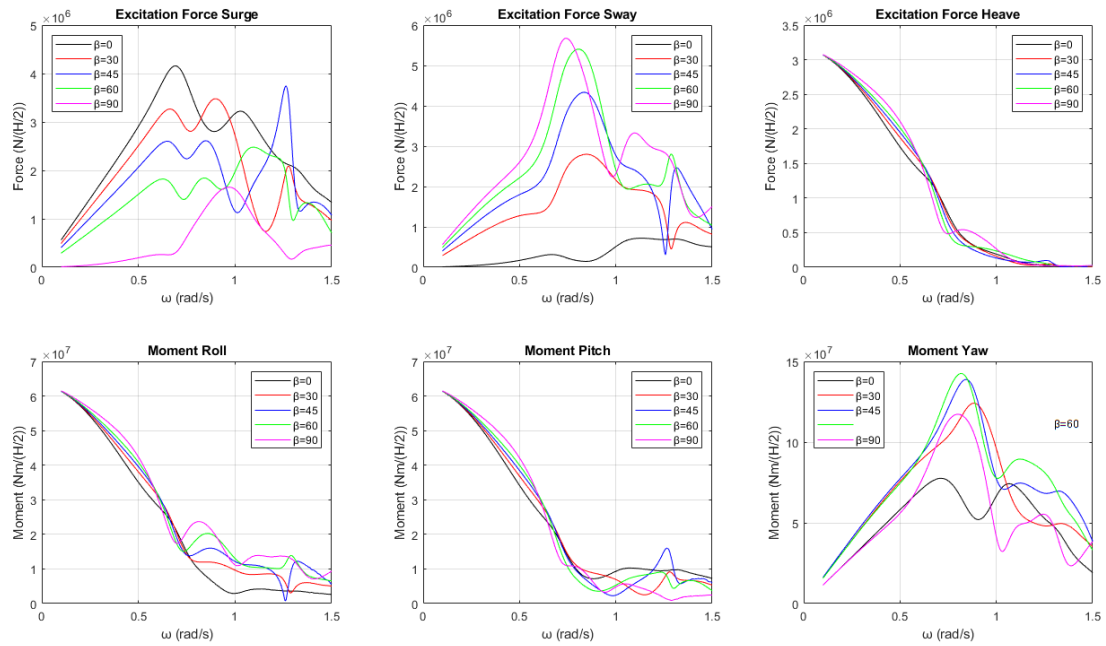
Προκειμένου να ελέγξουμε πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, μελετάμε τη διάταξη για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 69-72 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



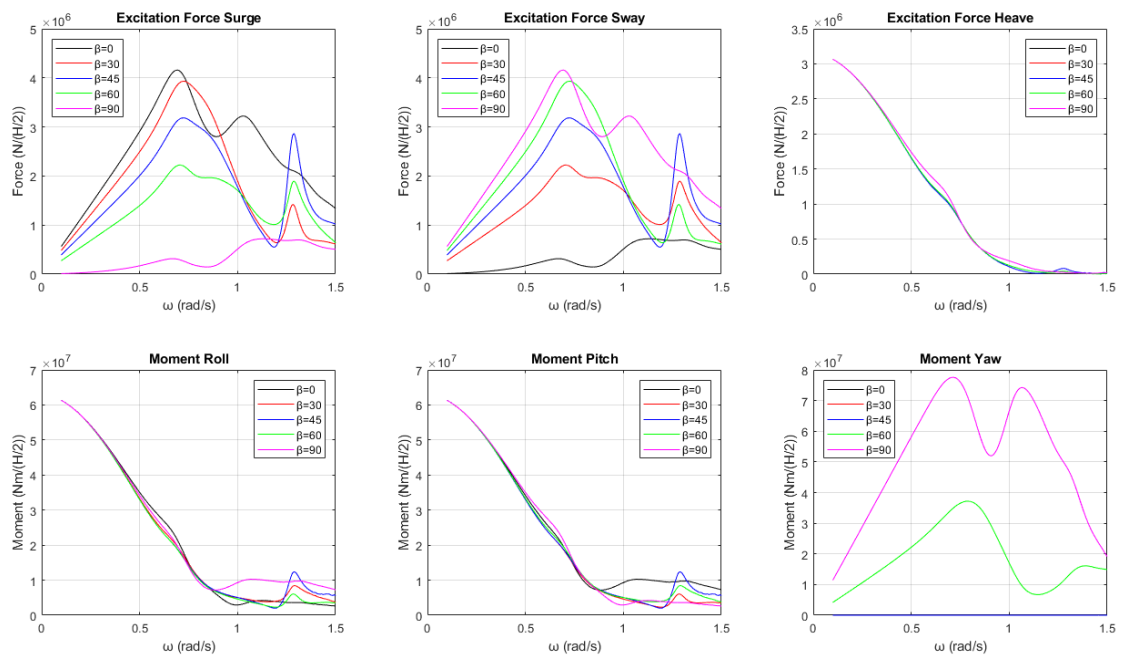
Εικόνα 69: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 70: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 71: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 72: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 69-72 παρατηρούμε πως δεν αλλάζει μόνο η κατανομή των φορτίσεων που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης, αλλά αλλάζουν και οι συχνότητες οι οποίες ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως οι μεγαλύτερες φορτίσεις μετά τη γωνία πρόσπτωσης $\beta = 45^\circ$ εμφανίζονται στις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Προκειμένου να ελέγξουμε τον

τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Στον Πίνακα 18 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

Πίνακας 18: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.10$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.72$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.93$	$\cong 1.28$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.98$	$\cong 1.28$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.97$	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.10$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.81$	$\cong 1.29$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.83$	$\cong 1.31$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.84$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.69$	$\cong 1.03$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.28$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.26$	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.97$	–
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.69$	$\cong 1.03$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.73$	$\cong 1.28$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.72$	$\cong 1.29$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.70$	$\cong 1.29$
$\beta = 90^\circ$	–	–

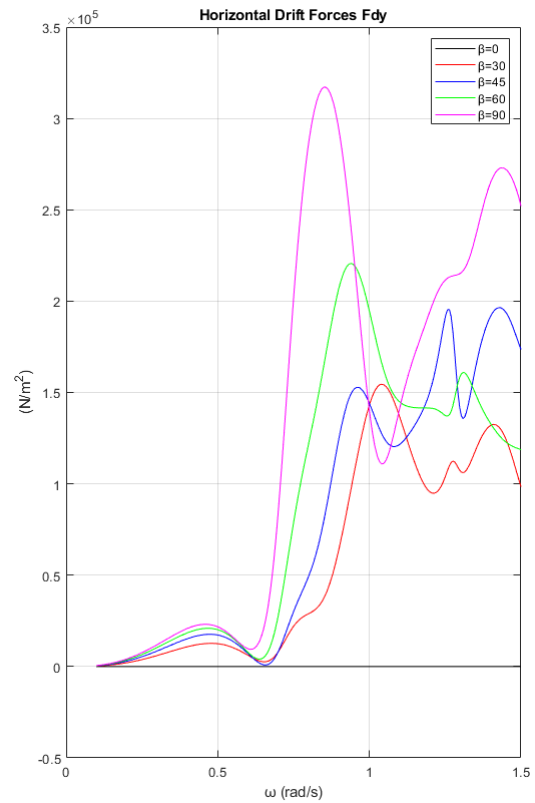
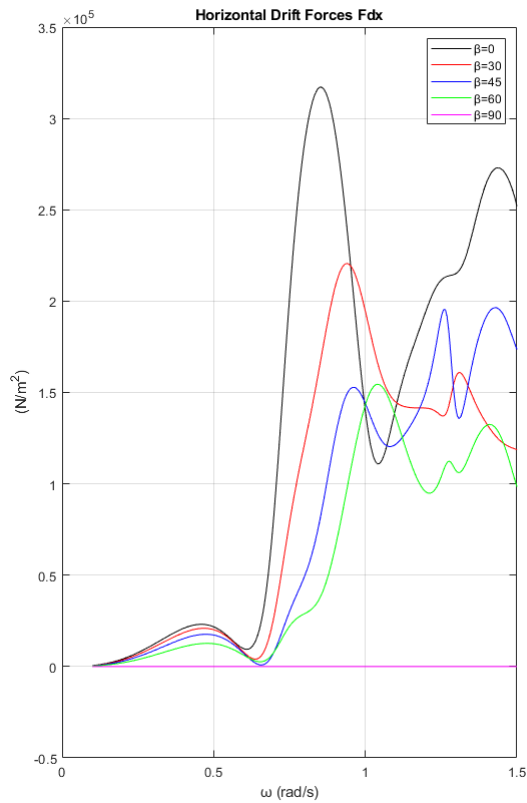
Από τον Πίνακα 18 παρατηρούμε πως όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού γίνει ίση με $\beta = 90^\circ$, τότε το φαινόμενο της παγίδευσης δεν εμφανίζεται σε κανένα κύλινδρο της διάταξης. Όμως για τις υπόλοιπες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού παρατηρούμε πως το φαινόμενο εμφανίζεται μόνο στο κύλινδρο 4 της διάταξης. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε τις μεγαλύτερες φορτίσεις τις παραλαμβάνουν οι κύλινδροι 1 και 2 της διάταξης. Αντίστοιχα όταν η γωνία είναι ίση με $\beta = 30^\circ$, τότε τις μεγαλύτερες φορτίσεις τις δέχεται ο κύλινδρος 2, ενώ όταν γίνει ίση με $\beta = 45^\circ$ ο κύλινδρος 1. Στον Πίνακα 19 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ανάλογα τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y .

Πίνακας 19: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

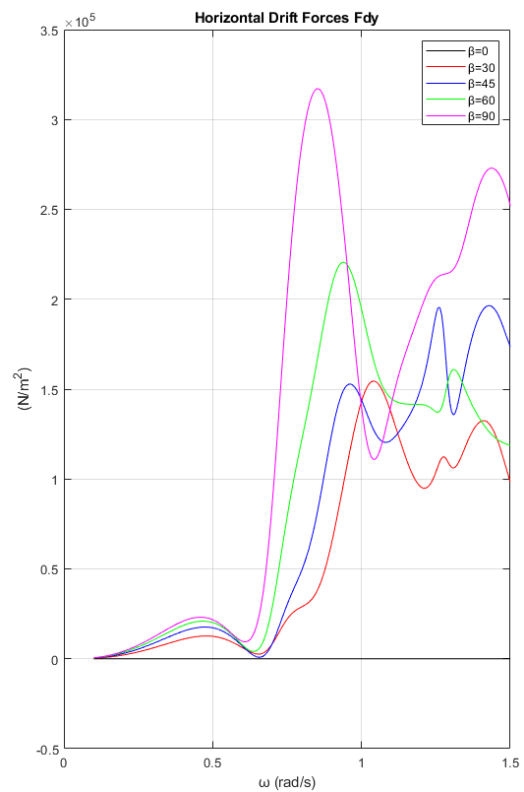
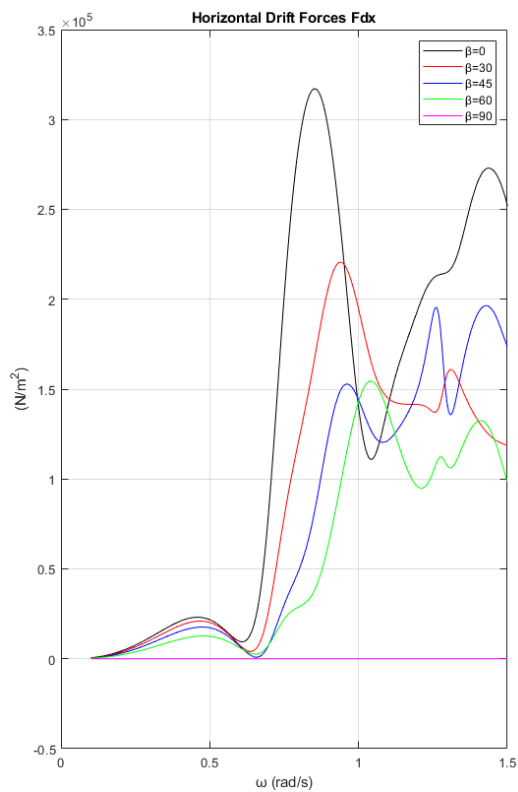
Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.98$	$\cong 1.28$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.93$	$\cong 1.29$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 2.28$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.10$
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.26$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.28$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.69$	$\cong 1.03$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.72$	$\cong 1.31$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.81$	$\cong 1.29$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.10$

Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.70$	$\cong 1.29$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.72$	$\cong 1.29$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.71$	$\cong 1.28$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.69$	$\cong 1.03$

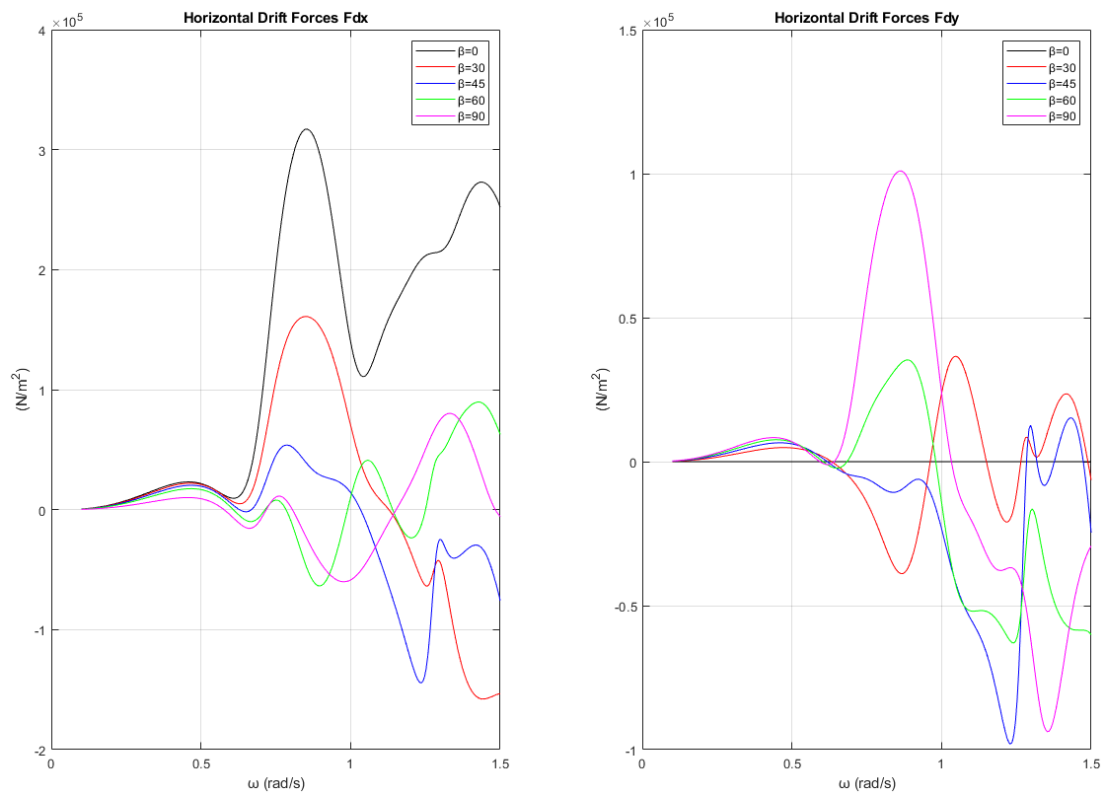
Από τον Πίνακα 19 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κύλινδρους. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται σε κάποιον κύλινδρο αυτό δεν σημαίνει ότι ασκούνται και οι μεγαλύτερες φορτίσεις σε αυτόν. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες φορτίσεις ασκούνται στον κύλινδρο 3. Αντίστοιχα όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$, τότε ο κύλινδρος 2 δέχεται τις μεγαλύτερες φορτίσεις. Όταν η γωνία γίνει ίση με $\beta = 60^\circ$ τότε στον κύλινδρο 3 ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις, ενώ όταν η γωνία είναι ίση με $\beta = 90^\circ$ ασκούνται στους κύλινδρους 1 και 3. Σε πρώτη εκτίμηση συγκρίνοντας τον Πίνακα 18 με τον Πίνακα 19, μπορούμε να υποθέσουμε πως οι κύλινδρο 1, 2 και 3 της διάταξης είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς παρατηρούνται σε αυτούς οι μεγαλύτερες δυνάμεις στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην Εικόνα 73 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 74-77 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



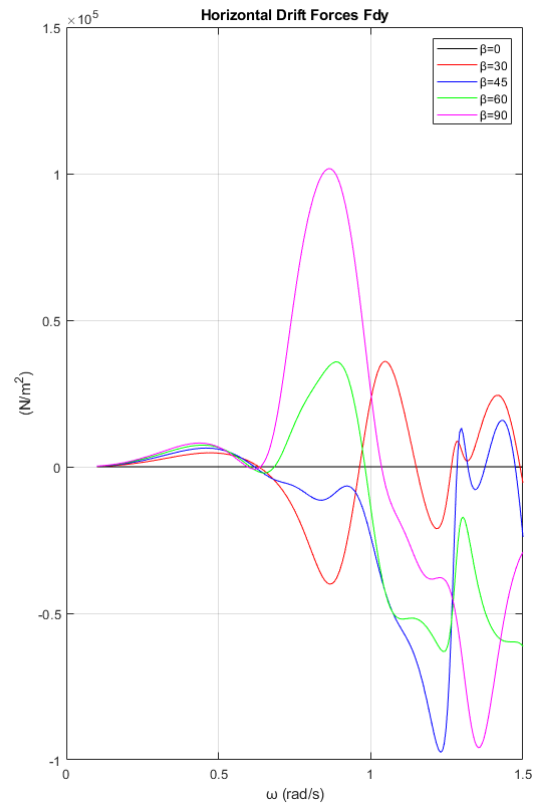
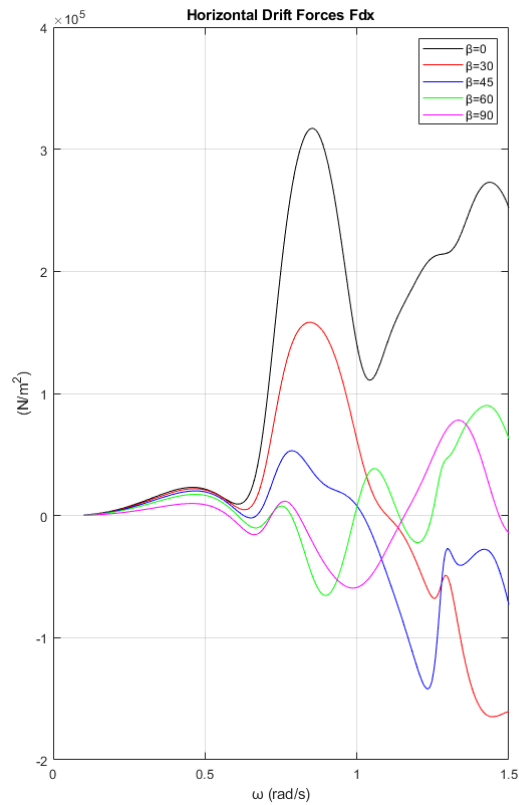
Εικόνα 73: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



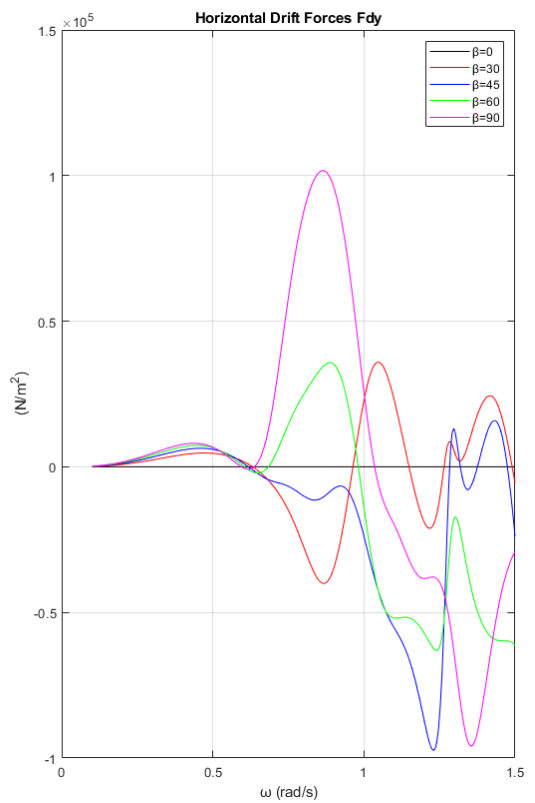
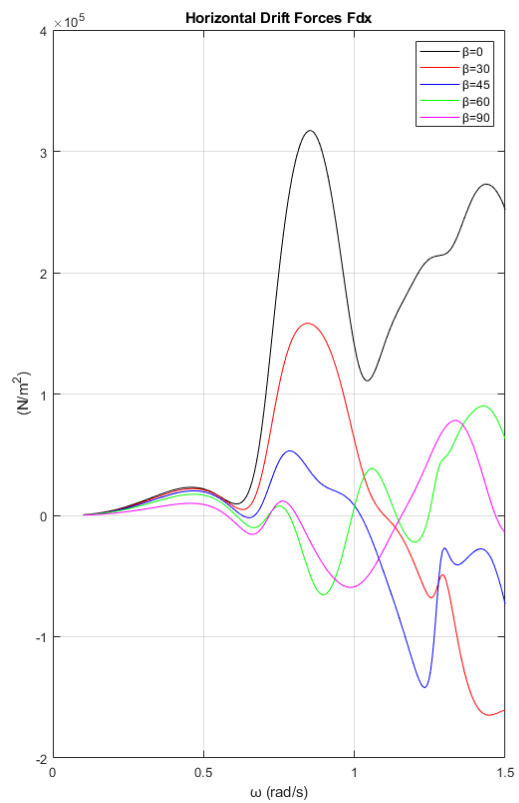
Εικόνα 74: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 75: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 76: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 77: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Όπως και στην περίπτωση των δύο πακτωμένων κυλίνδρων, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 20 φαίνονται οι συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν οι συχνότητες αυτές ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann.

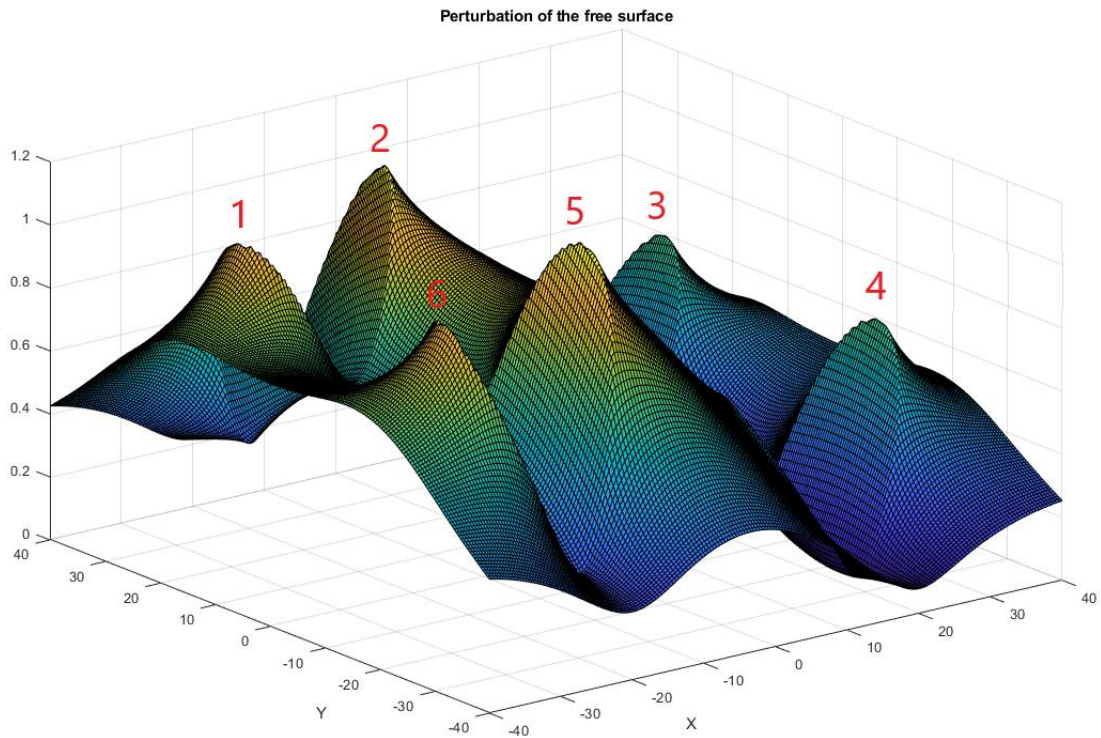
Πίνακας 20: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	Κύλινδροι 1,2	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.81$	Κύλινδρος 2	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδροι 2,3	F_x, F_y	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.81$	Κύλινδρος 3	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	Κύλινδροι 1,3	F_y	ΝΑΙ

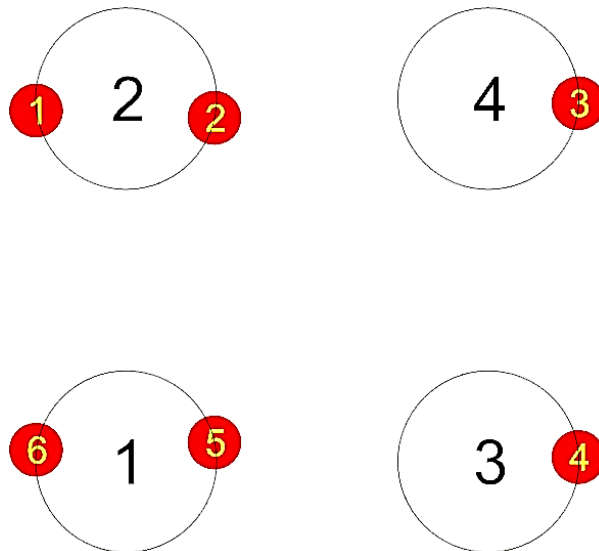
Στην Εικόνα 78 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 21 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 79 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 21: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.03m
2	1.18 m
3	0.74 m
4	0.74 m
5	1.18 m
6	1.03 m



Εικόνα 78: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann των κυλίνδρων 1 και 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



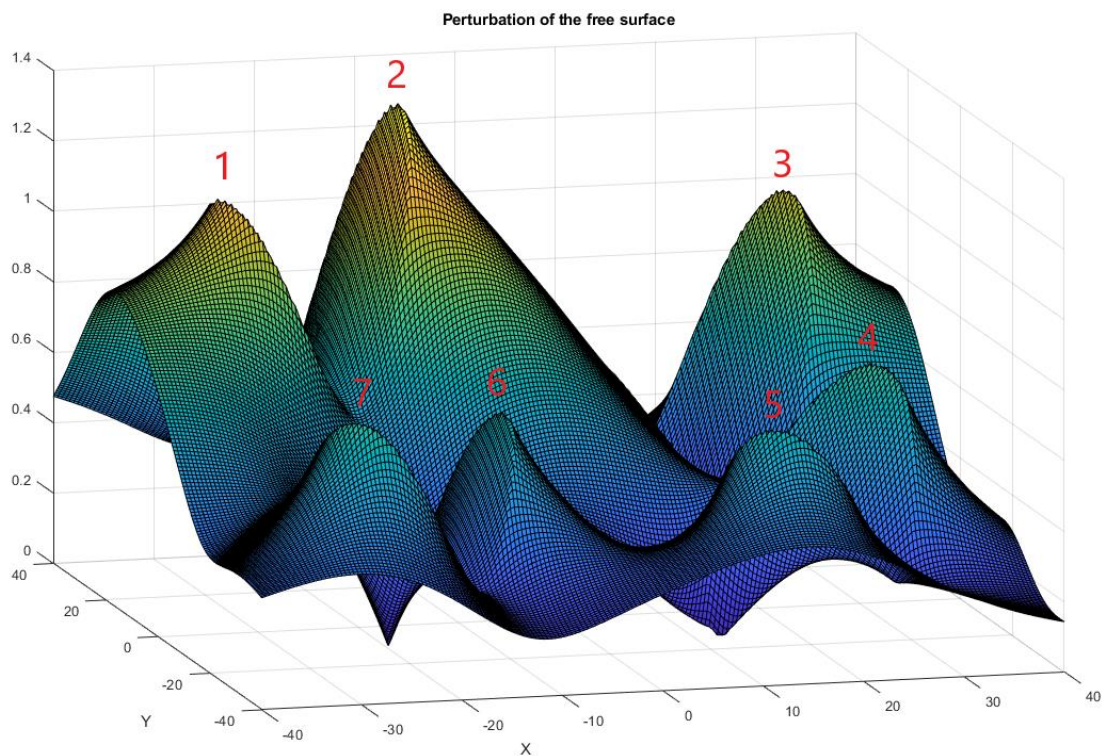
Εικόνα 79: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 80 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 22 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

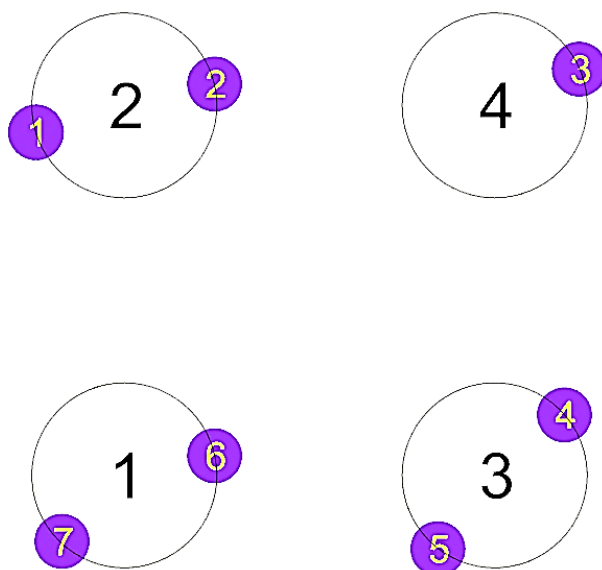
Εικόνα 81 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 22: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.14 m
2	1.36 m
3	1.05 m
4	0.76 m
5	0.66 m
6	0.69 m
7	0.72 m



Εικόνα 80: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

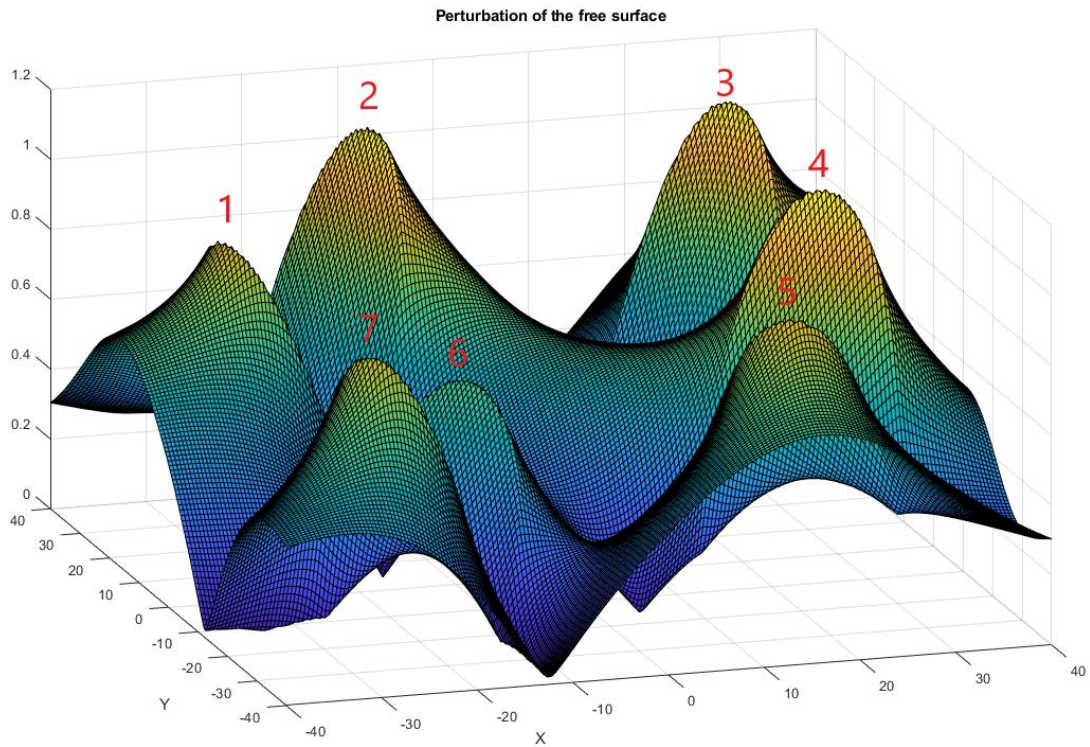


Εικόνα 81: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

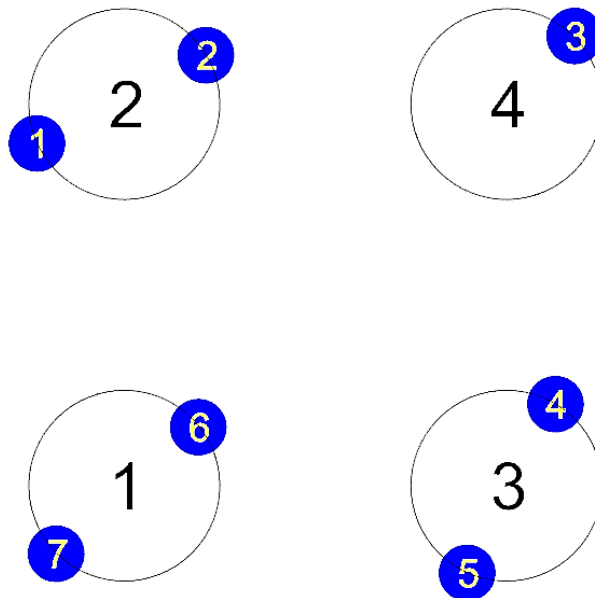
Στην Εικόνα 82 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 23 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 83 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 23: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.91 m
2	1.13 m
3	1.11 m
4	1.13 m
5	0.91 m
6	0.68 m
7	0.88 m



Εικόνα 82: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



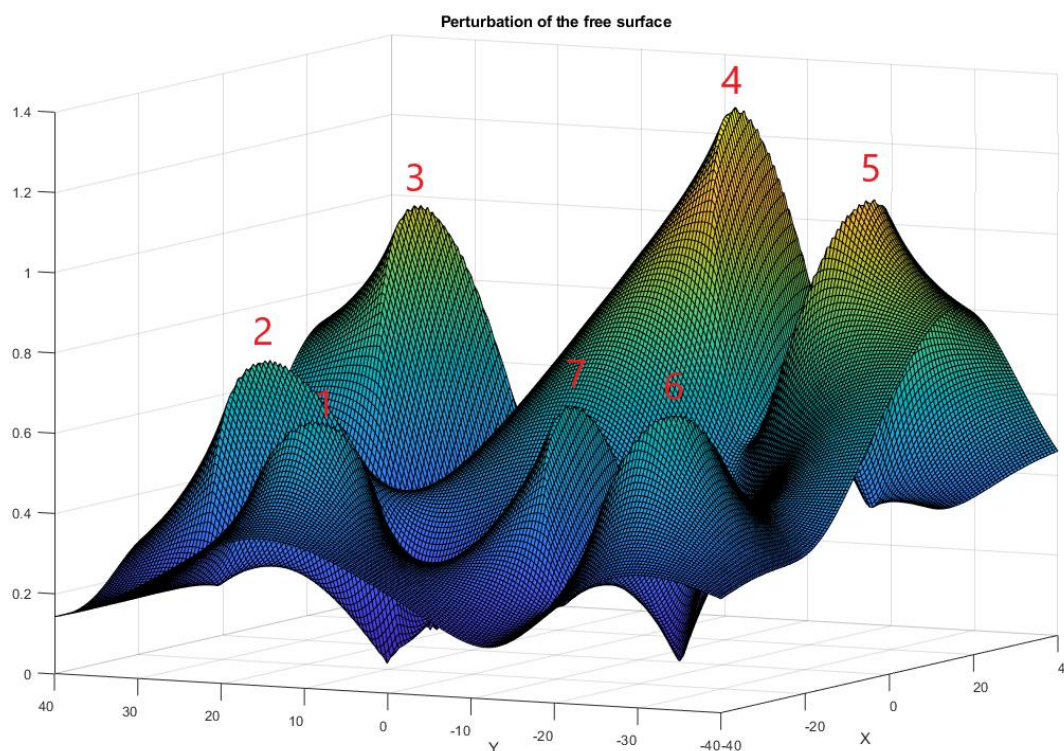
Εικόνα 83: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 84 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης

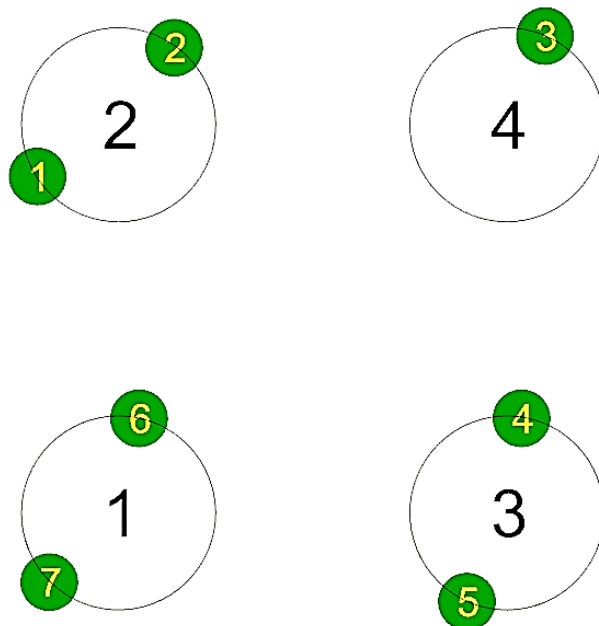
F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 24 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 85 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 24: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.63 m
2	0.73 m
3	1.02 m
4	1.31 m
5	1.13 m
6	0.69 m
7	0.68 m



Εικόνα 84: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

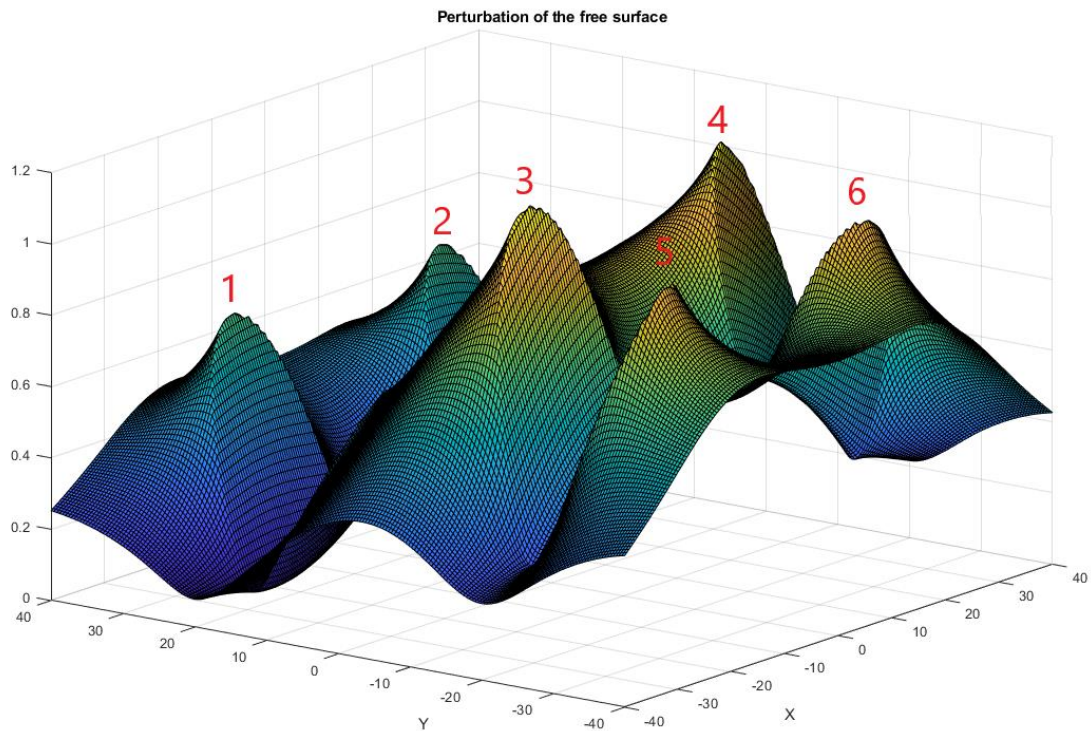


Εικόνα 85: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

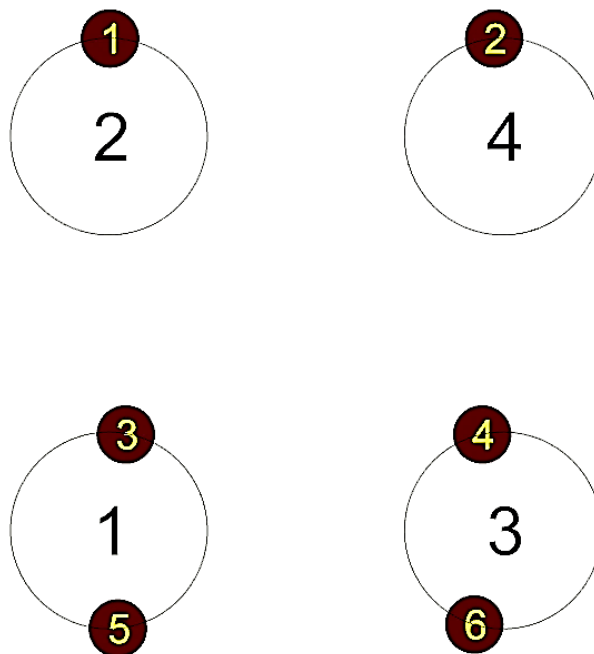
Στην Εικόνα 86 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 25 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 87 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 25: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.74 m
2	0.74 m
3	1.18 m
4	1.18 m
5	1.03m
6	1.03 m



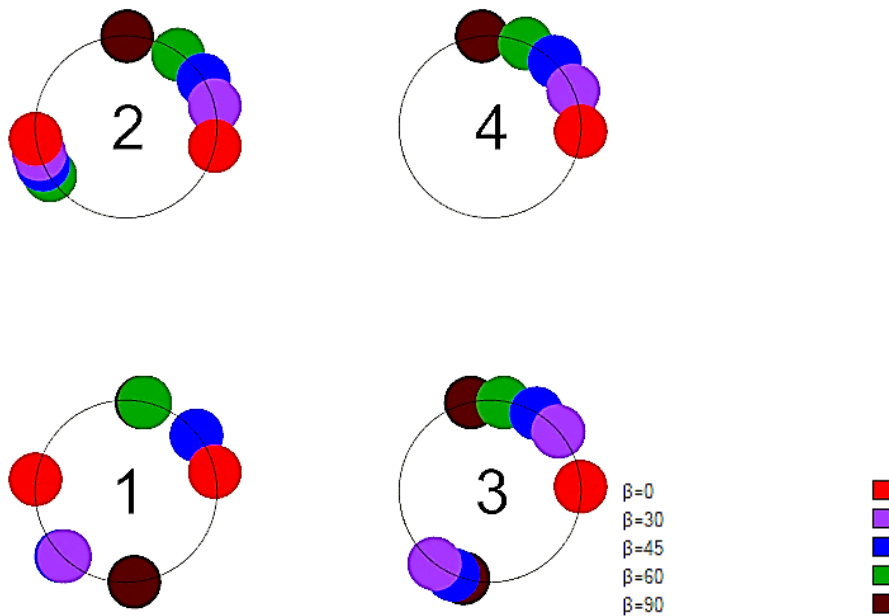
Εικόνα 86: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



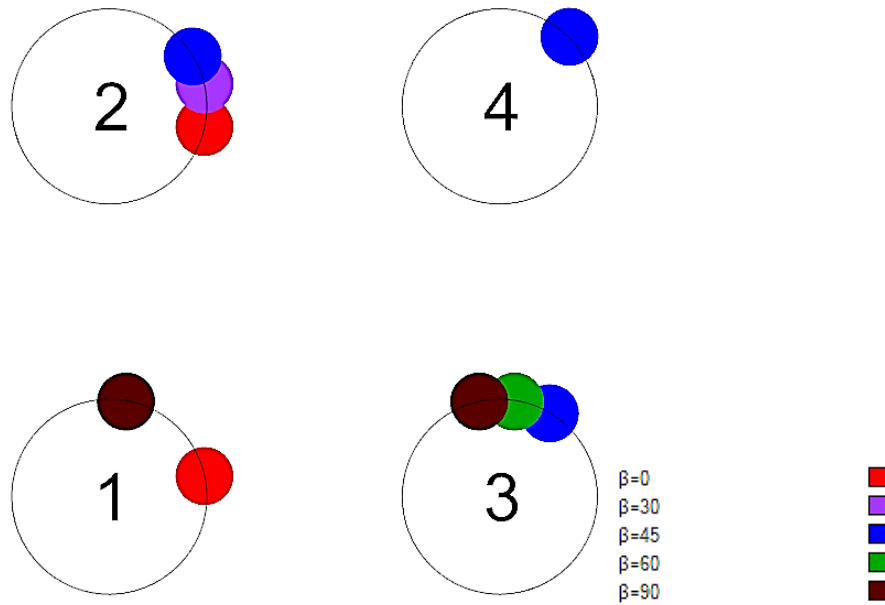
Εικόνα 87: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 88 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 89 φαίνονται οι θέσεις όλων

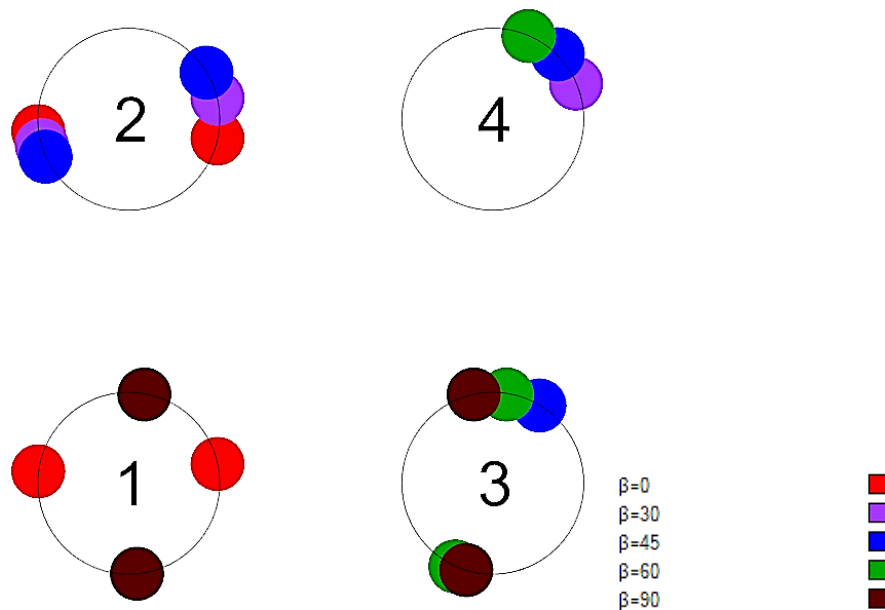
των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 89 συμπεραίνουμε πως στη διάταξη θα μπορούσαν να εγκατασταθούν τρεις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κύλινδρους 1,2 και 3. Οι κύλινδροι 2 και 3 της διάταξης είναι και οι καταλληλότεροι για να εγκατασταθούν οι συσκευές, καθώς σε αυτούς εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου στον κύλινδρο 2 εμφανίζονται για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ, 30^\circ$ και 45° , ενώ στον κύλινδρο 3 για γωνίες $\beta = 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Η Εικόνα 89, όμως, αποτελεί έναν οδηγό για τις θέσεις των μεγίστων κορυφών. Στην Εικόνα 90 φαίνονται οι κορυφές εκείνες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την Εικόνα 90 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι.



Εικόνα 88: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 89: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

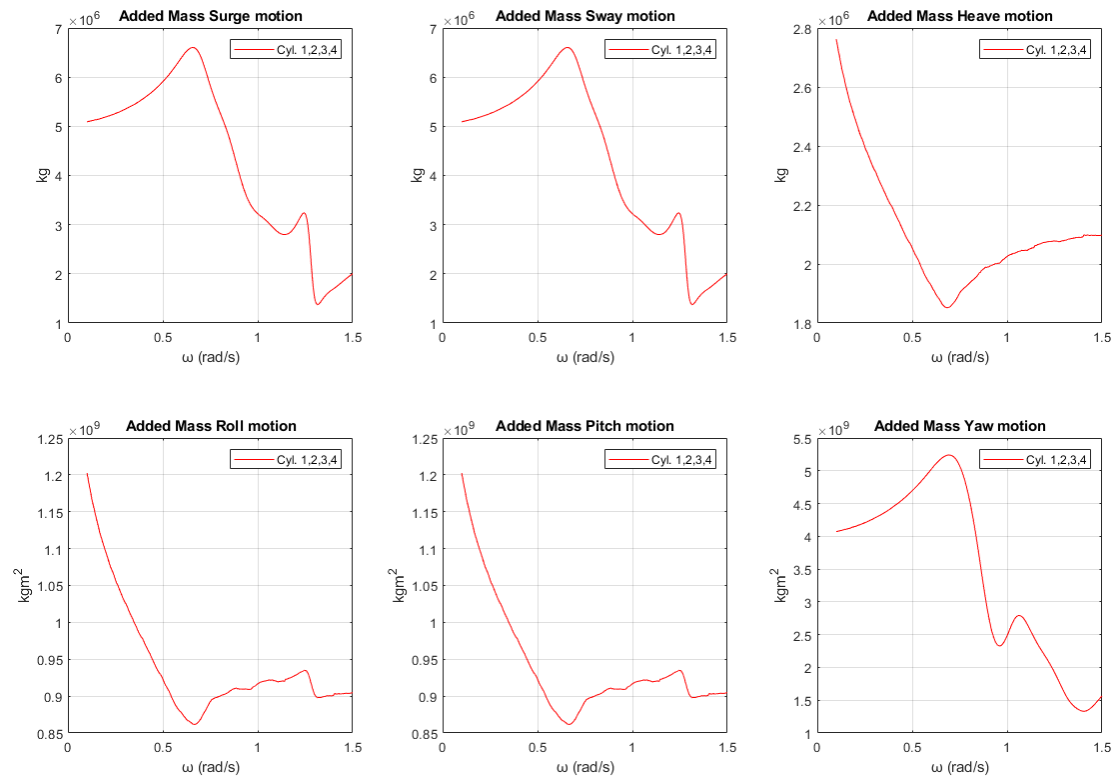


Εικόνα 90: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

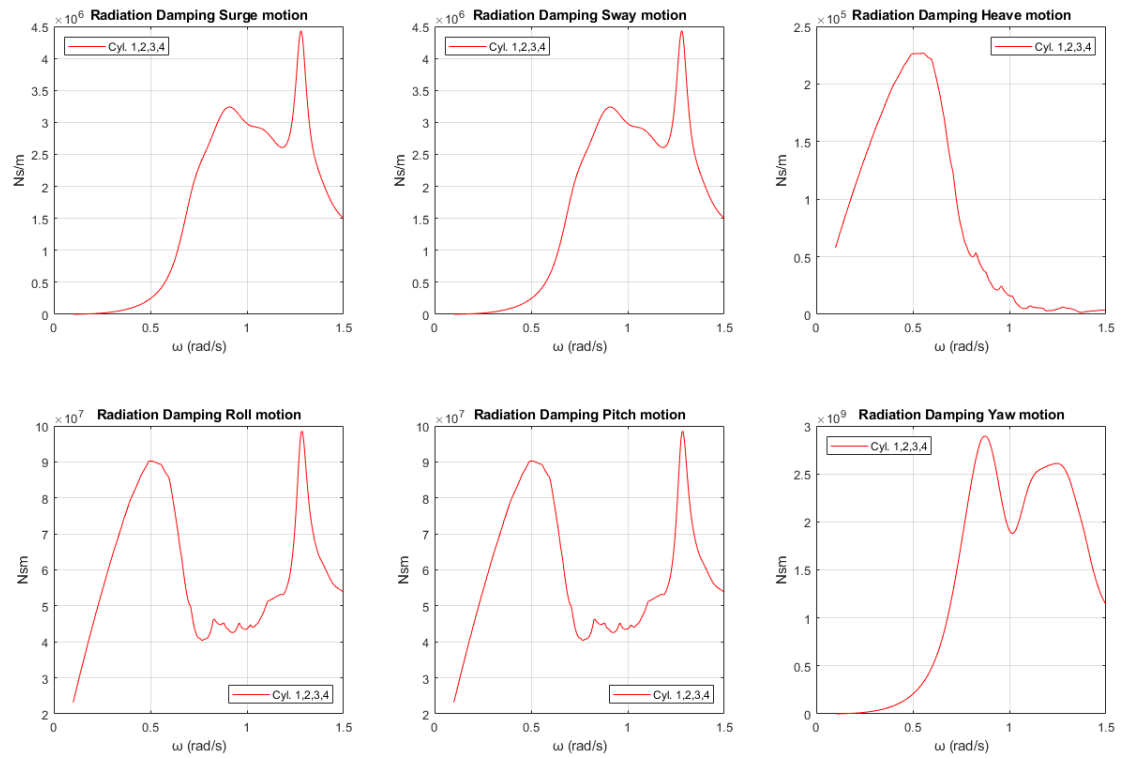
3.3.2 Ελεύθερη ταλάντωση κυλίνδρων – radiation problem

Είναι εξίσου σημαντικό να μελετήσουμε τη διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων στην περίπτωση που αυτοί εκτελούν ελεύθερη ταλάντωση. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης δεν εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού παρά μόνο από την γεωμετρία του σώματος. Στην

Εικόνα 91 φαίνονται οι συντελεστές πρόσθετης μάζας στους κυλίνδρους της διάταξης και αντίστοιχα στην Εικόνα 92 φαίνονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

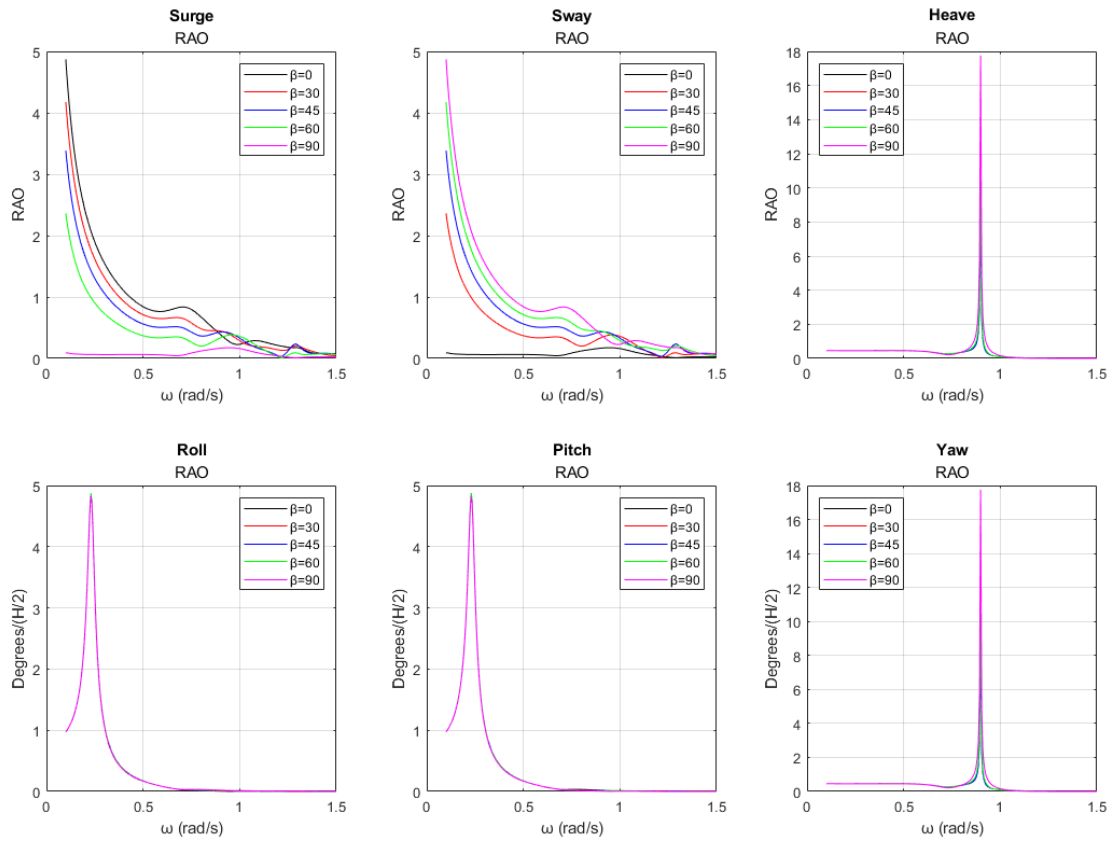


Εικόνα 91: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

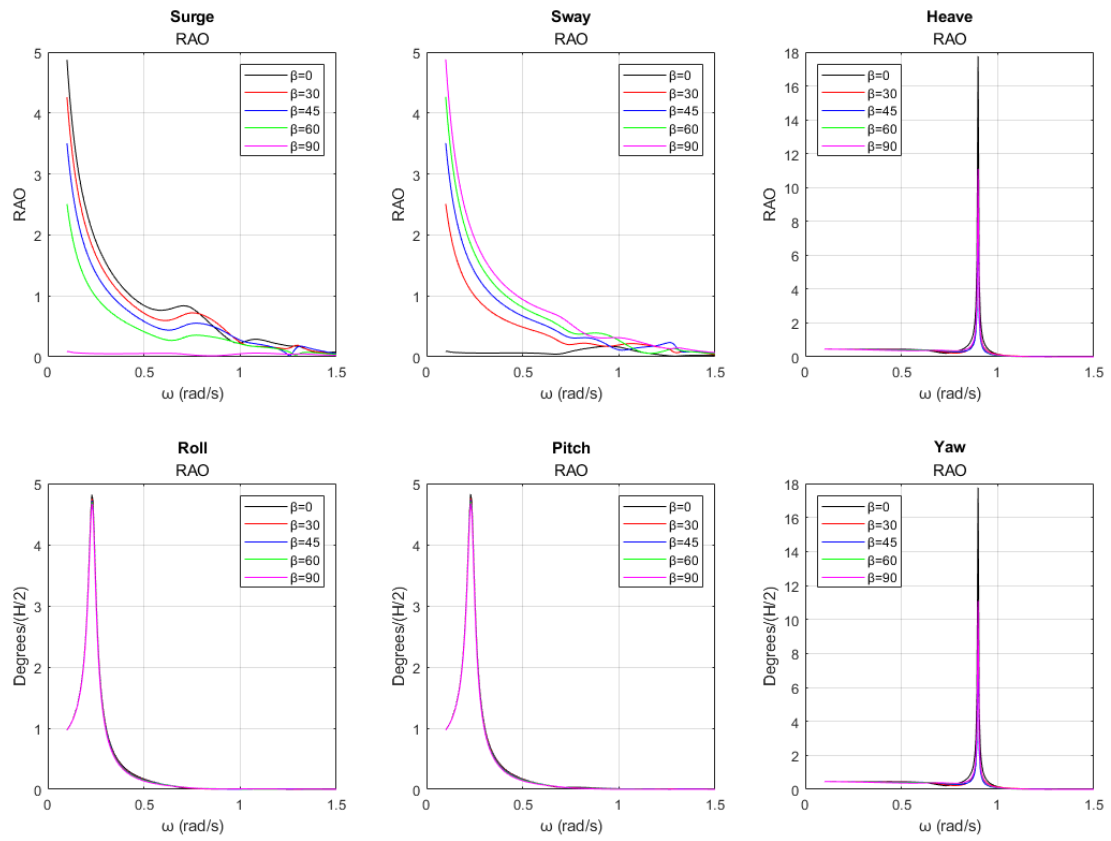


Εικόνα 92: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

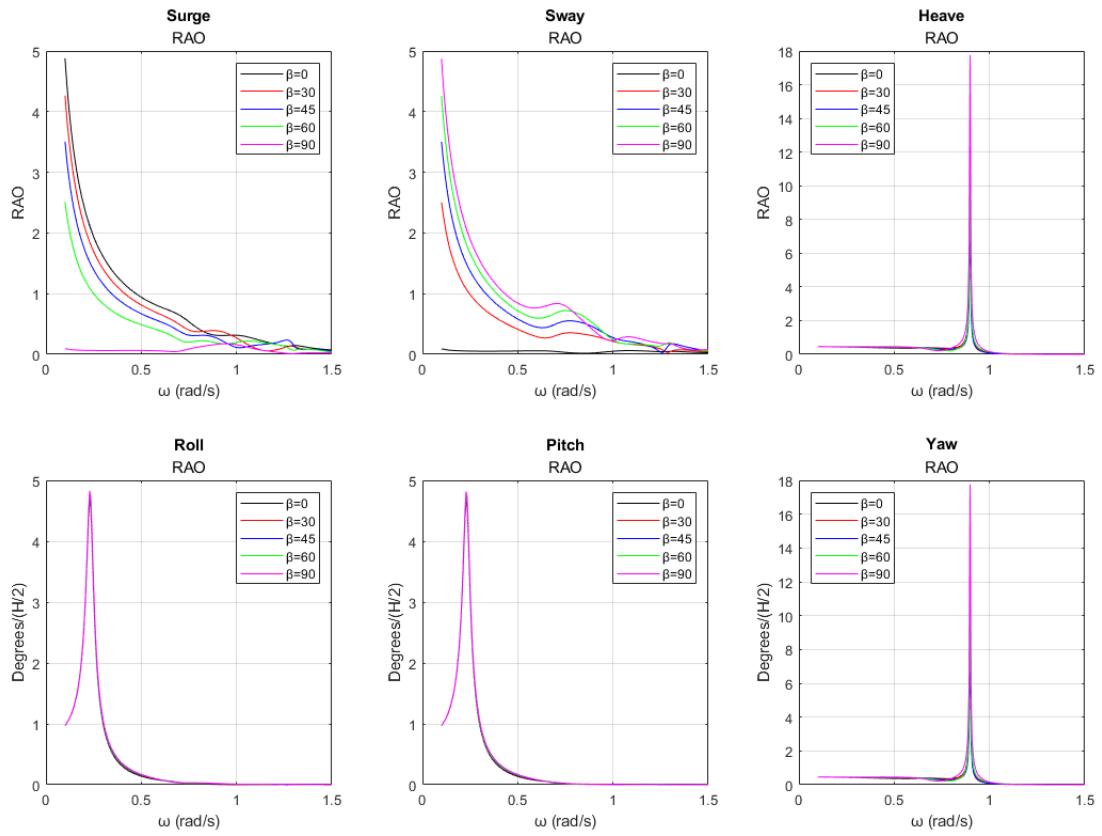
Οι κινήσεις των κυλίνδρων ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στις Εικόνες 93-96.



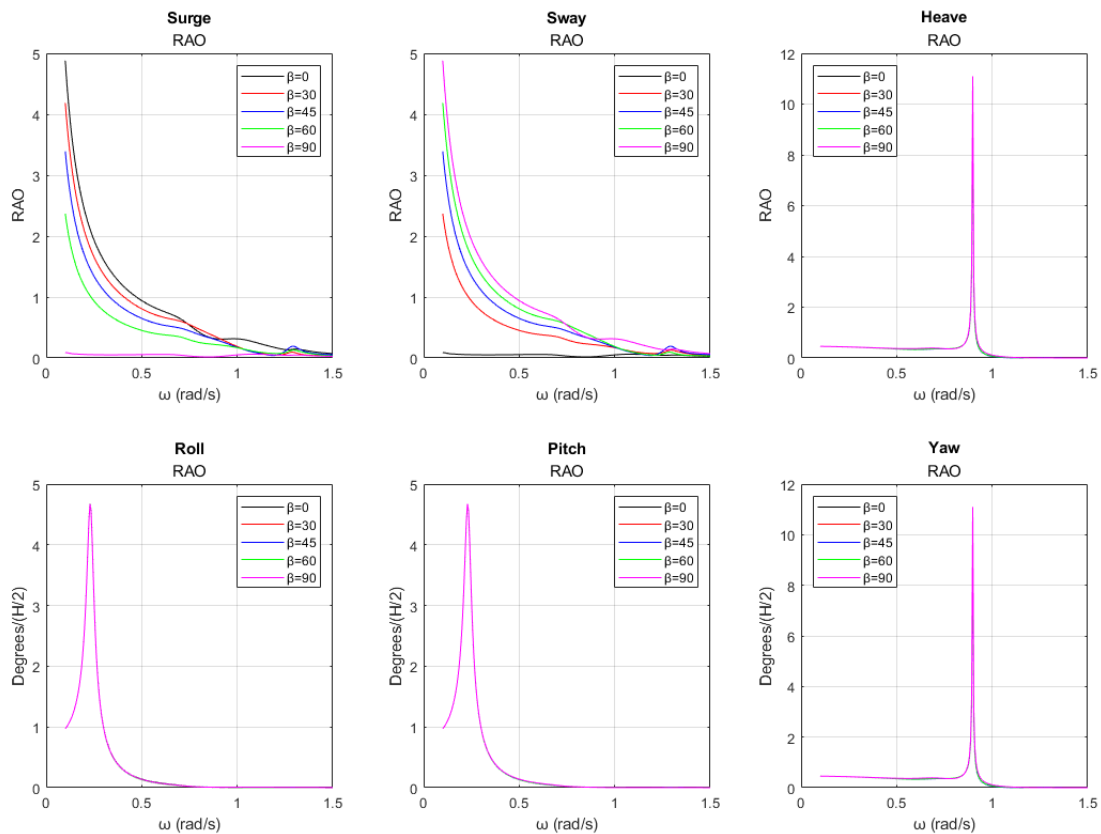
Εικόνα 93: Κινήσεις κυλίνδρου 1 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 94: Κινήσεις κυλίνδρου 2 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

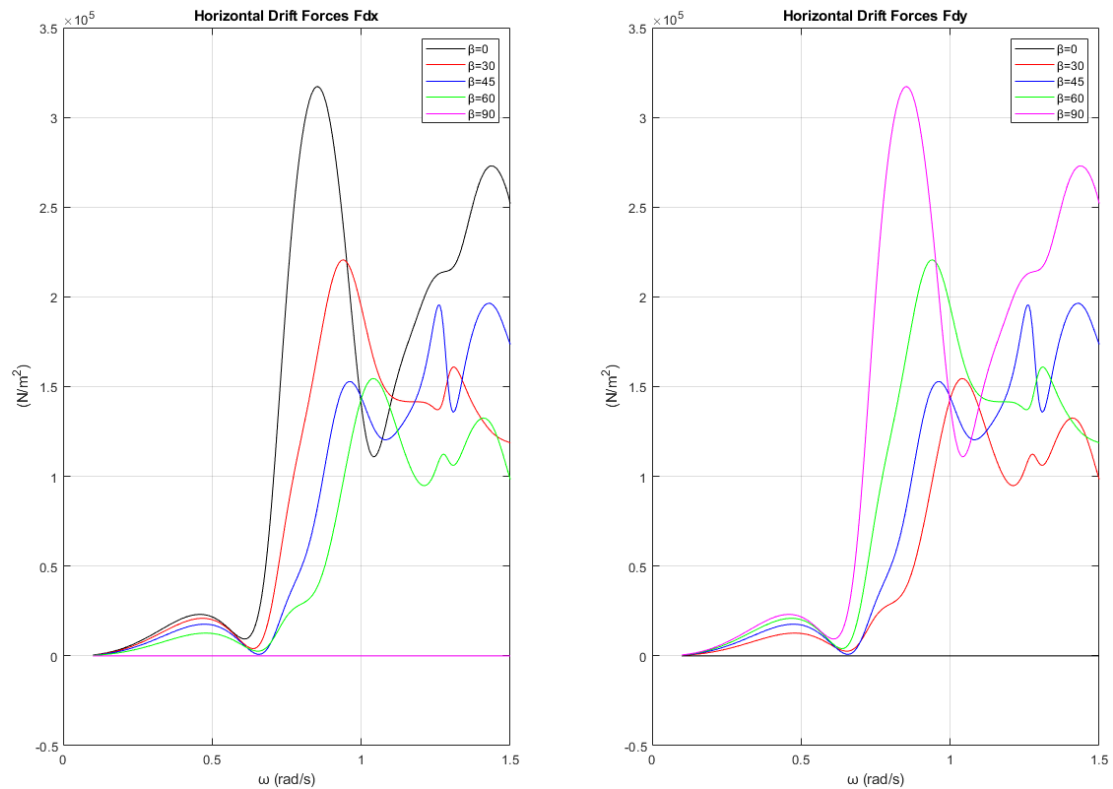


Εικόνα 95: Κινήσεις κυλίνδρου 3 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

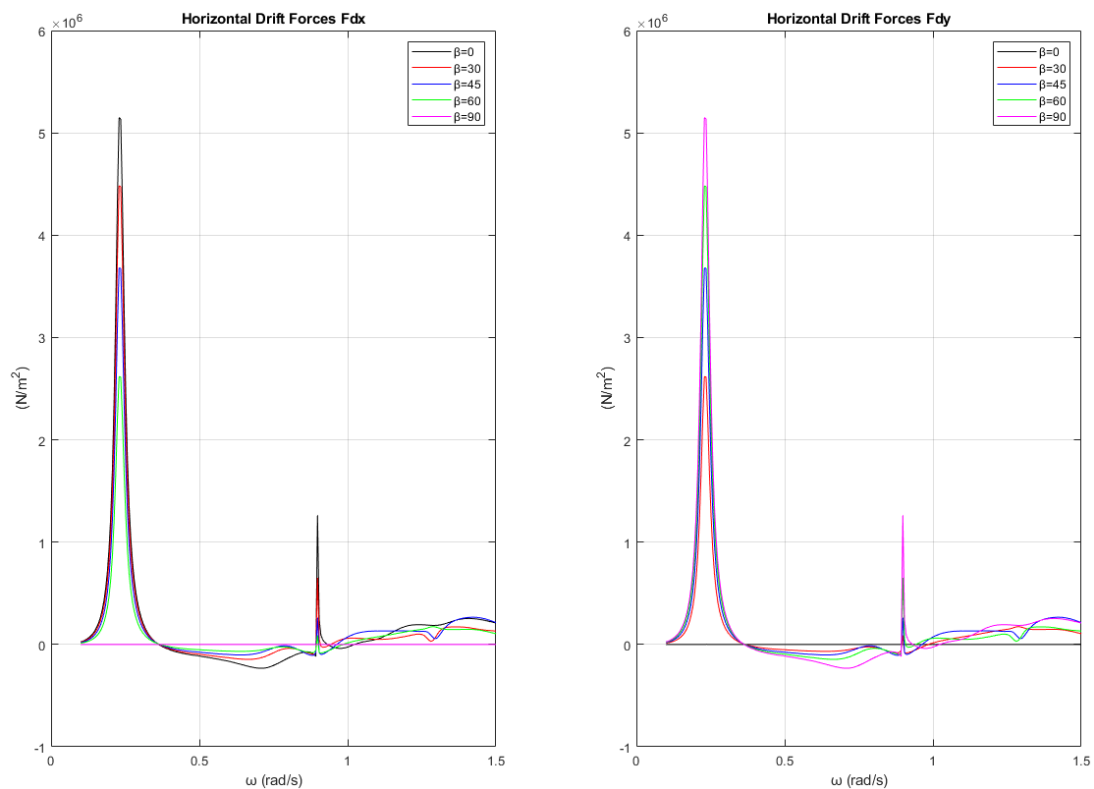


Εικόνα 96: Κινήσεις κυλίνδρου 4 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

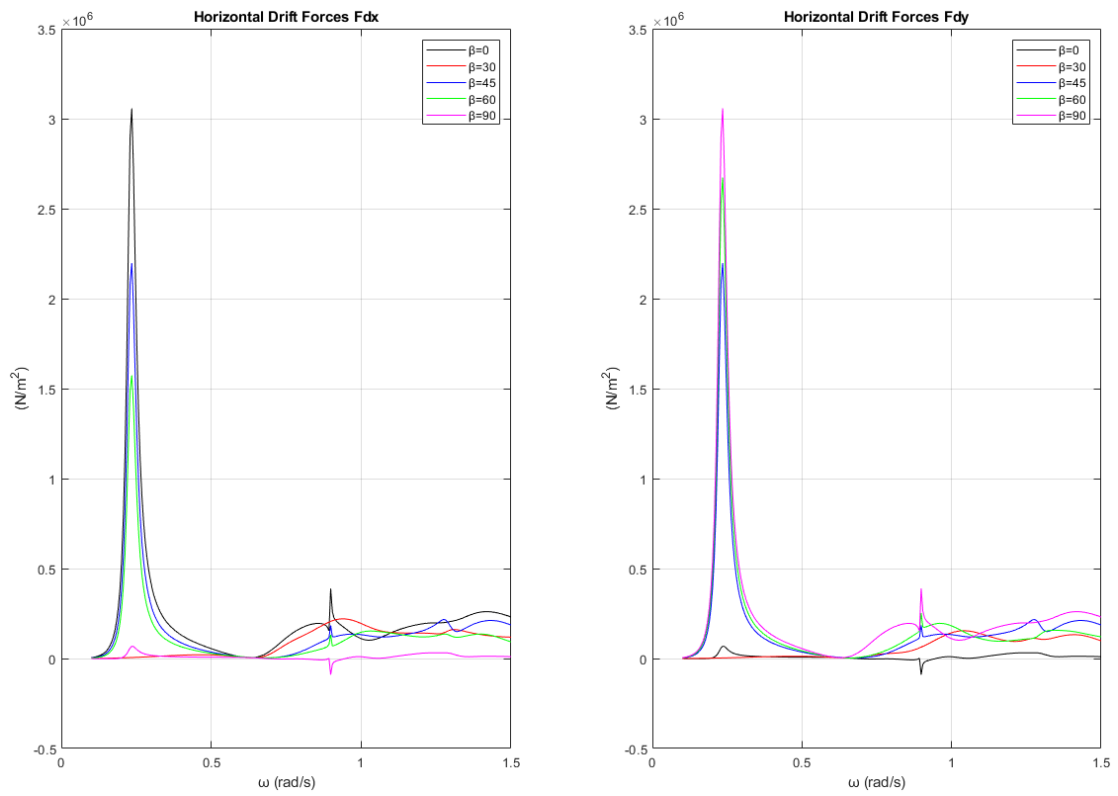
Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν όταν αυτοί κινούνται, αφού προέρχονται από την επίλυση του προβλήματος περίθλασης, όμως αλλάζουν οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 97 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Αντίστοιχα στην Εικόνα 98 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη λόγω των κινήσεων των κυλίνδρων για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στις Εικόνες 99-102 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



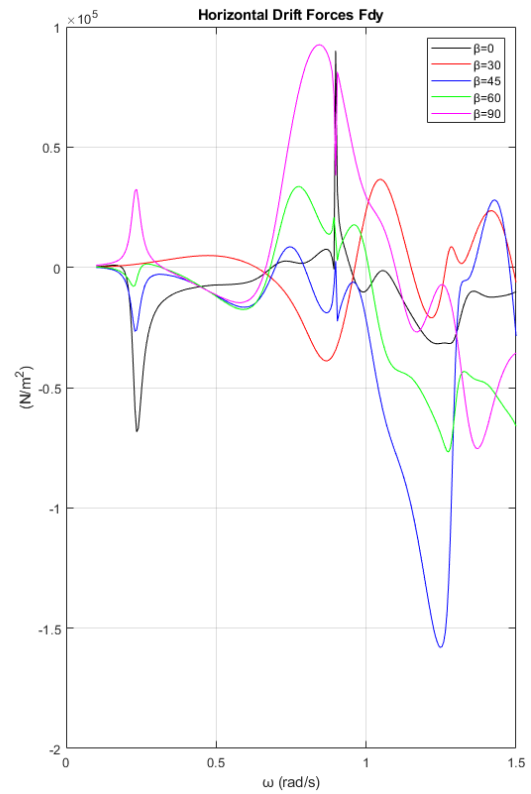
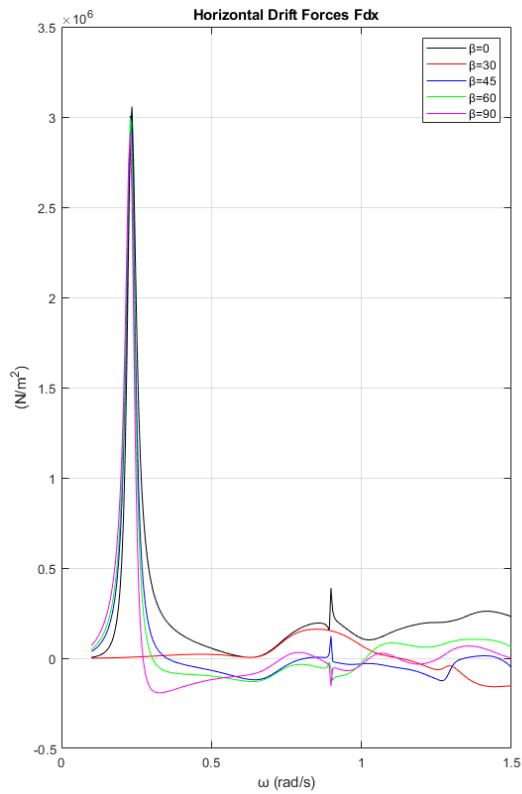
Εικόνα 97: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – diffraction problem



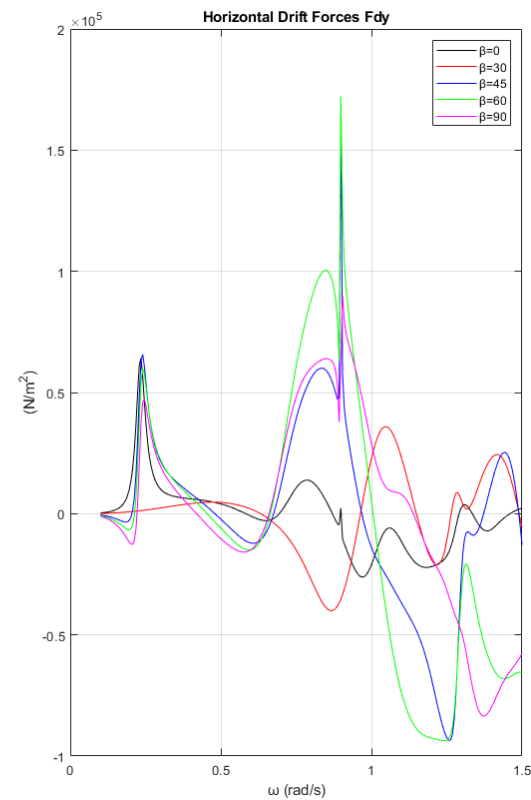
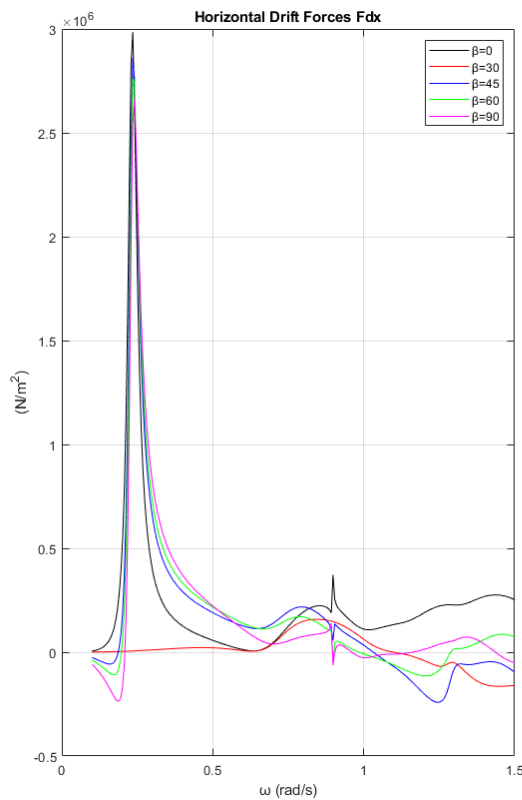
Εικόνα 98: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη λόγω των κινήσεων των κυλίνδρων για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – radiation problem



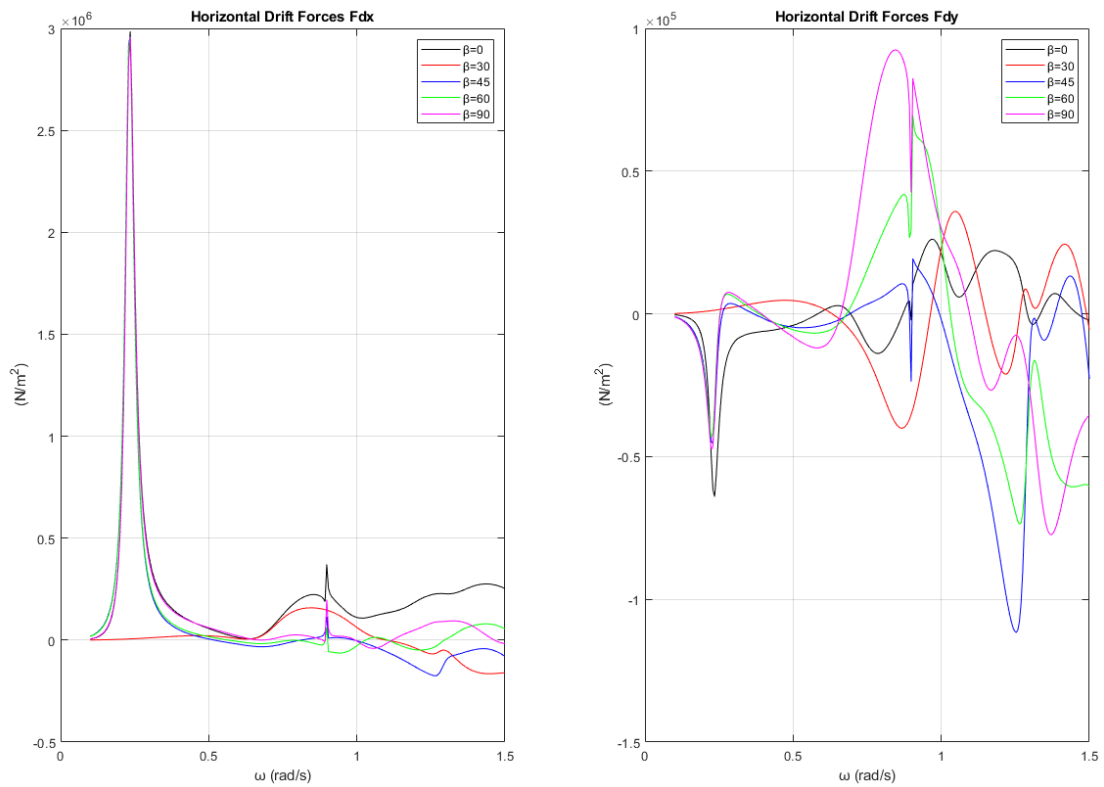
Εικόνα 99: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – radiation problem



Εικόνα 100: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – radiation problem



Εικόνα 101: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – radiation problem

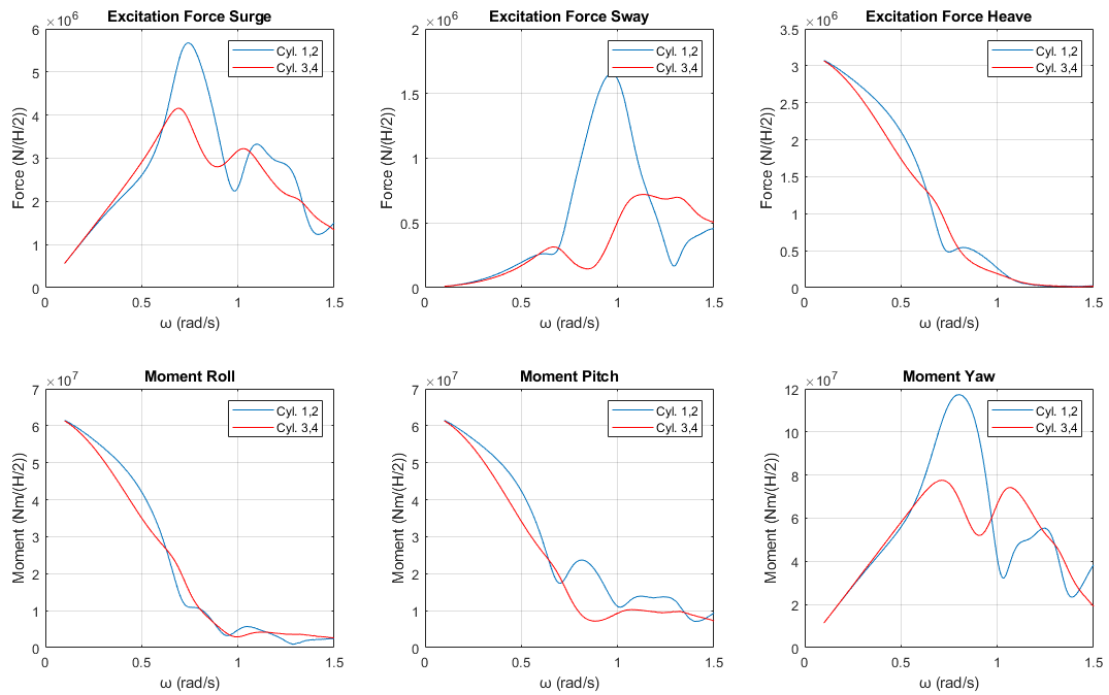


Εικόνα 102: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού – radiation problem

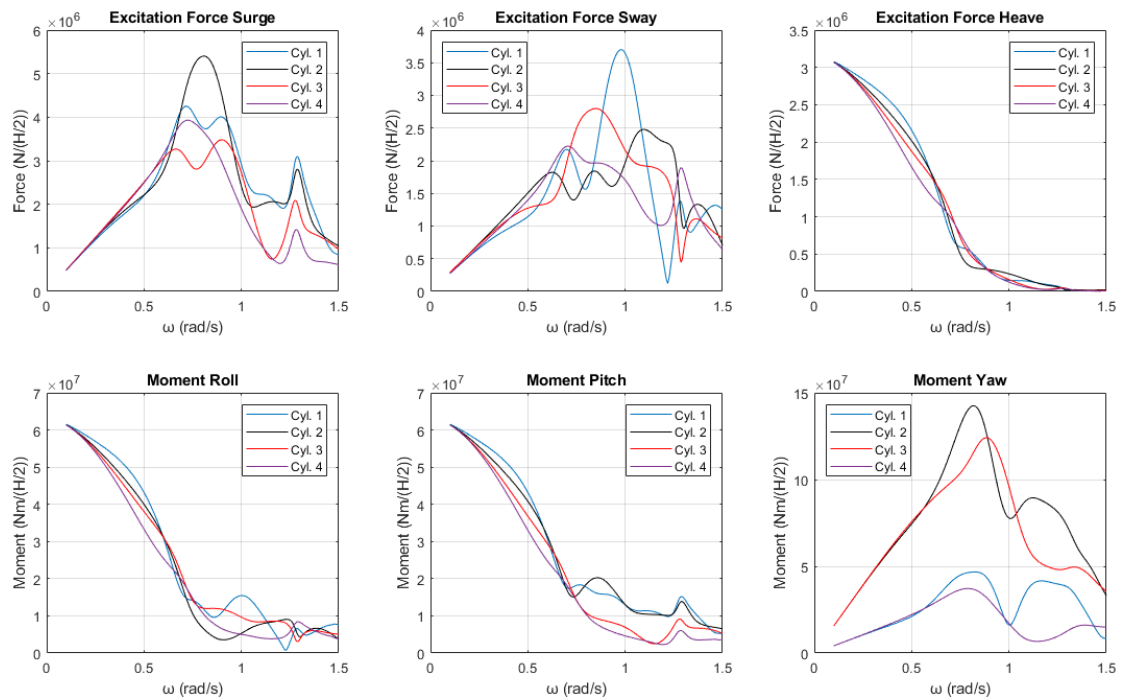
Προκειμένου να δούμε πως αλλάζει το μέτρο τη ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω των κινήσεων των σωμάτων, θα το αναπαραστήσουμε στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στον Πίνακα 26 παρουσιάζεται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann. Στις Εικόνες 103-107 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης ανά γωνία πρόσπτωσης κυματισμού.

Πίνακας 26: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

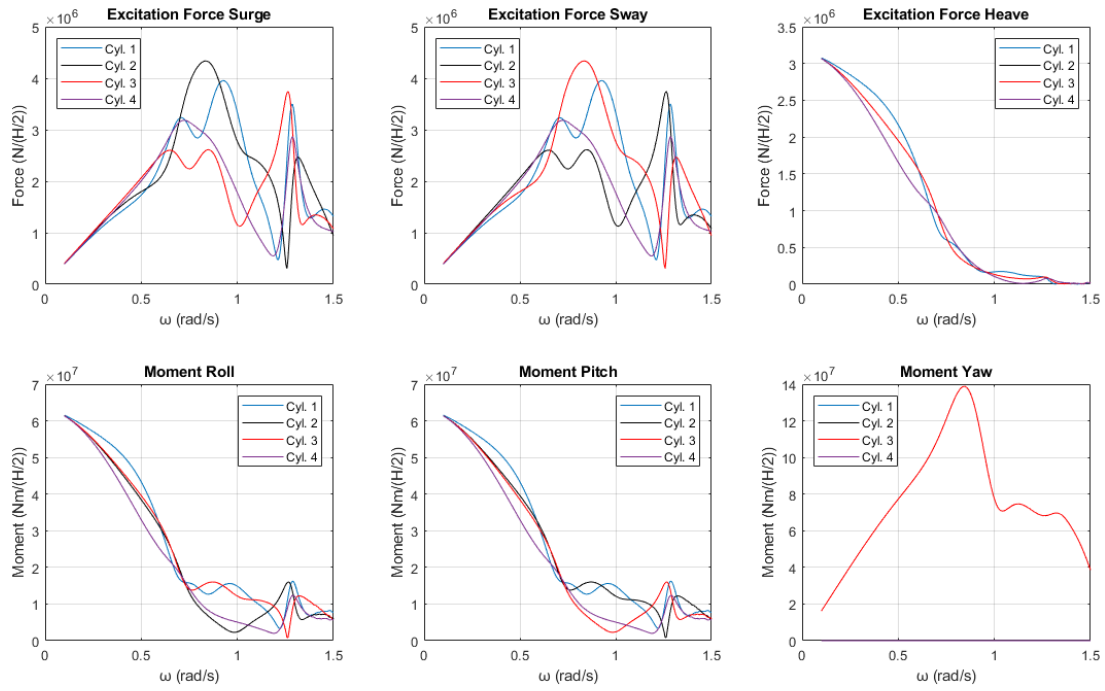
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	Κύλινδροι 1,2	F_x	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.81$	Κύλινδρος 2	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδροι 2,3	F_x/F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.81$	Κύλινδρος 3	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	Κύλινδροι 1,3	F_y	NAI



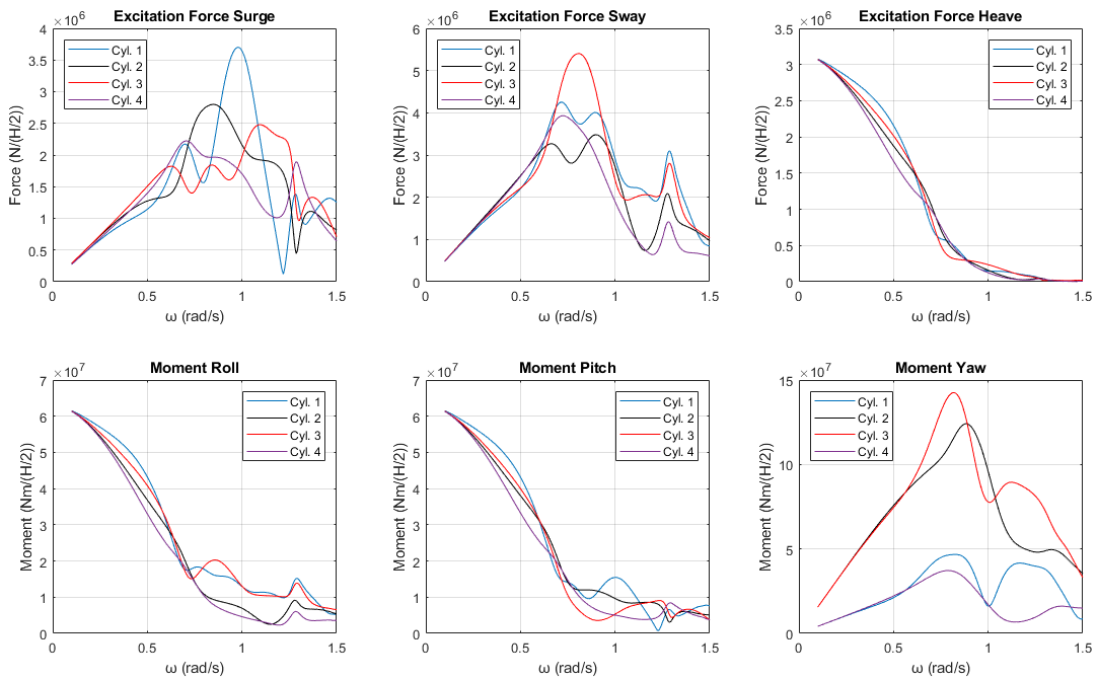
Εικόνα 103: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$



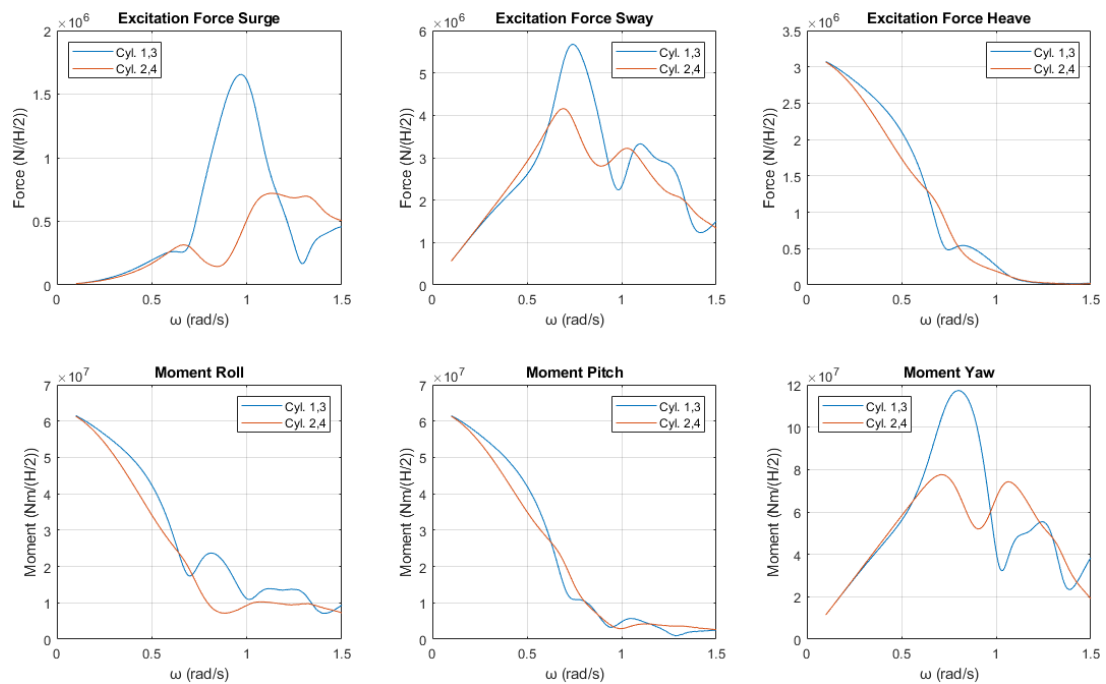
Εικόνα 104: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$



Εικόνα 105: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$



Εικόνα 106: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$

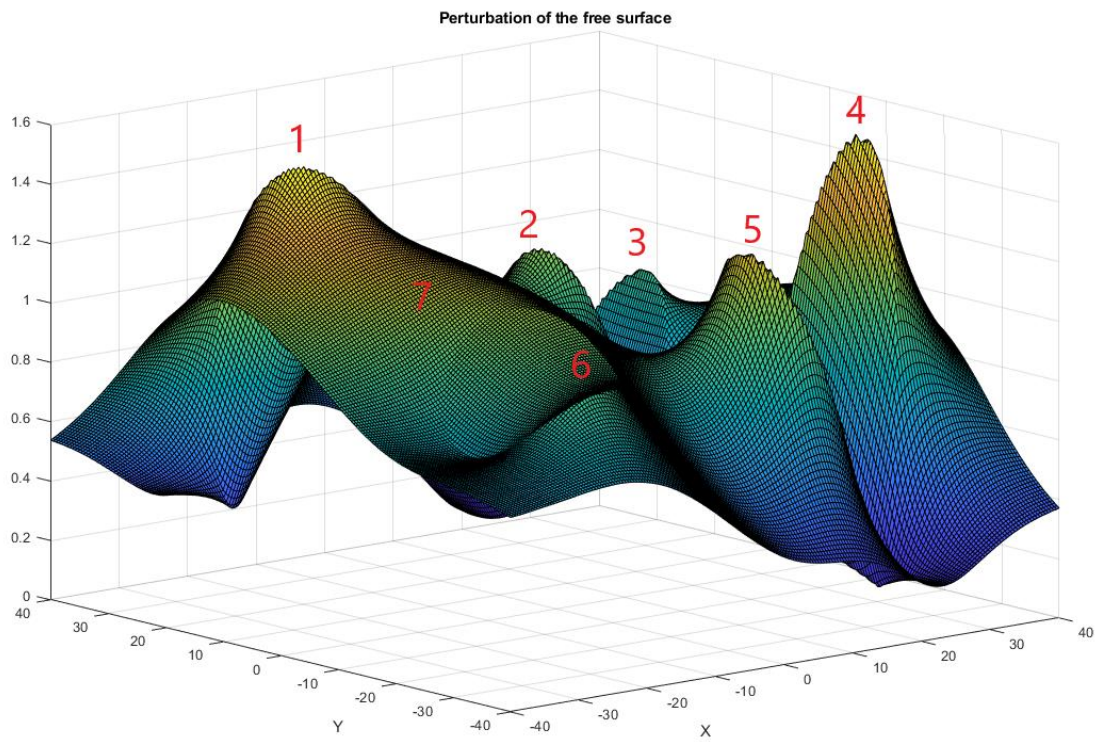


Εικόνα 107: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

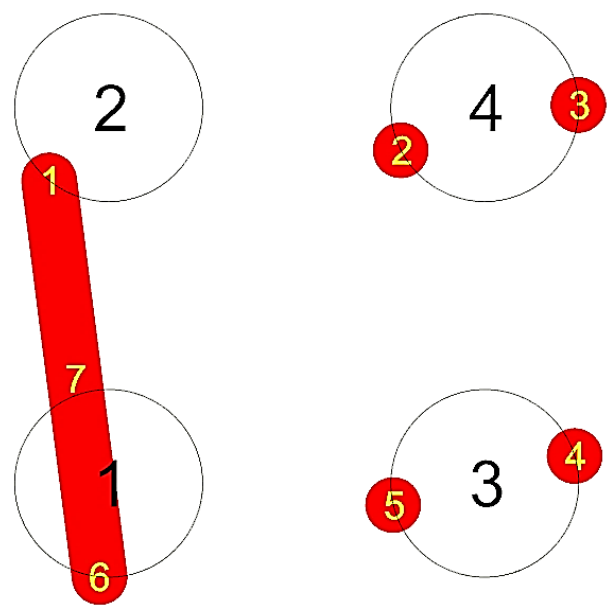
Στην Εικόνα 108 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 27 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 109 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως στη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 27: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.54m
2	1.10 m
3	0.93 m
4	1.56 m
5	1.26 m
6	0.93 m
7	1.23 m



Εικόνα 108: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



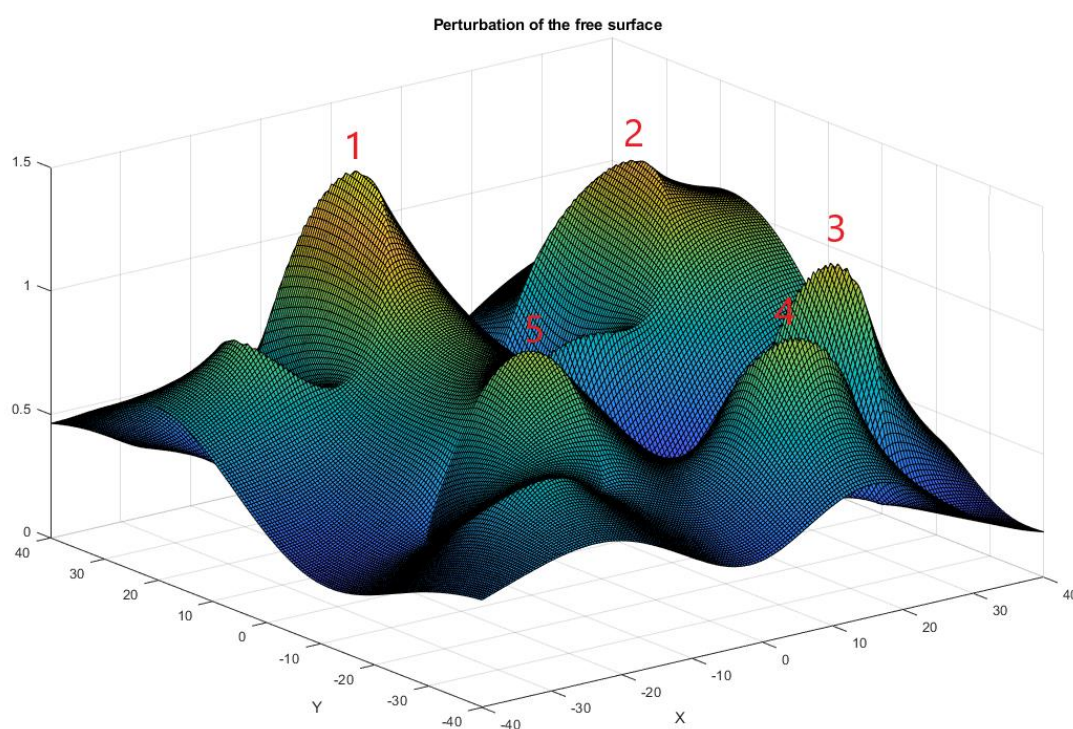
Εικόνα 109: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 110 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 2 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 28 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

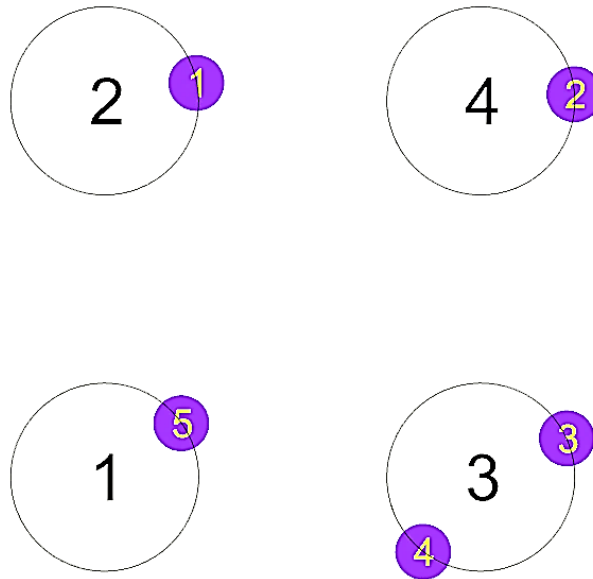
Εικόνα 111 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς την συχνότητα αυτή.

Πίνακας 28: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.44 m
2	1.22 m
3	1.13 m
4	1.04 m
5	1.03 m



Εικόνα 110: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 2 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

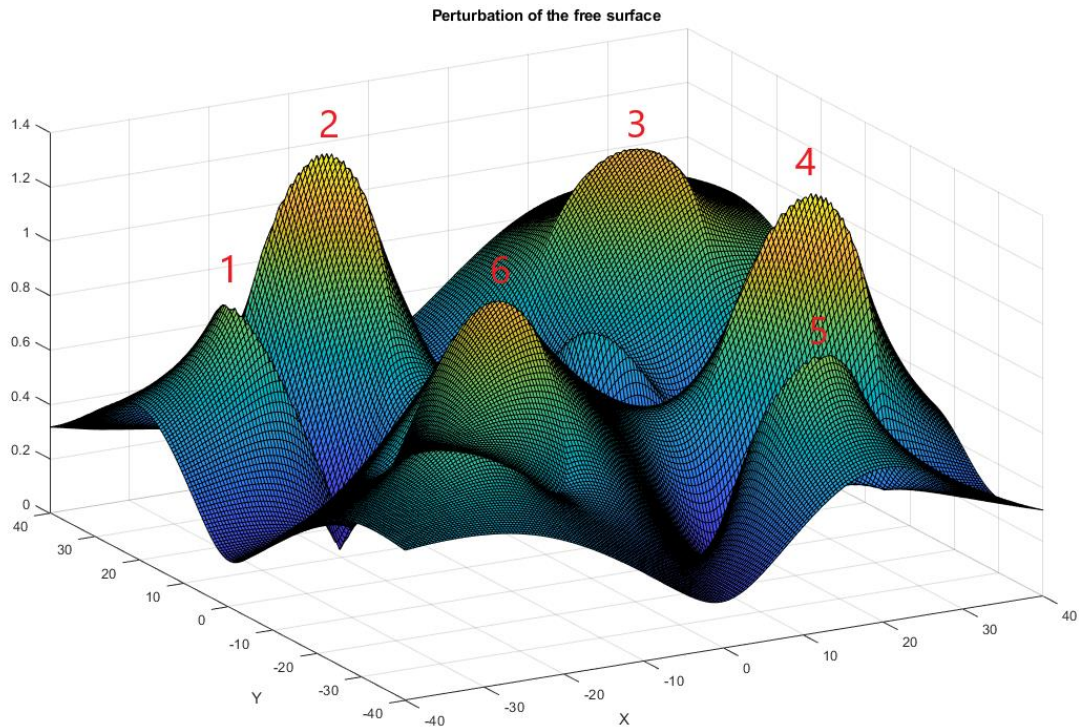


Εικόνα 111: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

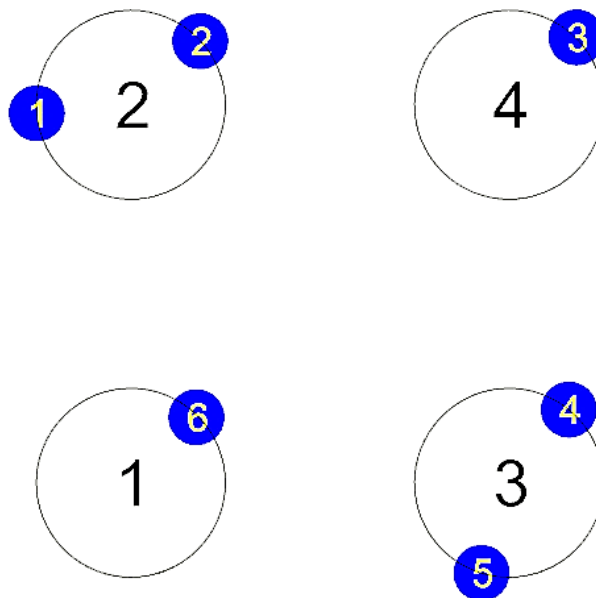
Στην Εικόνα 112 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 29 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 113 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς την συχνότητα αυτή.

Πίνακας 29: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.90 m
2	1.31 m
3	1.13 m
4	1.31 m
5	0.90 m
6	1.10 m



Εικόνα 112: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 2 και 3 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



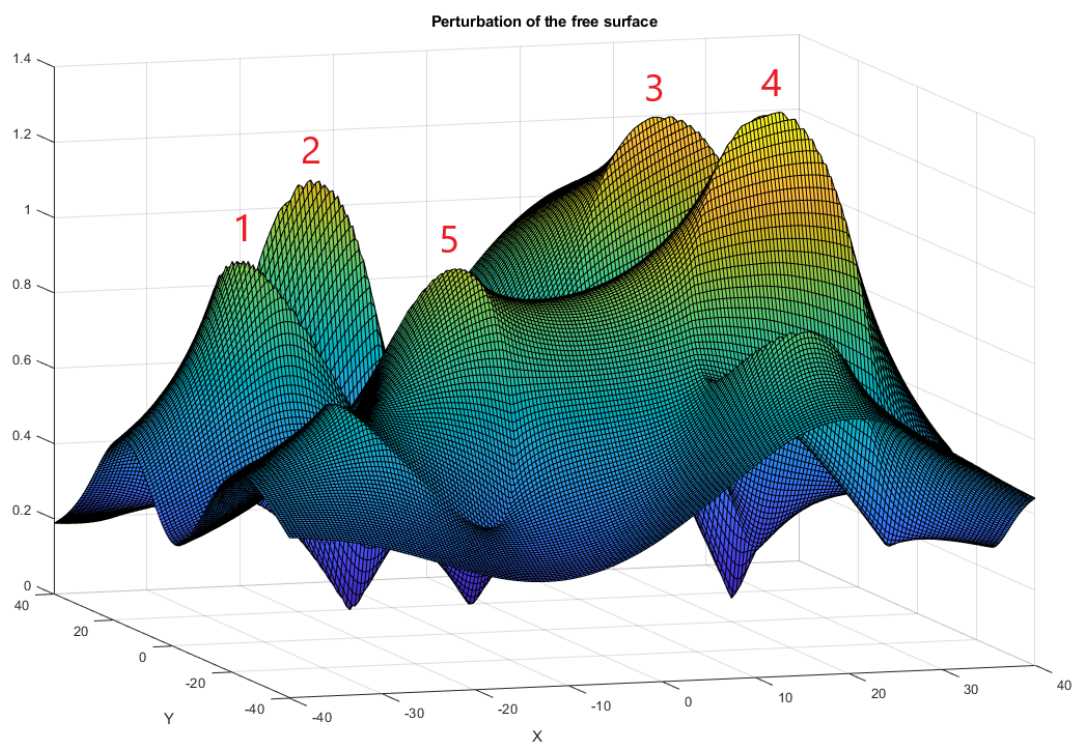
Εικόνα 113: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 114 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 30 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

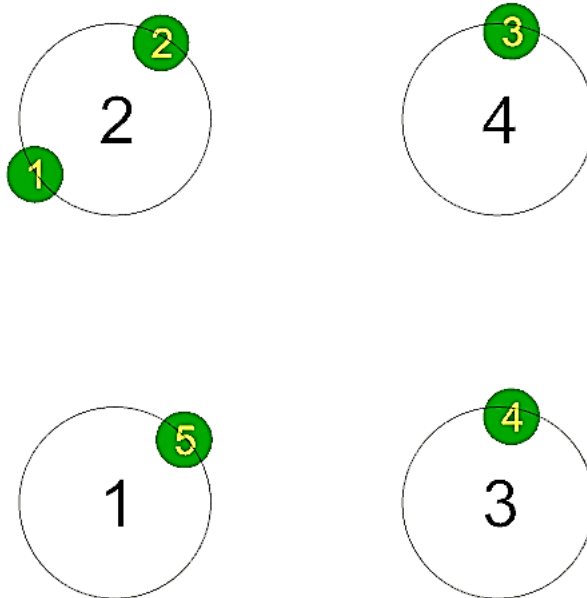
Εικόνα 115 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 30: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.96 m
2	1.10 m
3	1.23 m
4	1.38 m
5	1.02 m



Εικόνα 114: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

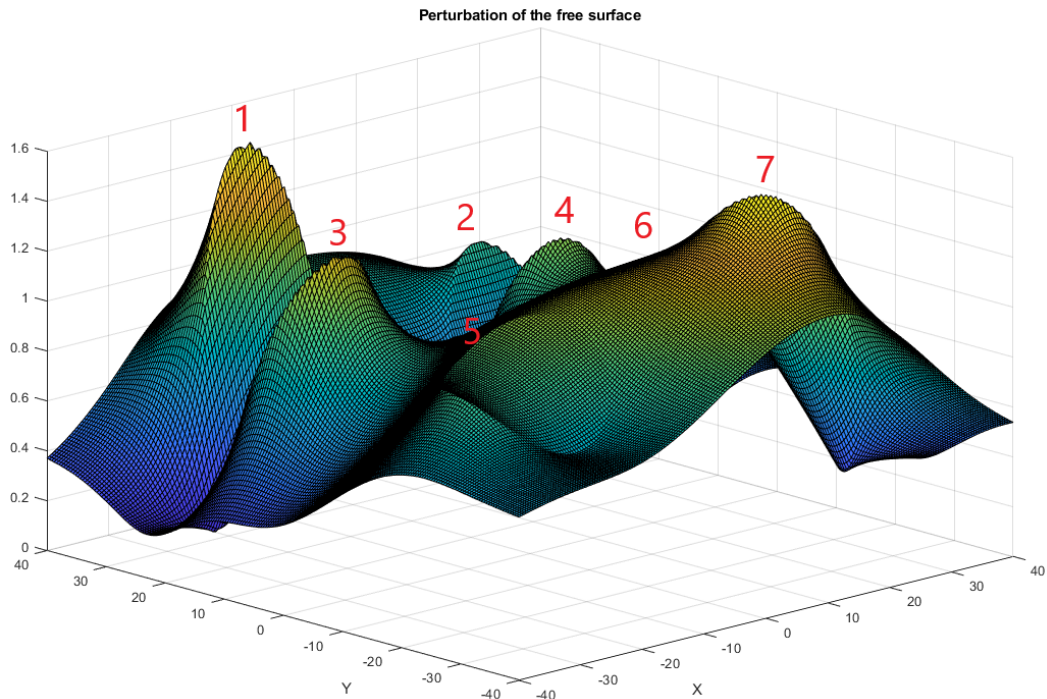


Εικόνα 115: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

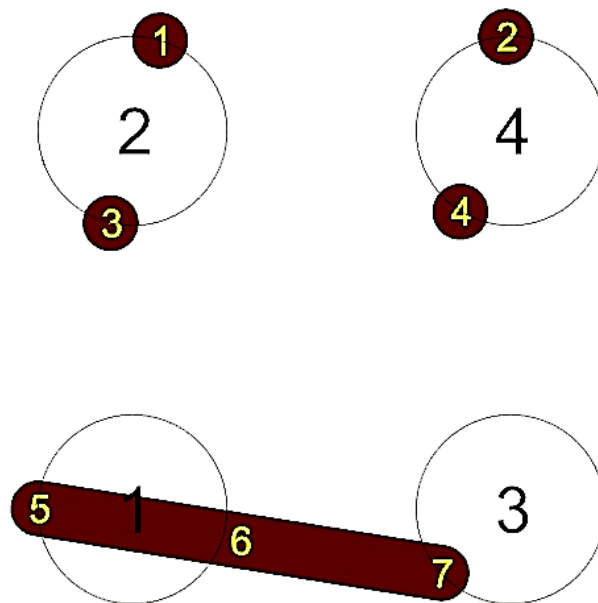
Στην Εικόνα 116 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 31 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 117 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 31: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.56 m
2	0.93 m
3	1.26 m
4	1.09 m
5	0.94 m
6	1.22 m
7	1.53 m



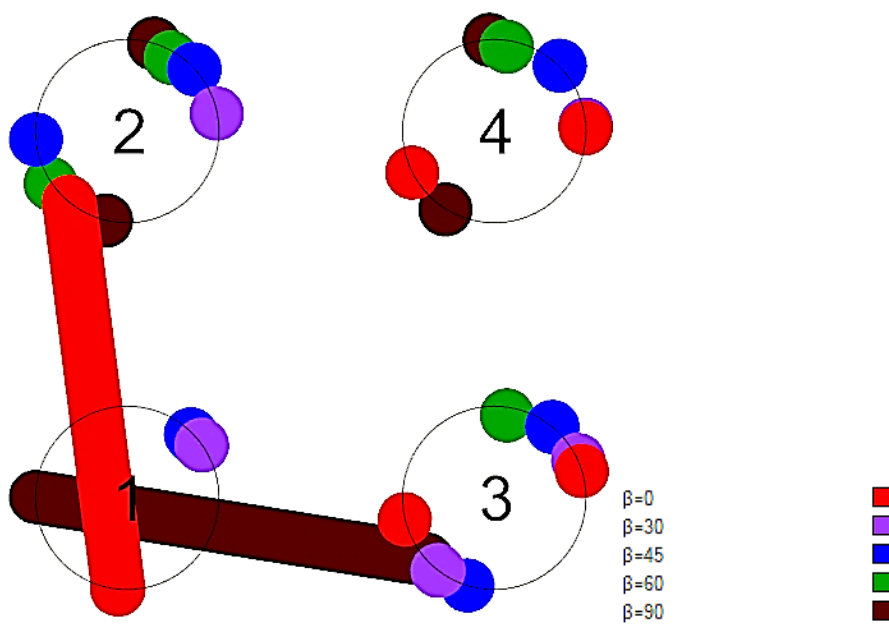
Εικόνα 116: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 1 και 3 ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



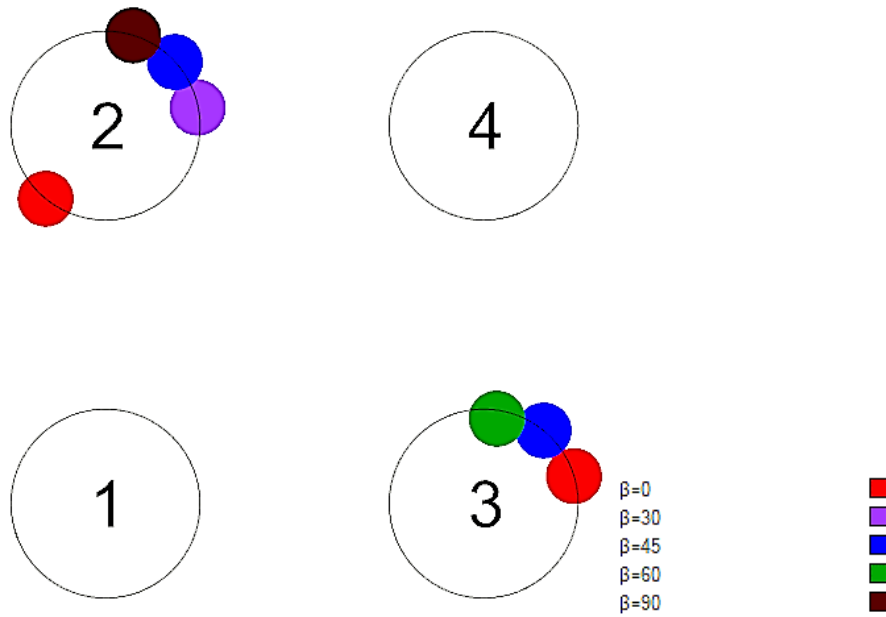
Εικόνα 117: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 118 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 119 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα

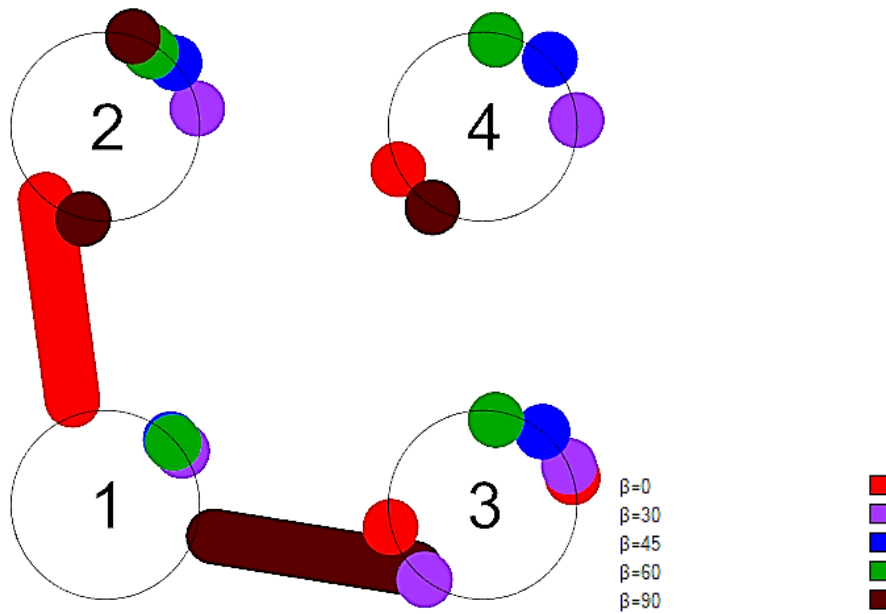
119 συμπεραίνουμε πως οι ταλαντώσεις των κυλίνδρων επηρεάζουν τις πιθανές θέσεις των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Όταν οι κύλινδροι κρατούνται ακίνητοι, οι μέγιστες τιμές του μέτρου εμφανίζονται στους κυλίνδρους 1, 2 και 3 της διάταξης. Όμως, όταν κινούνται όλοι οι κύλινδροι παρατηρούμε πως οι μέγιστες τιμές του μέτρου εντοπίζονται στους κυλίνδρους 2 και 3. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι πως οι ταλαντώσεις των κυλίνδρων βοηθούν στο να αυξηθεί η τιμή του μέτρου στους κυλίνδρους αυτούς. Η δεύτερη διαφορά που έχουν βρίσκεται στις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του μέτρου. Για παράδειγμα, εάν εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 2 τότε αυτή μπορεί να παράξει μέγιστη ενέργεια για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ και 90° , ενώ στην περίπτωση των ακίνητων κυλίνδρων αυτή μπορούσε να την παράξει για γωνίες $\beta = 0^\circ, 30^\circ$ και 45° . Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως η Εικόνα 119, αποτελεί έναν οδηγό για τις θέσεις που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 120 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την Εικόνα 120 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όπως και στην περίπτωση των ακίνητων κυλίνδρων.



Εικόνα 118: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 119: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

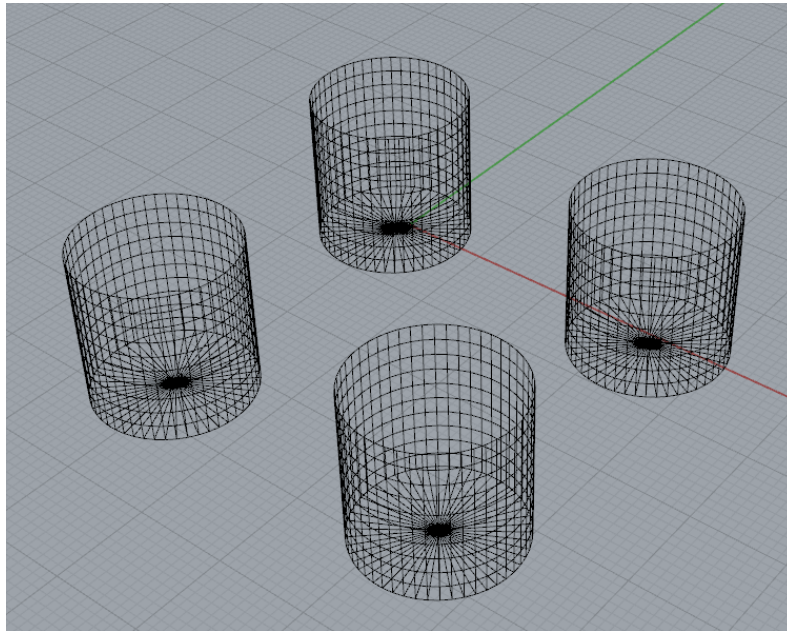


Εικόνα 120: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.3.3 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα

Όπως και στην περίπτωση των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων, θα μελετήσουμε τη διάταξη θεωρώντας ότι οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσουμε να ελέγξουμε αν εμφανίζεται το φαινόμενο της

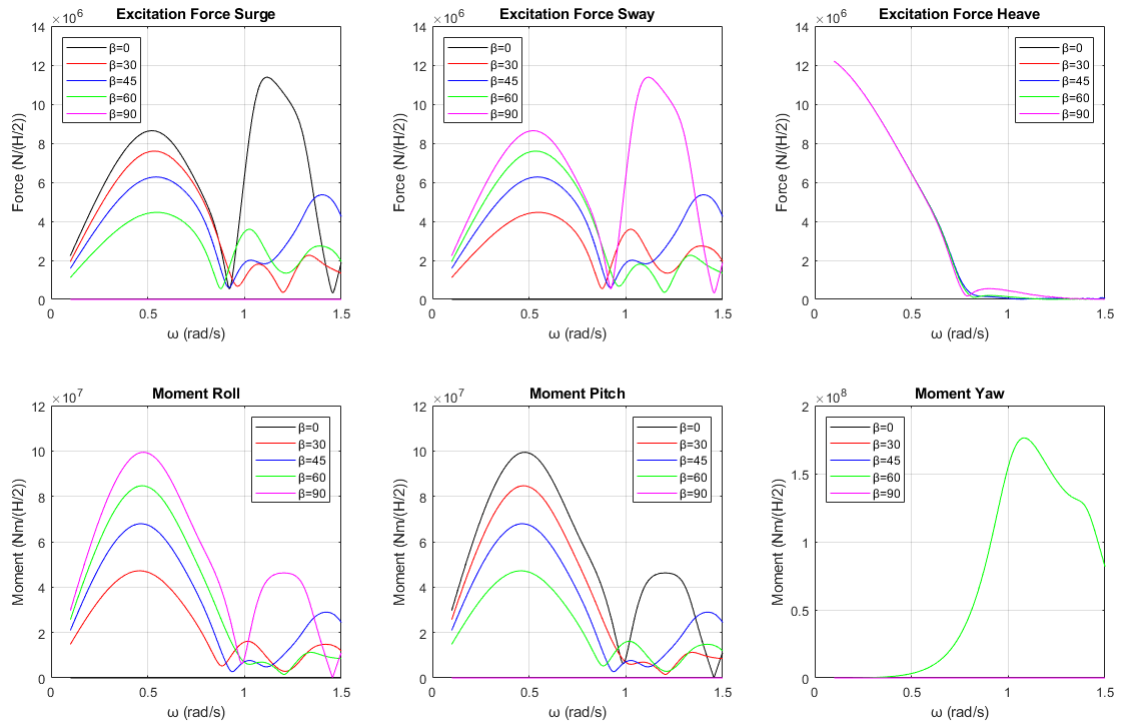
παγίδευσης των κυματισμών σε όλη την διάταξη και όχι σε μεμονωμένους κυλίνδρους, καθώς και πως μεταβάλλεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Όταν η διακριτοποίηση του ενός κυλίνδρου αποτελούταν από 500 στοιχεία, τότε τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα BEM NEMOH ήταν ικανοποιητικά. Στην Εικόνα 121 φαίνεται η διακριτοποίηση της διάταξης των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, η οποία αποτελείται από 2204 σημεία και 2200 στοιχεία.



Εικόνα 121: Διακριτοποίηση διάταξης τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, η οποία αποτελείται από 2204 σημεία και 2200 στοιχεία

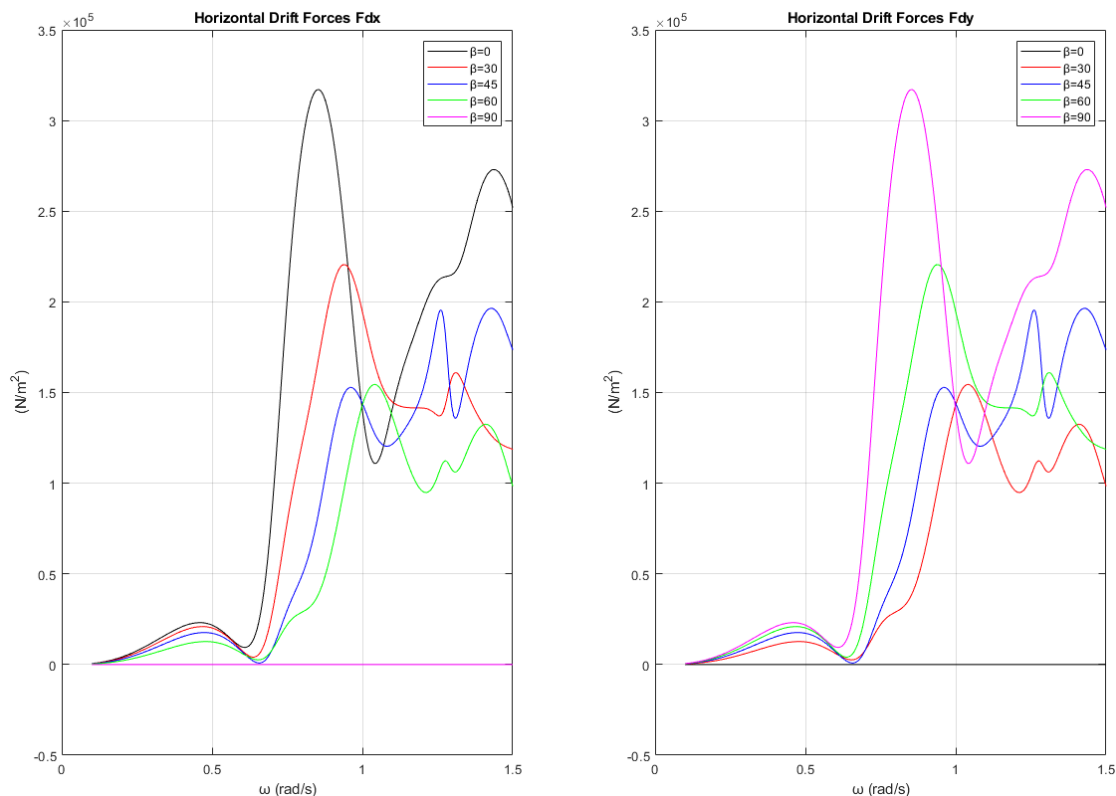
3.3.3.1 Ακίνητη διάταξη – diffraction problem

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα φαίνονται στην Εικόνα 122.



Εικόνα 122: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται συνολικά στη διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη, φαίνονται στην Εικόνα 123.



Εικόνα 123: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη από τον κυματισμό

Θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 32 φαίνονται ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης.

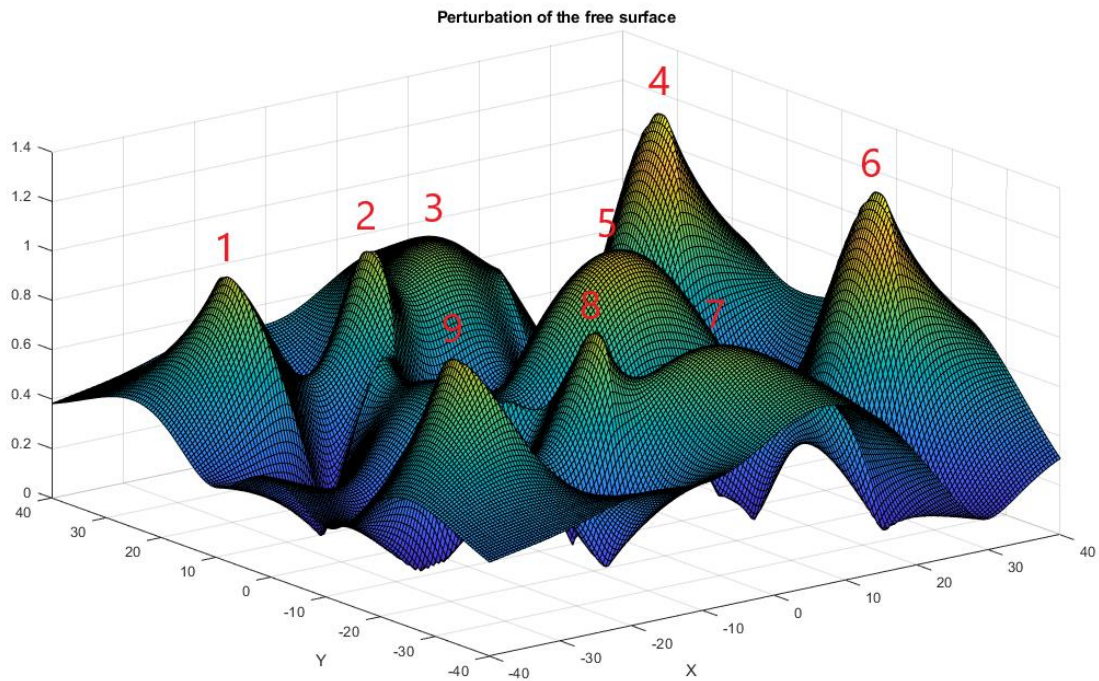
Πίνακας 32: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.12$	F_x
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.53$	F_x
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.53$	F_x/F_y
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.53$	F_y
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.12$	F_y

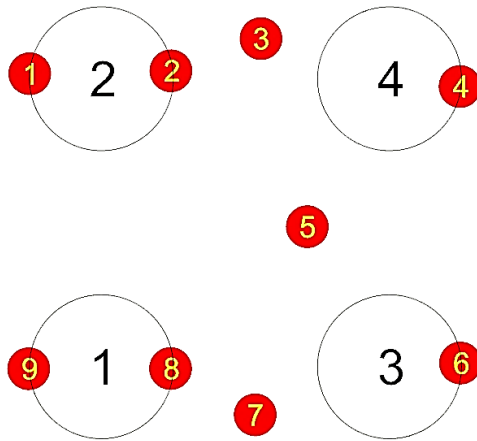
Στην Εικόνα 124 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 33 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 125 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς την συχνότητα αυτή.

Πίνακας 33: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.99 m
2	0.97 m
3	0.88 m
4	1.29 m
5	1.02 m
6	1.29 m
7	0.87 m
8	0.97 m
9	0.98 m



Εικόνα 124: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

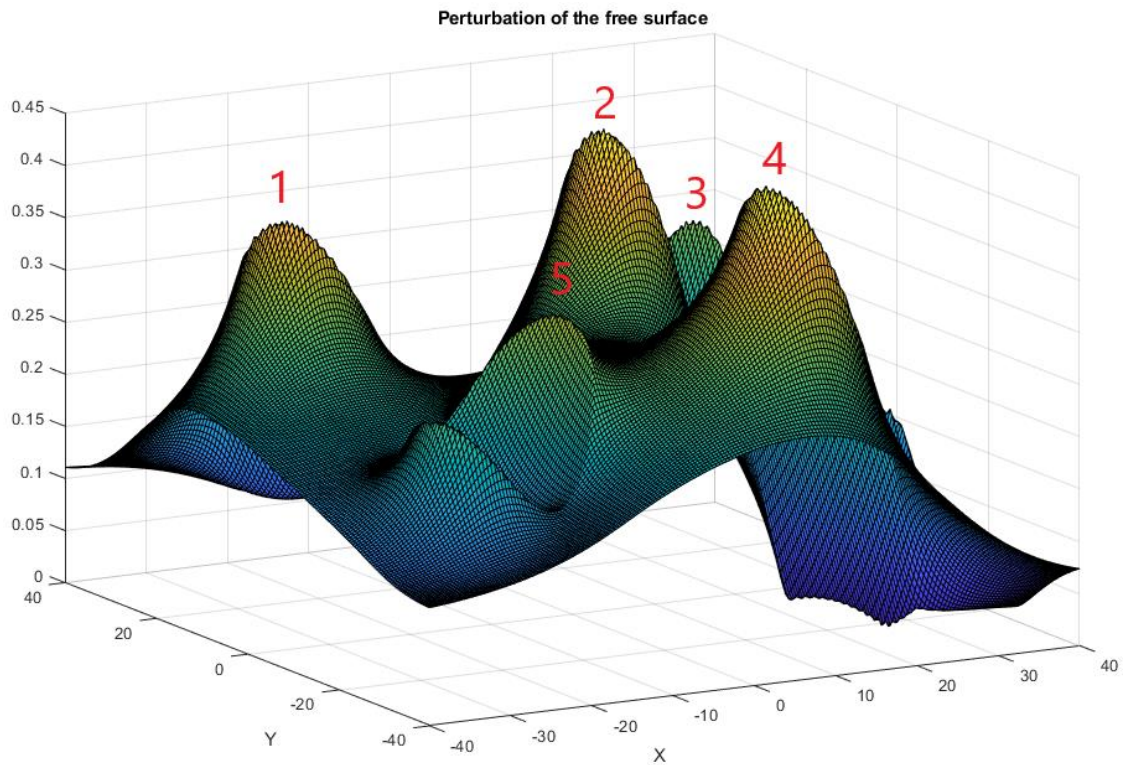


Εικόνα 125: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

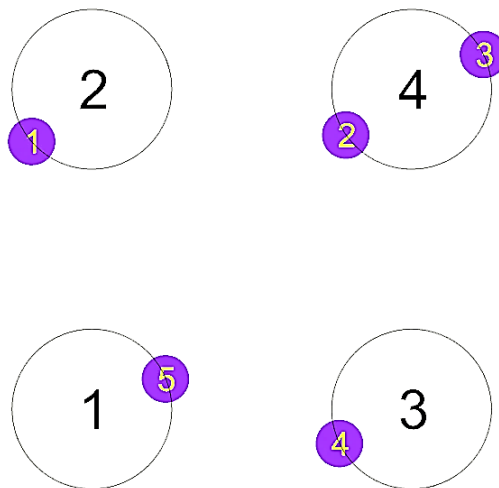
Στην Εικόνα 126 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 34 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 127 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 34: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.38 m
2	0.43 m
3	0.31 m
4	0.44 m
5	0.33 m



Εικόνα 126: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

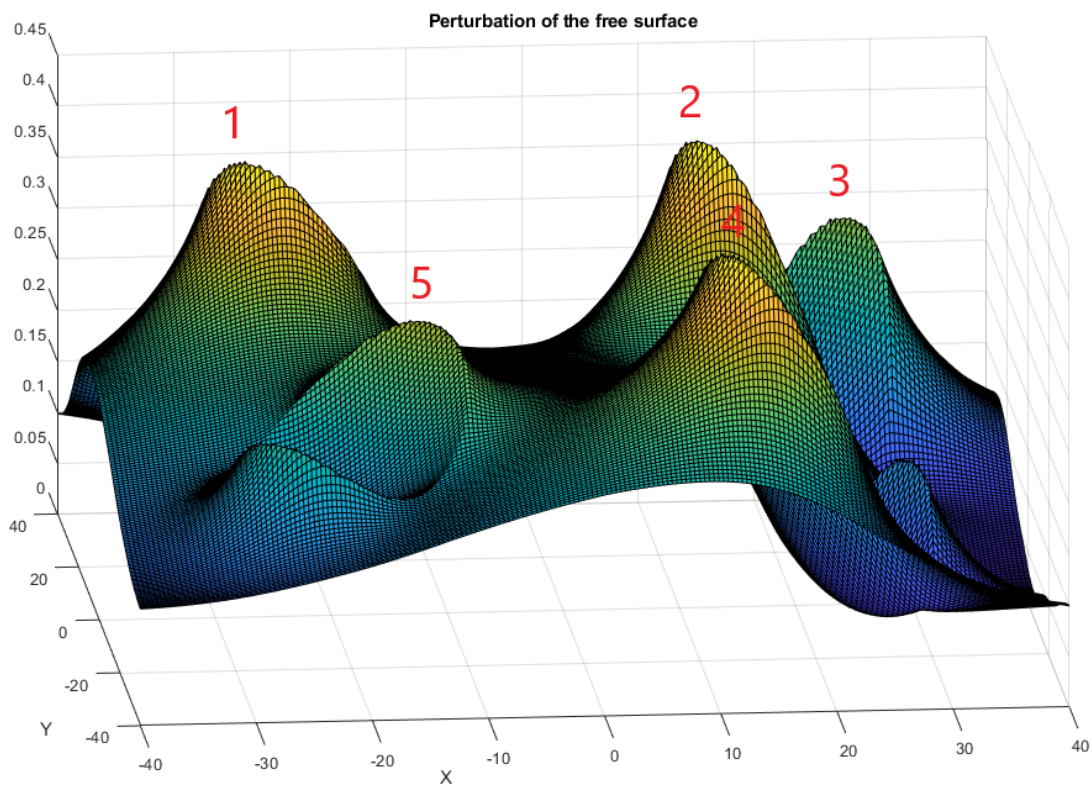


Εικόνα 127: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

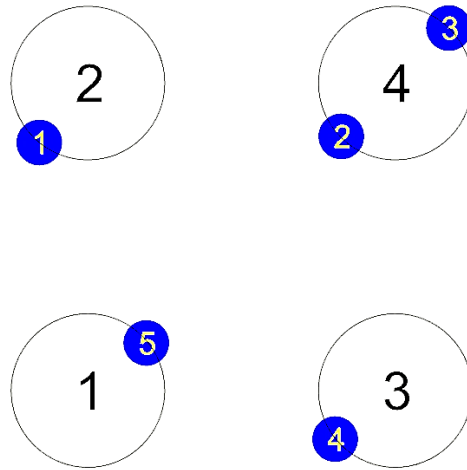
Στην Εικόνα 128 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 35 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 129 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 35: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.41 m
2	0.42 m
3	0.31 m
4	0.41 m
5	0.32 m



Εικόνα 128: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

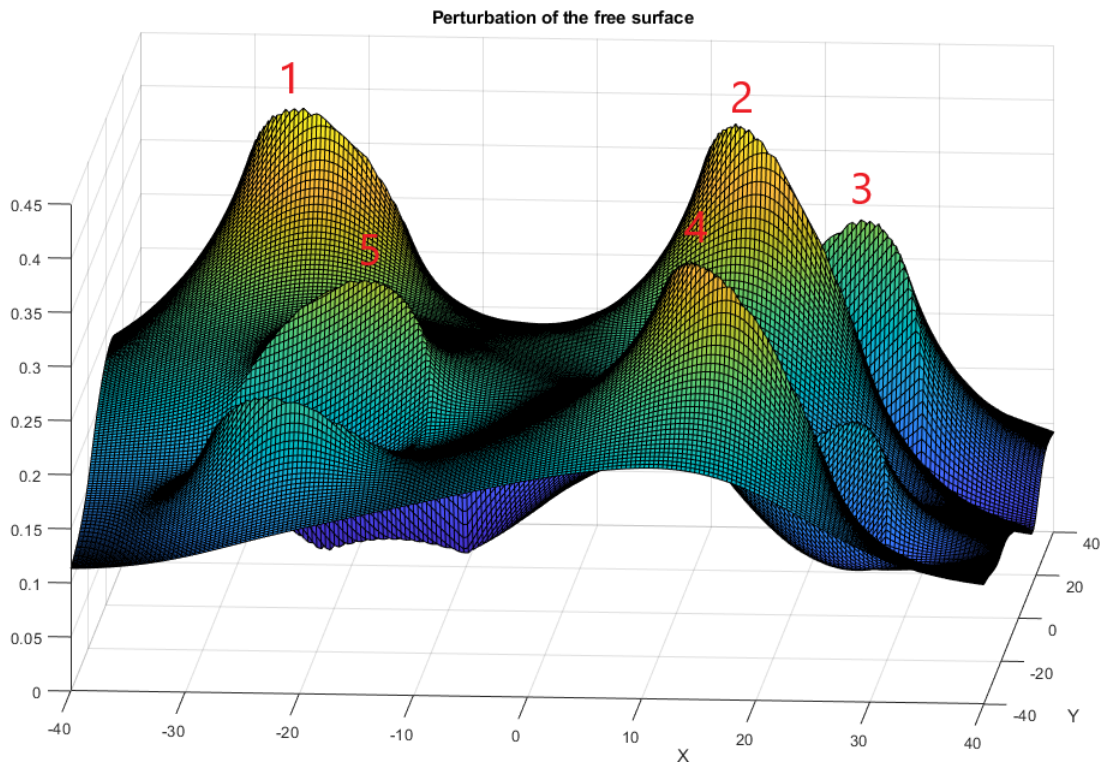


Εικόνα 129: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

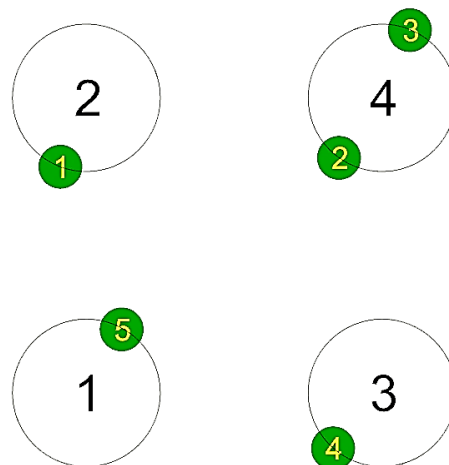
Στην Εικόνα 130 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 36 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 131 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 36: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.44 m
2	0.43 m
3	0.31 m
4	0.38 m
5	0.32 m



Εικόνα 130: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

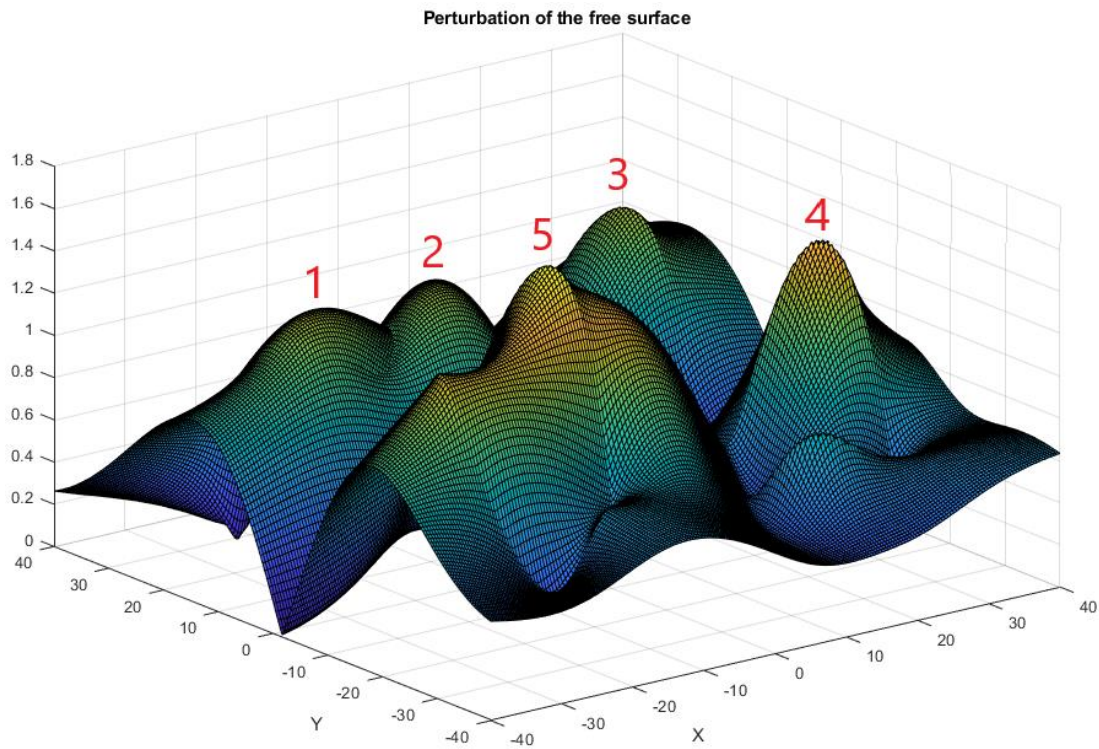


Εικόνα 131: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

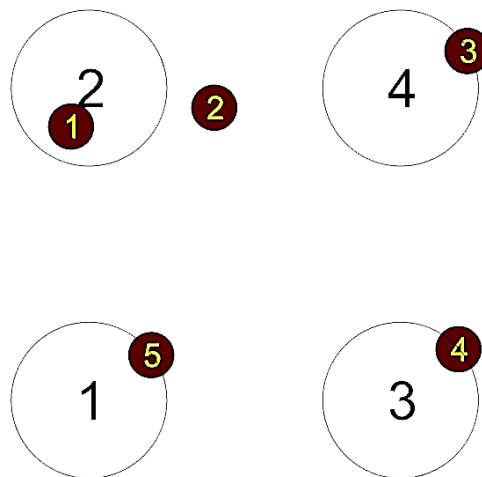
Στην Εικόνα 132 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 37 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 133 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 37: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.23 m
2	1.20 m
3	1.22 m
4	1.47 m
5	1.67 m

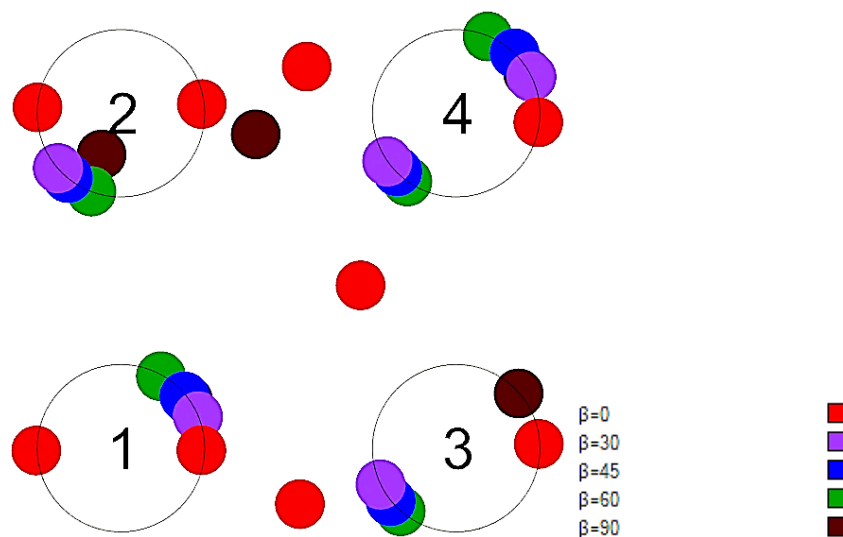


Εικόνα 132: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

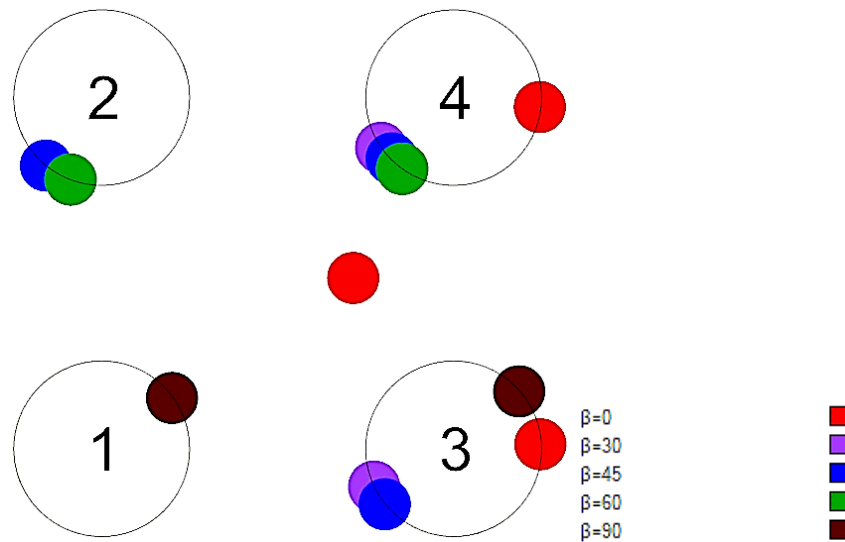


Εικόνα 133: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

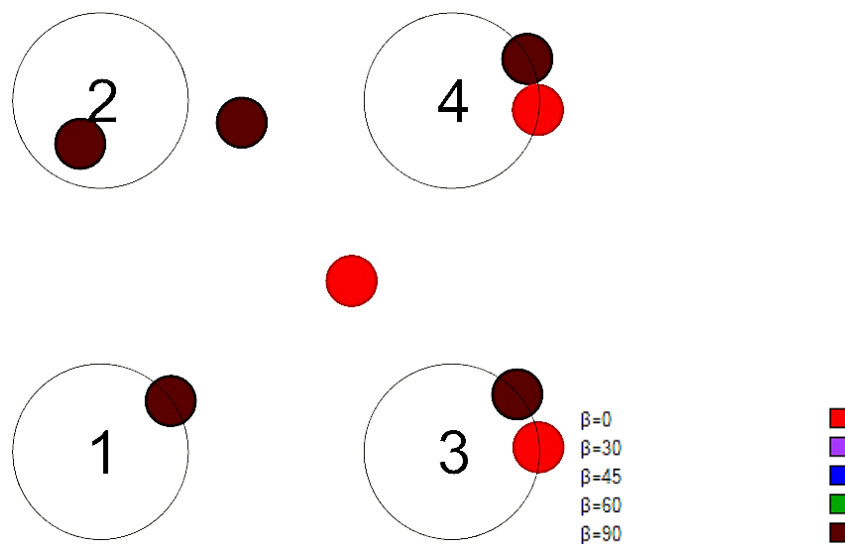
Στην Εικόνα 134 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 135 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Συγκρίνοντας την Εικόνα 88 με την Εικόνα 134 παρατηρούμε πως η κατανομή των κορυφών που εμφανίζονται είναι διαφορετική, όχι μόνο ως προς τις θέσεις που εμφανίζονται αλλά και ως προς τις τιμές που έχει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η σύγκριση της Εικόνας 89 με την Εικόνα 135, καθώς παρατηρούμε πως όταν η διάταξη συμπεριφέρεται σαν ένα σώμα οι κύλινδροι 1 και 2 της διάταξης δεν μπορούν να αξιοποιηθούν και να εγκατασταθούν σε αυτούς συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Αντιθέτως, οι δυνητικοί υποψήφιοι είναι οι κύλινδροι 3 και 4 της διάταξης όπου υπάρχει μια ευελιξία στις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού. Το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ και 60° είναι πολύ μικρότερο από όταν η γωνία είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ και 90° αντίστοιχα. Στην Εικόνα 136 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 136 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 3 και 4 της διάταξης, οι οποίες περιορίζονται στις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ και 90° .



Εικόνα 134: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



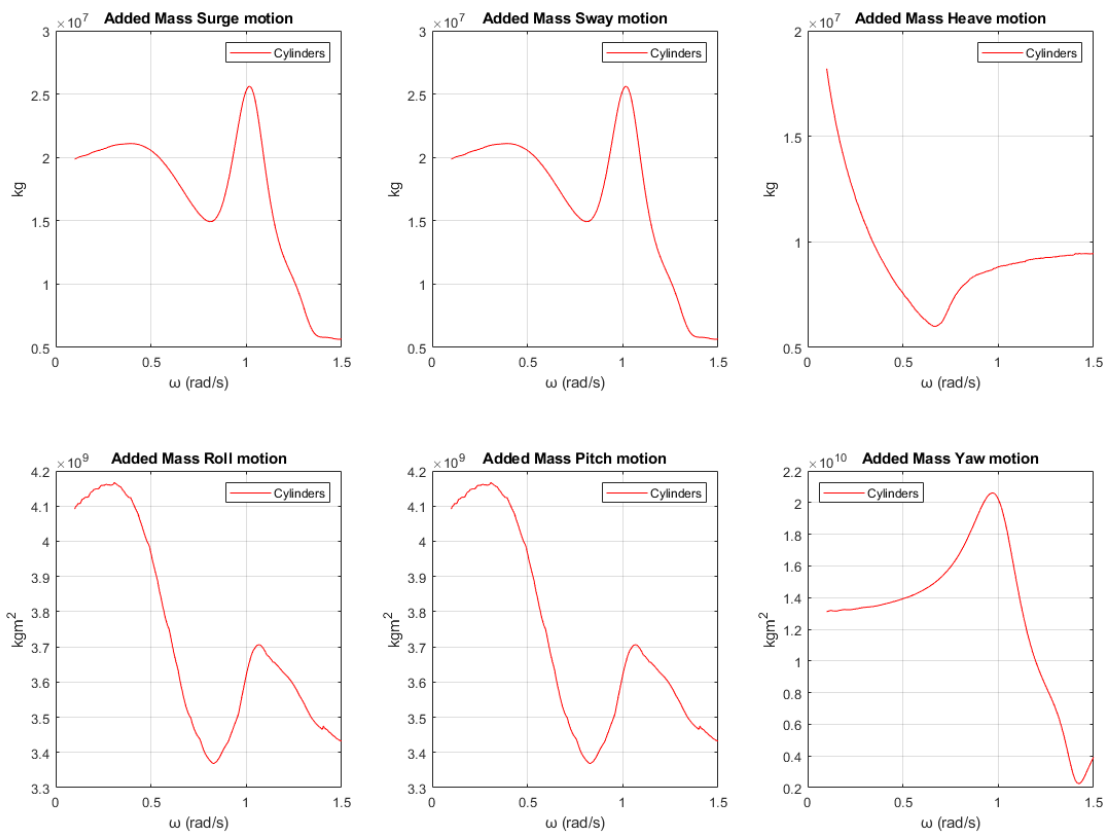
Εικόνα 135: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



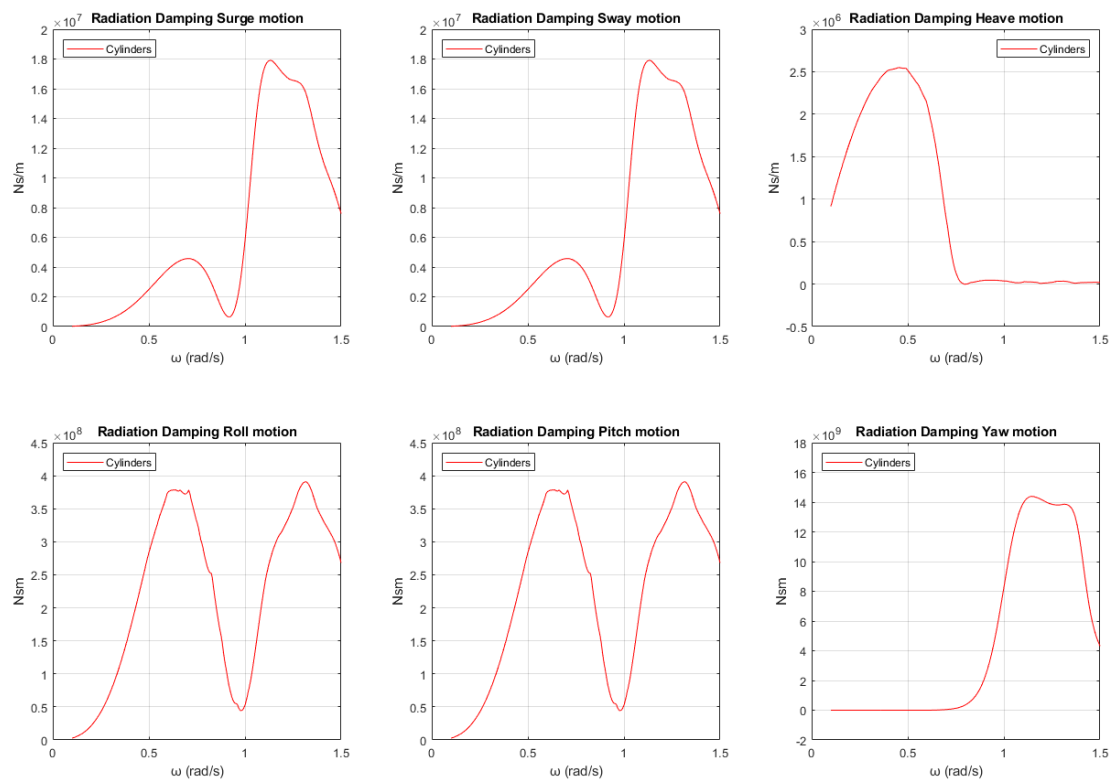
Εικόνα 136: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.3.3.2 Η διάταξη ταλαντώνεται ελεύθερα – radiation problem

Όπως και προηγουμένως, θα μελετήσουμε τη διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων θεωρώντας ότι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.3.3.1, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 122, δεν μεταβάλλονται λόγω των κινήσεων του σώματος. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας της διάταξης φαίνονται στην Εικόνα 137 και στην Εικόνα 138 παρουσιάζονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

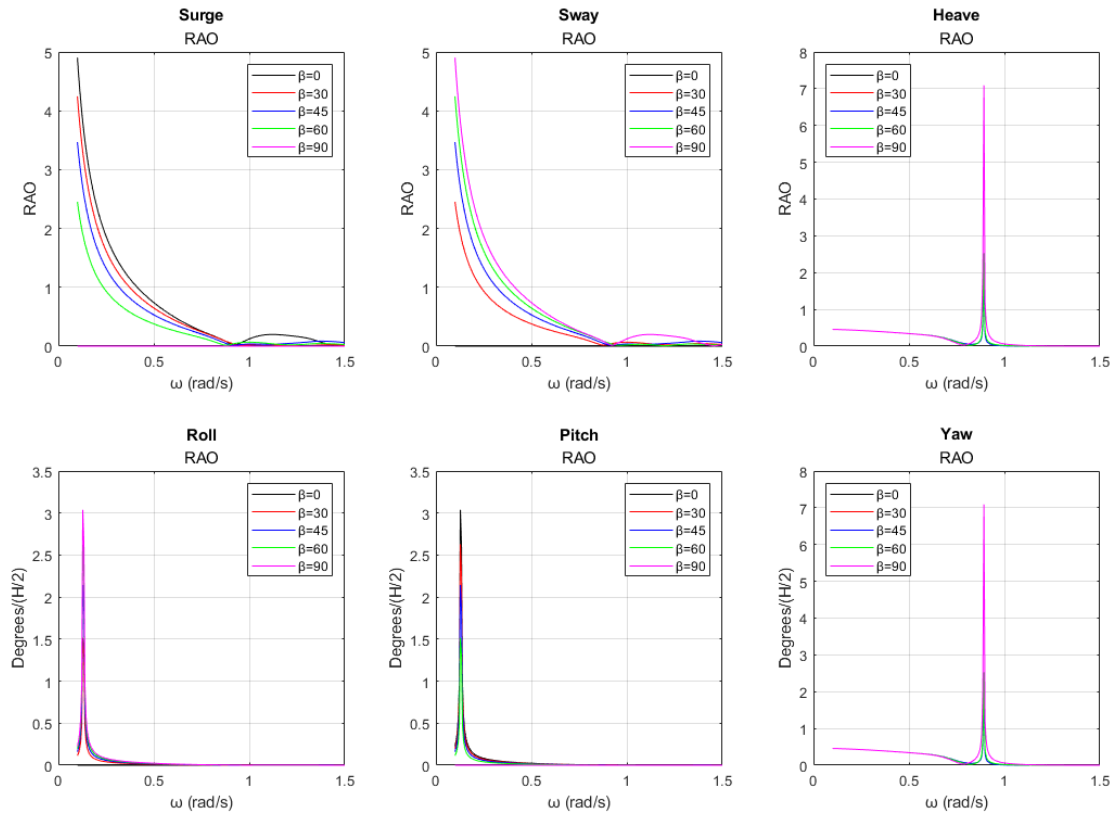


Εικόνα 137: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ της διάταξης

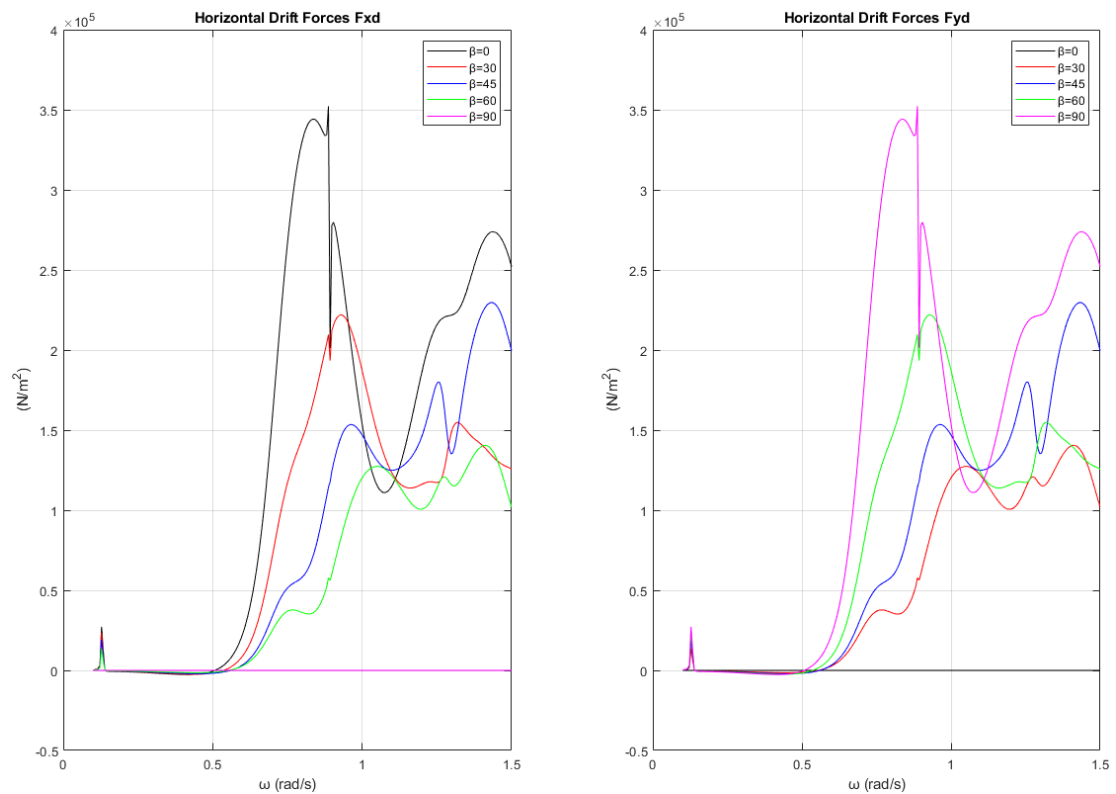


Εικόνα 138: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ της διάταξης

Οι κινήσεις της διάταξης των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας φαίνονται στην Εικόνα 139. Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα παρουσιάζονται στην Εικόνα 140.



Εικόνα 139: Κινήσεις της διάταξης ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης



Εικόνα 140: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Στον Πίνακα 38 δίνεται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης.

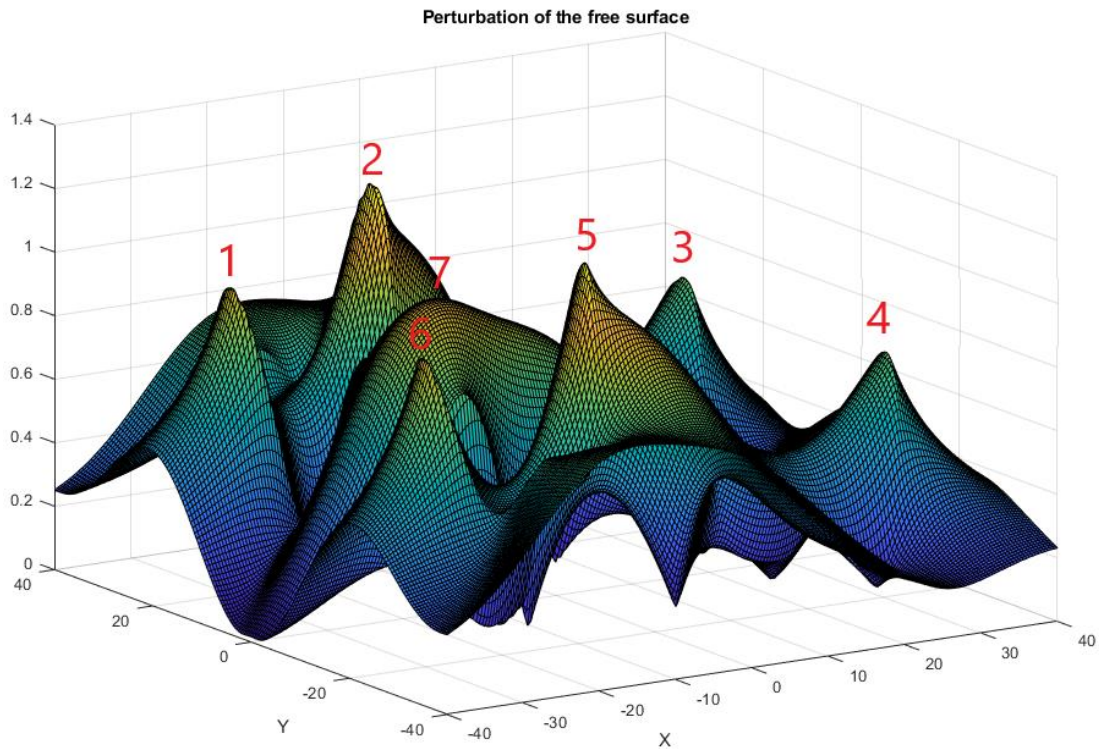
Πίνακας 38: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και ως προς ποια δύναμη διέγερσης παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.02$	F_x
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.53$	F_x
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.53$	F_x/F_y
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.53$	F_y
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.02$	F_y

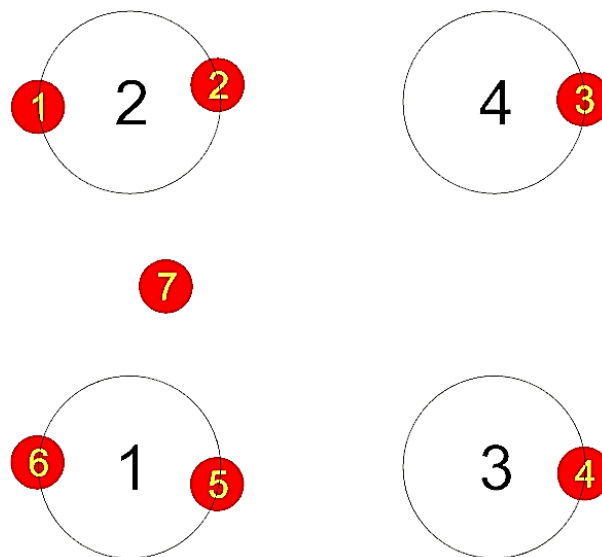
Στην Εικόνα 141 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 39 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 142 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 39: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.97 m
2	1.21 m
3	0.77 m
4	0.77 m
5	1.21 m
6	0.97 m
7	0.99 m



Εικόνα 141: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



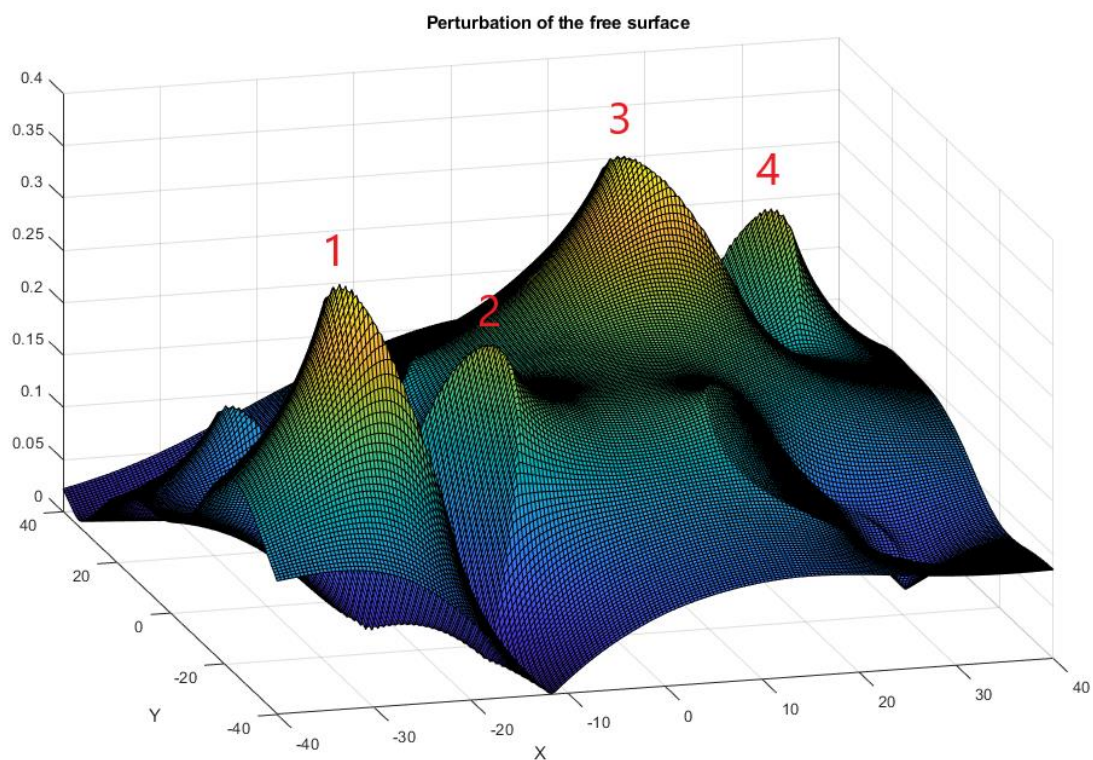
Εικόνα 142: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 143 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 40 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 144 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών

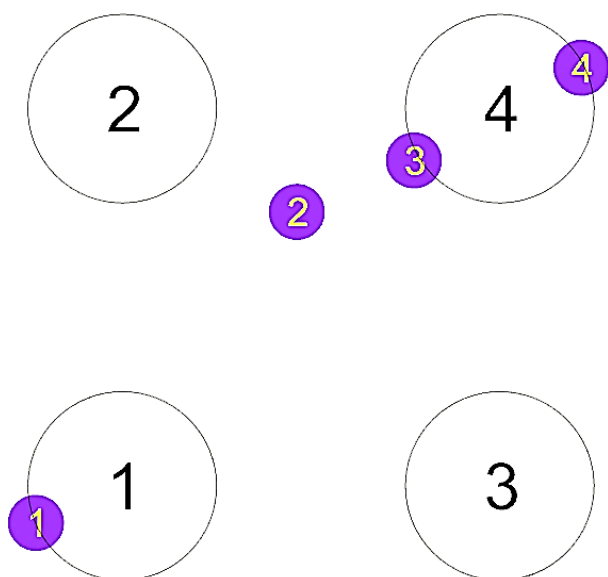
που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 40: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.37 m
2	0.22 m
3	0.37 m
4	0.28 m



Εικόνα 143: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

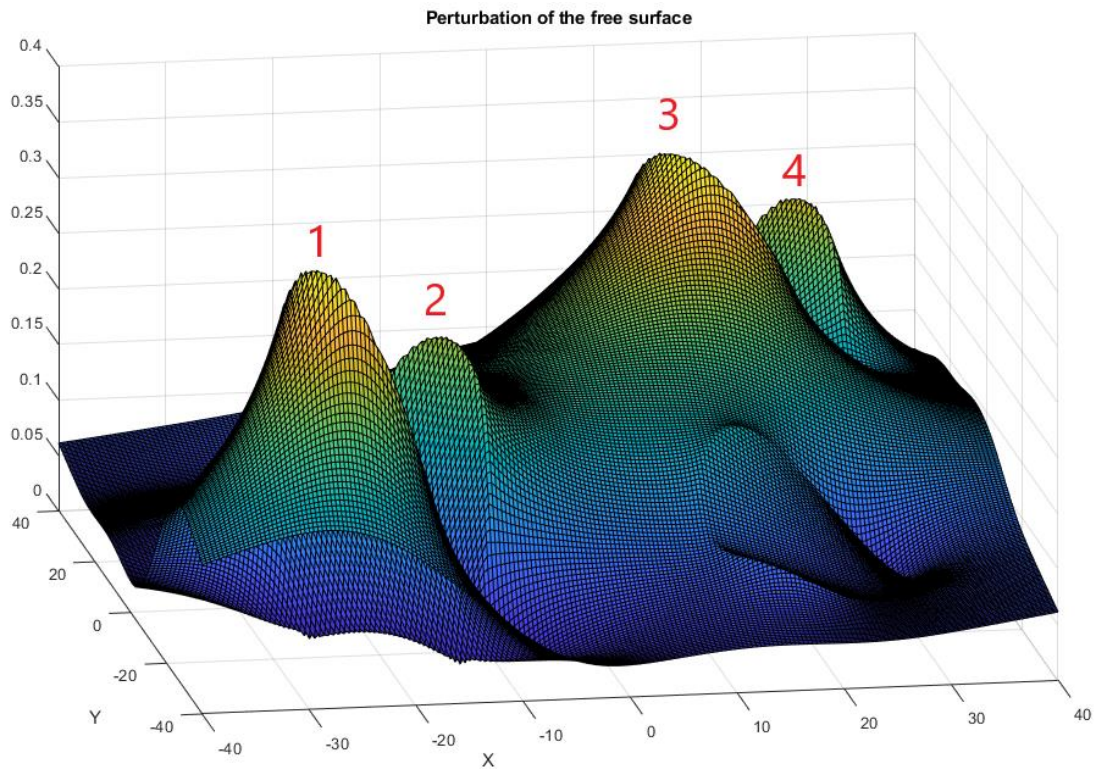


Εικόνα 144: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

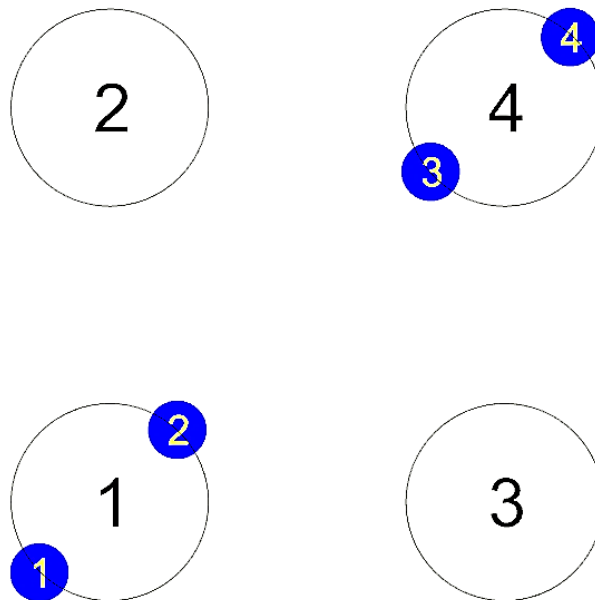
Στην Εικόνα 145 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 41 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 146 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 41: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.37 m
2	0.27 m
3	0.36 m
4	0.28 m



Εικόνα 145: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



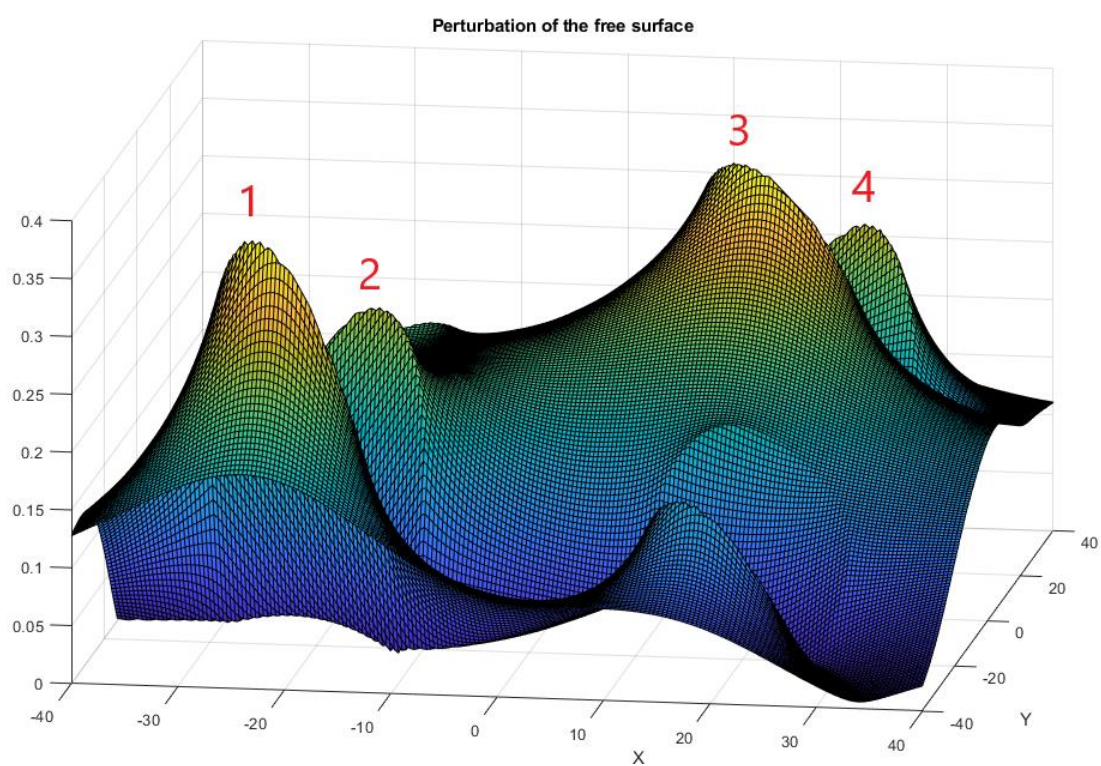
Εικόνα 146: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 147 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 42 φαίνονται

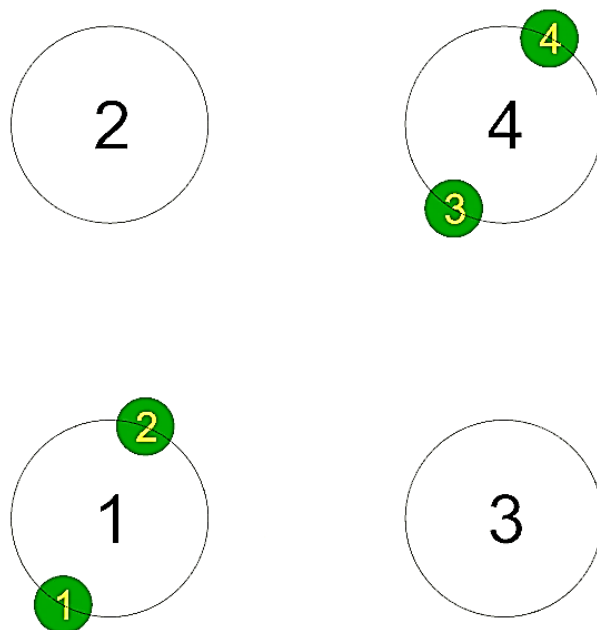
οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 148 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 42: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.37 m
2	0.27 m
3	0.36 m
4	0.28 m



Εικόνα 147: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

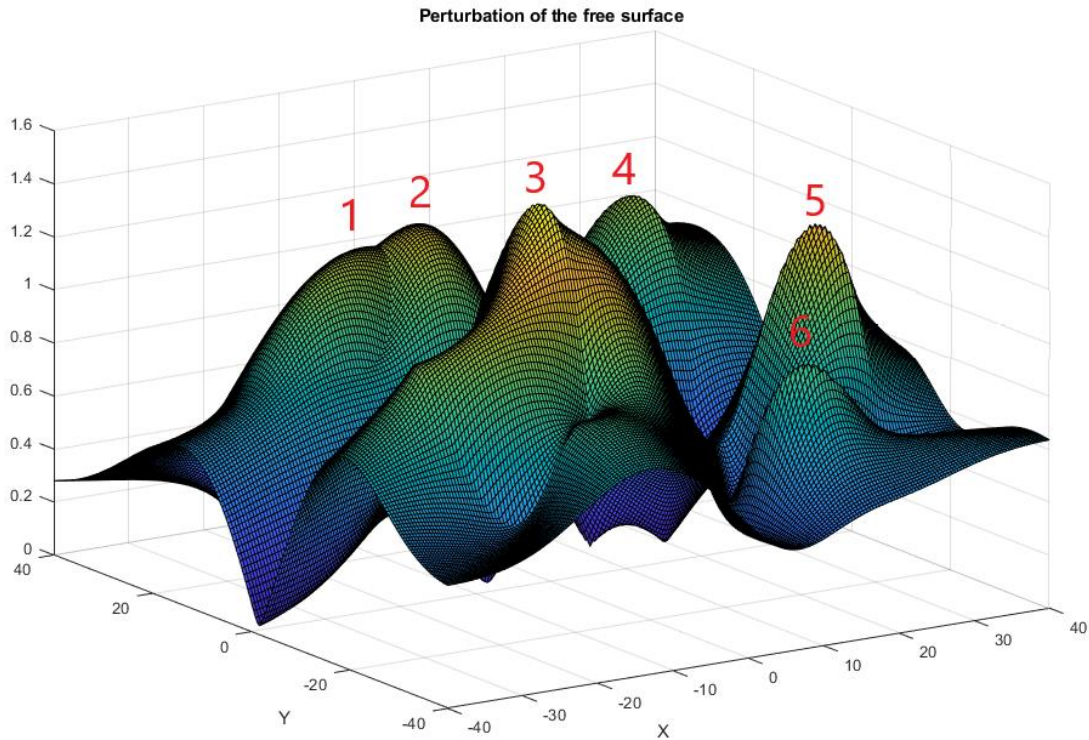


Εικόνα 148: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

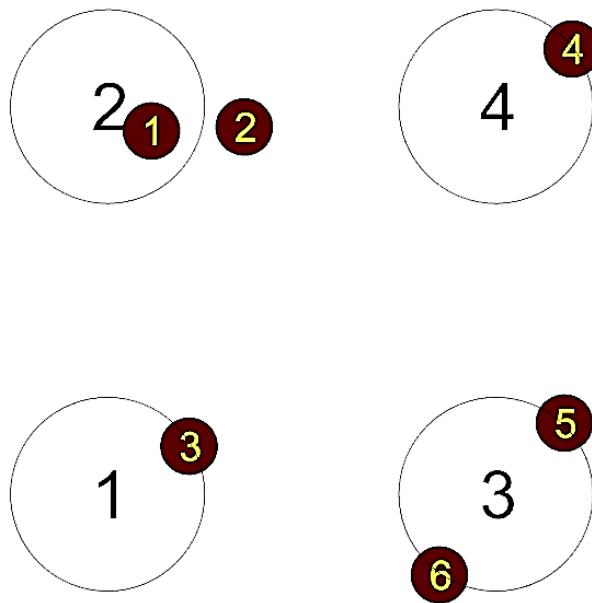
Στην Εικόνα 149 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 43 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 150 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 43: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.17 m
2	1.24 m
3	1.59 m
4	1.14 m
5	1.30 m
6	0.94 m



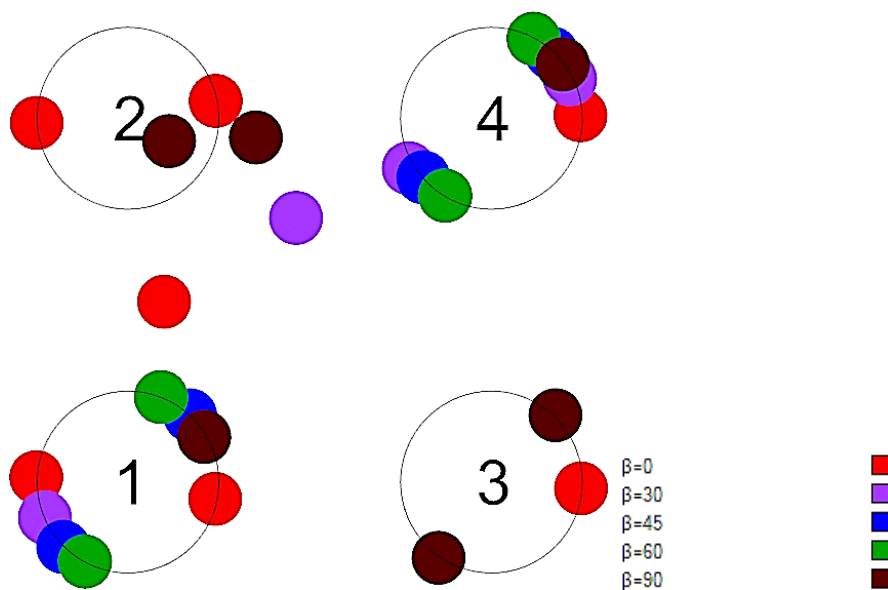
Εικόνα 149: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



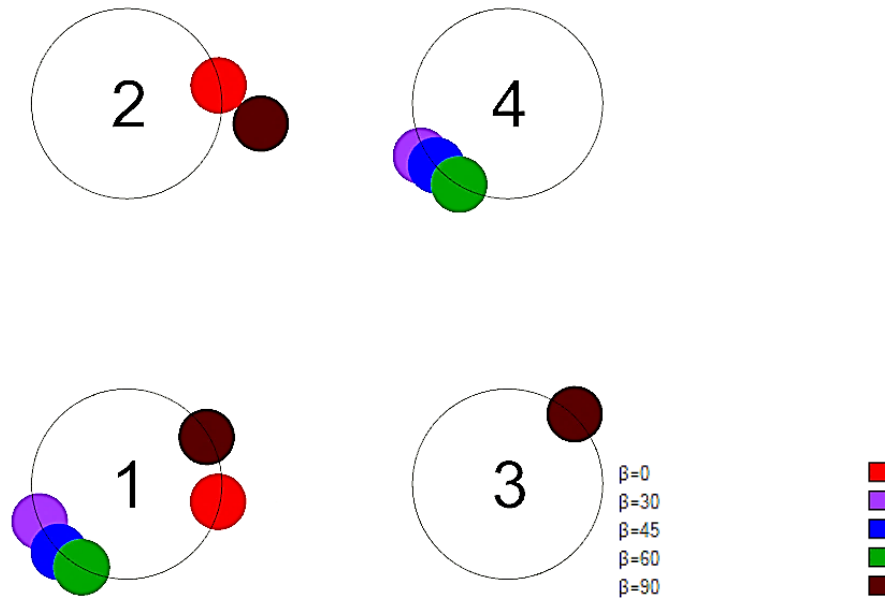
Εικόνα 150: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 151 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 152 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα

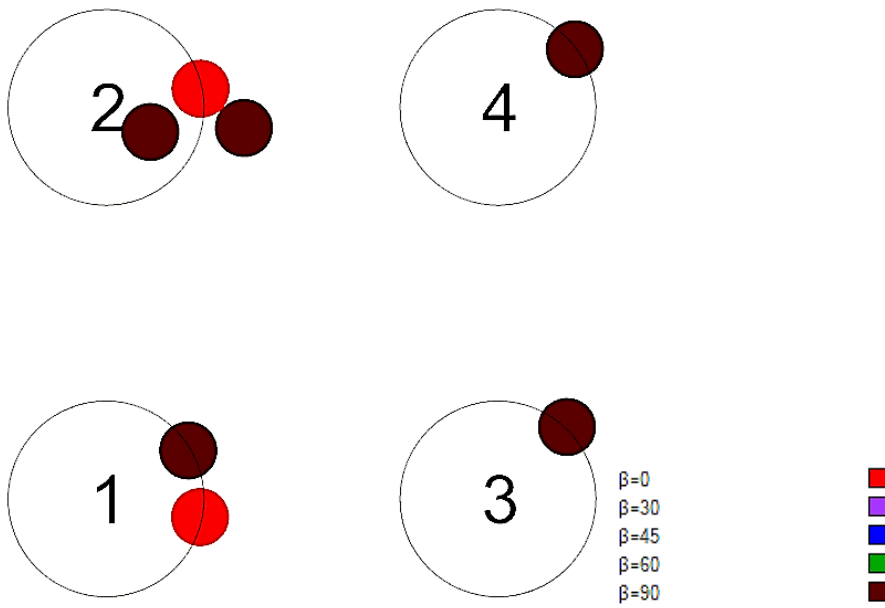
152 συμπεραίνουμε πως οι κινήσεις της διάταξης των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας επηρεάζει την κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Παρόλα αυτά όπως είδαμε και στην παράγραφο 3.3.3.1, όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ και 60° τότε οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι περίπου 3 φορές μικρότερες από τις τιμές του όταν η γωνία είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ και $\beta = 90^\circ$. Στην Εικόνα 153 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 153 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1 και 2, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν για γωνίες $\beta = 0^\circ$ και 90° .



Εικόνα 151: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

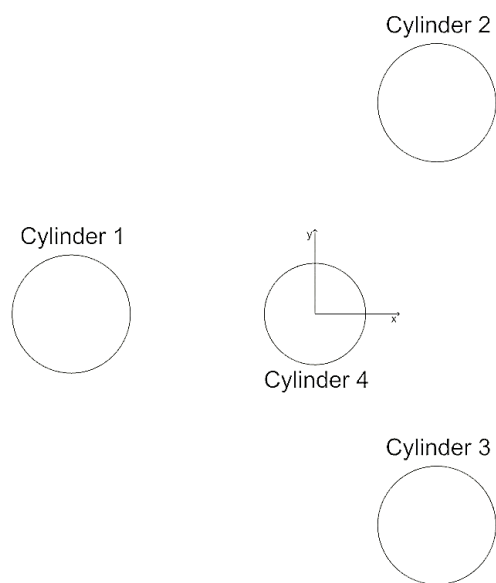


Εικόνα 152: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



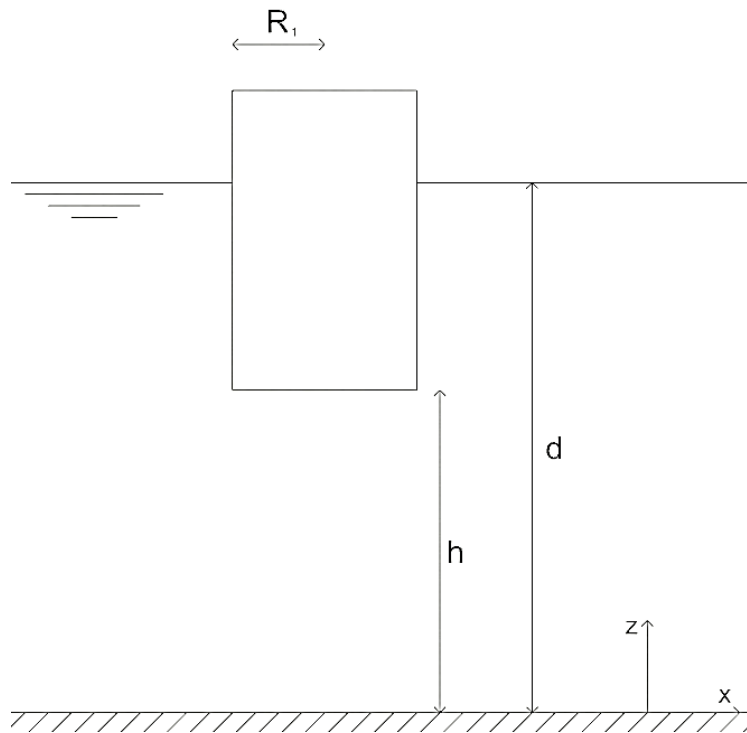
Εικόνα 153: Θέσεις των αξιοποιήσιμων κορυφών για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ και 90°

3.4 Τέσσερις κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι σε τριγωνική διάταξη

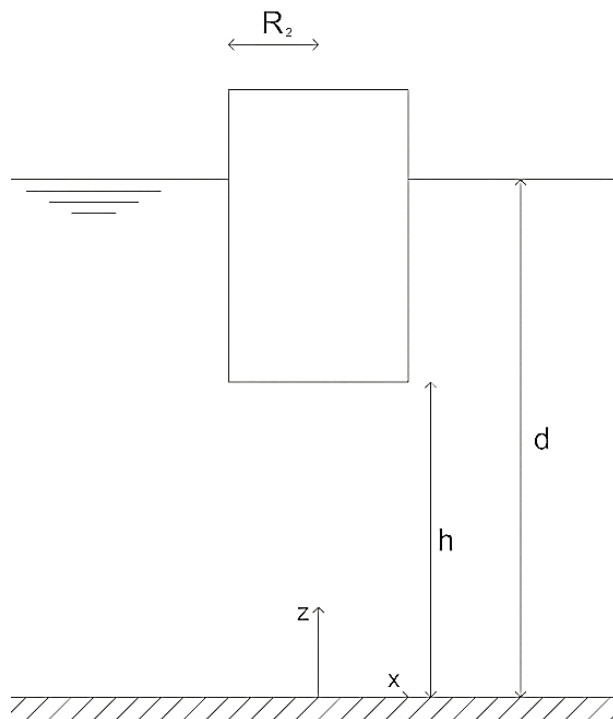


Εικόνα 154: Διάταξη τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων

Θεωρούμε τέσσερις κατακόρυφους πλωτούς κυλίνδρους τοποθετημένους σε τριγωνική διάταξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 154. Οι κύλινδροι βρίσκονται σε περιοχή με βάθος d και ο πυθμένας τους απέχει απόσταση h από τον πυθμένα της θάλασσας. Οι κύλινδροι 1, 2 και 3 έχουν ακτίνα R_1 και ο κύλινδρος 4 έχει ακτίνα R_2 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 155 και Εικόνα 156 αντίστοιχα.



Εικόνα 155: Πλάγια όψη εξωτερικού κυλίνδρου της διάταξης

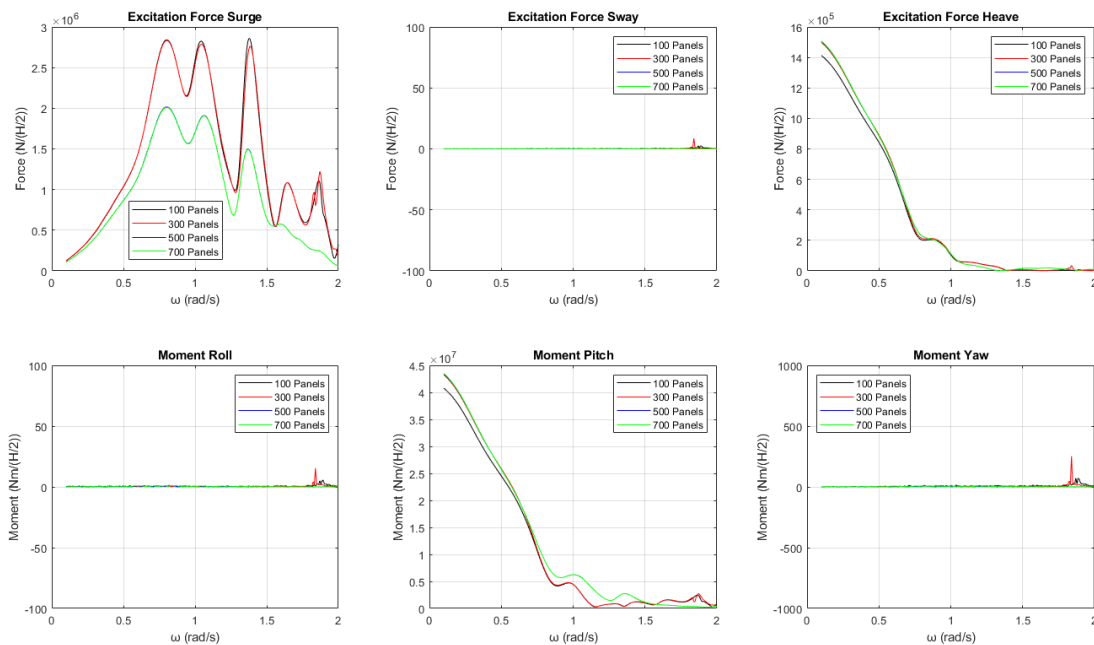


Εικόνα 156: Πλάγια όψη εσωτερικού κυλίνδρου

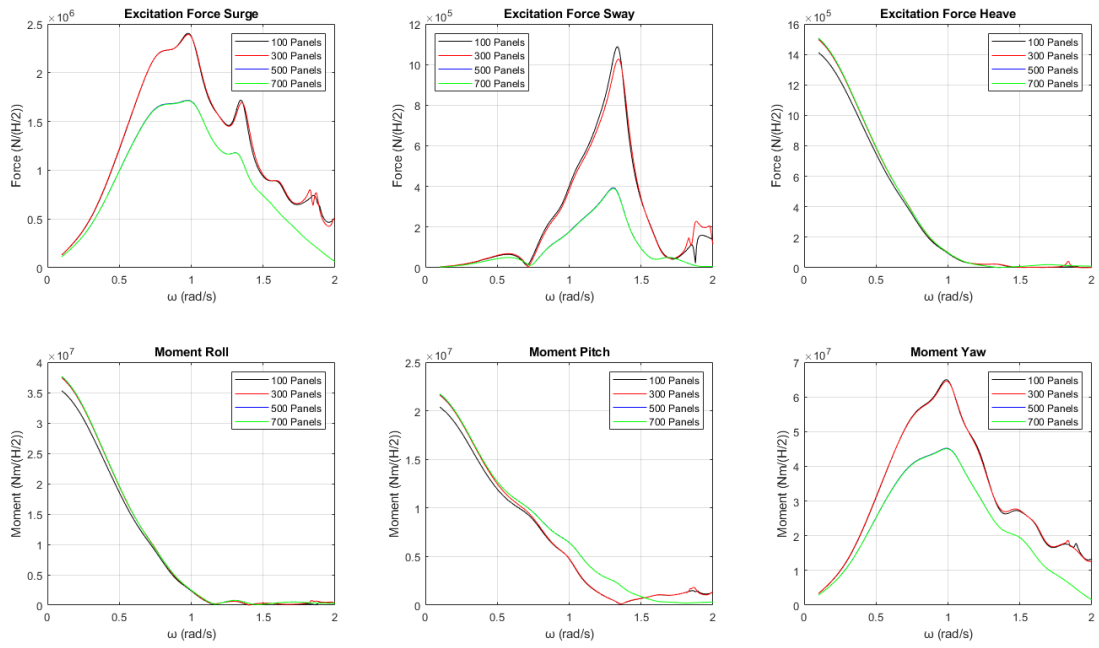
Η διάταξη αυτή βρίσκεται στη δημοσίευση των Mazarakos et al. (2018). Οι συντεταγμένες των κυλίνδρων είναι οι ακόλουθες:

- Κύλινδρος 1 (-28.87,0)
- Κύλινδρος 2 (14.43,25)
- Κύλινδρος 3 (14.43,-25)
- Κύλινδρος 4 (0,0)

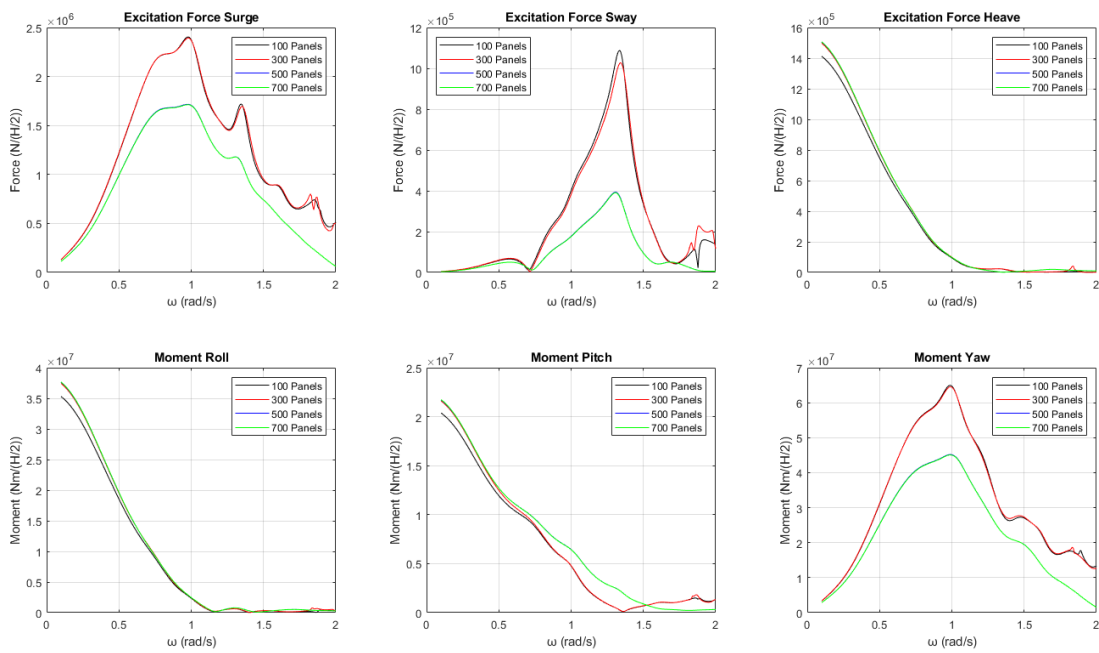
Οι κύλινδροι βρίσκονται σε βάθος περιοχής εγκατάστασης $d = 200\text{m}$ και έχουν ακτίνες ίσες με $R_1 = 7\text{ m}$ και $R_2 = 6\text{ m}$. Ο πυθμένας των κυλίνδρων απέχει από τον πυθμένα της θάλασσας απόσταση $h = 180\text{ m}$ και έχουν συνολικό ύψος 38.5m . Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τη διάταξη των τεσσάρων πλωτών κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία με γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$. Στις Εικόνες 157-160 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τους υπό μελέτη αριθμούς στοιχείων.



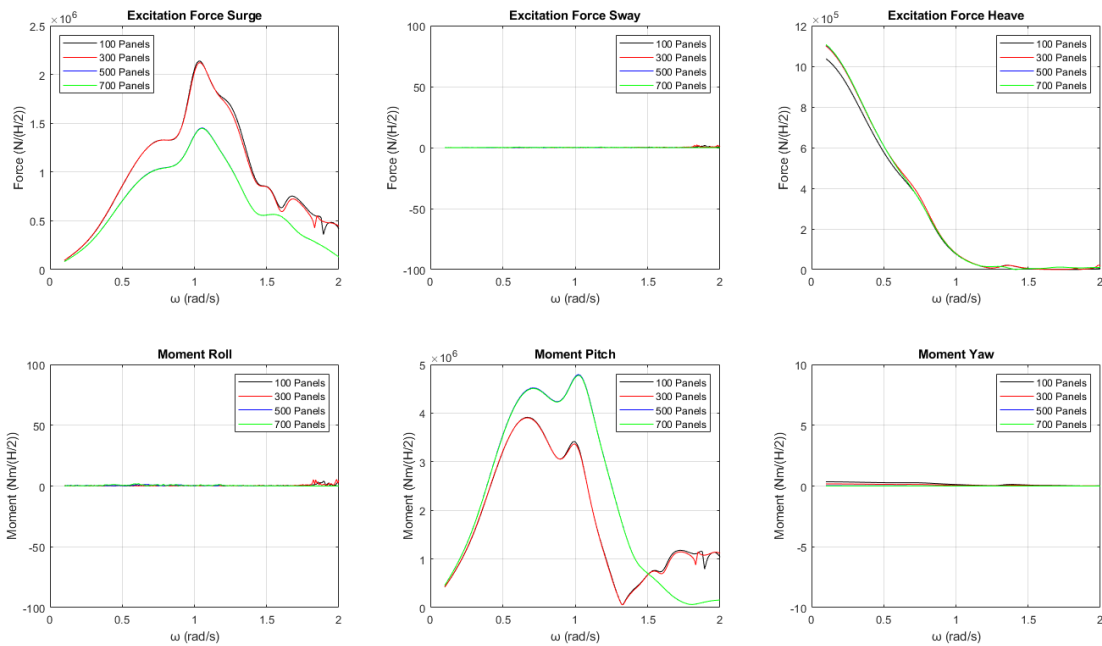
Εικόνα 157: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης



Εικόνα 158: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης

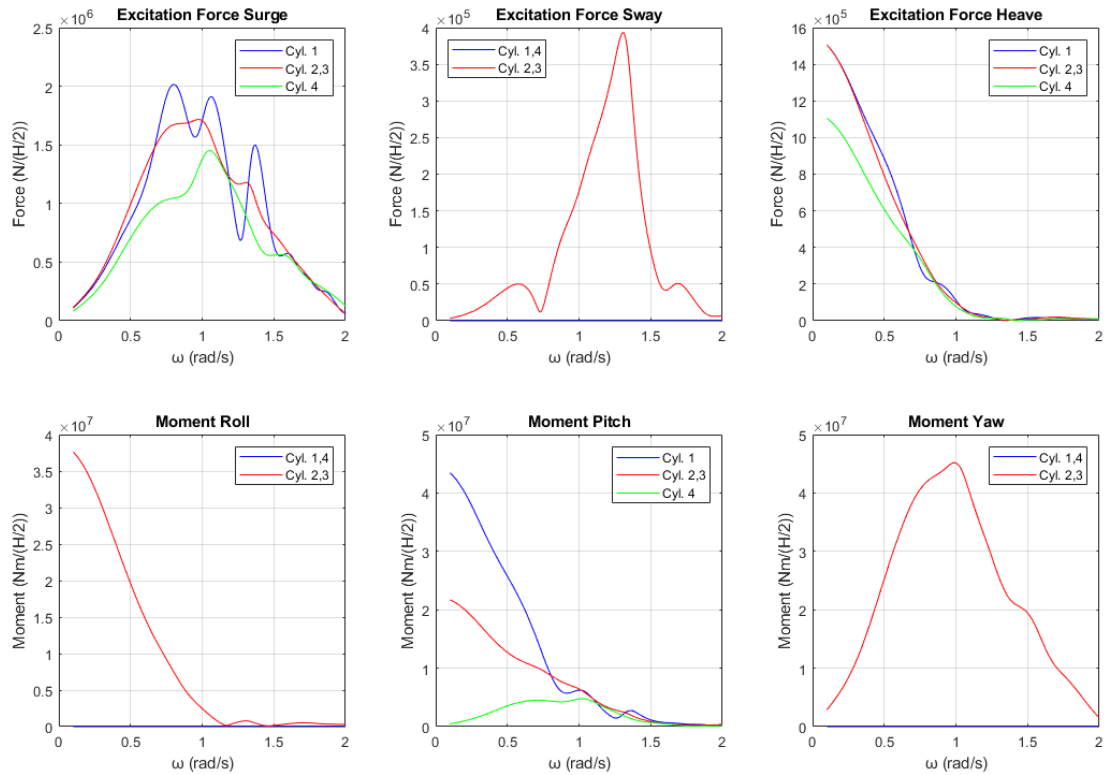


Εικόνα 159: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης



Εικόνα 160: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης

Από τις Εικόνες 157-160 παρατηρούμε πως οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης αλλάζουν σημαντικά όταν αυξάνουμε τον αριθμό των στοιχείων, από 300 σε 500. Όταν ο αριθμός των στοιχείων αλλάξει από 500 σε 700 παρατηρούμε πως οι δυνάμεις δεν αλλάζουν σημαντικά και η απόκλιση είναι πάρα πολύ μικρή, οπότε η διακριτοποίηση των κυλίνδρων με 500 στοιχεία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 161 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης $\beta = 0^\circ$.

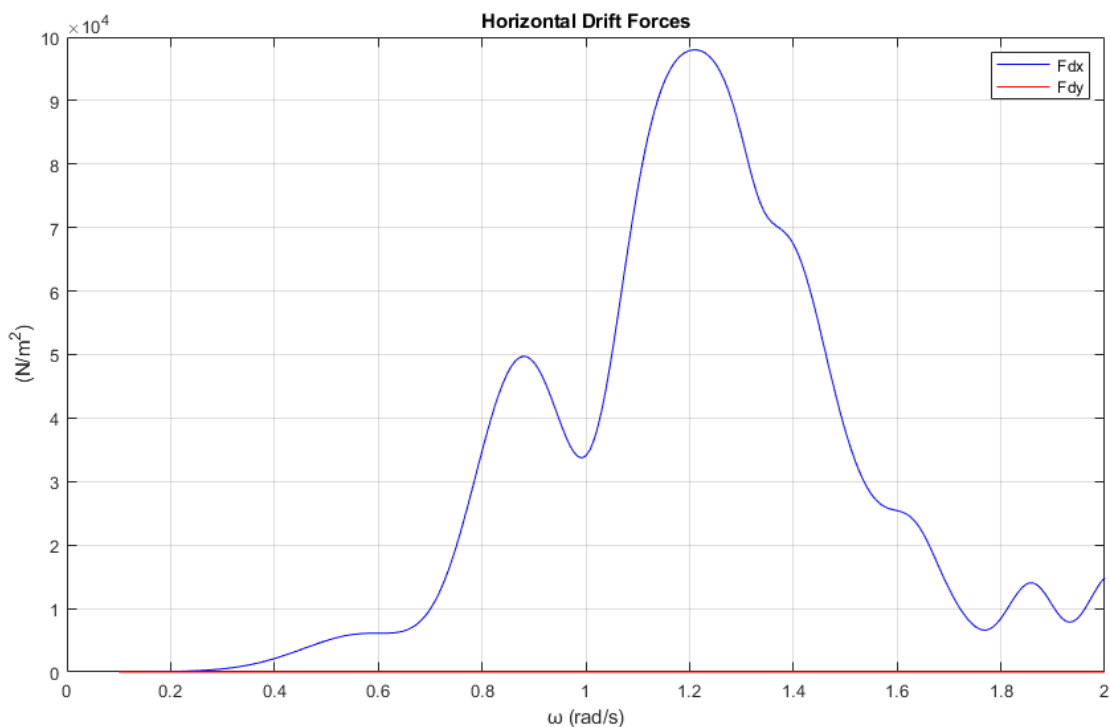


Εικόνα 161: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης

Από την Εικόνα 161 παρατηρούμε πως ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται εντονότερα στους κυλίνδρους 1 και 4 της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, για τον κύλινδρο 1 ικανοποιούνται και οι δύο συνθήκες ενώ για τον κύλινδρο 4 ικανοποιείται μόνο η Neumann. Αντιθέτως, το φαινόμενο της παγίδευσης εμφανίζεται στους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y , με την Neumann να είναι η μόνη συνθήκη που ικανοποιείται. Για τον κύλινδρο 1 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.80 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.06 \text{ r/s}$. Για τους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.31 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα για τον κύλινδρο 4 στην συχνότητα $\omega \cong 1.05 \text{ r/s}$. Παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται και στις οριζόντιες δυνάμεις F_x αλλά και στις F_y , οι μέγιστες δυνάμεις εμφανίζονται στον κύλινδρο 1, ενώ οι μικρότερες ασκούνται στους κυλίνδρους 2 και 3. Όπως και στην παράγραφο 3.3 για τους τέσσερις πλωτούς κυλίνδρους σε μορφή τετραγώνου, έτσι και εδώ θα διαχωρίσουμε τη μελέτη σε δύο ενότητες. Στην πρώτη θα θεωρήσουμε πως οι κύλινδροι είναι ακίνητοι, ενώ στη δεύτερη θα μπορούν να ταλαντωθούν ελεύθερα. Με τον τρόπο αυτό θα ελέγξουμε πως αλλάζει η κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και πως οι κινήσεις της κατασκευής επηρεάζουν το φαινόμενο.

3.4.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στη διάταξη, φαίνονται στην Εικόνα 162.

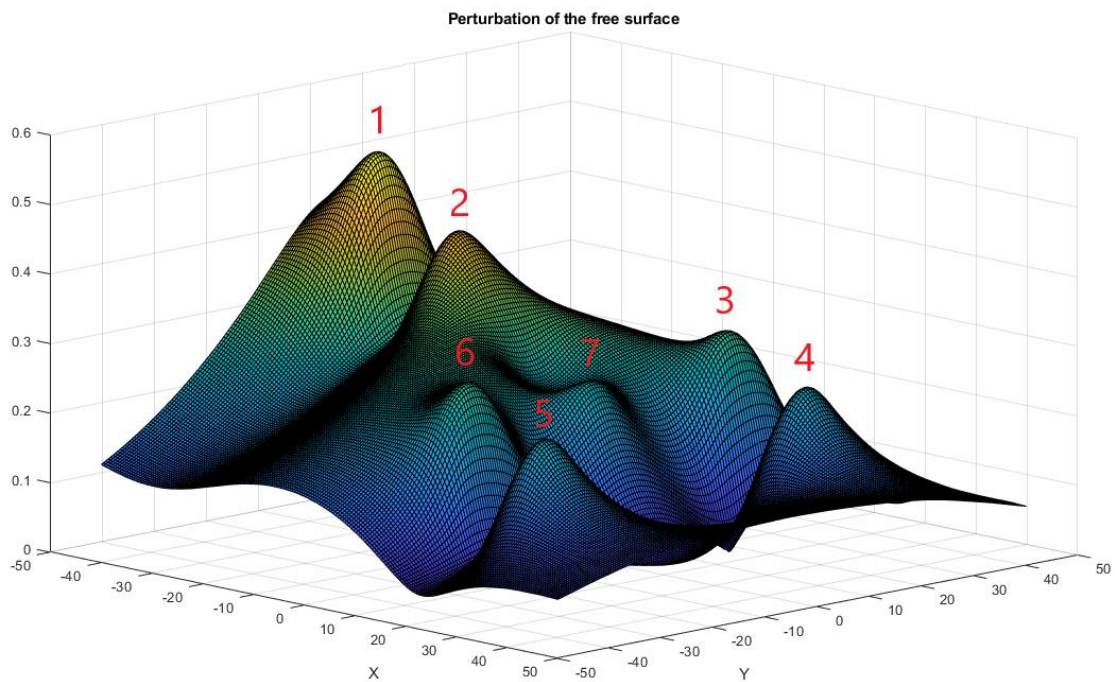


Εικόνα 162: Συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη

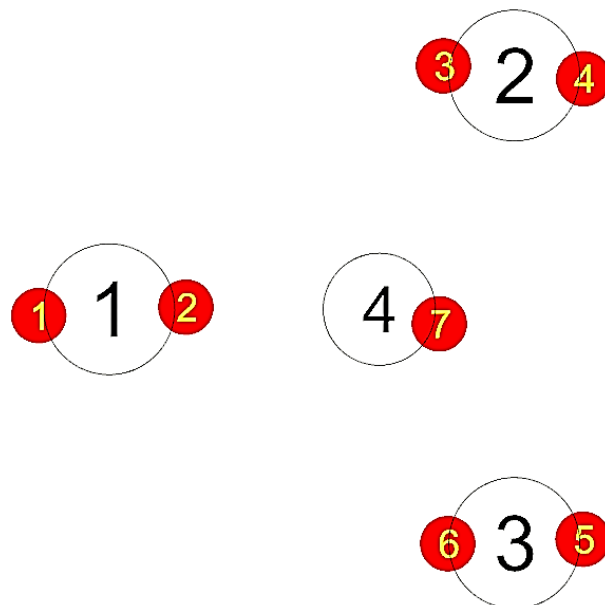
Στην Εικόνα 163 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 44 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 164 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς την συχνότητα αυτή.

Πίνακας 44: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.52 m
2	0.43 m
3	0.29 m
4	0.24 m
5	0.24 m
6	0.29 m
7	0.25 m



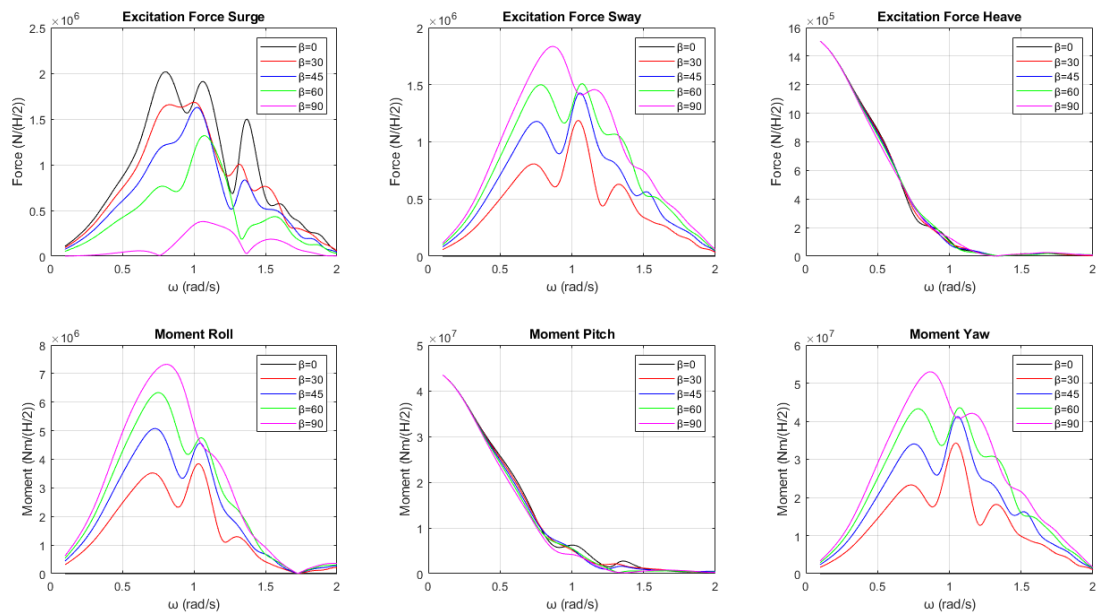
Εικόνα 163: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



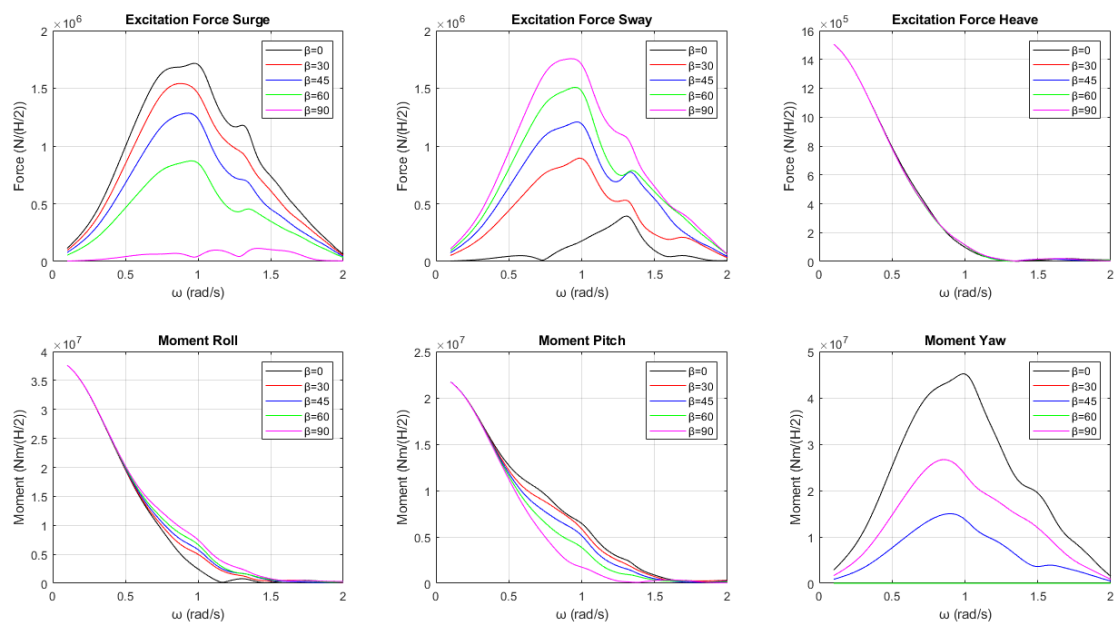
Εικόνα 164: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Προκειμένου να ελέγξουμε πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών όταν αλλάξει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, μελετάμε τη διάταξη για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 165-168

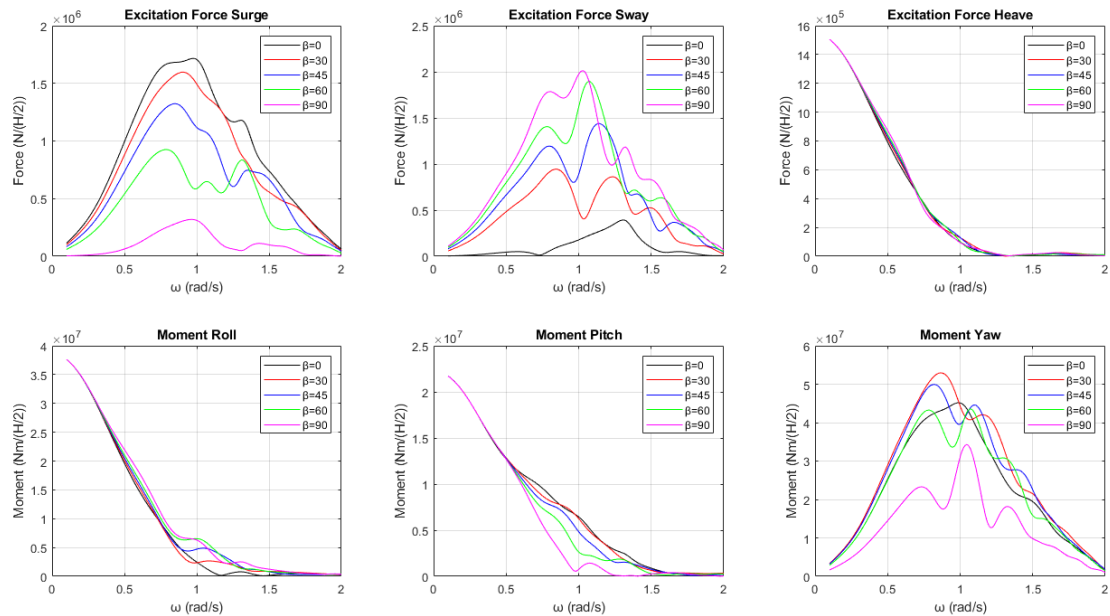
φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



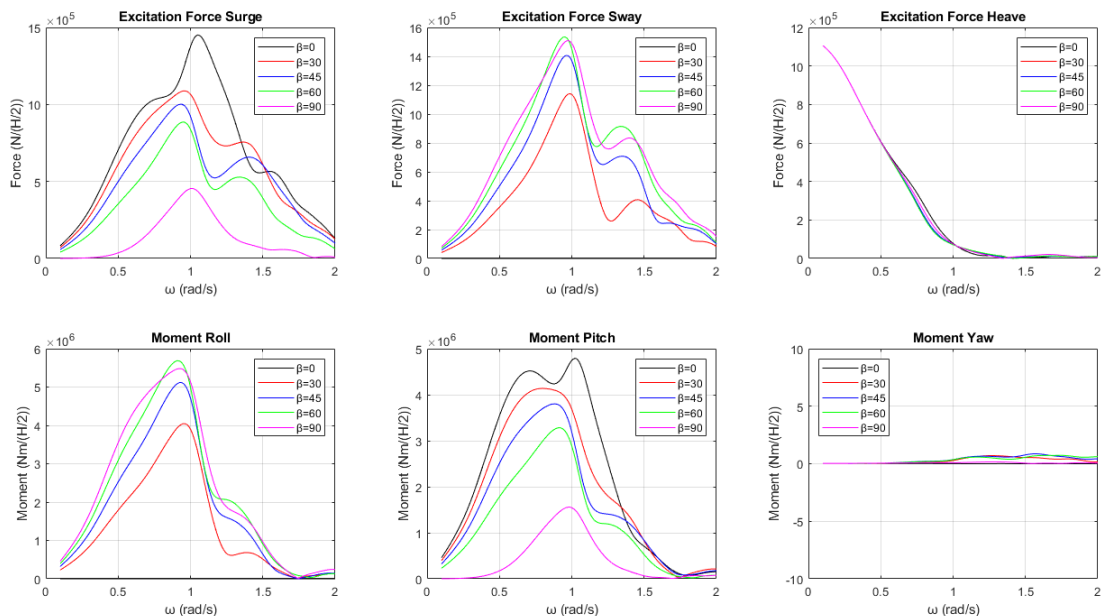
Εικόνα 165: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 166: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 167: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 168: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 165-168 παρατηρούμε πως παρόλο που αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών συνεχίζει να υπάρχει στην διάταξη. Όμως, οι συνθήκες Neumann και Dirichlet μεταβάλλονται όχι μόνο ως προς τις συχνότητες που τις ικανοποιούν αλλά και ως προς την κατεύθυνση των δυνάμεων διέγερσης. Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Στον Πίνακα

45 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

Πίνακας 45: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.80$	$\cong 1.06$
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.35$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.06$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.91$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.79$	$\cong 1.31$
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.05$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.96$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.93$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.95$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.00$	–

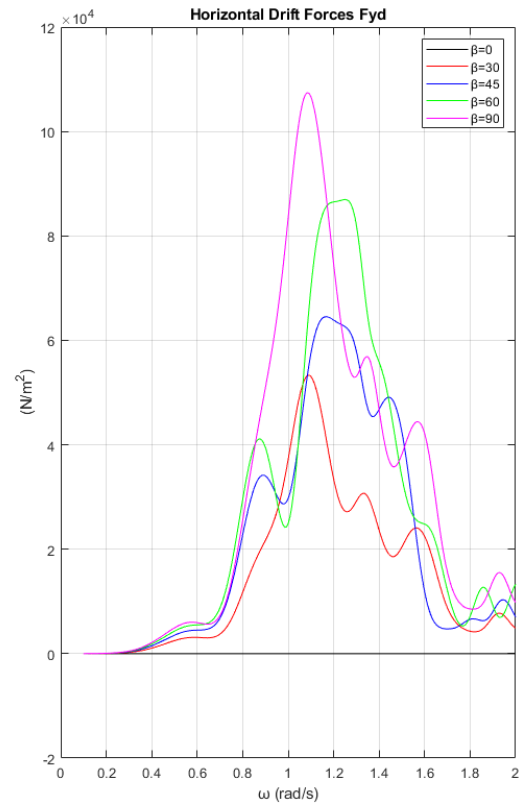
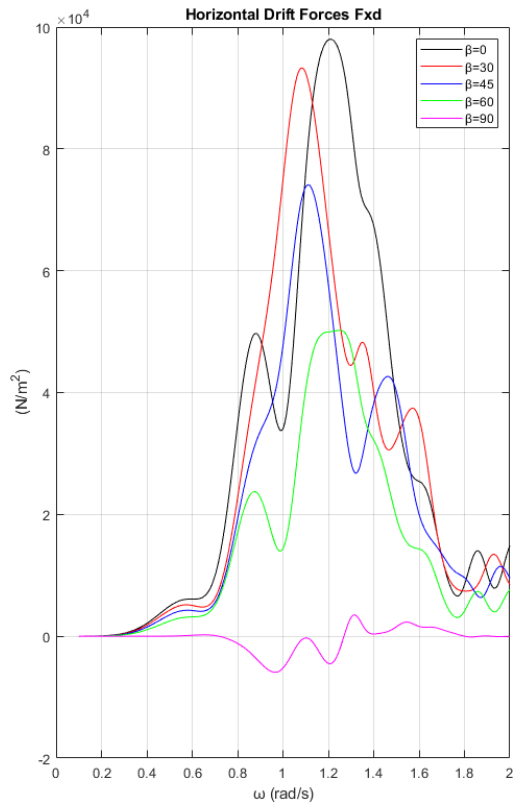
Από τον Πίνακα 45 παρατηρούμε πως μόνο στον κύλινδρο 4 της διάταξης ικανοποιείται η συνθήκη Neumann για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Όμως παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται στο συγκεκριμένο κύλινδρο σε όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, αυτό δεν σημαίνει ότι ασκούνται σε αυτόν και οι μεγαλύτερες φορτίσεις. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ και 60° , τότε οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης. Στον κύλινδρο 4 της διάταξης ασκούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 90^\circ$. Στον Πίνακα 46 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y .

Πίνακας 46: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

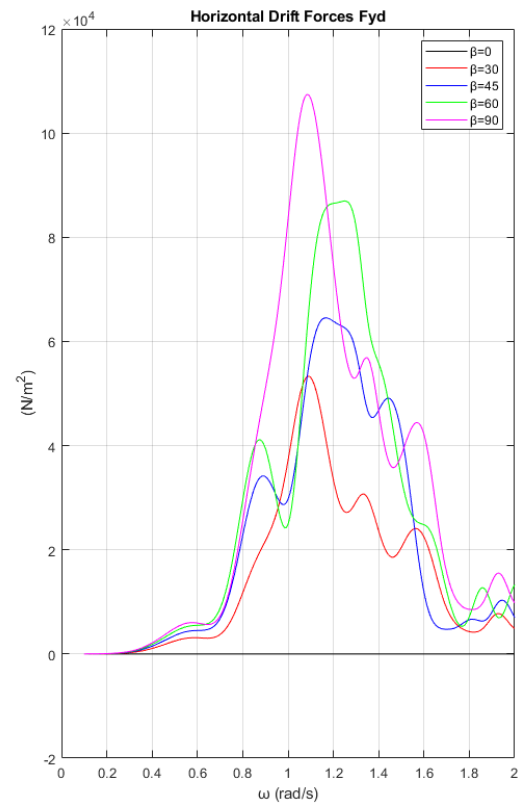
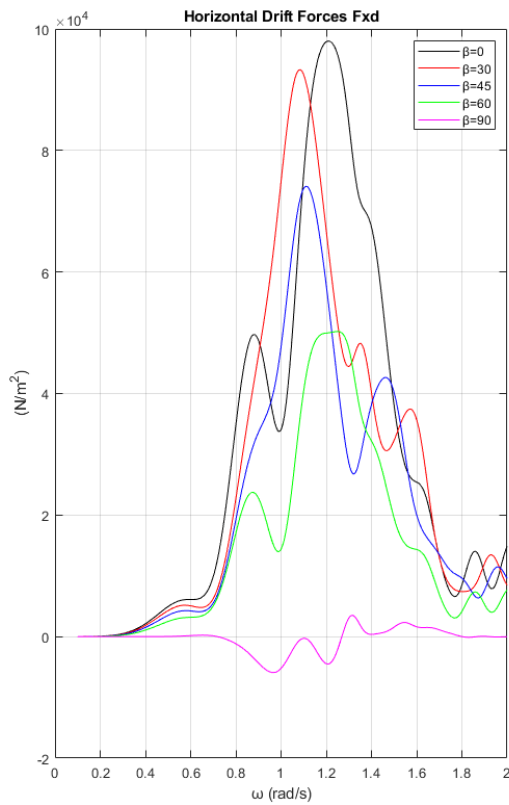
Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.05$	$\cong 1.32$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.06$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.86$	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.31$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.99$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.33$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.95$	$\cong 1.35$
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.31$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	$\cong 1.22$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.38$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.32$
Κύλινδρος 4		

Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.99$	$\cong 1.45$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.96$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.95$	$\cong 1.34$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.40$

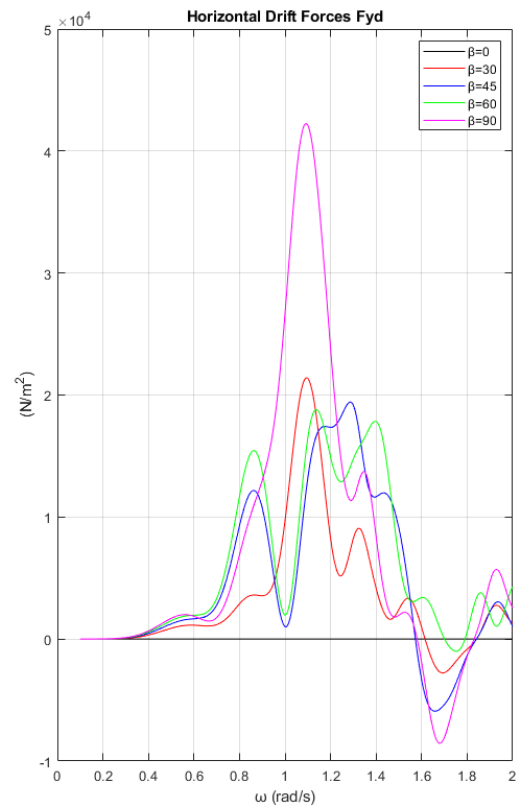
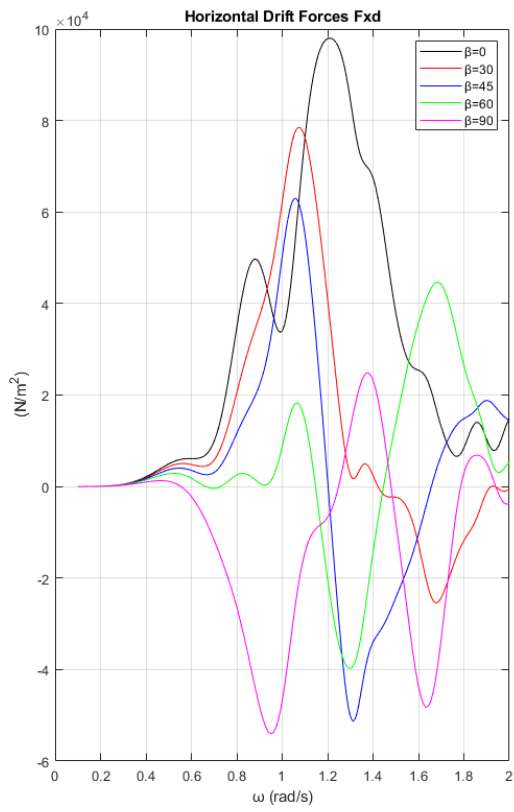
Από τον Πίνακα 46 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, με εξαίρεση τη γωνία $\beta = 0^\circ$ για τους κυλίνδρους 1 και 4 της διάταξης. Παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε σε ποιον κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις για κάθε γωνία πρόσπτωσης που μελετήθηκε. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης F_y ασκούνται στους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης. Όταν όμως η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες φορτίσεις ασκούνται στους κυλίνδρους 1 και 4. Αντίστοιχα όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$, τότε αυτές ασκούνται στους κυλίνδρους 1, 3 και 4. Τέλος, όταν η γωνία γίνει ίση με $\beta = 60^\circ$ και 90° τότε αυτές ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης. Σε πρώτη εκτίμηση συγκρίνοντας τον Πίνακα 45 με τον Πίνακα 46, μπορούμε να υποθέσουμε πως οι κύλινδρο 1 και 3 της διάταξης είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς παρατηρούνται σε αυτούς οι μεγαλύτερες δυνάμεις στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην Εικόνα 169 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 170-173 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



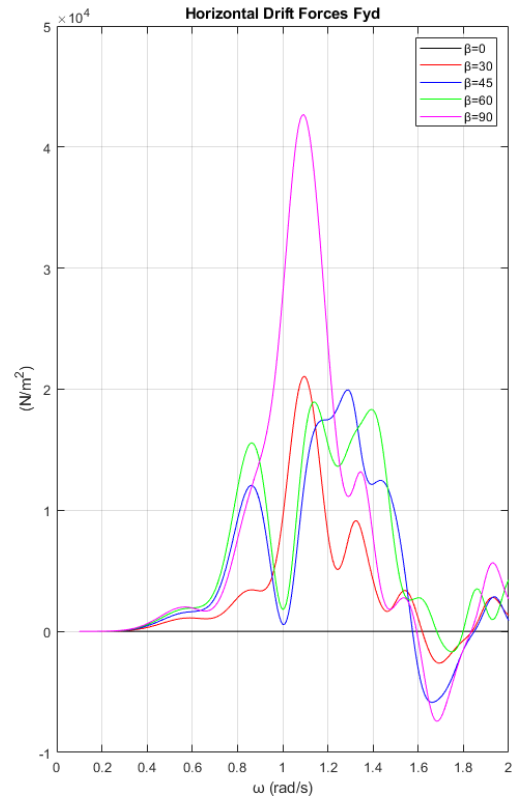
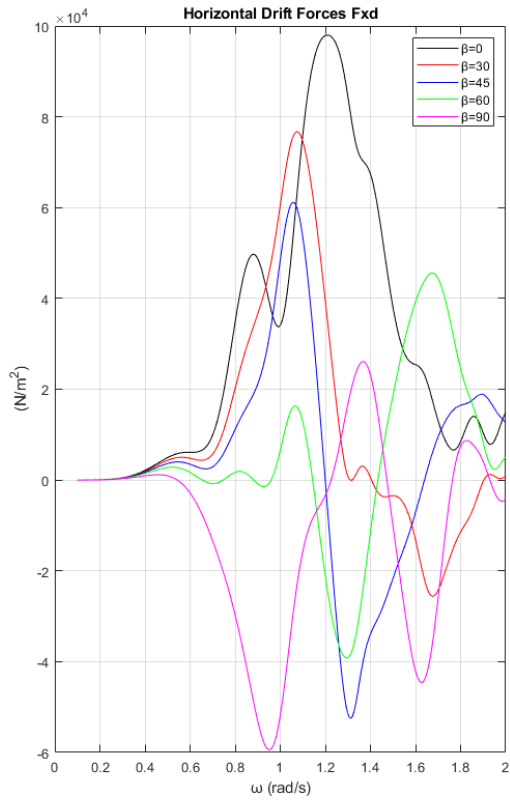
Εικόνα 169: Συνολικές οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



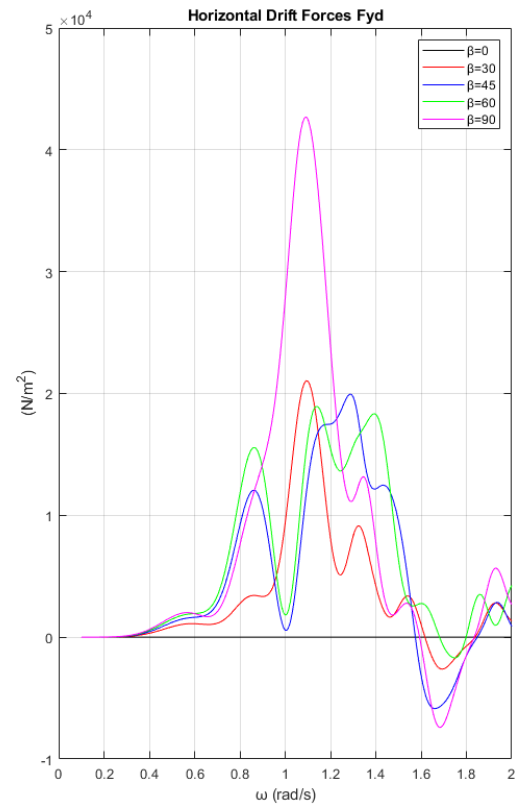
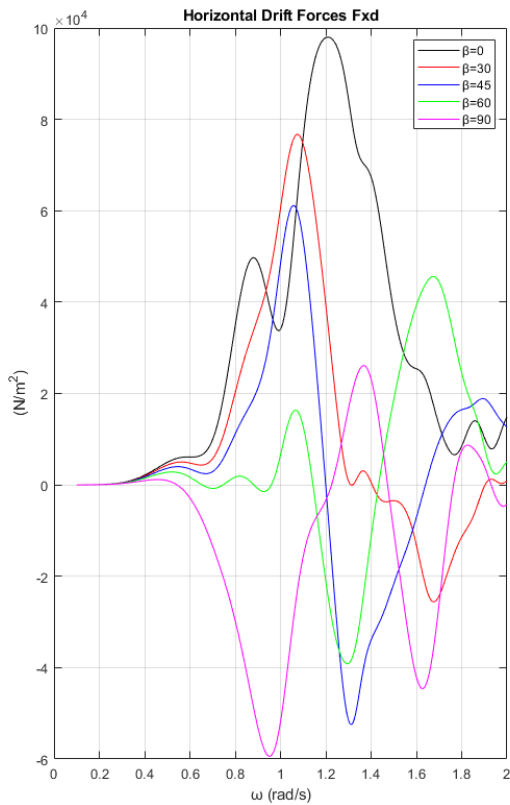
Εικόνα 170: Οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 171: Οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 172: Οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 173: Οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Για την αναπαράσταση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας θα αξιοποιήσουμε τις συχνότητες εκείνες όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 47 φαίνονται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης.

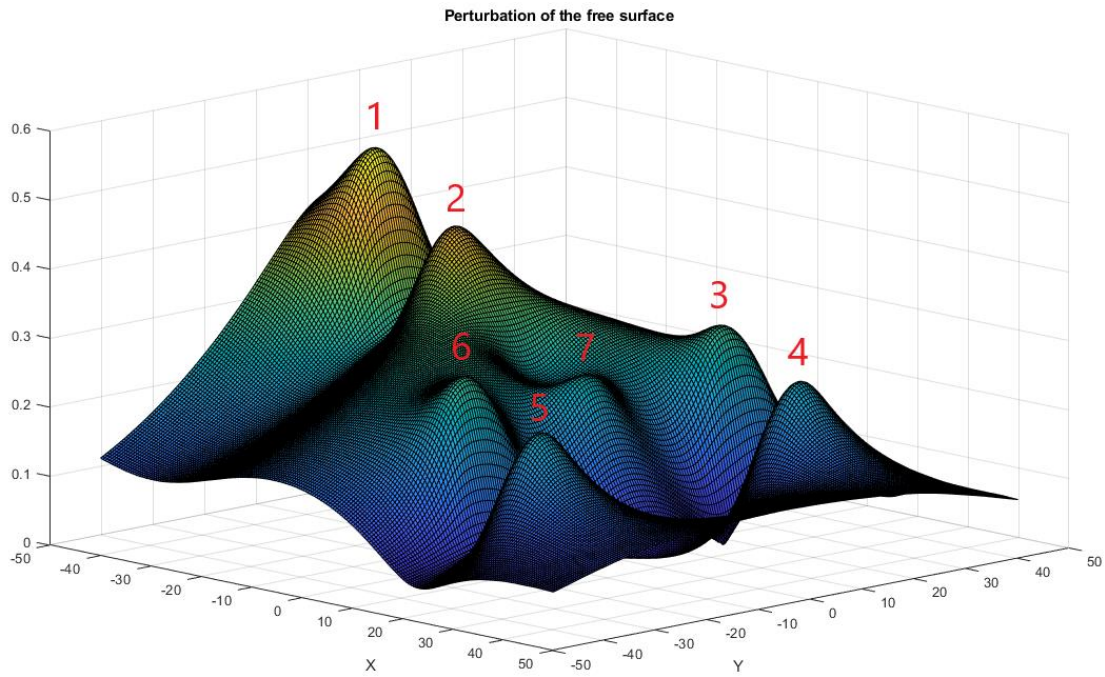
Πίνακας 47: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.80$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 1	F_x	ΟΧΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.02$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	Κύλινδρος 3	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	Κύλινδρος 3	F_y	ΝΑΙ

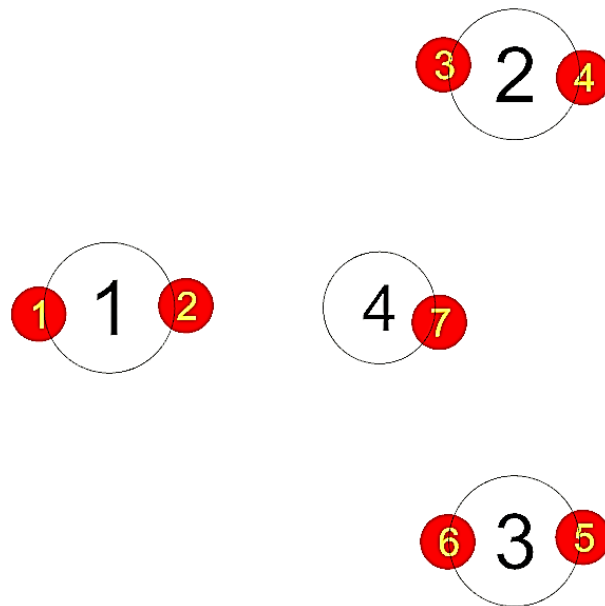
Στην Εικόνα 174 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann στον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 48 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 175 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 48: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.52 m
2	0.43 m
3	0.29 m
4	0.24 m
5	0.24 m
6	0.29 m
7	0.25 m



Εικόνα 174: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για την συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



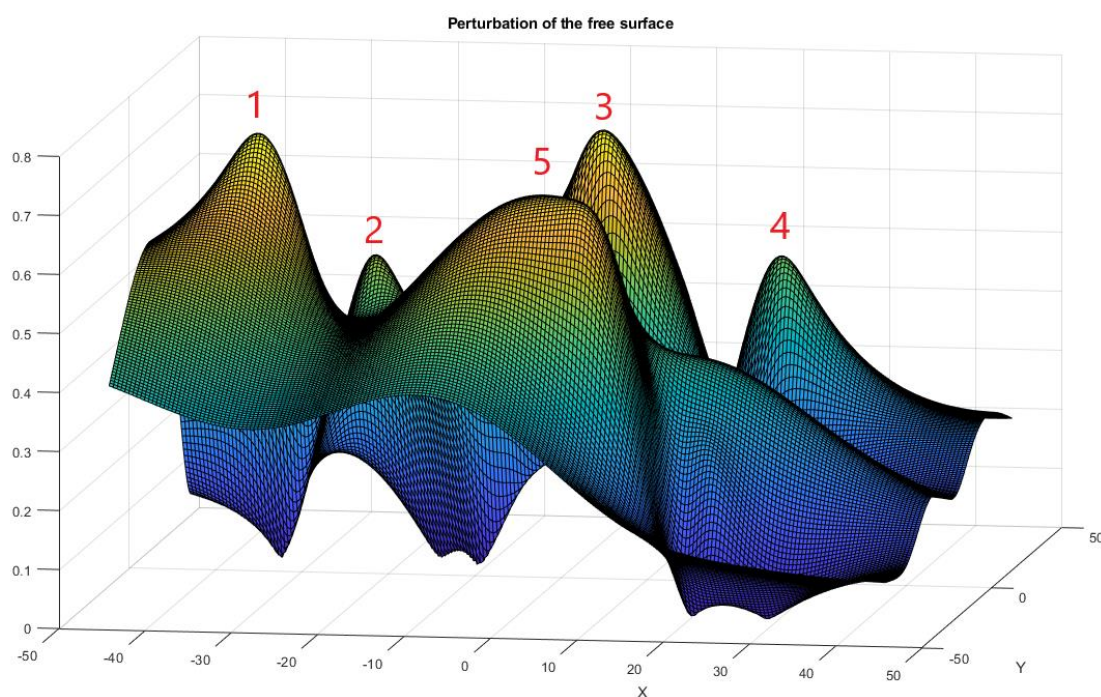
Εικόνα 175: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 176 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 49 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

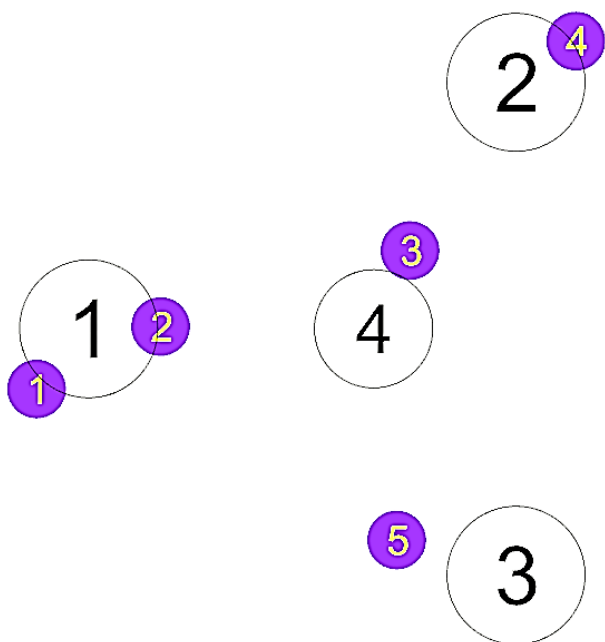
Εικόνα 177 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 49: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.76 m
2	0.54 m
3	0.74 m
4	0.49 m
5	0.69 m



Εικόνα 176: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x .

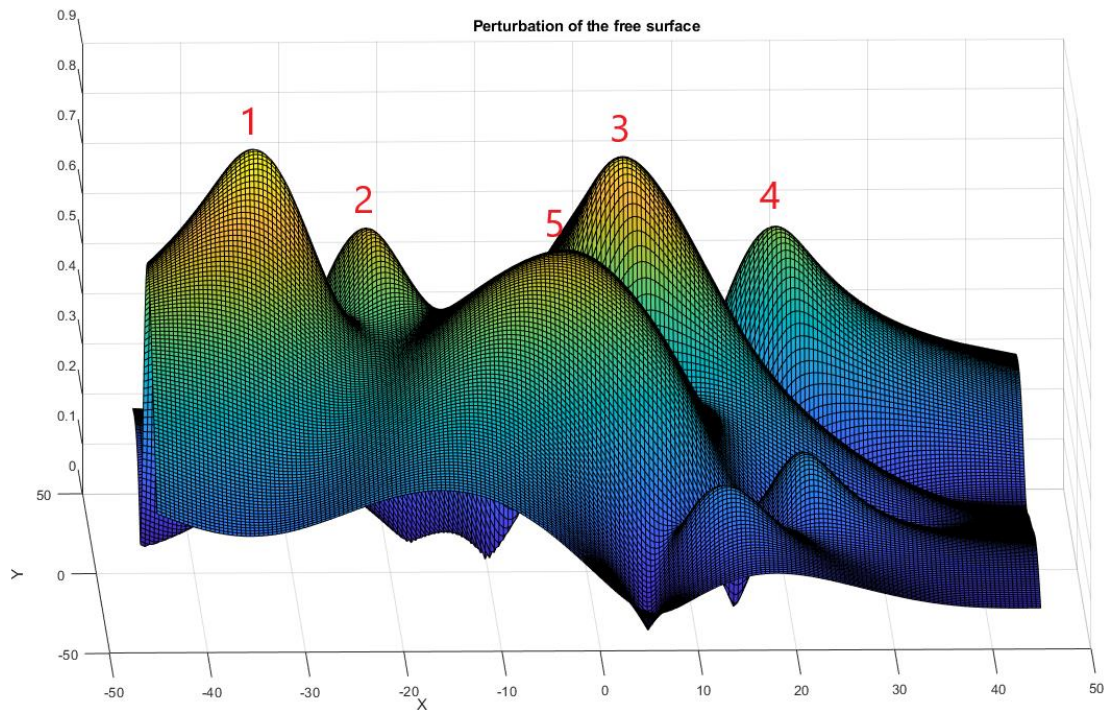


Εικόνα 177: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

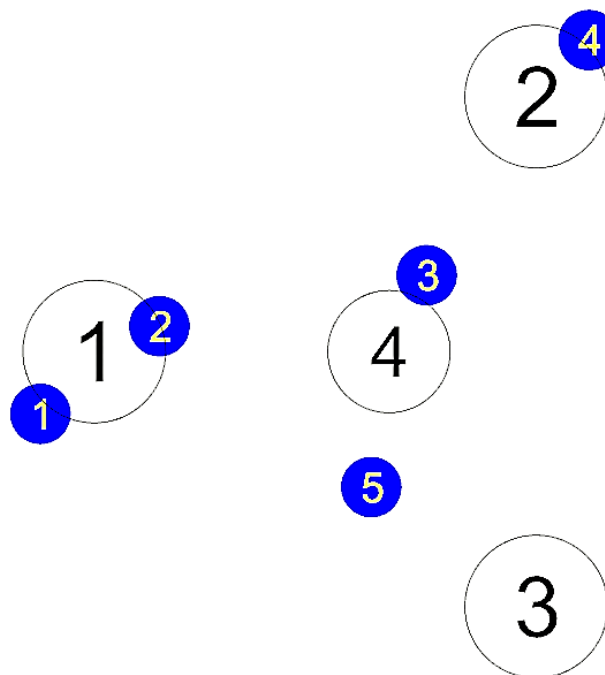
Στην Εικόνα 178 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 50 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 179 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 50: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.87 m
2	0.69 m
3	0.80 m
4	0.59 m
5	0.68 m



Εικόνα 178: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



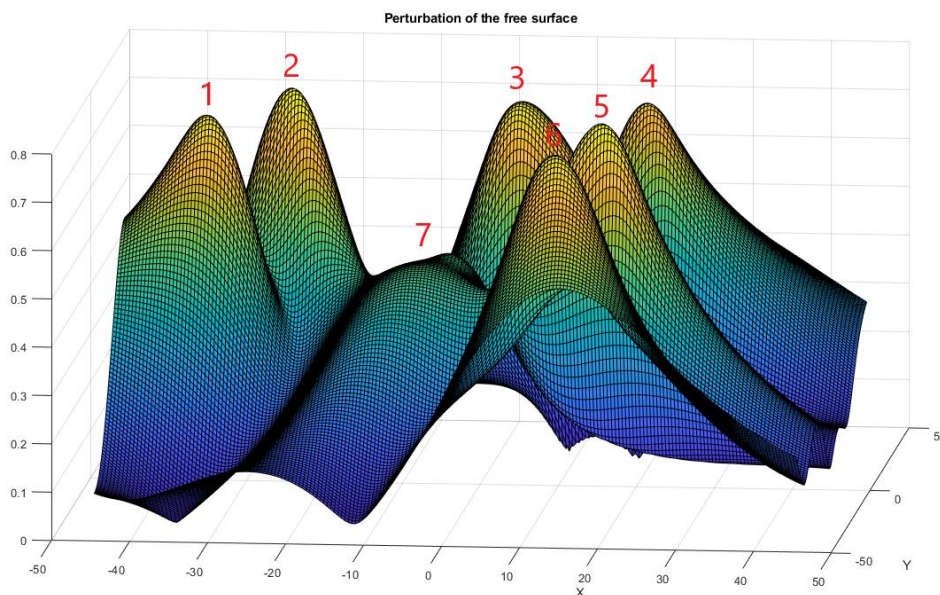
Εικόνα 179: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 180 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης

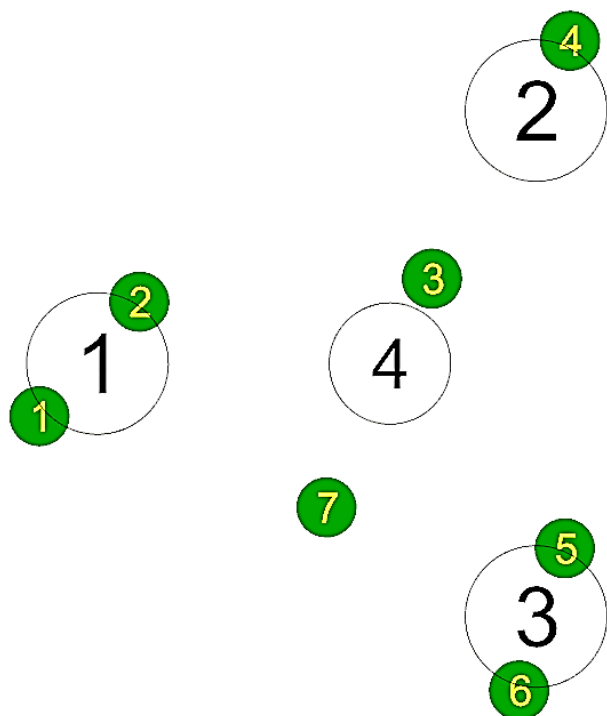
F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 51 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 181 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 51: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.77 m
2	0.80 m
3	0.77 m
4	0.71 m
5	0.80 m
6	0.77 m
7	0.48 m



Εικόνα 180: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

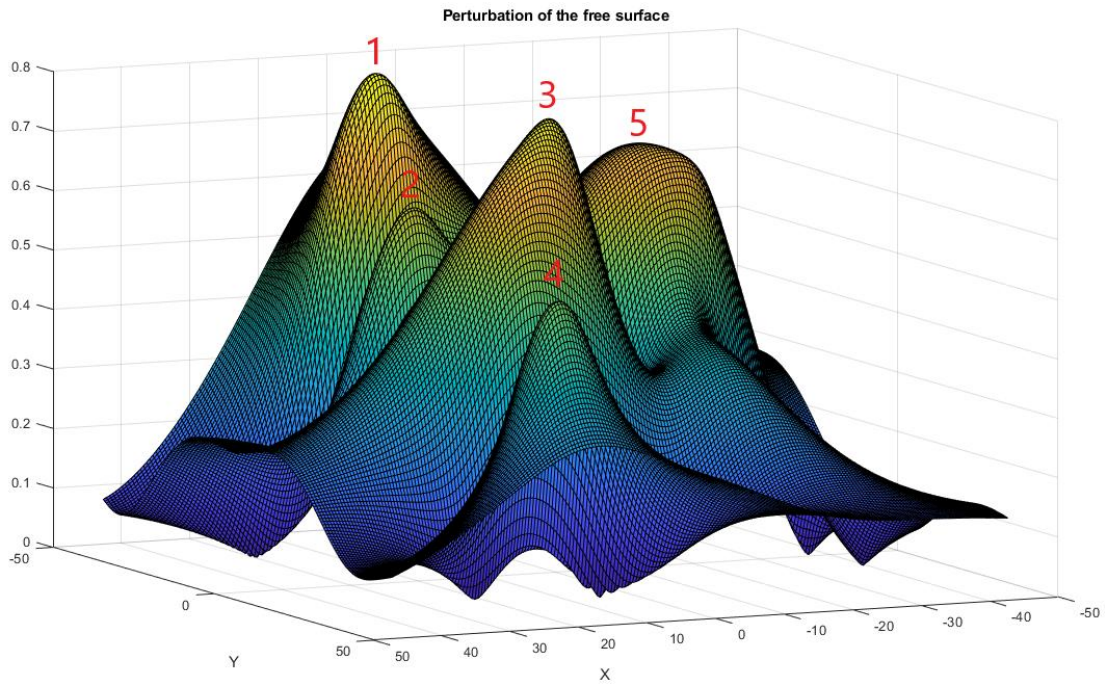


Εικόνα 181: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

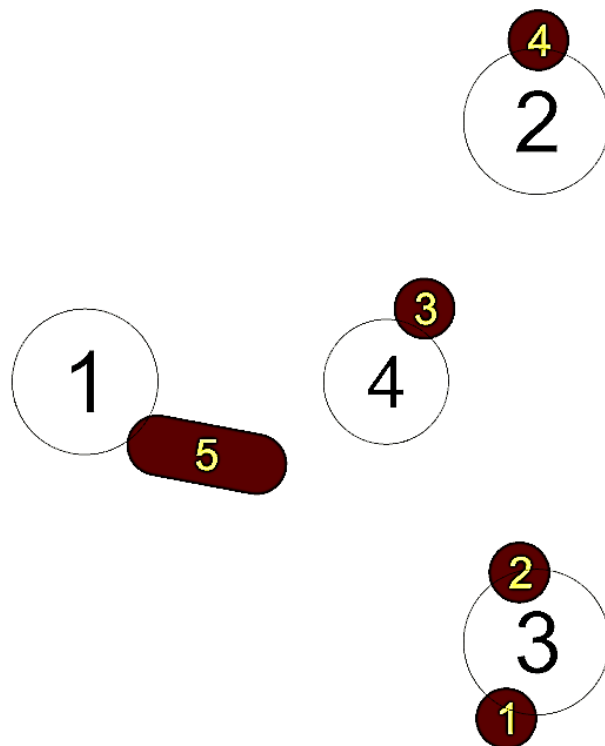
Στην Εικόνα 182 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 52 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 183 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 52: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.79 m
2	0.59 m
3	0.78 m
4	0.52 m
5	0.69 m



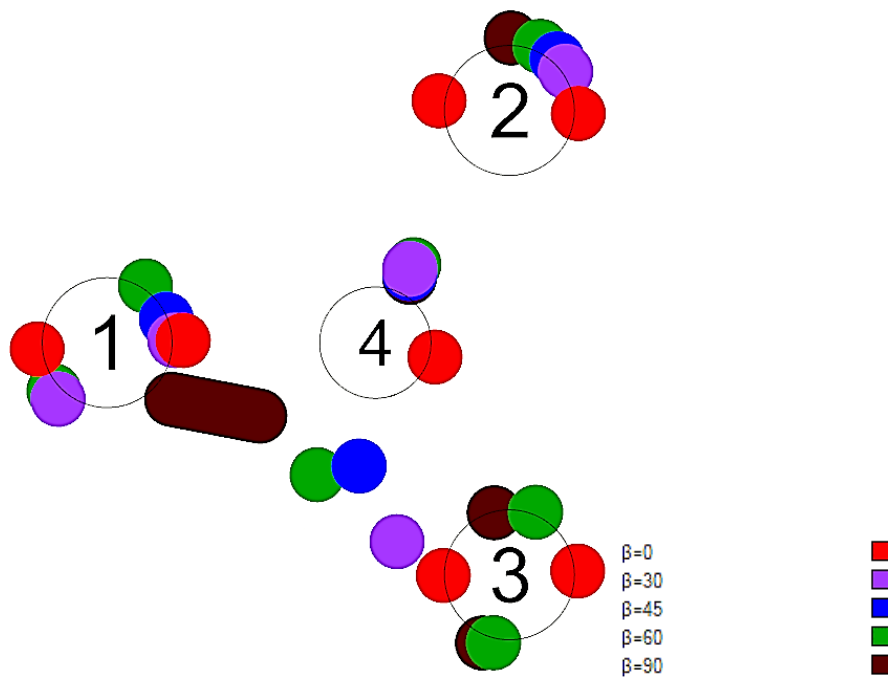
Εικόνα 182: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



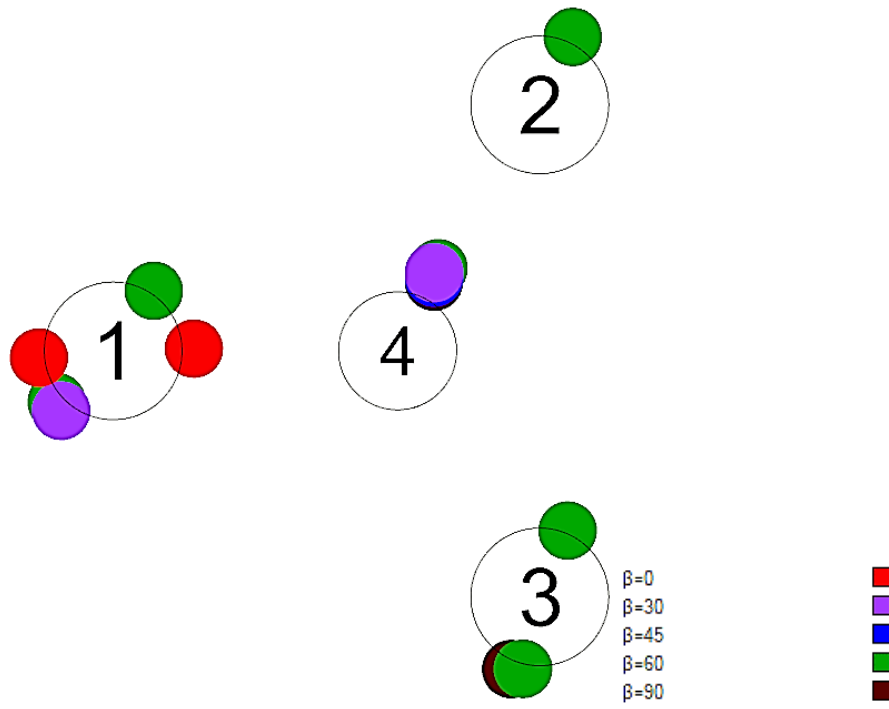
Εικόνα 183: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 184 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 185 φαίνονται οι θέσεις όλων

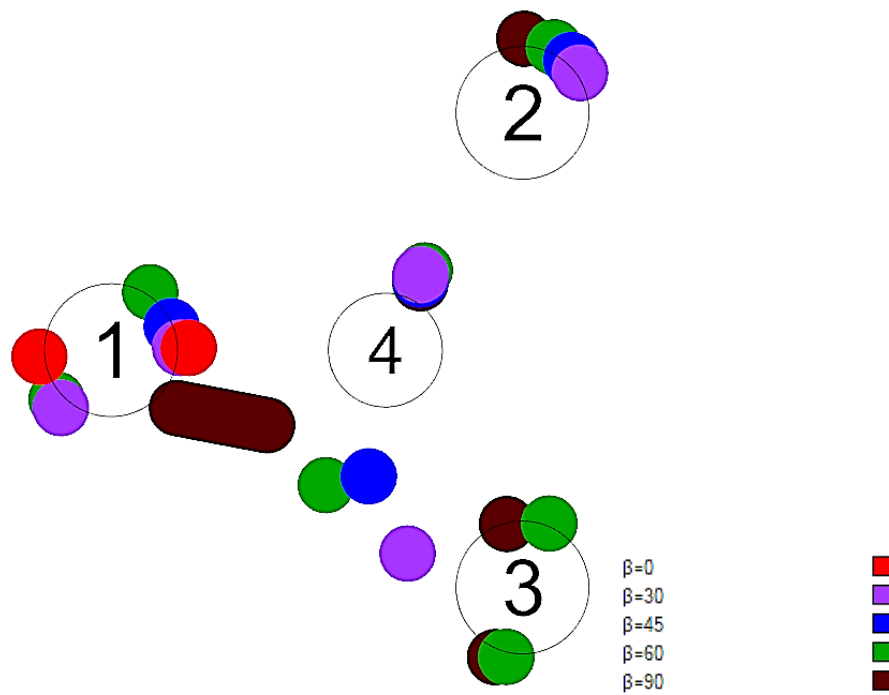
των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 185 συμπεραίνουμε πως στη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1 και 3. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού γίνει ίση με $\beta = 60^\circ$, οι δύο αυτές συσκευές παράγουν τη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς στους κυλίνδρους 1 και 3 το μέτρο της ανύψωσης σχηματίζει 2 κορυφές σε κάθε κύλινδρο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 185. Αν παρατηρήσουμε τις κορυφές που σχηματίζονται κοντά στον κύλινδρο 4 της διάταξης, βλέπουμε πως έχουμε μεγάλες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 186 φαίνονται οι κορυφές που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την Εικόνα 186 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορεί να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 1 της διάταξης, καθώς μπορεί να παράξει ενέργεια για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 184: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



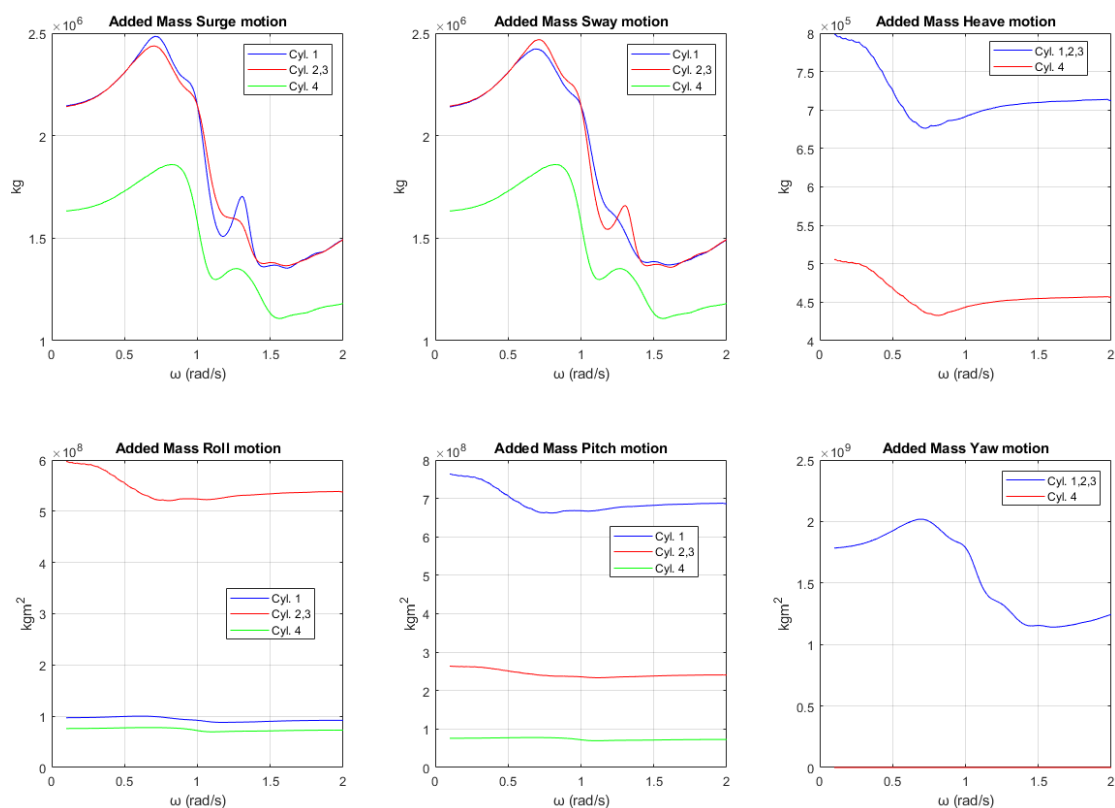
Εικόνα 185: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



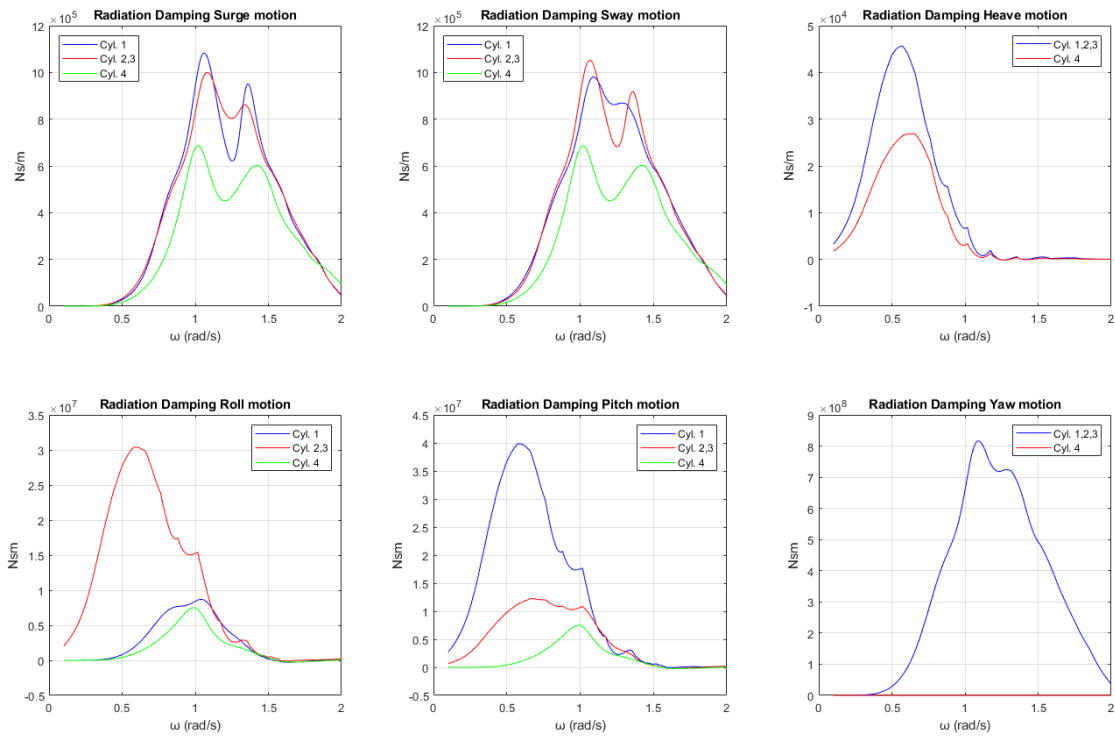
Εικόνα 186: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.4.2 Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem

Είναι εξίσου σημαντικό να μελετήσουμε τη διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων όταν αυτοί ταλαντώνονται ελεύθεροι. Έτσι, όχι μόνο θα ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, αλλά θα επιβεβαιώσουμε και αν οι κύλινδροι 1 και 3 είναι πράγματι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε αυτούς. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης δεν εξαρτώνται από την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού παρά μόνο από την γεωμετρία του σώματος. Στην Εικόνα 187 φαίνονται οι συντελεστές πρόσθετης μάζας στους κυλίνδρους της διάταξης και στην Εικόνα 188 οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

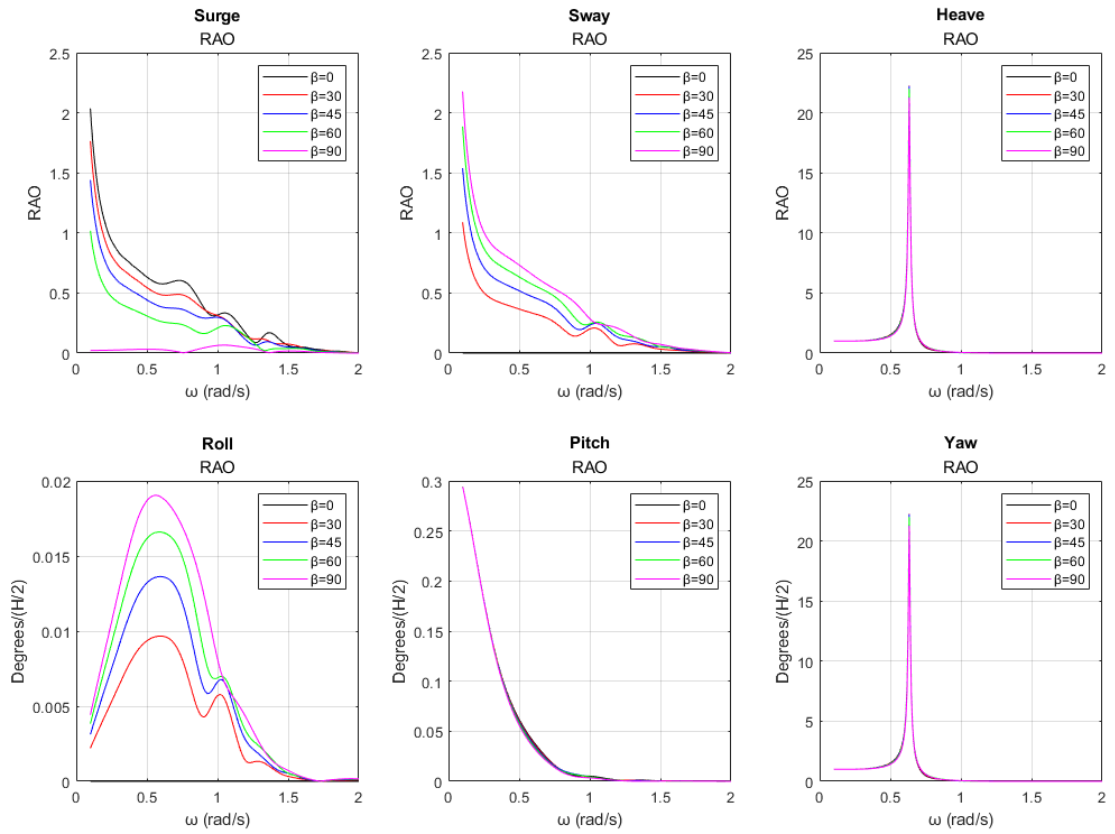


Εικόνα 187: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

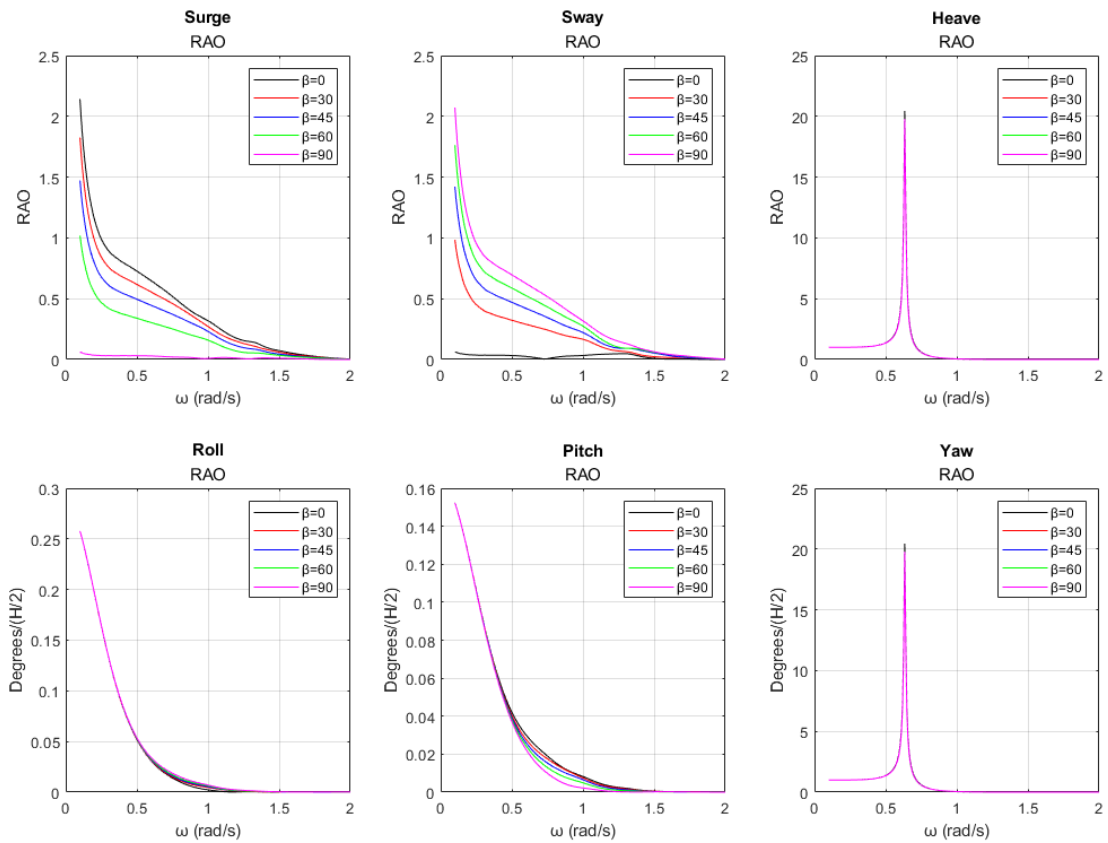


Εικόνα 188: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

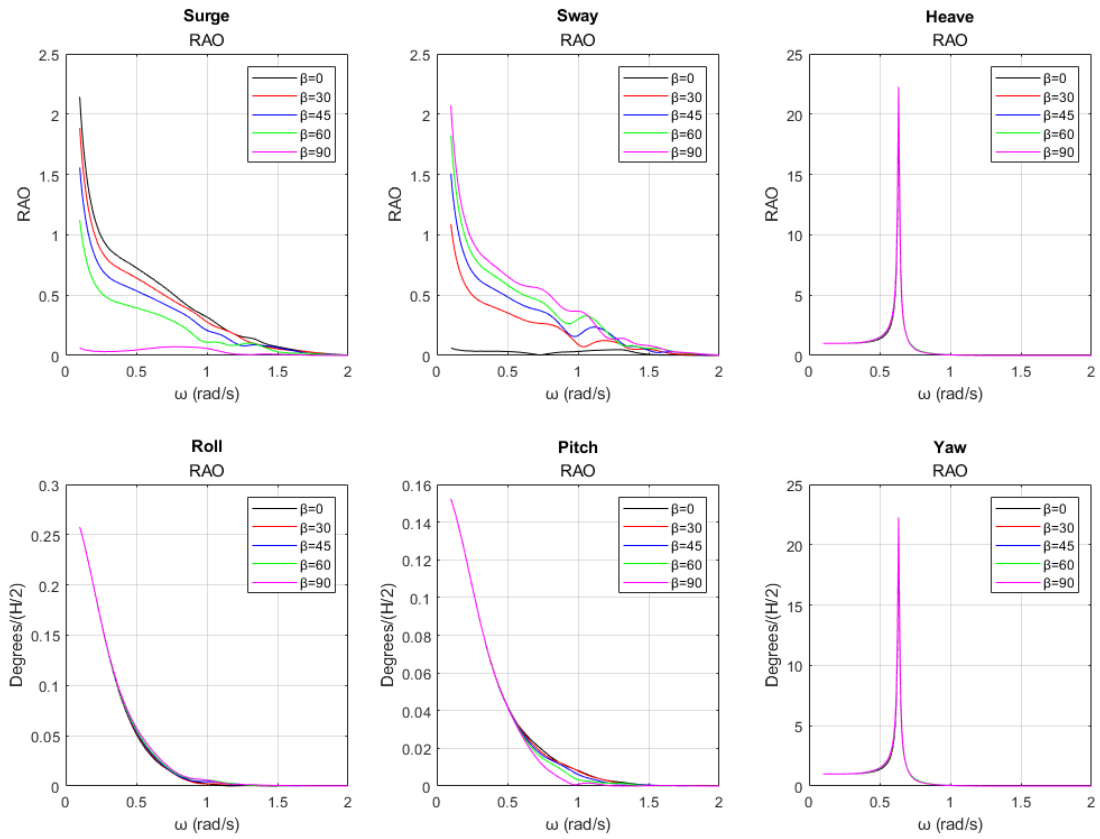
Οι κινήσεις των κυλίνδρων ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στις Εικόνες 189-192.



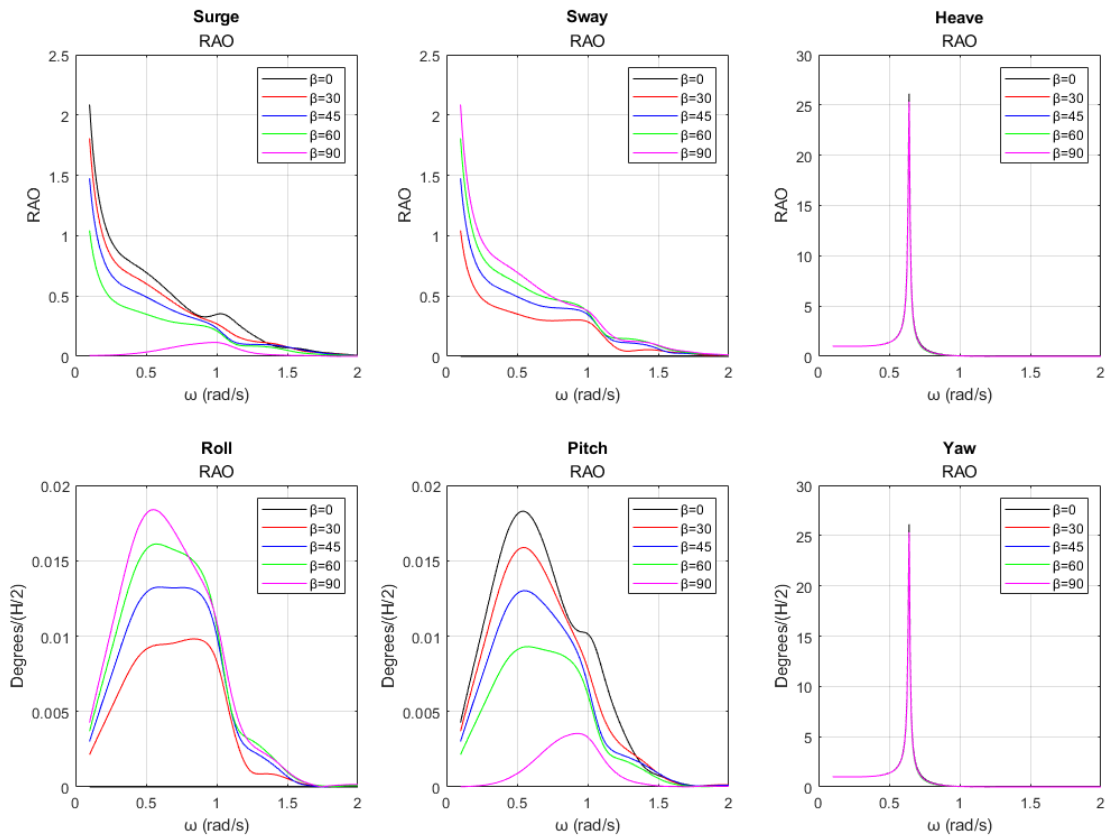
Εικόνα 189: Κινήσεις κυλίνδρου 1 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 190: Κινήσεις κυλίνδρου 2 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

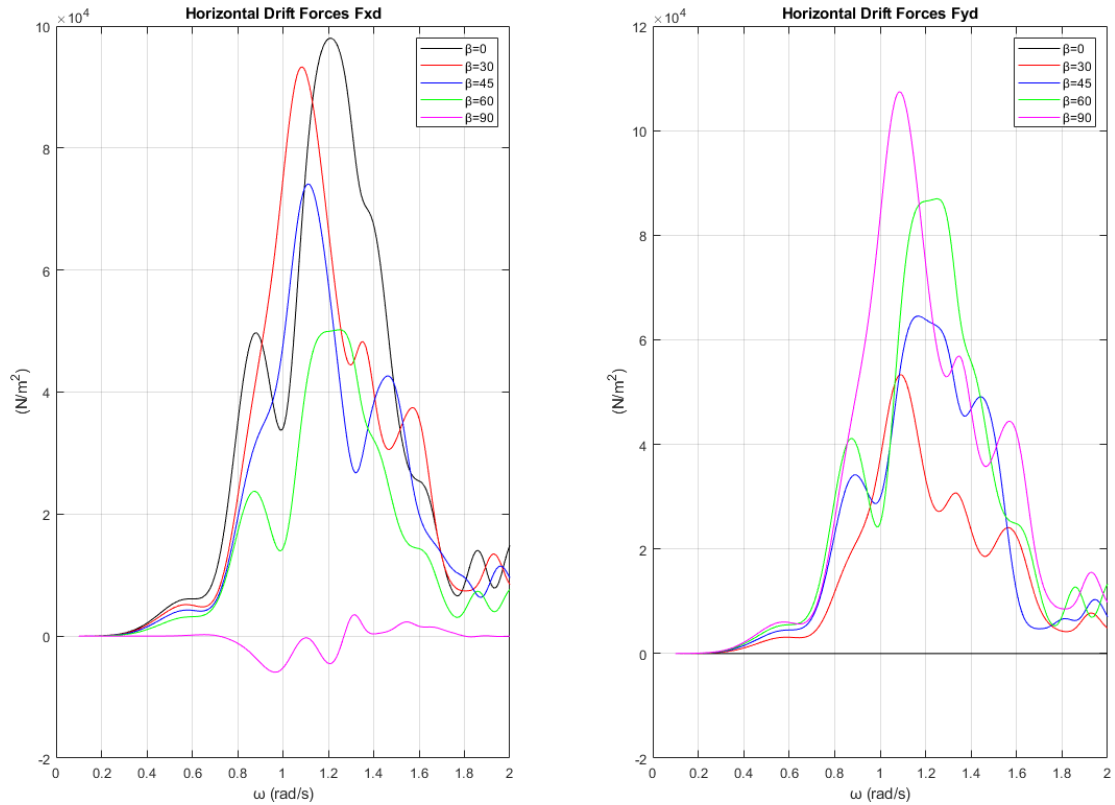


Εικόνα 191: Κινήσεις κυλίνδρου 3 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

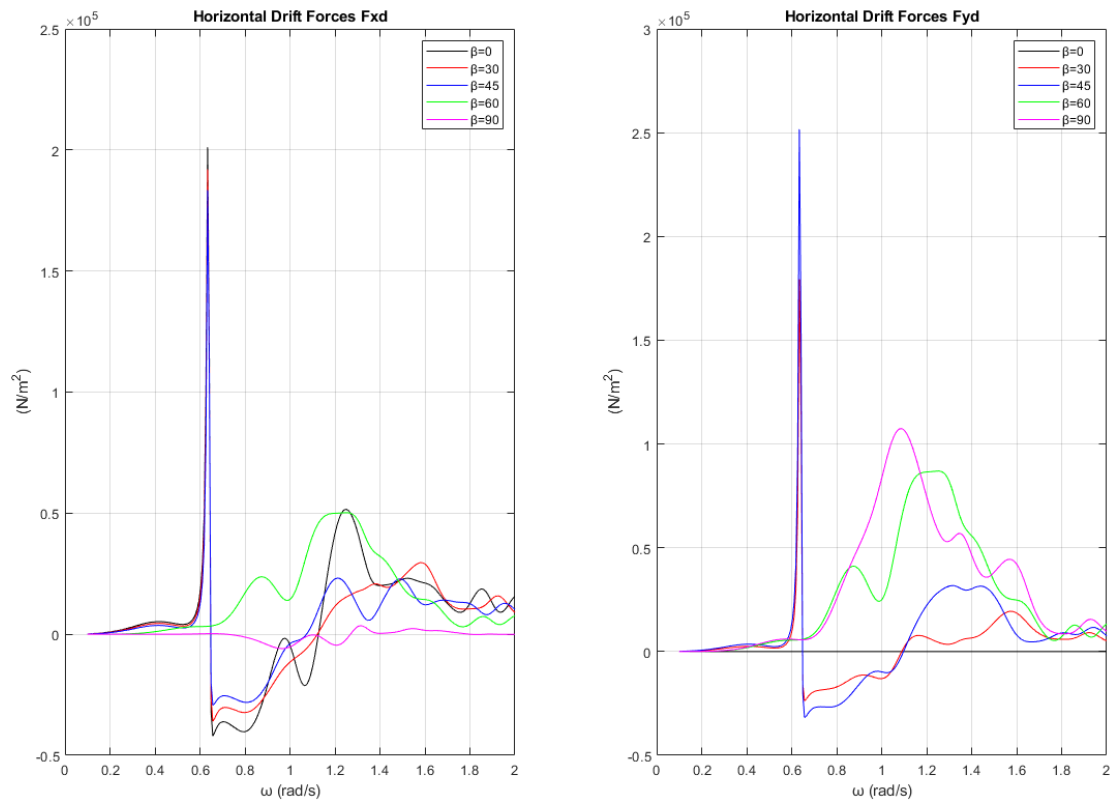


Εικόνα 192: Κινήσεις κυλίνδρου 4 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

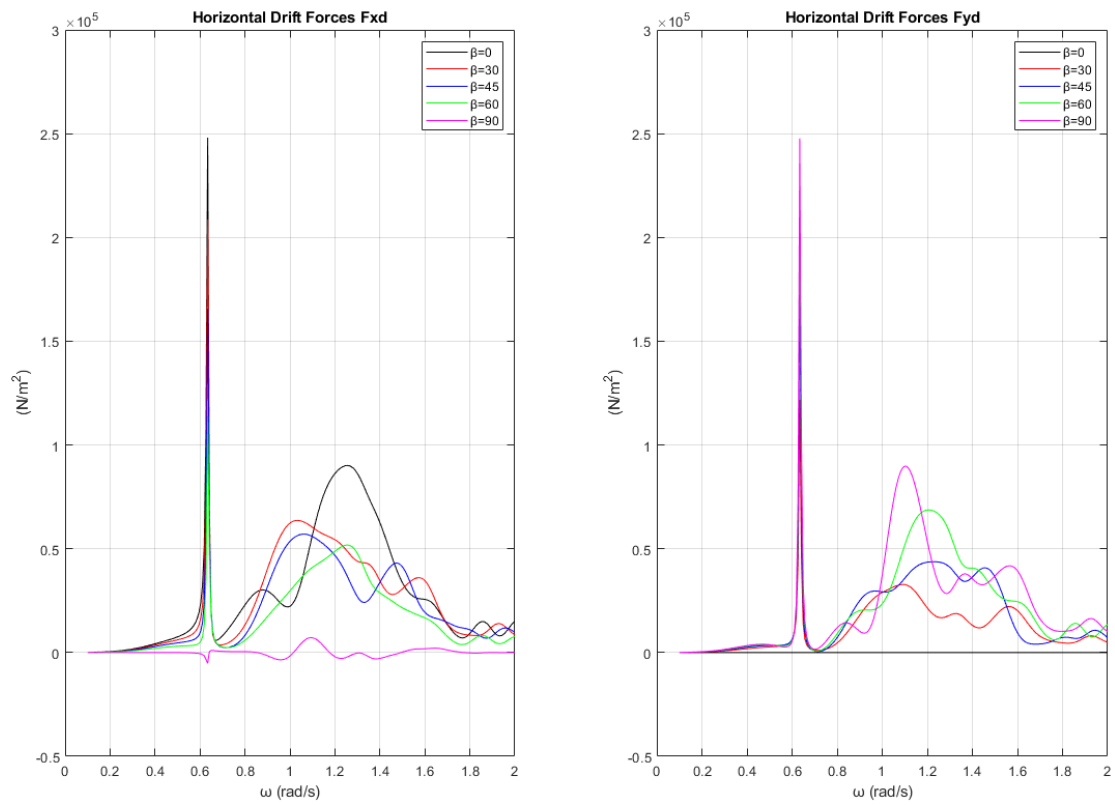
Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν (diffraction problem), όμως αλλάζουν οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 193 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem). Αντίστοιχα στην Εικόνα 194 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem). Στις Εικόνες 195-198 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem).



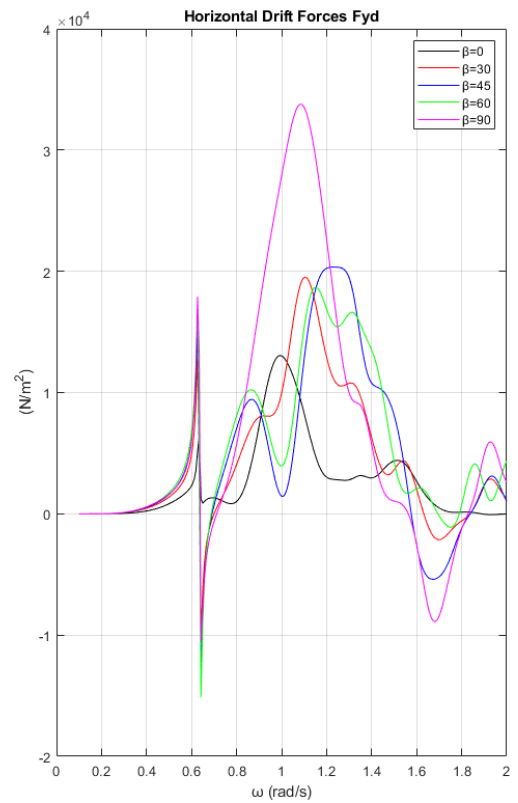
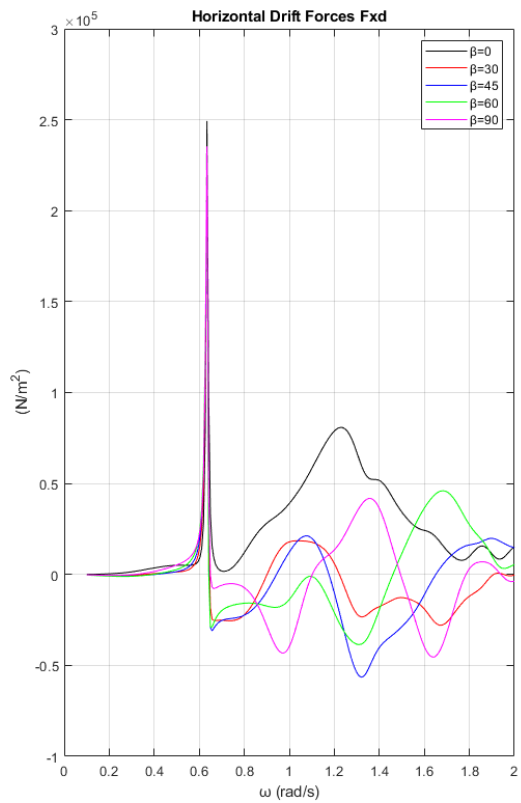
Εικόνα 193: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem)



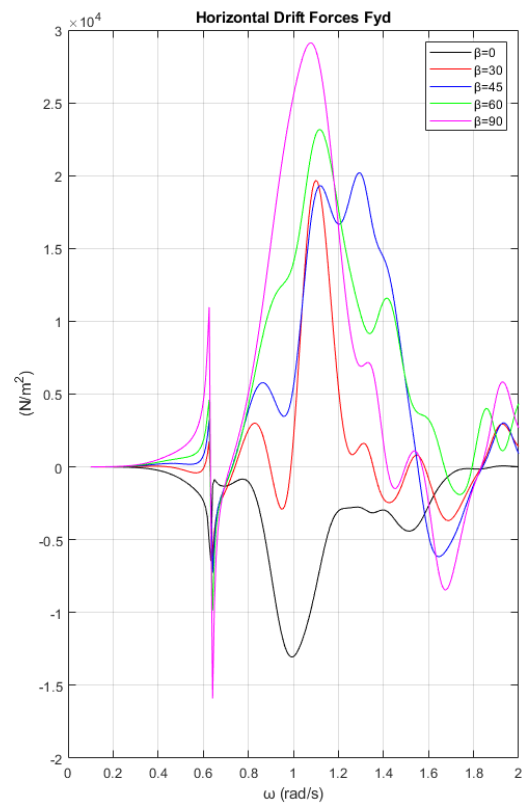
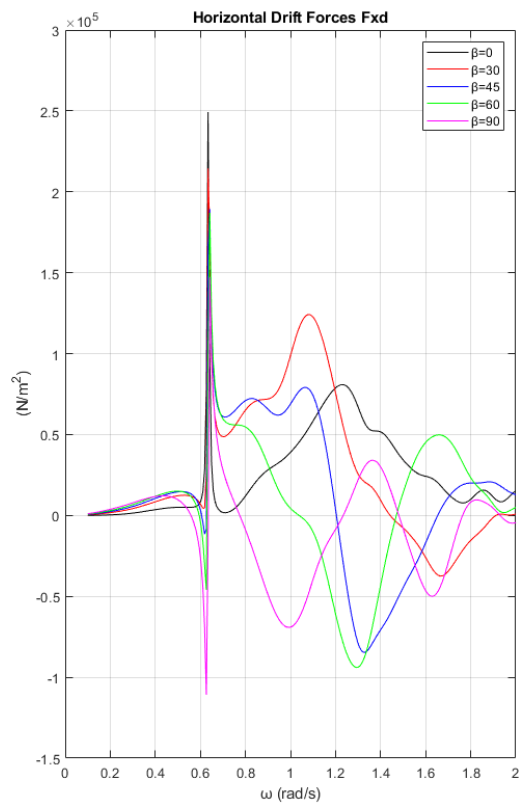
Εικόνα 194: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



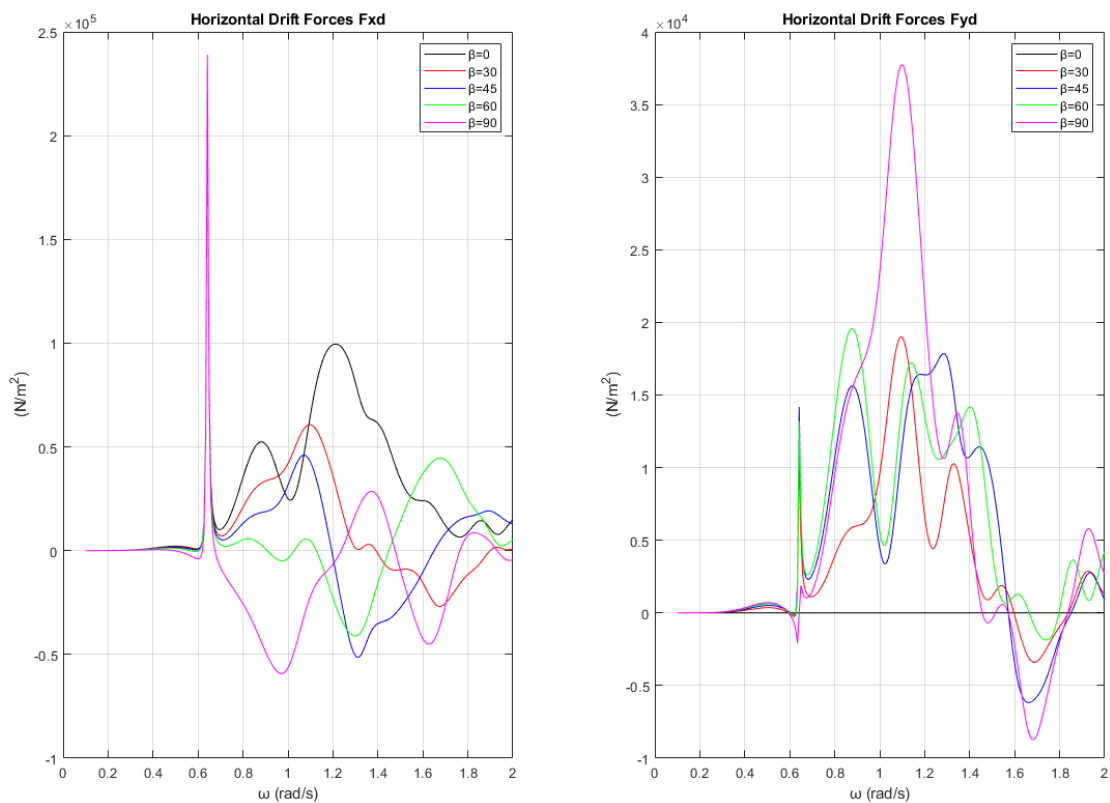
Εικόνα 195: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 196: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 197: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



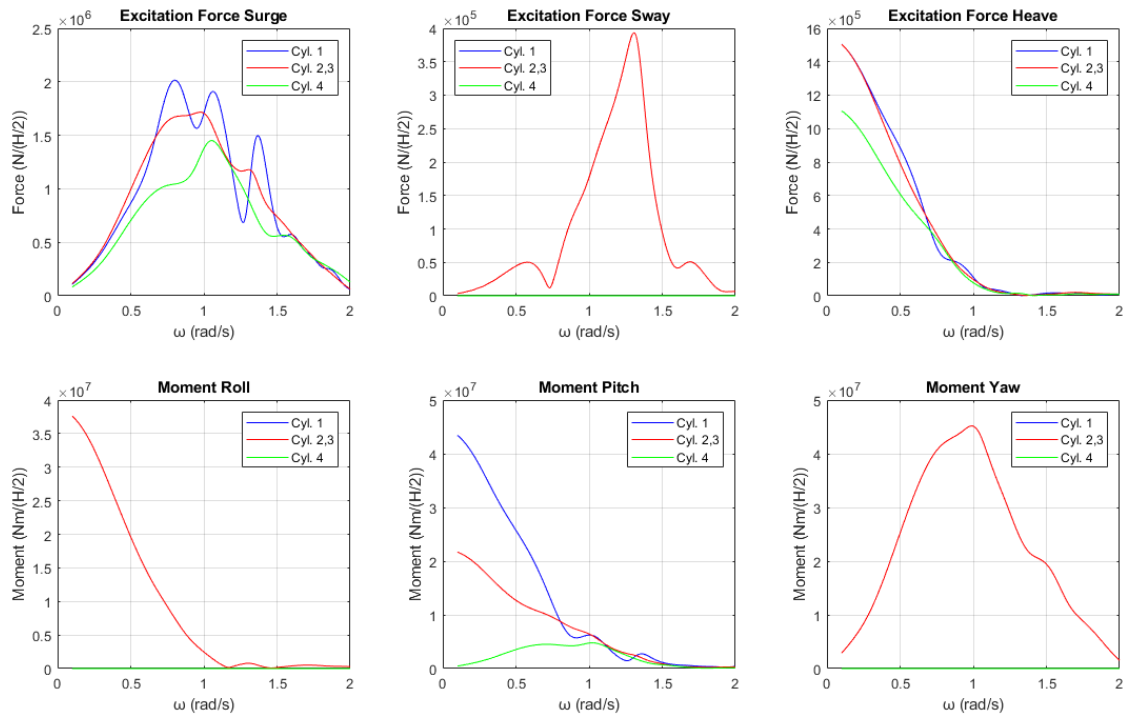
Εικόνα 198: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

Προκειμένου να δούμε πως αλλάζει το μέτρο τη ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω των κινήσεων των σωμάτων, θα το αναπαραστήσουμε στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Επειδή το φαινόμενο εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους κυλίνδρους για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, θα παρουσιάσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας μόνο για τις συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann, καθώς ασκούνται και οι μεγαλύτερες δυνάμεις στη συνθήκη αυτή. Στις Εικόνες 199-203 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης ανά γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Στον Πίνακα 53 φαίνονται σε ποιο κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης.

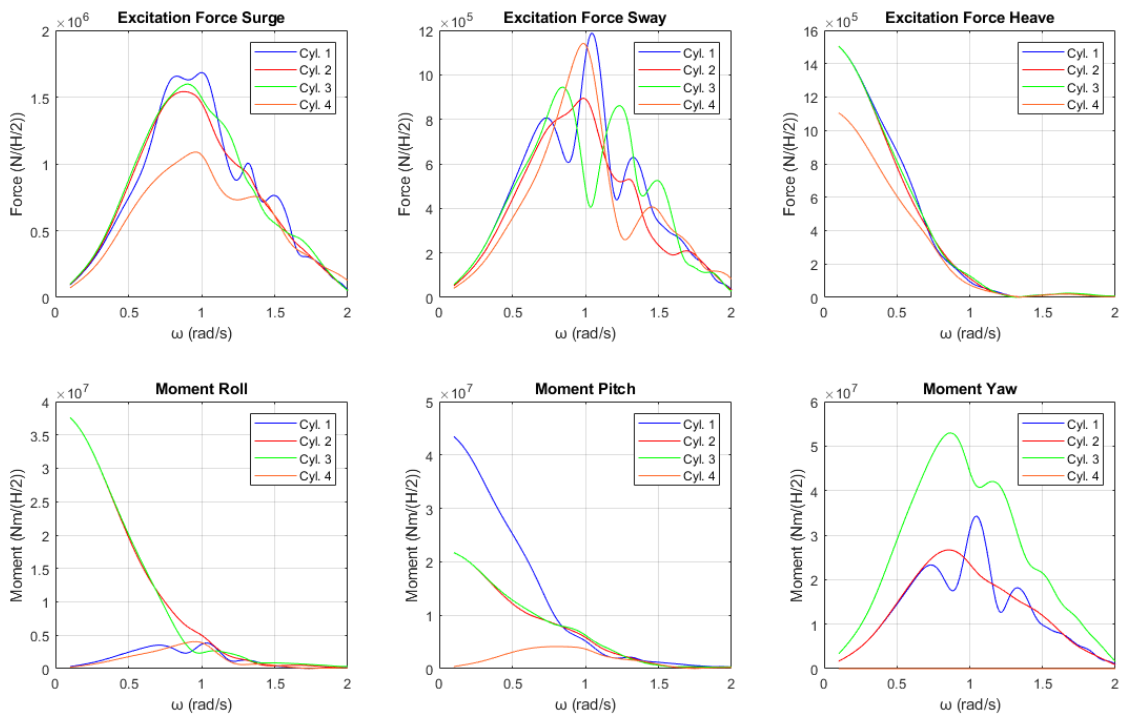
Πίνακας 53: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.80$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 1	F_x	ΟΧΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.02$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	Κύλινδρος 3	F_y	ΝΑΙ

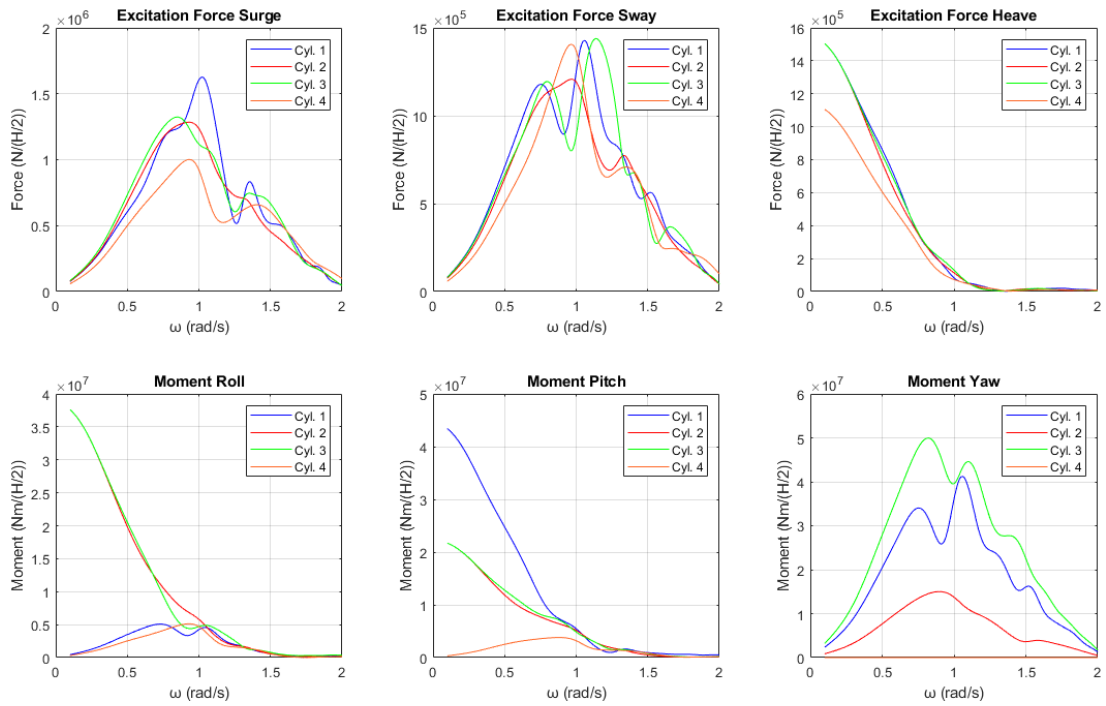
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	Κύλινδρος 3	F_y	NAI
--------------------	--------------	-------------	-------	-----



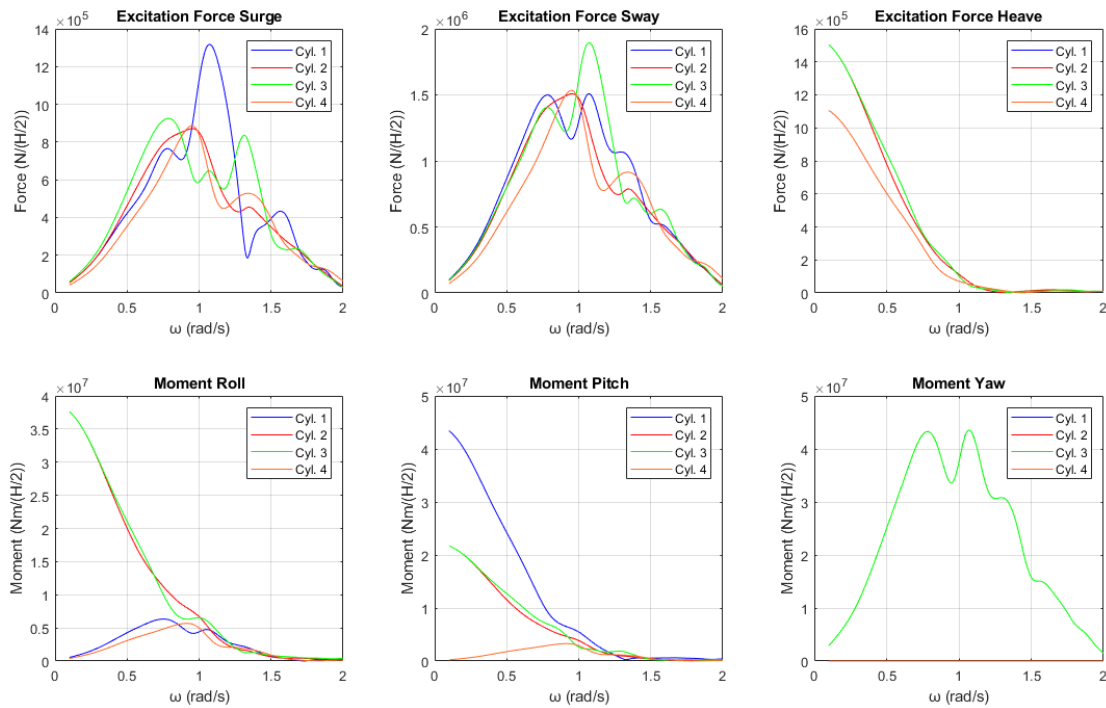
Εικόνα 199: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$



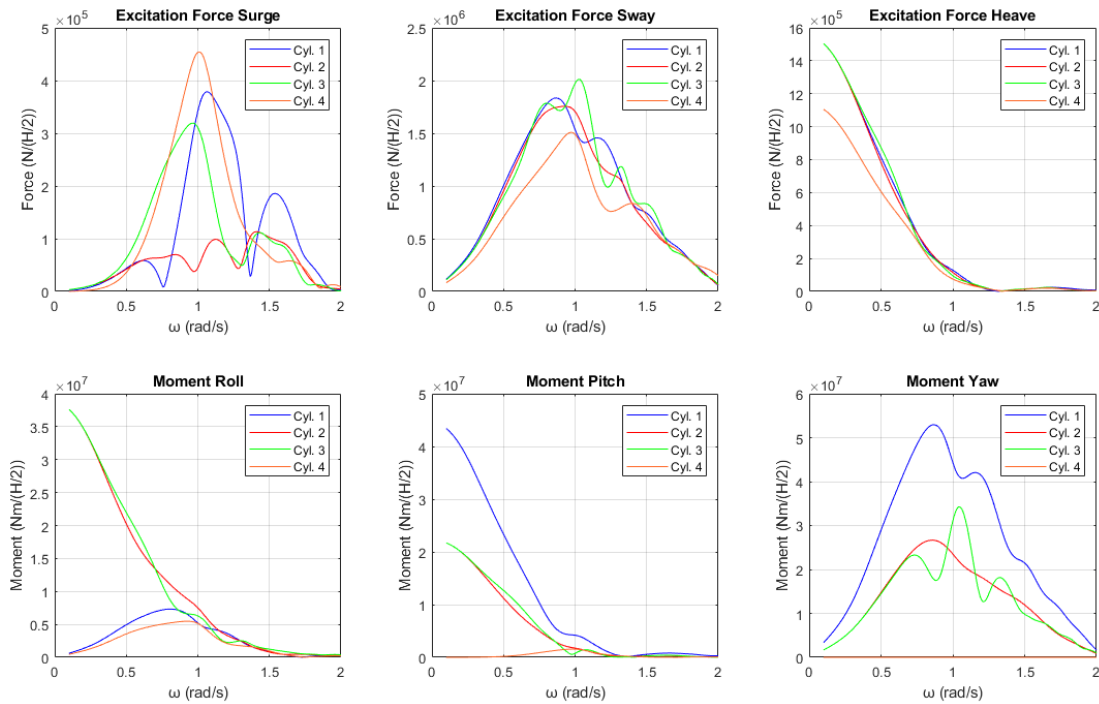
Εικόνα 200: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$



Εικόνα 201: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$



Εικόνα 202: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$

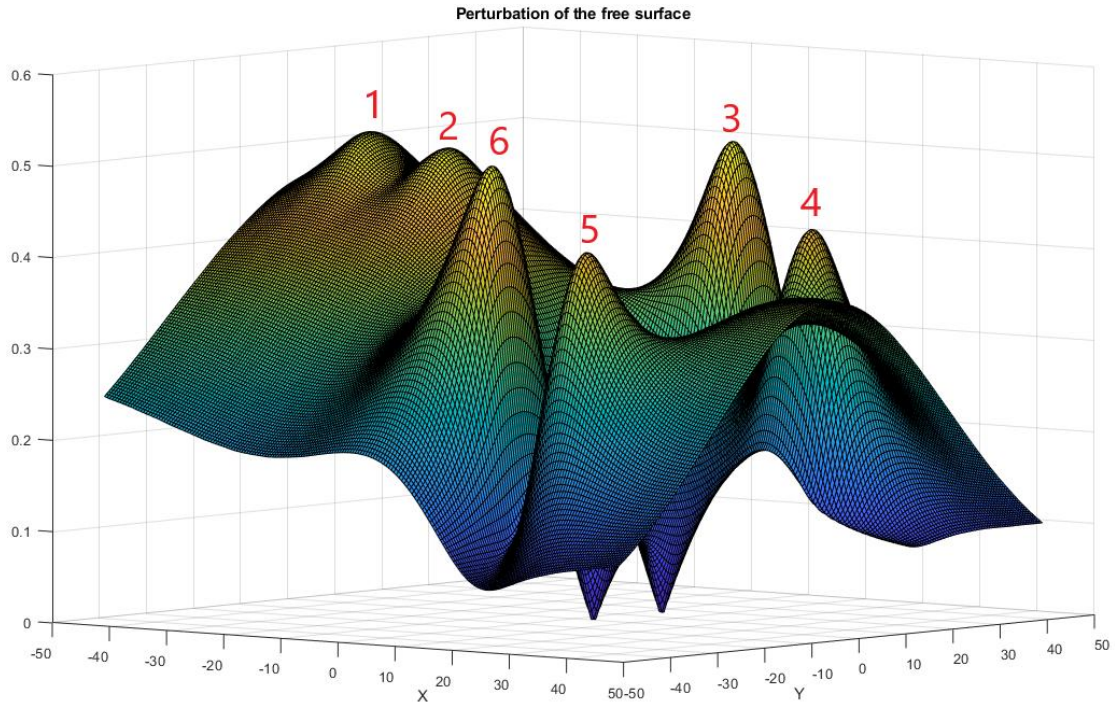


Εικόνα 203: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

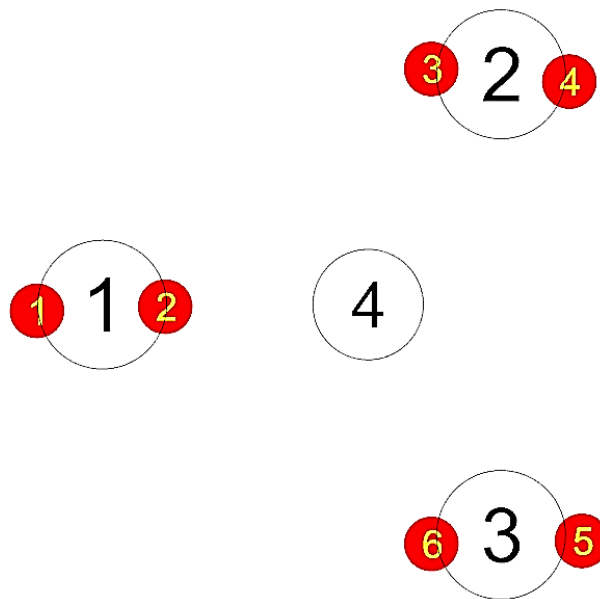
Στην Εικόνα 204 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 54 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 205 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 54: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.52 m
2	0.51 m
3	0.51 m
4	0.42 m
5	0.42 m
6	0.51 m



Εικόνα 204: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



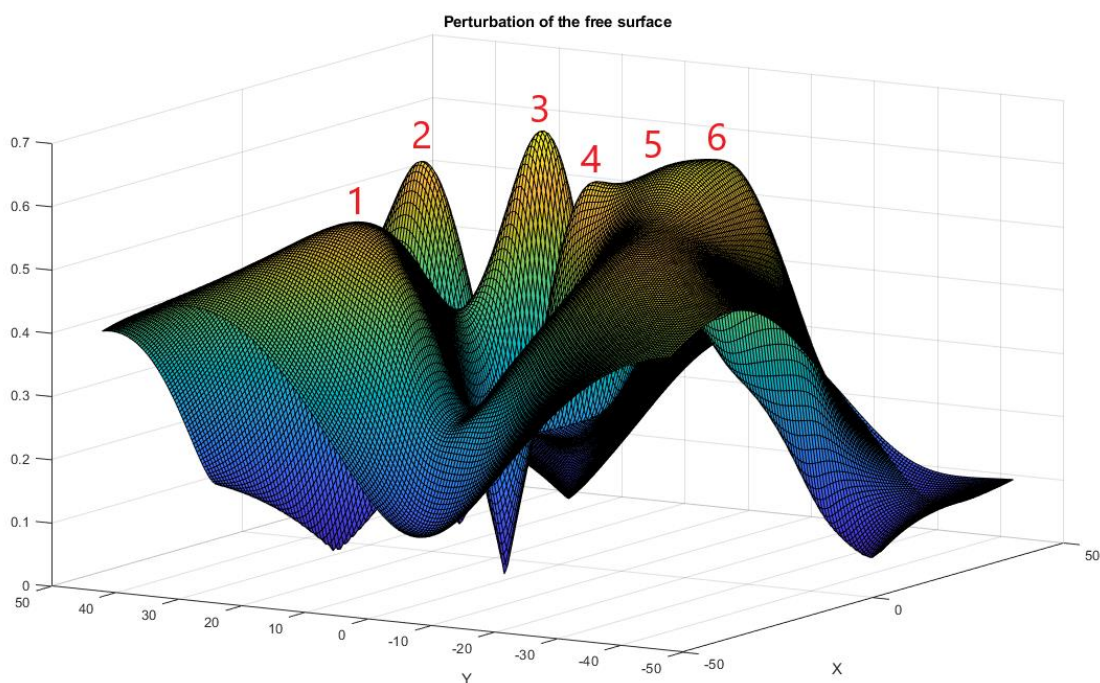
Εικόνα 205: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 206 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 55 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

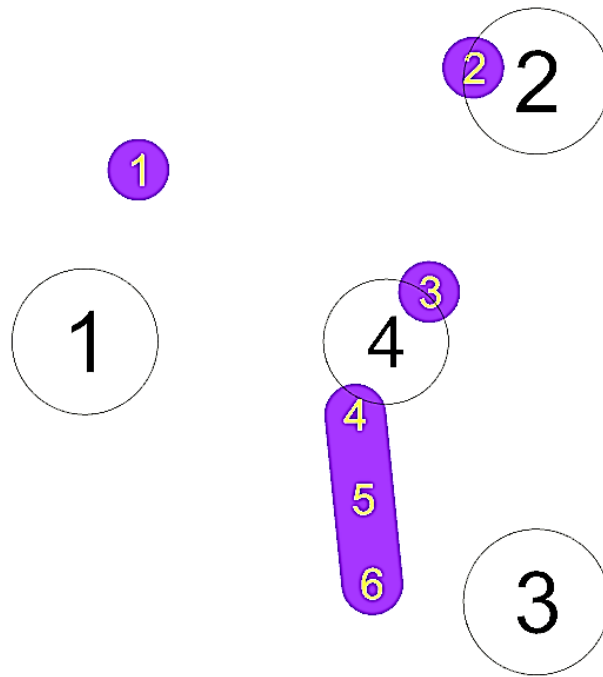
Εικόνα 207 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 55: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.57 m
2	0.60 m
3	0.67 m
4	0.62 m
5	0.64 m
6	0.65 m



Εικόνα 206: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

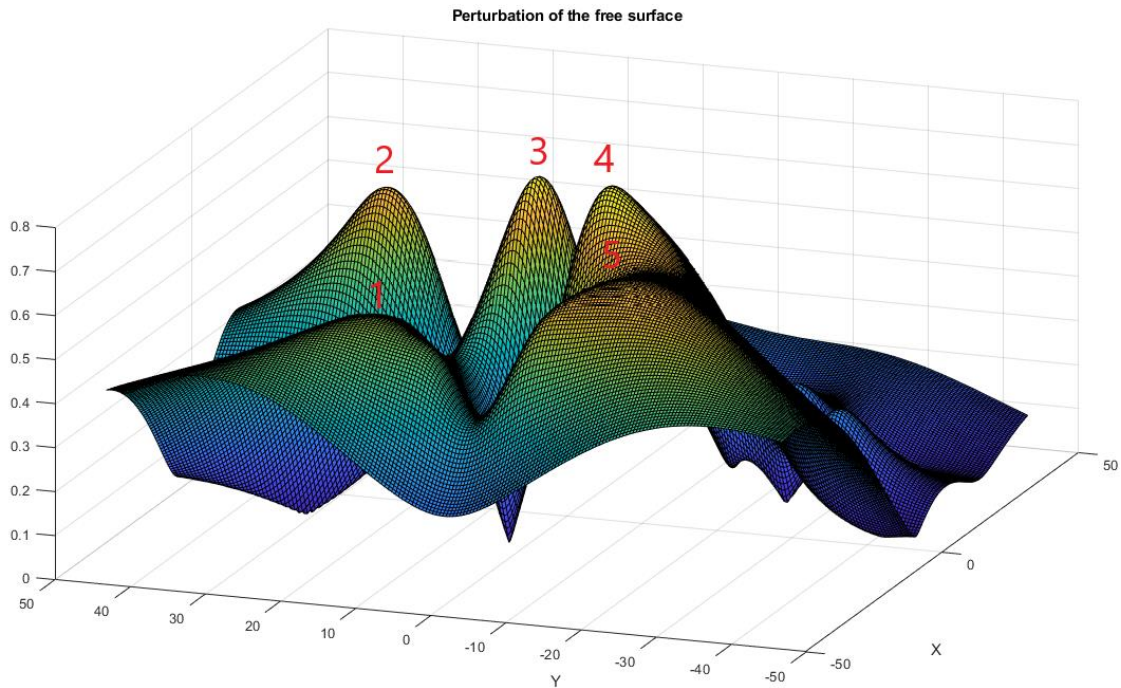


Εικόνα 207: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

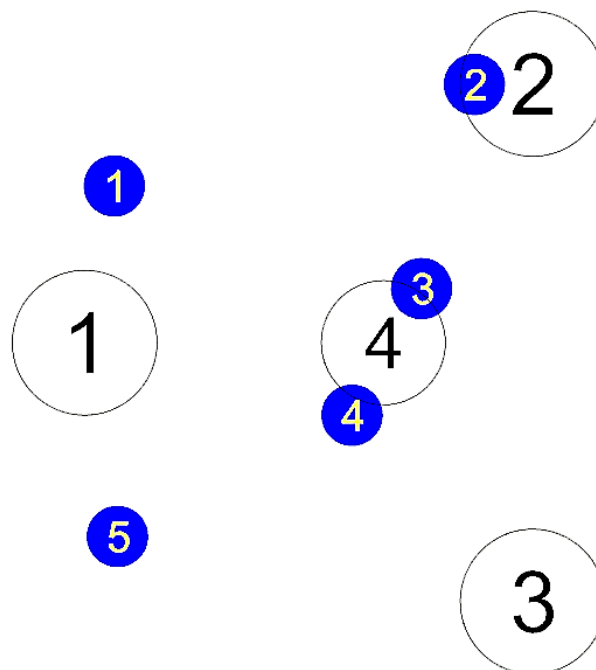
Στην Εικόνα 208 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 56 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 209 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 56: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.54 m
2	0.67 m
3	0.74 m
4	0.77 m
5	0.66 m



Εικόνα 208: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



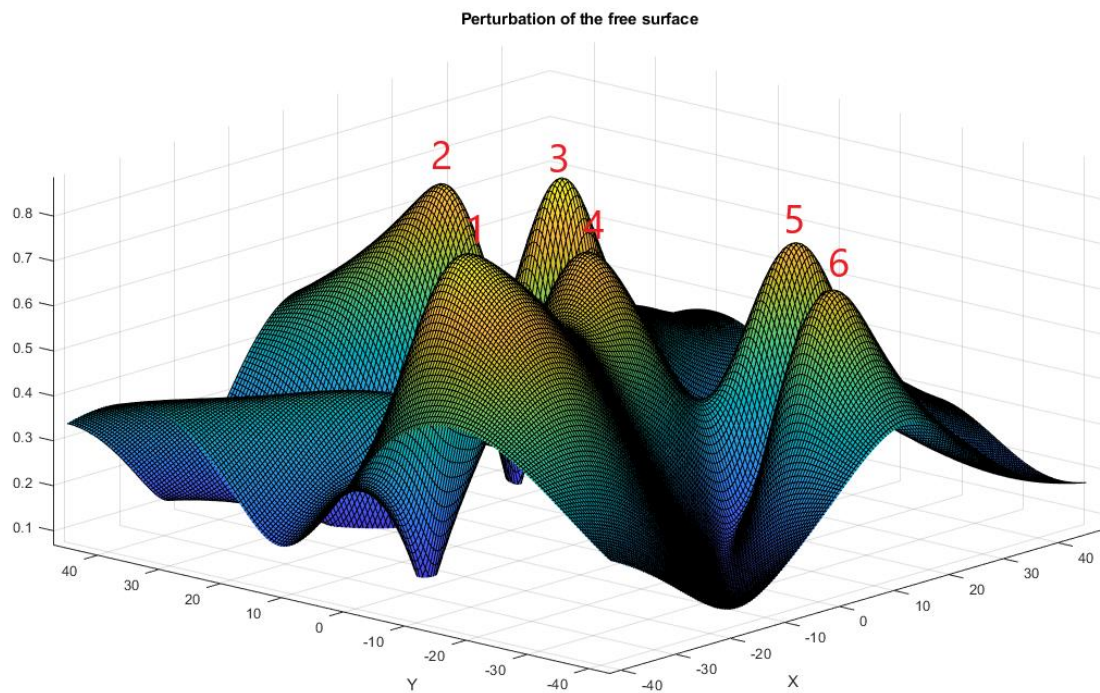
Εικόνα 209: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 210 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης

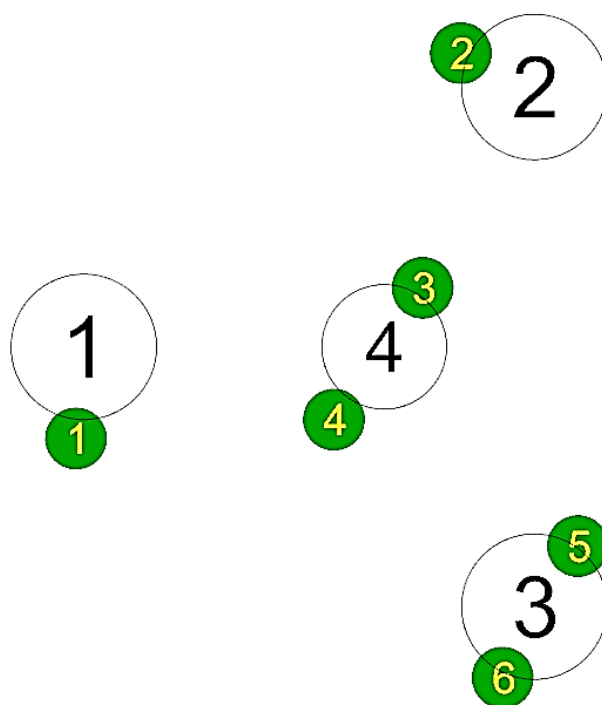
F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 57 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 211 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 57: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.85 m
2	0.76 m
3	0.85 m
4	0.75 m
5	0.73 m
6	0.69 m



Εικόνα 210: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

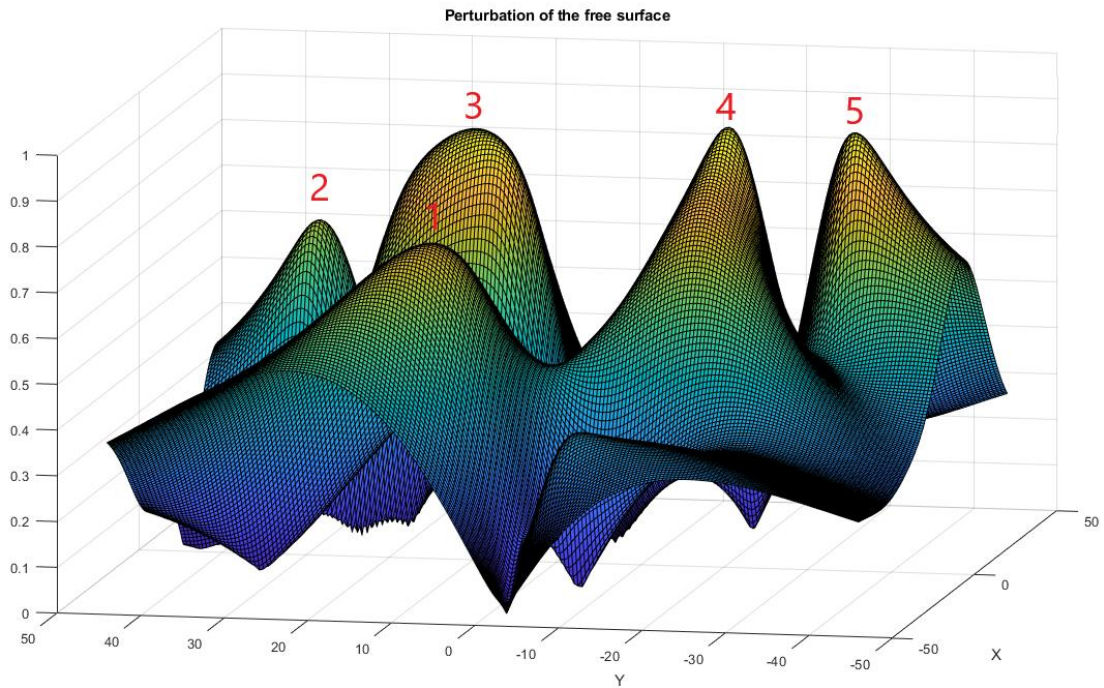


Εικόνα 211: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

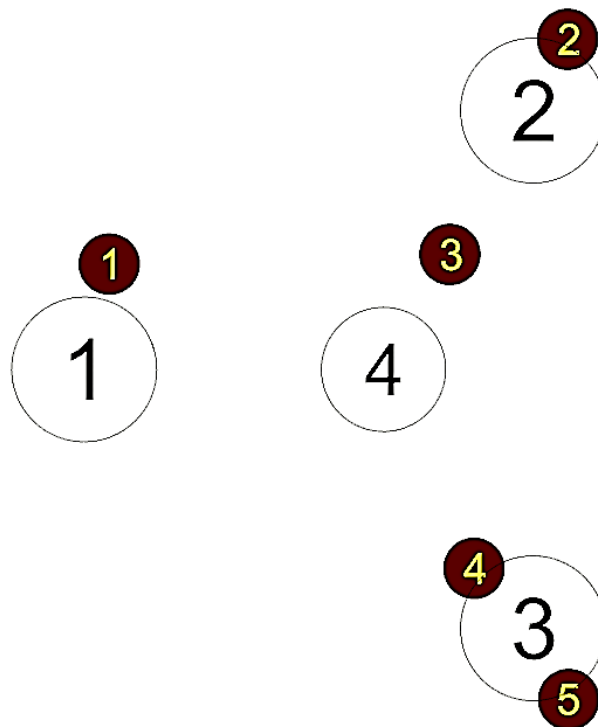
Στην Εικόνα 212 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 58 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 213 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 58: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.76 m
2	0.68 m
3	0.92 m
4	0.93 m
5	0.91 m



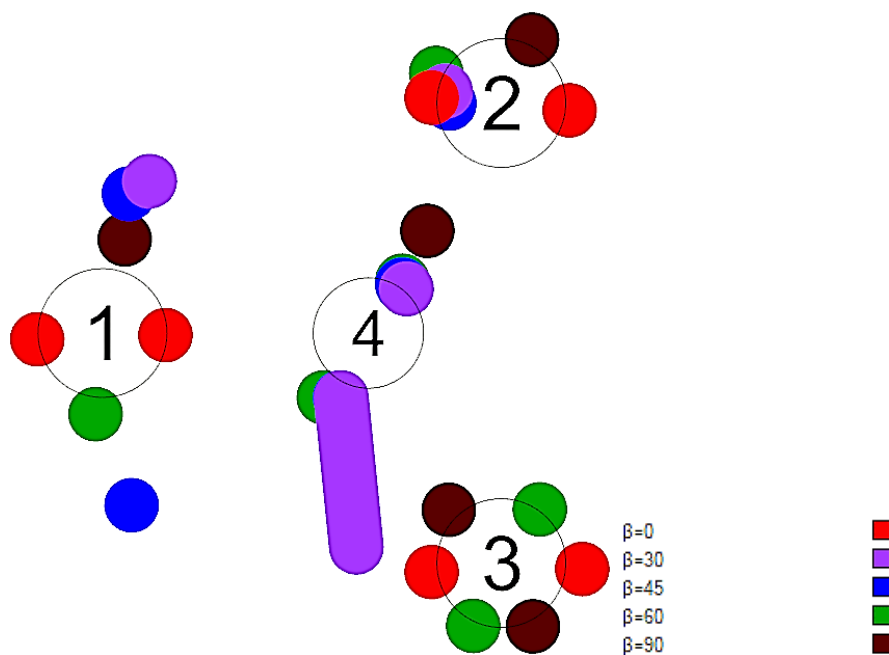
Εικόνα 212: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



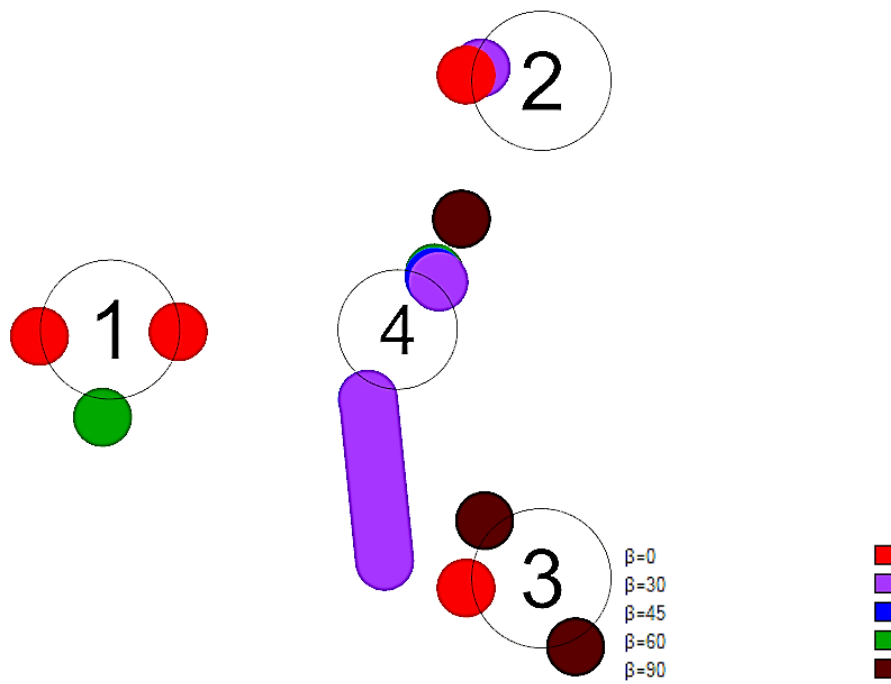
Εικόνα 213: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 214 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 215 φαίνονται οι θέσεις όλων

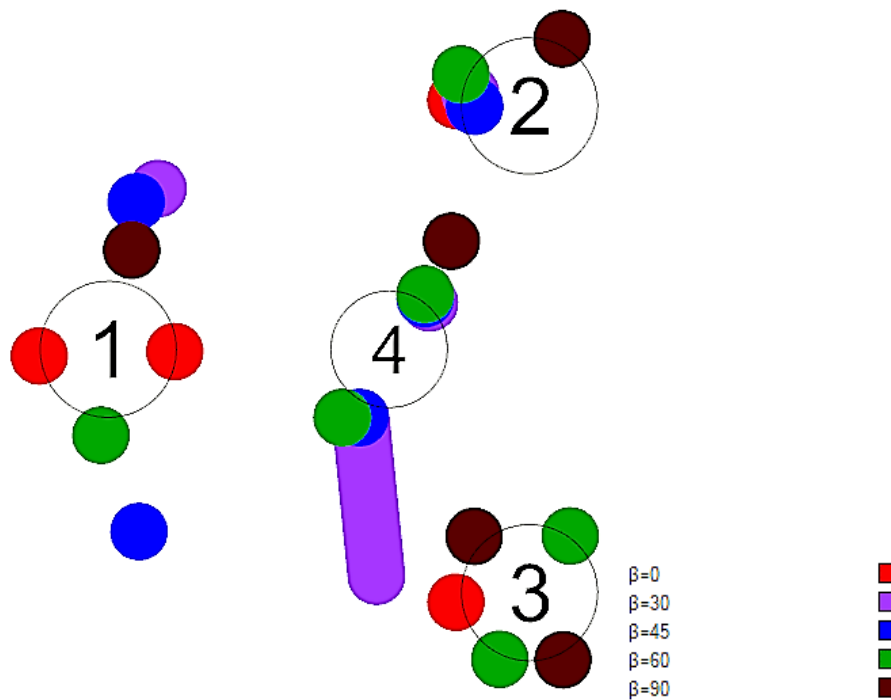
των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 215 παρατηρούμε πως στη διάταξη μπορεί να εγκατασταθούν 3 συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1, 3 και 4. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση που οι κύλινδροι θεωρούνταν ακίνητοι, οι κινήσεις των κυλίνδρων επηρεάζουν τις θέσεις των μέγιστων κορυφών. Στην προηγούμενη περίπτωση, η συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας του κυλίνδρου 1 μπορούσε να παράξει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, πλην όμως της γωνίας $\beta = 90^\circ$. Αυτό όμως δεν ισχύει πλέον, διότι παρατηρούμε πως στον κύλινδρο 1 η συσκευή μπορεί να παράξει τη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια μόνο για τις γωνίες $\beta = 0^\circ$ και 60° . Ομοίως και με την περίπτωση της συσκευής στον κύλινδρο 3, η οποία μπορεί να παράξει μέγιστη ενέργεια όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ και 90° , έναντι των γωνιών $\beta = 60^\circ$ και 90° . Η τρίτη συσκευή, όμως που μπορεί να εγκατασταθεί στον κύλινδρο 4, μπορεί να καλύψει τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ και 60° . Οι κινήσεις των σωμάτων δεν επηρεάζουν μόνο τις θέσεις των συσκευών αλλά και τις γωνίες που μπορεί να παραχθεί η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια. Οι συσκευές των κυλίνδρων 1 και 3 μπορούν να παράγουν μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$, ενώ για $\beta = 60^\circ$ οι συσκευές των κυλίνδρων 1 και 4. Αντίστοιχα για γωνίες $\beta = 30^\circ$ και 45° η μέγιστη ενέργεια παράγεται στον κύλινδρο 4 και για $\beta = 90^\circ$ μόνο στον κύλινδρο 3. Στην Εικόνα 216 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 216 συμπεραίνουμε πως μάλλον μπορεί να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 1, καθώς υπάρχει μια ευελιξία στις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, ενώ προηγουμένως όταν οι κύλινδροι ήταν ακίνητοι την ευελιξία αυτή την είχε επίσης ο κύλινδρος 1.



Εικόνα 214: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



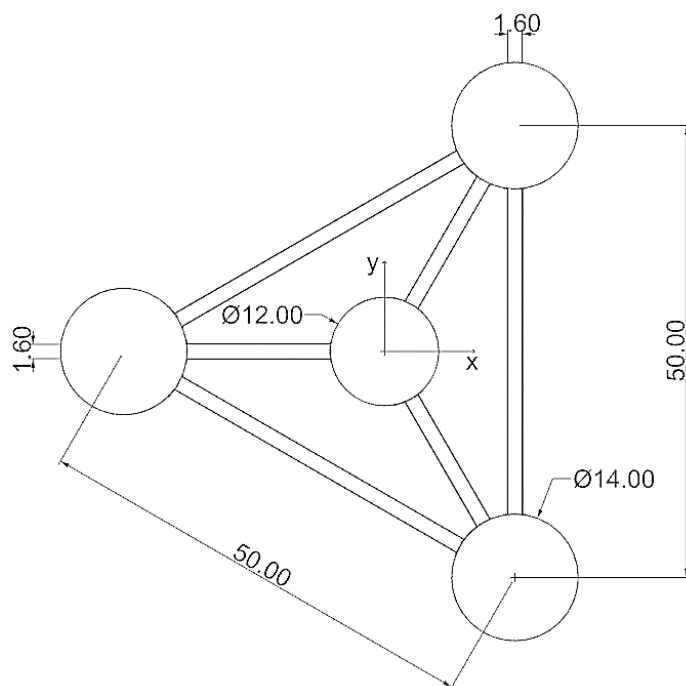
Εικόνα 215: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



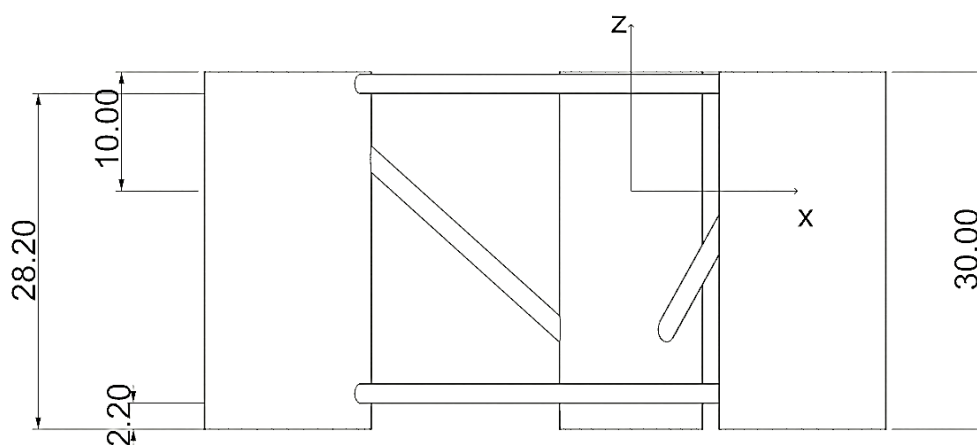
Εικόνα 216: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.4.3 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή των Mazarakos et al. (2018), της οποίας οι διαστάσεις φαίνονται στην Εικόνα 217 και στην Εικόνα 218. Η κατασκευή έχει βύθισμα $20m$ και το βάθος της περιοχής εγκατάστασης είναι ίσο με $200m$.



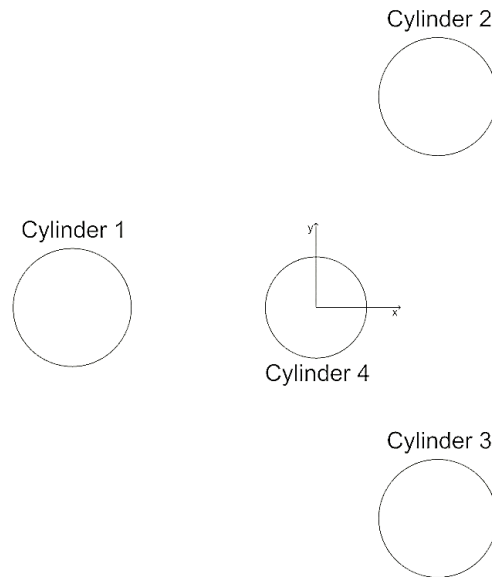
Εικόνα 217: Κάτοψη πλωτής κατασκευής (διαστάσεις σε m)



Εικόνα 218: Πλάγια όψη πλωτής κατασκευής (διαστάσεις σε m)

Σκοπός της μελέτης, είναι να ελέγξουμε αν μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε μια πραγματική κατασκευή. Η διακριτοποίηση που θα

κάνουμε θα αποτελείται μόνο από τους κυλίνδρους της διάταξης χωρίς τα μπρακέτα. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή το πρόγραμμα BEM NEMOH αδυνατεί να λύσει το πρόβλημα με τα μπρακέτα λόγω του περιορισμού που έχει στο πλήθος των στοιχείων (4000). Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Mazarakos et al. (2018), οι οποίοι κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων.

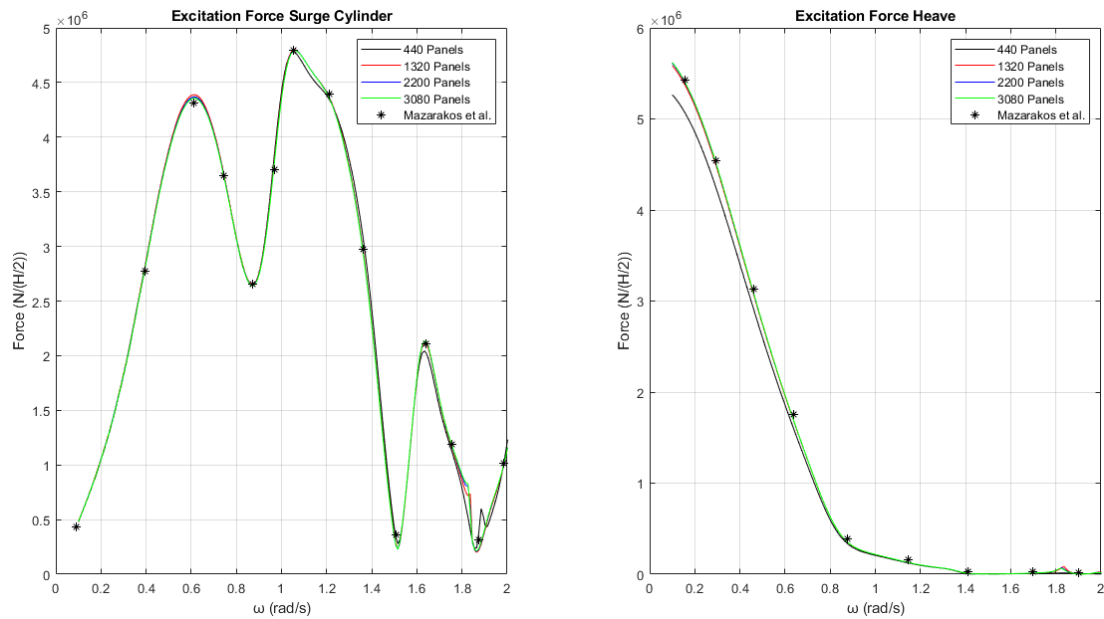


Εικόνα 219: Κάτοψη της πλωτής κατασκευής χωρίς τα μπρακέτα

Στην Εικόνα 219 φαίνεται η κάτοψη της πλωτής κατασκευής χωρίς τα μπρακέτα. Οι συντεταγμένες των κυλίνδρων είναι οι ακόλουθες:

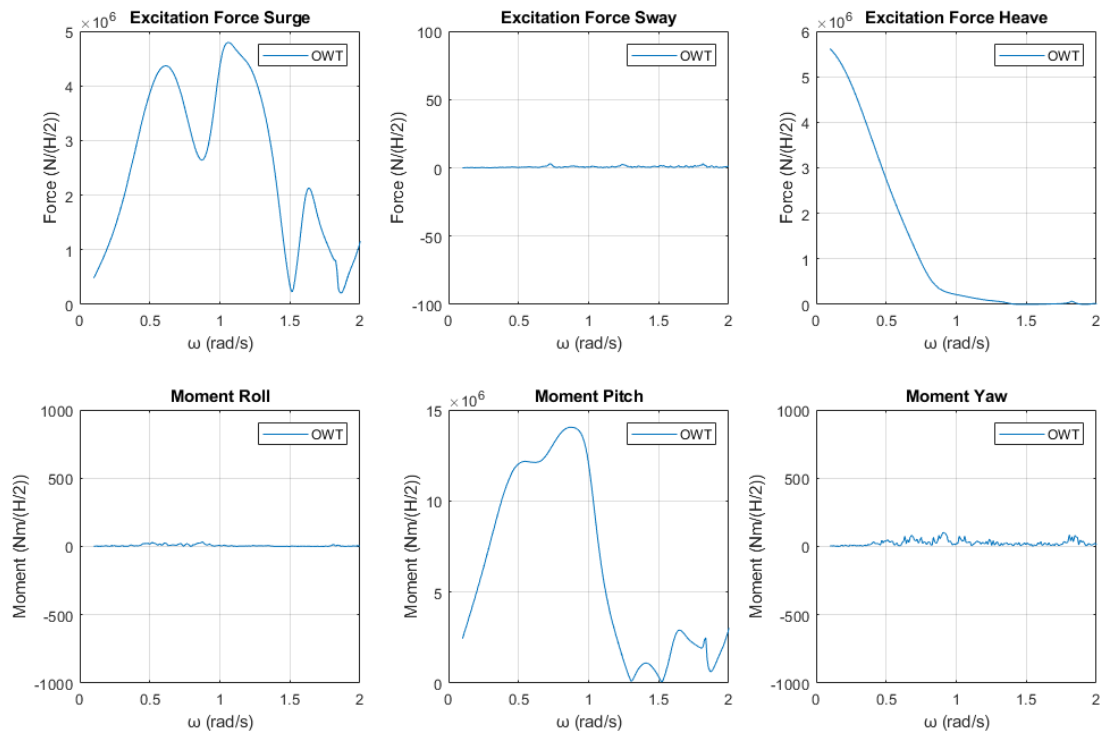
- Κύλινδρος 1 $(-28.87, 0)$
- Κύλινδρος 2 $(14.43, 25)$
- Κύλινδρος 3 $(14.43, -25)$
- Κύλινδρος 4 $(0, 0)$

Θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή σαν μια διάταξη τεσσάρων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Η διακριτοποίηση του σώματος αποτελείται από 440, 1320, 2200 και 3080 στοιχεία ή αλλιώς κάθε κύλινδρος της διάταξης αποτελείται από 110, 330, 550 και 770 στοιχεία. Στην Εικόνα 220 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y .

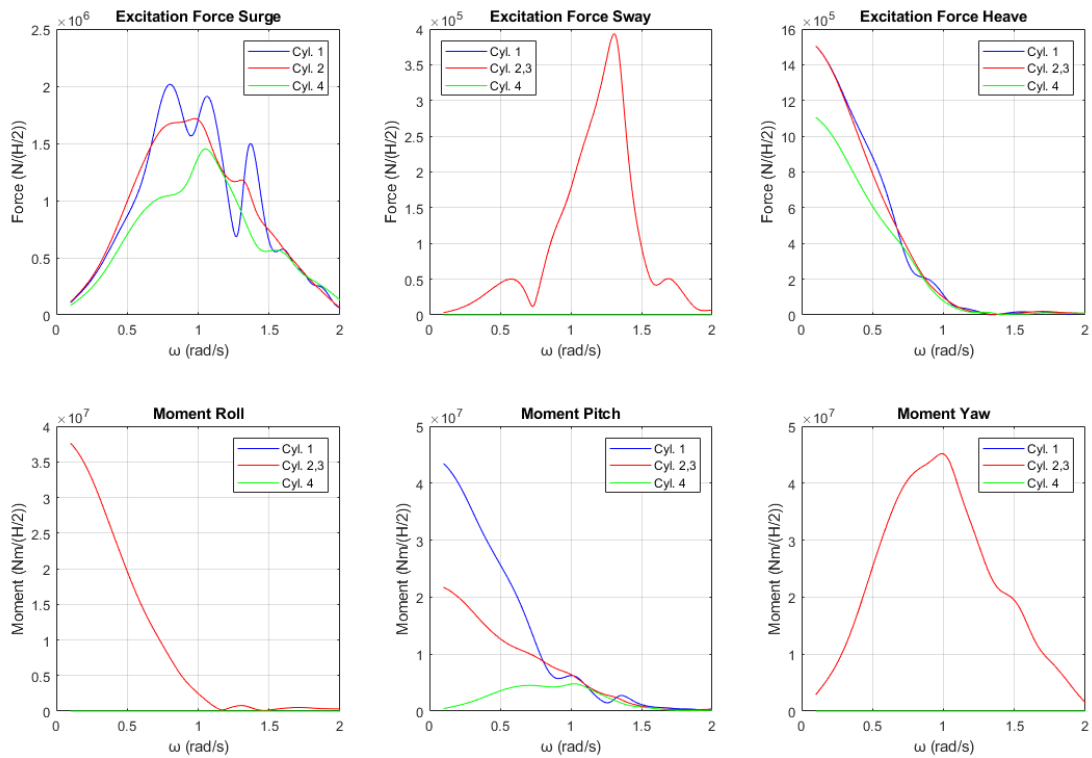


Εικόνα 220: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή

Από την Εικόνα 220 παρατηρούμε πως παρόλο που δεν υπάρχουν τα μπρακέτα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα BEM NEMOH συγκλίνουν με αυτά των Mazarakos et al. (2018). Στην Εικόνα 221 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή και αντίστοιχα στην Εικόνα 222 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



Εικόνα 221: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή

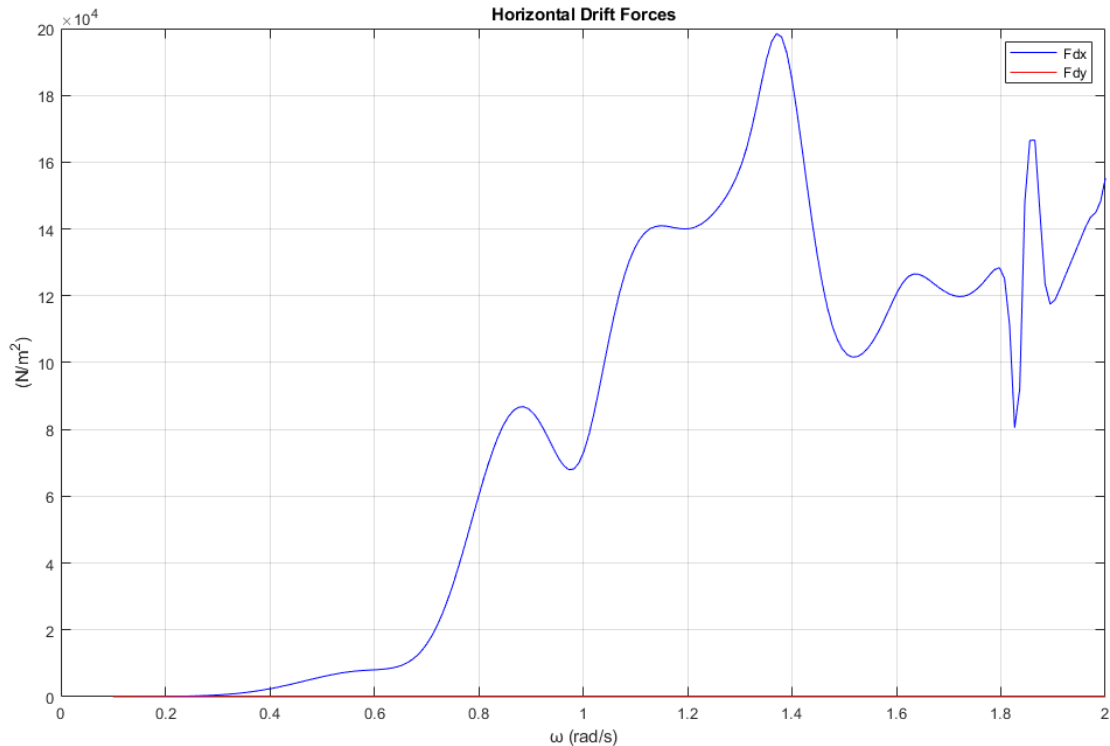


Εικόνα 222: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης

Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x το φαινόμενο παρατηρείται στους κυλίνδρους 1 και 4 της διάταξης, ενώ για τους κυλίνδρους 2 και 3 παρατηρείται ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Για τον κύλινδρο 1 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.80 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.06 \text{ r/s}$. Για τους κυλίνδρους 2 και 3 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.31 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα για τον κύλινδρο 4 στη συχνότητα $\omega \cong 1.05 \text{ r/s}$. Θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή για δύο περιπτώσεις, ώστε να δούμε πως μεταβάλλεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην πρώτη περίπτωση θα θεωρήσουμε πως η πλωτή κατασκευή είναι ακίνητη και δεν μπορεί να ταλαντωθεί, ενώ στην δεύτερη θα υποθέσουμε ότι μπορεί να εκτελέσει ελεύθερη ταλάντωση.

3.4.3.1 Ακίνητη κατασκευή – diffraction problem

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται συνολικά στην πλωτή κατασκευή για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ φαίνονται στην Εικόνα 223, όταν αυτή είναι ακίνητη.

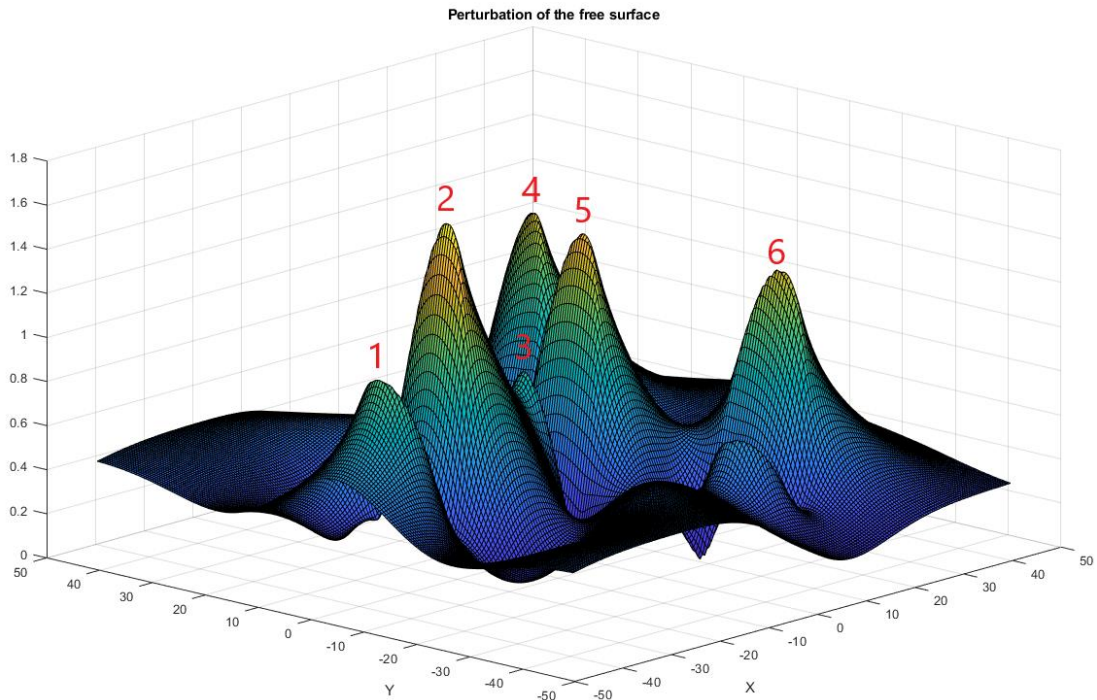


Εικόνα 223: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή (diffraction problem)

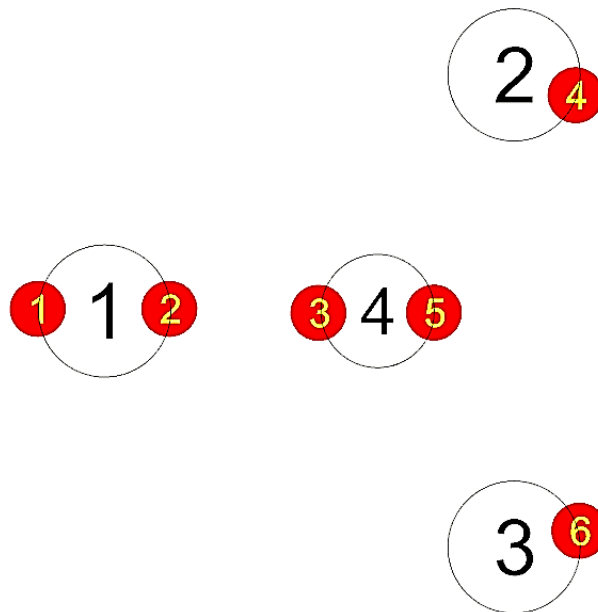
Στην Εικόνα 224 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 59 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 225 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 59: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.00m
2	1.62 m
3	0.86 m
4	1.28 m
5	1.41 m
6	1.27 m



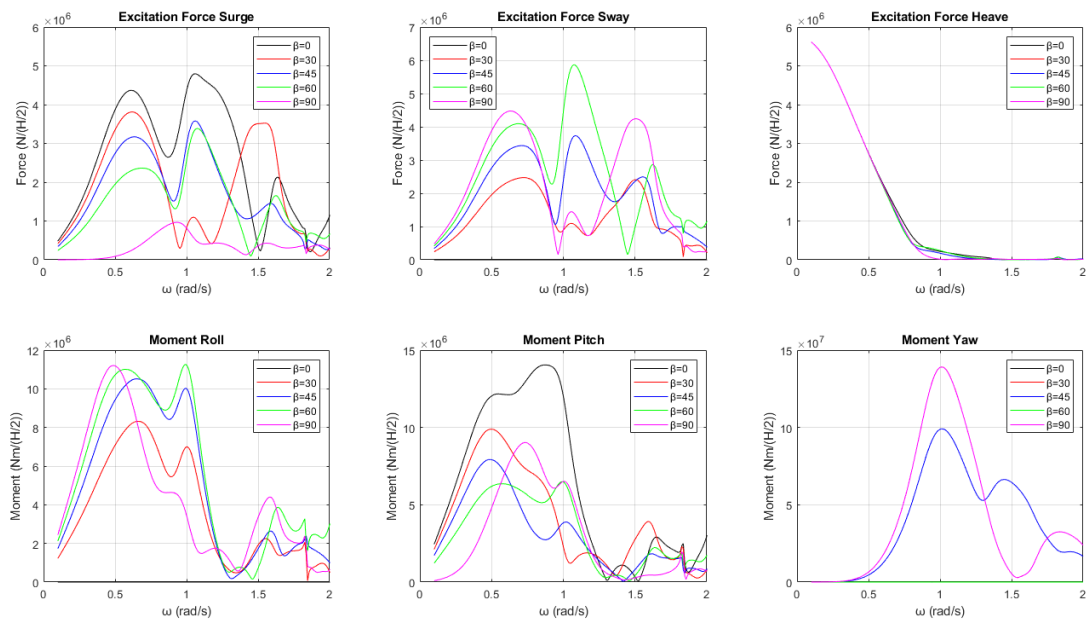
Εικόνα 224: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



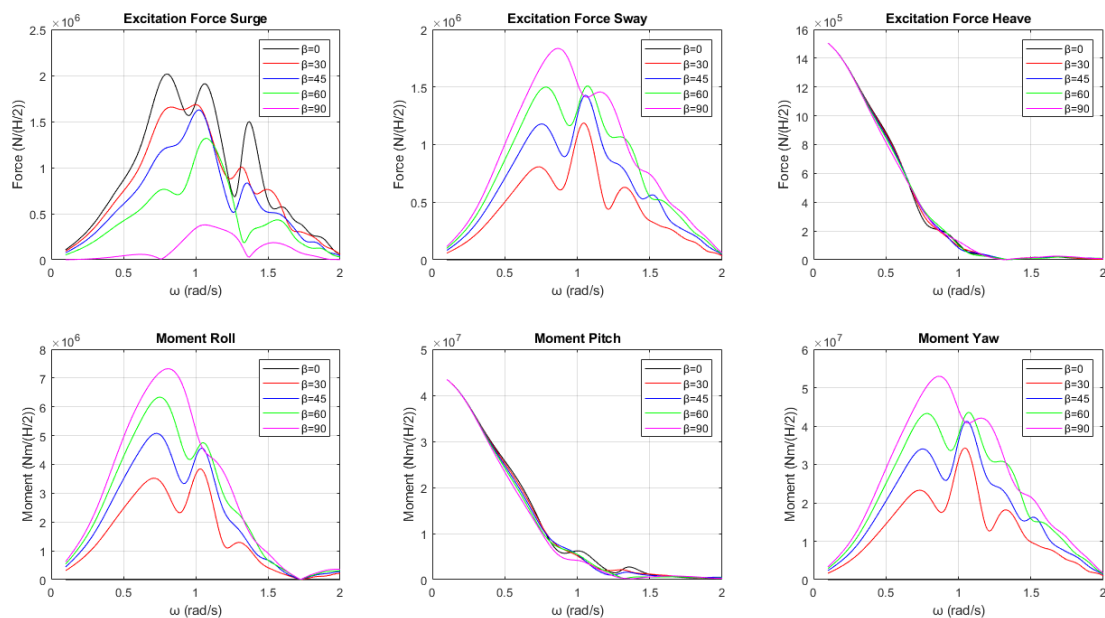
Εικόνα 225: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Επόμενο βήμα της ανάλυσης είναι να αλλάξουμε τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού έτσι ώστε να ελέγξουμε πως αλλάζει η κατανομή των δυνάμεων διέγερσης και πως αυτή επηρεάζει το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην Εικόνα 226 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για $\beta = 0^\circ, 30, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Αντίστοιχα στις Εικόνες 227–230

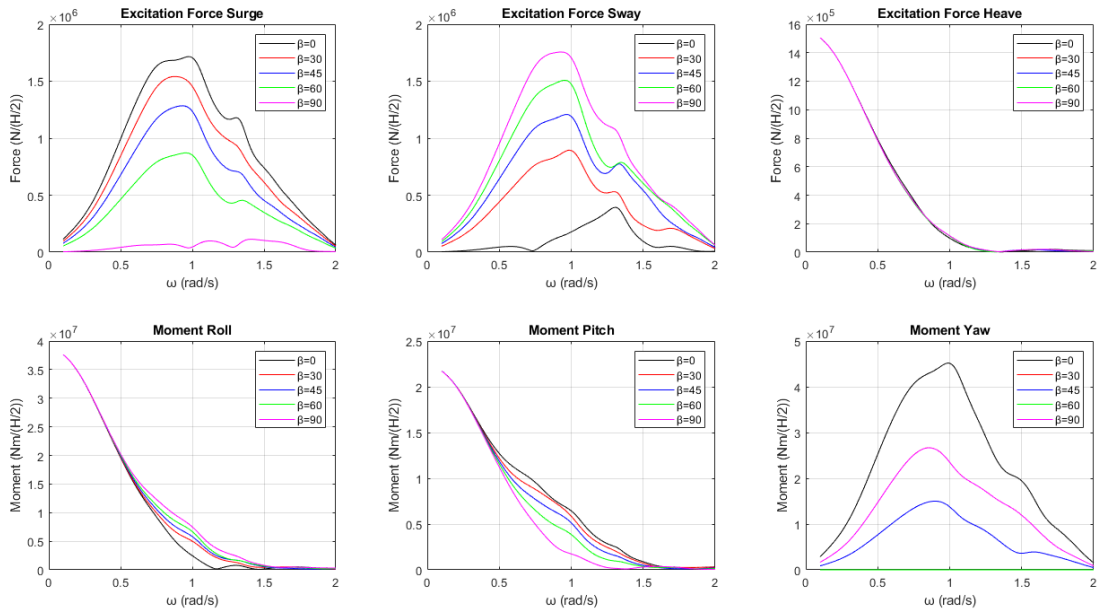
φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της πλωτής κατασκευής για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



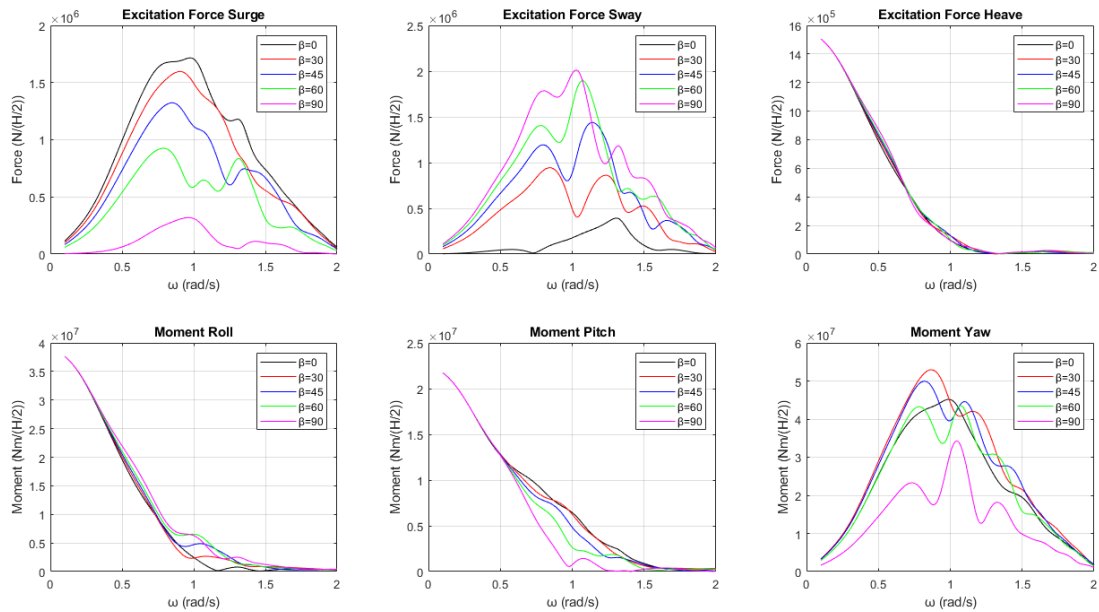
Εικόνα 226: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



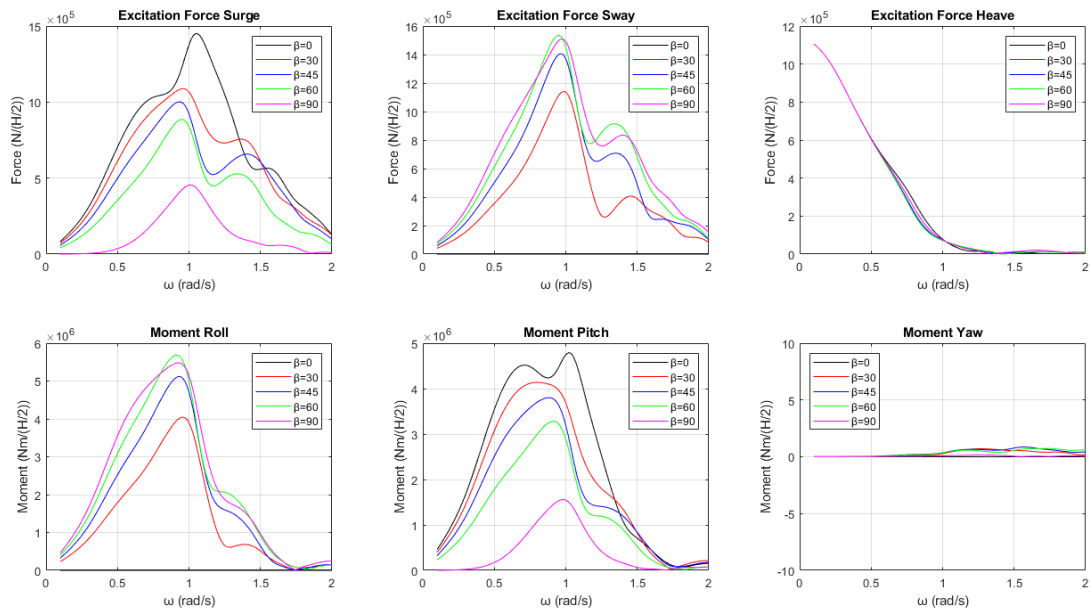
Εικόνα 227: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 228: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 229: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



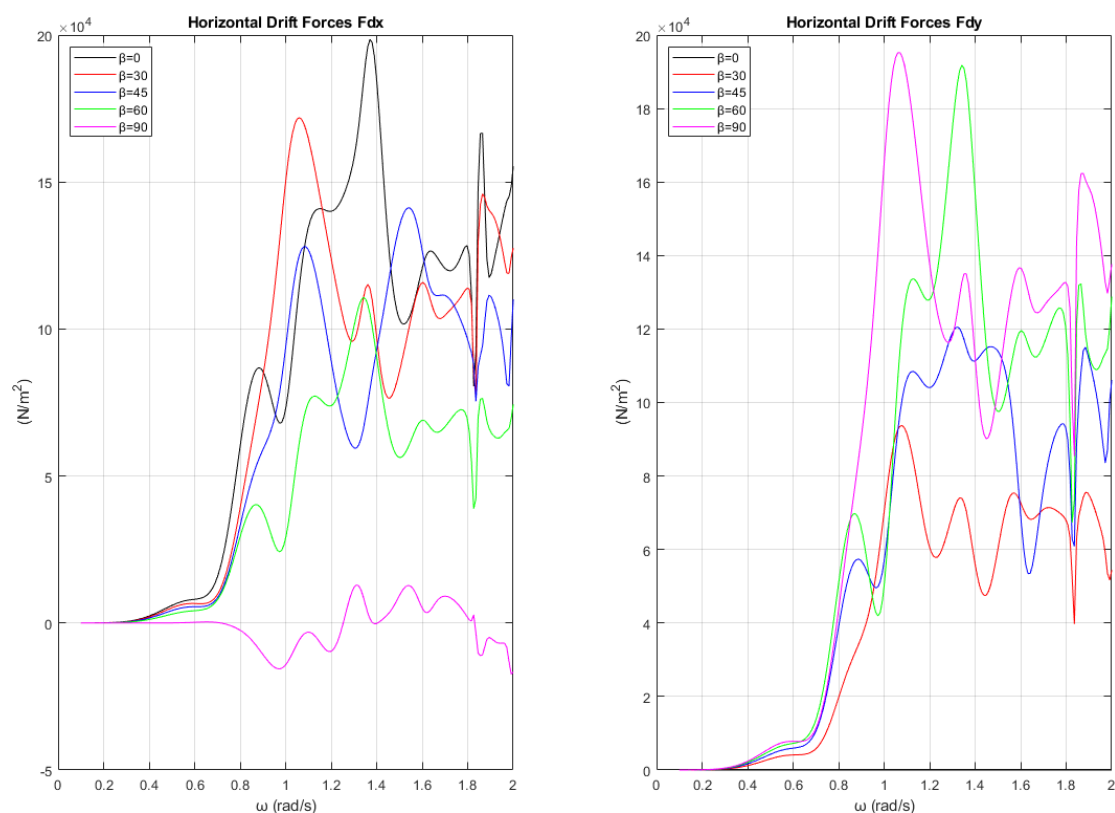
Εικόνα 230: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις 227-230 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών επηρεάζεται από την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Στον Πίνακα 60 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y .

Πίνακας 60: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.62$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.06$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.62$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.93$	—
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.09$	$\cong 1.55$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.08$	$\cong 1.62$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.63$	$\cong 1.51$

Από τον Πίνακα 60 παρατηρούμε πως ως προς στις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x , εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού που μελετήθηκαν. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού γίνει μεγαλύτερη από $\beta = 45^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες φορτίσεις παρατηρούνται ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, το γεγονός πως μετά από αυτή την γωνία ικανοποιούνται και η συνθήκη Neumann αλλά και η Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Στην Εικόνα 231 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 231: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 61 φαίνονται οι συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

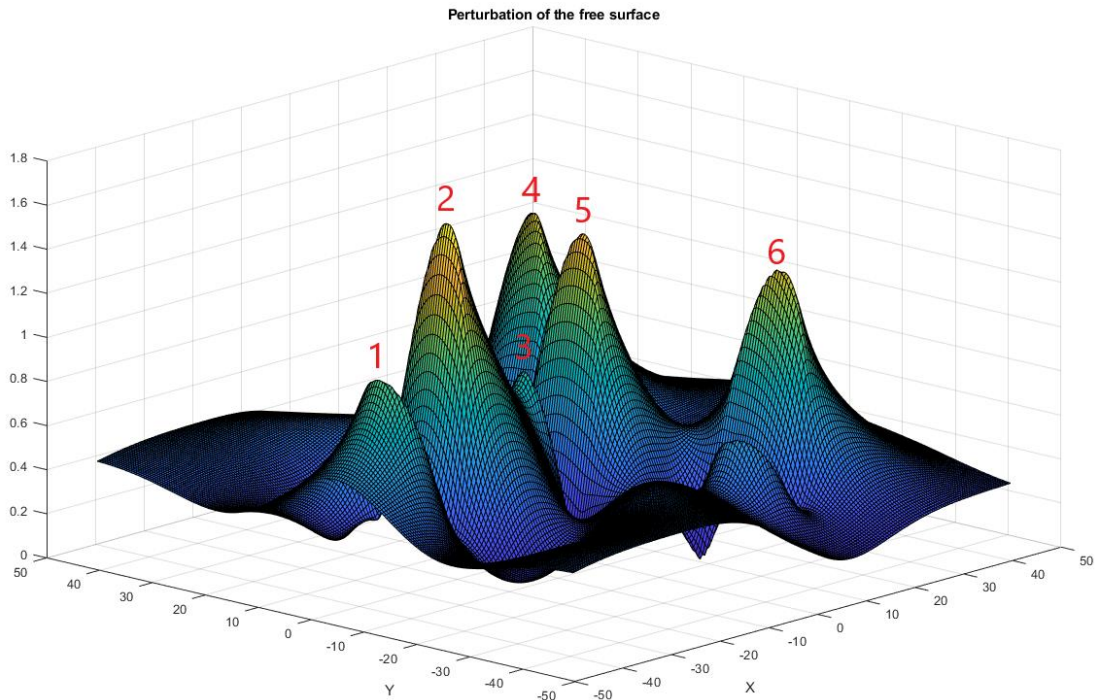
Πίνακας 61: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.06$	F_x	OXI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.62$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.09$	F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.08$	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.63$	F_y	NAI

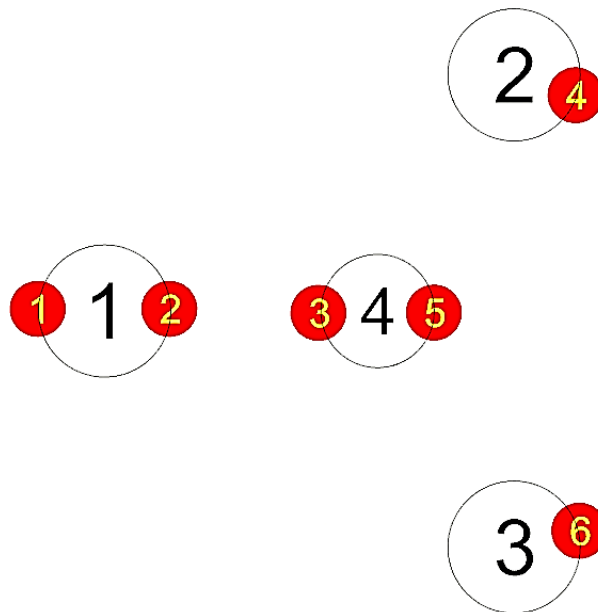
Στην Εικόνα 232 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 62 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 233 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 62: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.00m
2	1.62 m
3	0.86 m
4	1.28 m
5	1.41 m
6	1.27 m



Εικόνα 232: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



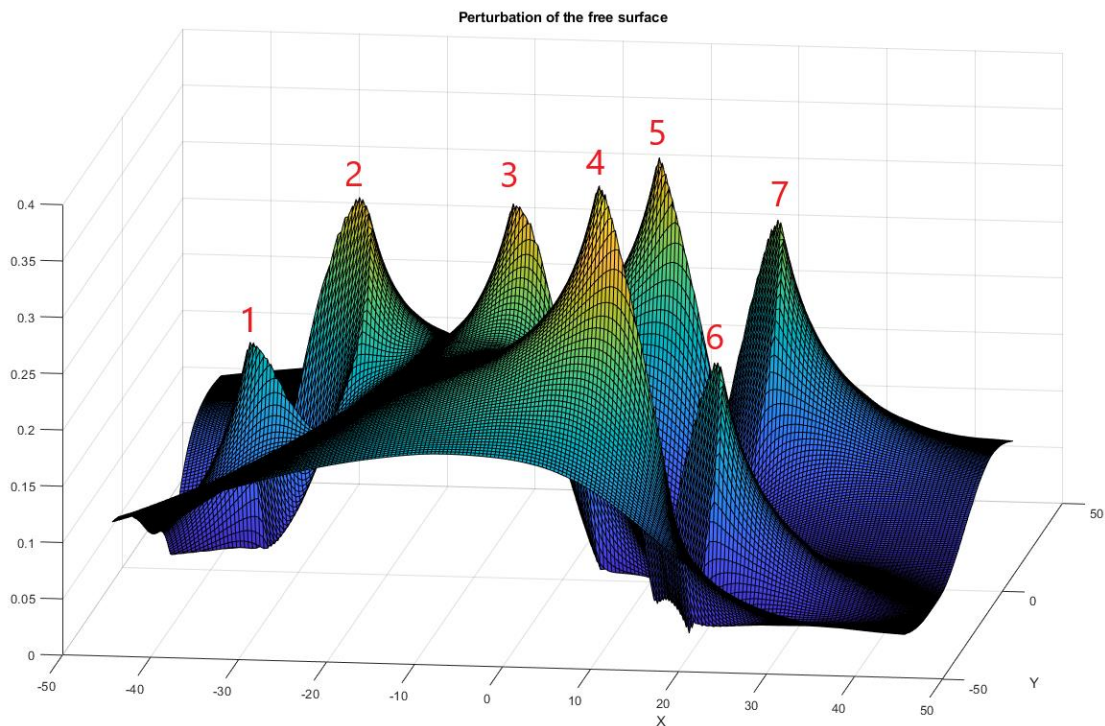
Εικόνα 233: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 234 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 63 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 235 φαίνονται οι θέσεις

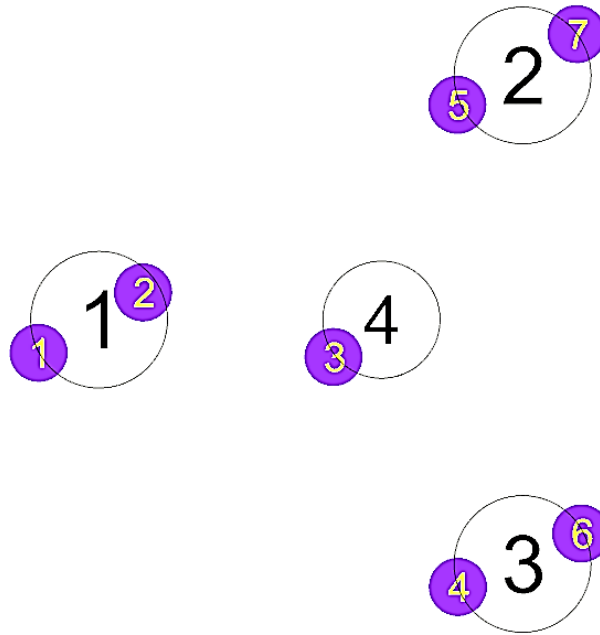
των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 63: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.21 m
2	0.33 m
3	0.34 m
4	0.39 m
5	0.33 m
6	0.23 m
7	0.27 m



Εικόνα 234: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

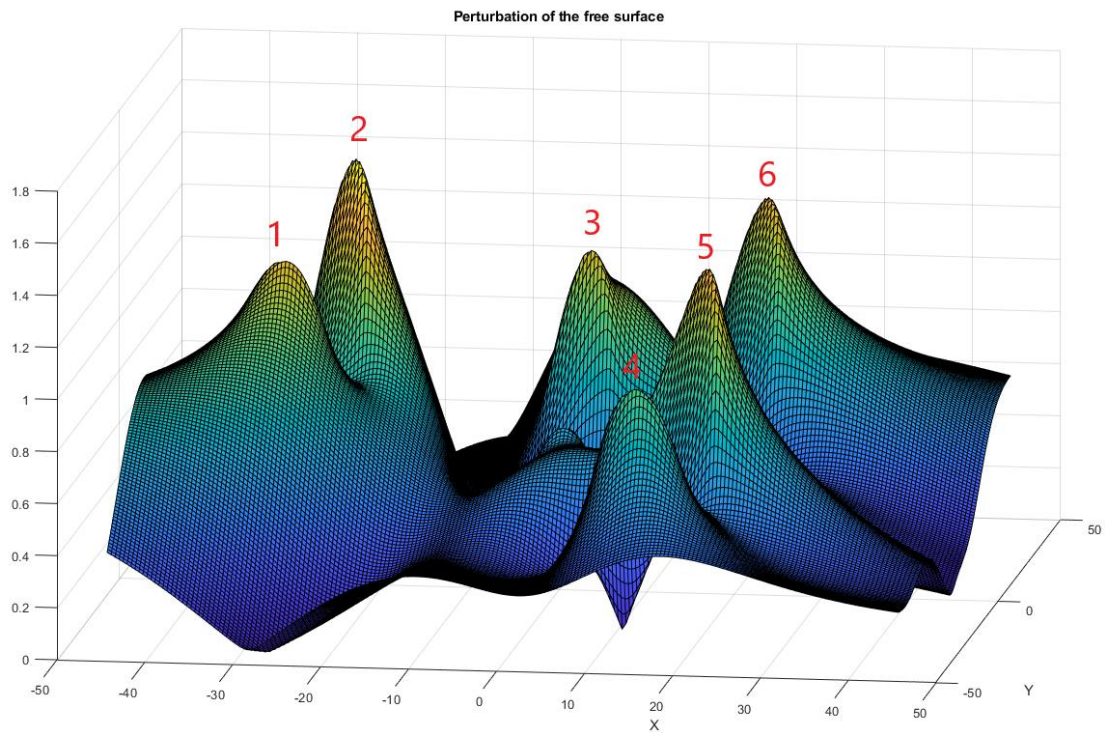


Εικόνα 235: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

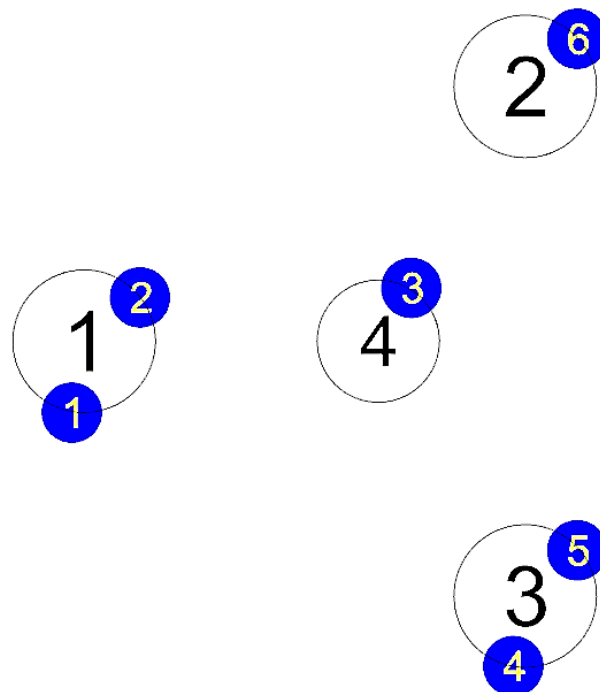
Στην Εικόνα 236 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 64 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 237 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 64: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.28 m
2	1.60 m
3	1.27 m
4	0.98 m
5	1.38 m
6	1.34 m



Εικόνα 236: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



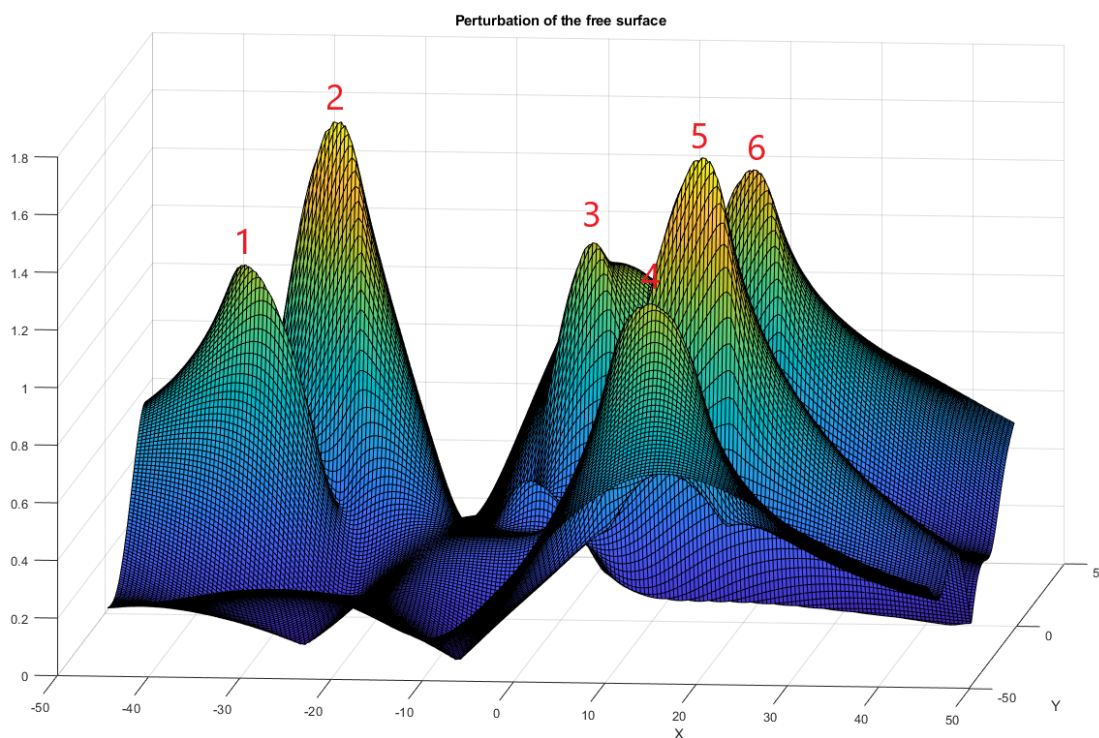
Εικόνα 237: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 238 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη

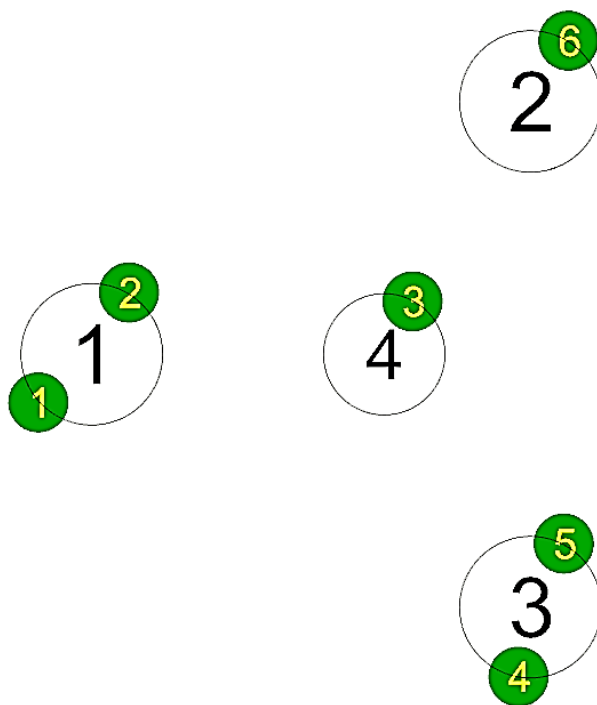
Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 65 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 239 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 65: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.24 m
2	1.69 m
3	1.29 m
4	1.04 m
5	1.69 m
6	1.43 m



Εικόνα 238: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

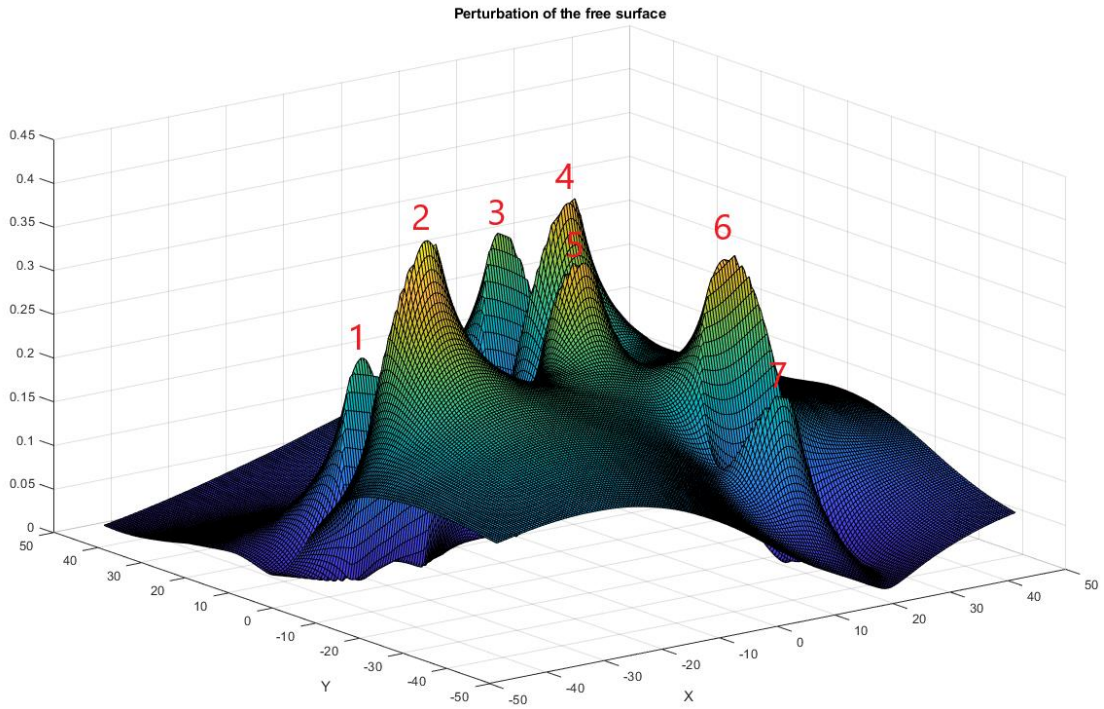


Εικόνα 239: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

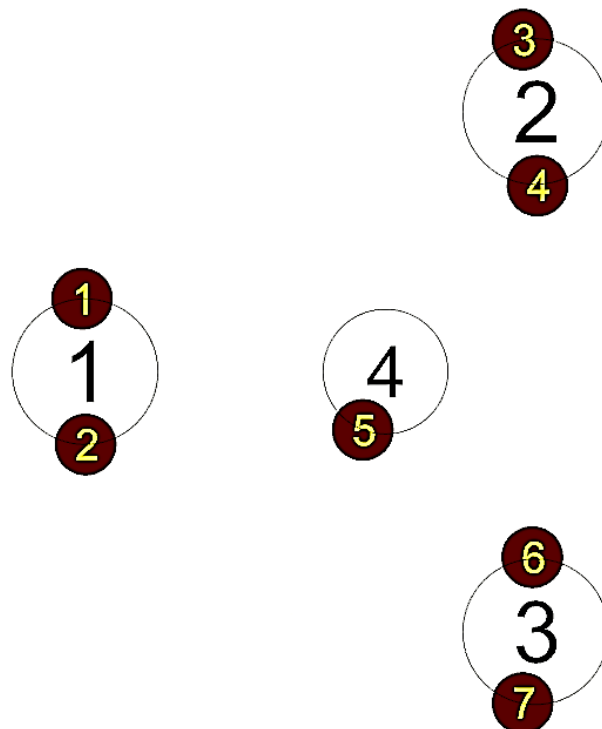
Στην Εικόνα 240 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 66 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 241 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 66: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.25 m
2	0.40 m
3	0.29 m
4	0.35 m
5	0.40m
6	0.34 m
7	0.22 m

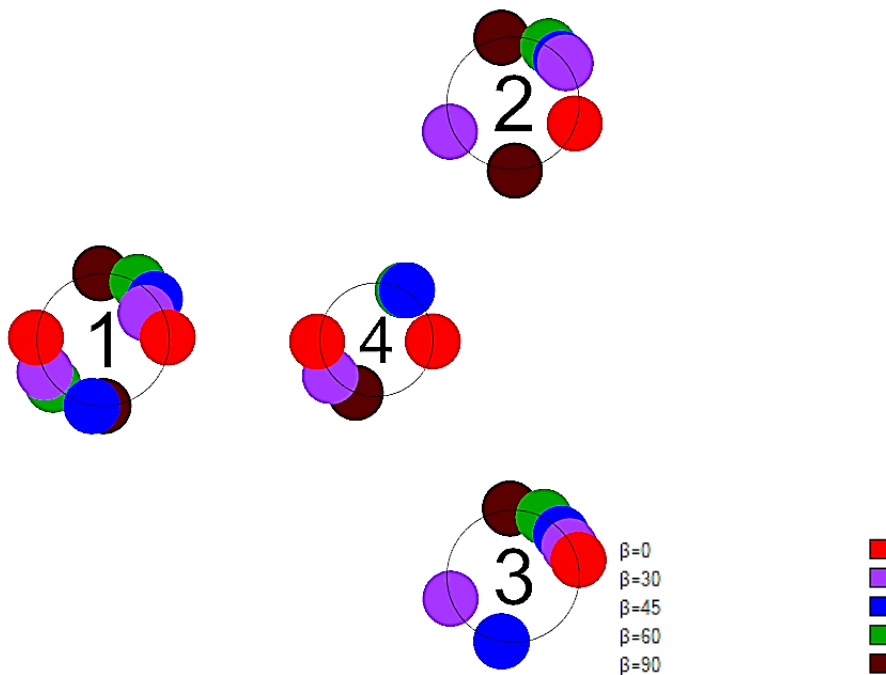


Εικόνα 240: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

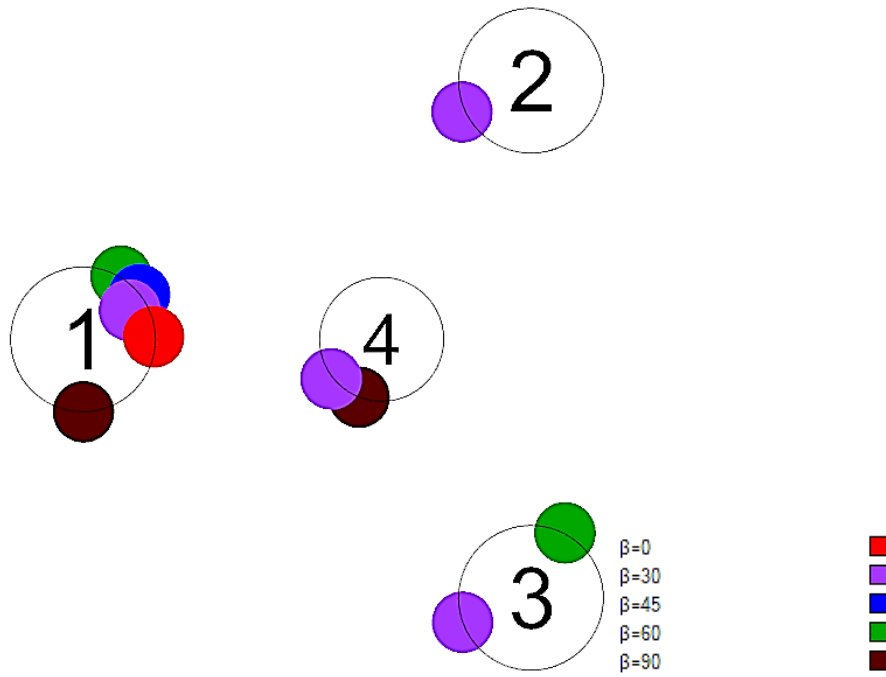


Εικόνα 241: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

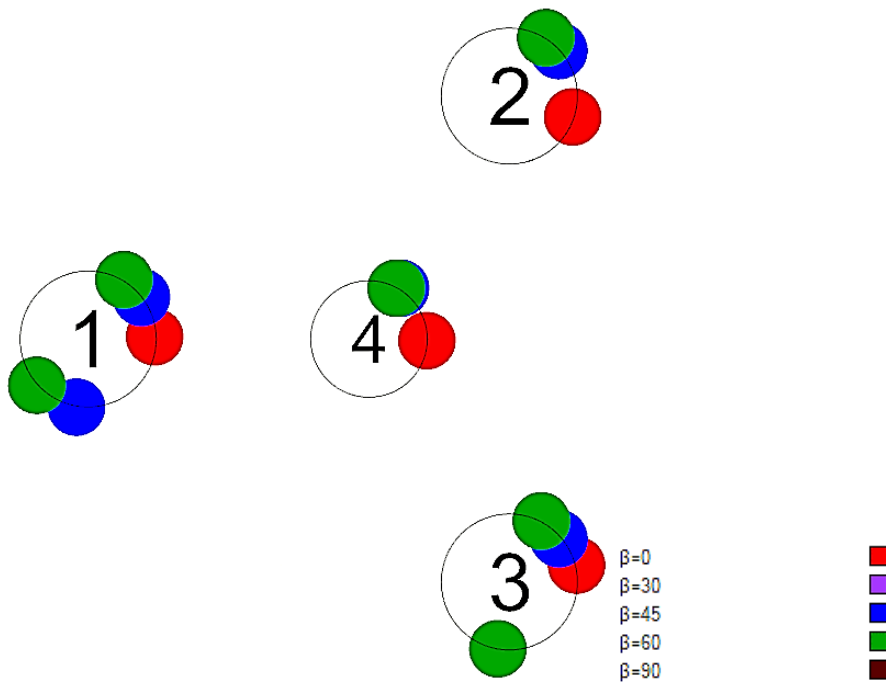
Στην Εικόνα 242 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 243 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην περίπτωση της πλωτής κατασκευής παρατηρώντας όλες τις μέγιστες κορυφές για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού συμπεραίνουμε πως μπορεί να εγκατασταθεί μόνο μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας, στον κύλινδρο 1. Όμως οι μέγιστες τιμές που έχει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες $\beta = 30^\circ$ και 90° είναι αρκετά μικρότερες από αυτές των άλλων γωνιών. Επομένως, προκειμένου να καταλήξουμε στον αριθμό των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας αλλά και τις θέσεις τους θα πρέπει όχι μόνο να περιορίσουμε τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού σε $\beta = 0^\circ, 45^\circ$ και 60° , αλλά και να γίνει καλύτερη αξιολόγηση των τιμών του μέτρου. Στην Εικόνα 244 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού. Από την Εικόνα 244 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι. Η συσκευή του κυλίνδρου 1 είναι και αυτή η οποία θα παράξει και την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια στις αξιοποιήσιμες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



Εικόνα 242: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



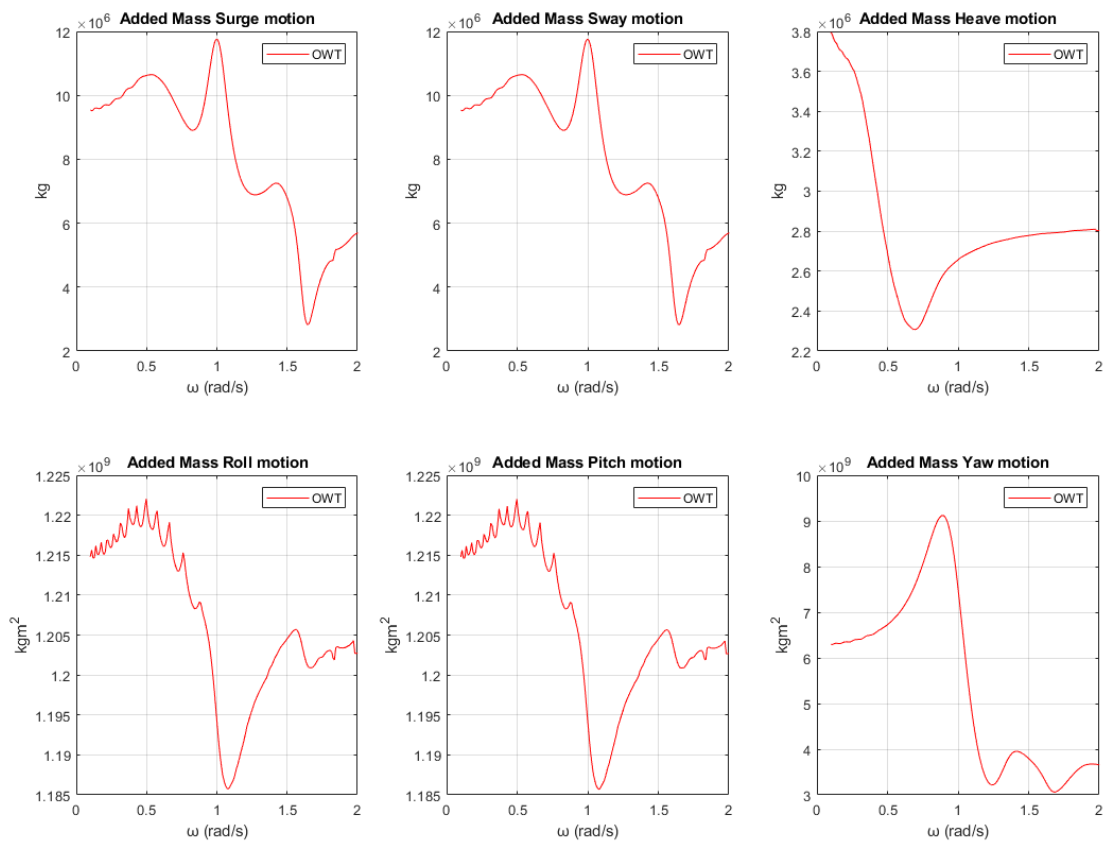
Εικόνα 243: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



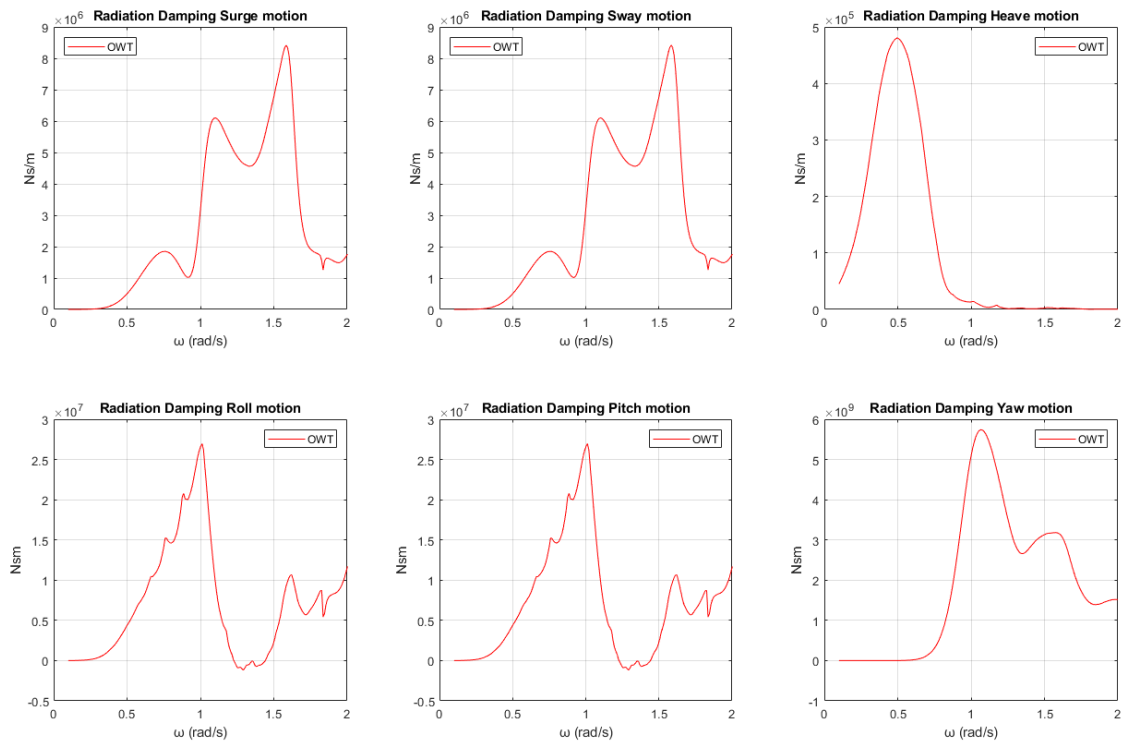
Εικόνα 244: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.4.3.2 Η πλωτή κατασκευή εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση - radiation problem

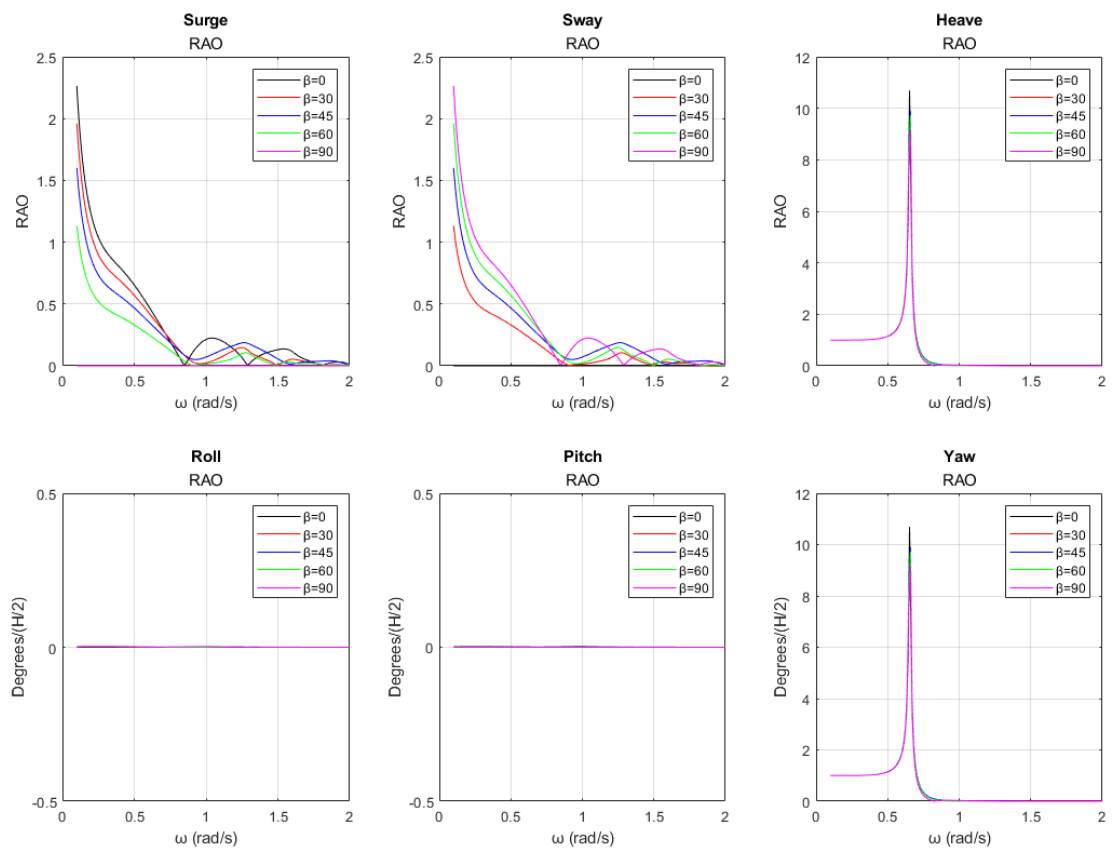
Στην Εικόνα 245 φαίνονται οι συντελεστές πρόσθετης μάζας της πλωτής κατασκευής και αντίστοιχα στην Εικόνα 246 φαίνονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης. Οι κινήσεις της πλωτής κατασκευής ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας φαίνονται στην Εικόνα 247 για όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 245: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ της πλωτής κατασκευής

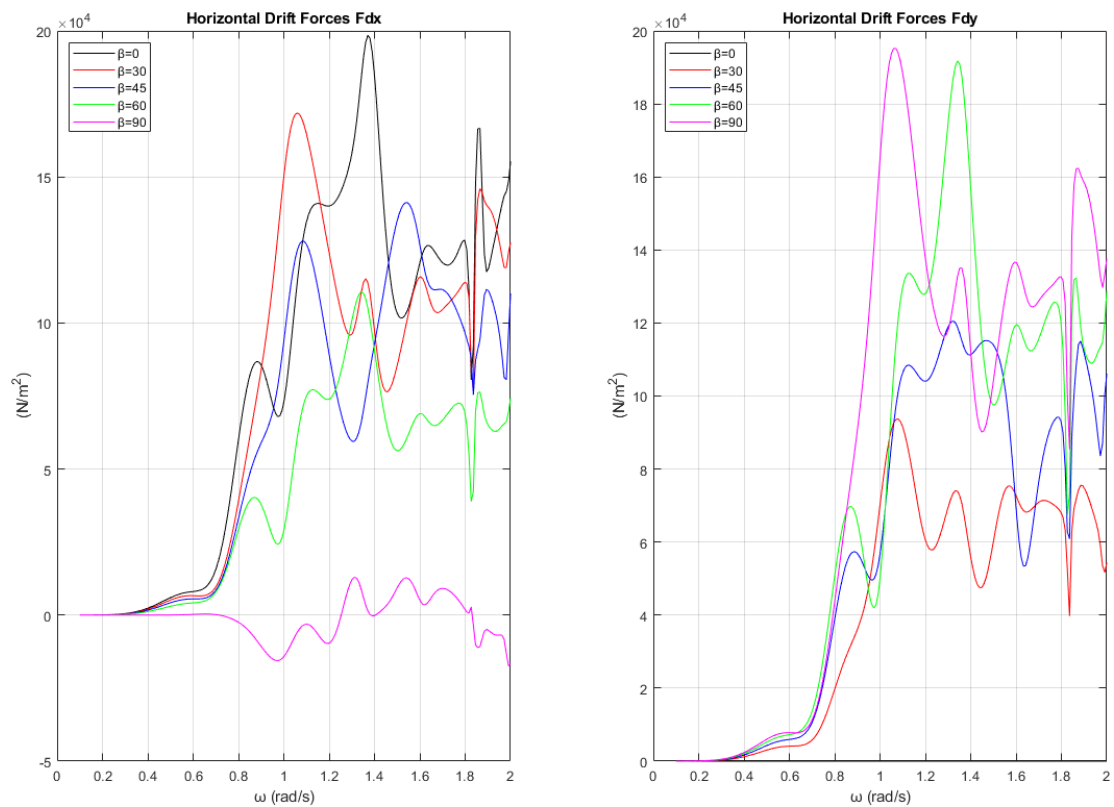


Εικόνα 246: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ της πλωτής κατασκευής

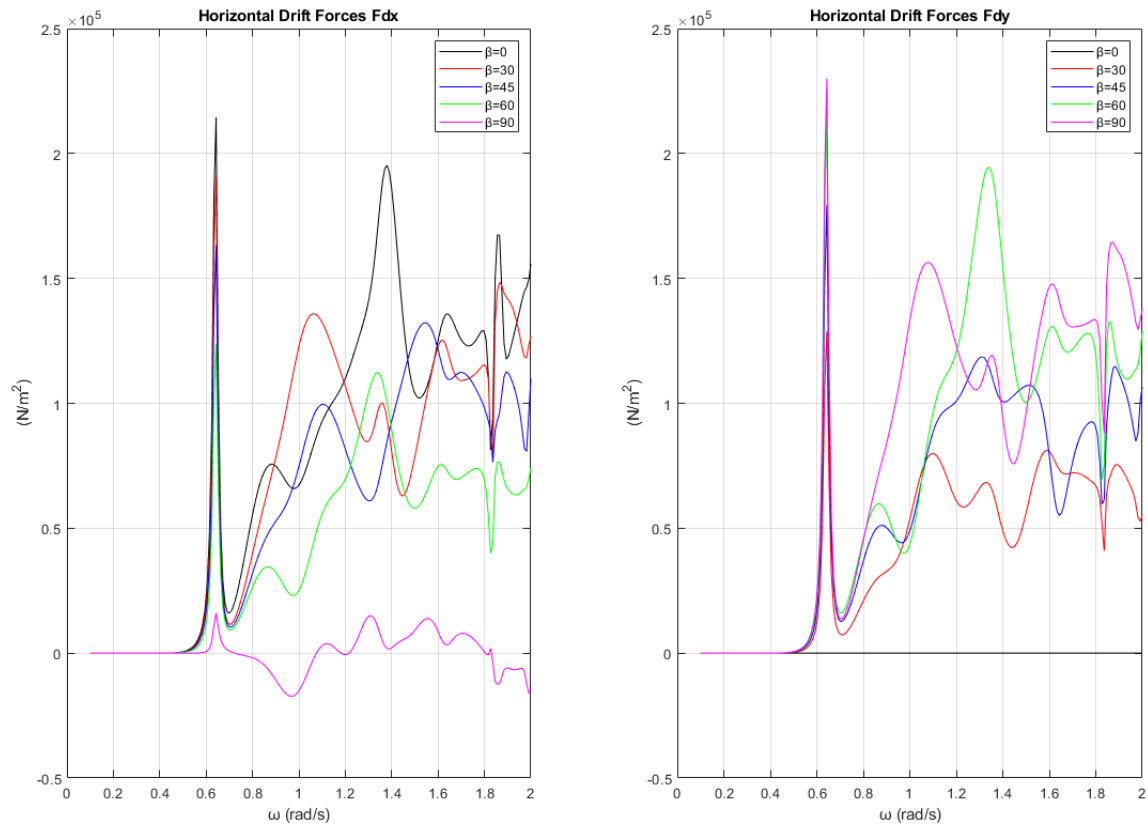


Εικόνα 247: Κινήσεις της πλωτής κατασκευής ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν όταν αυτή πλέει ελεύθερη, όμως αλλάζουν οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 248 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται λόγω της περίθλασης του κυματισμού στην πλωτή κατασκευή για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem). Αντίστοιχα στην Εικόνα 249 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη, λόγω των κινήσεων της πλωτής κατασκευής (radiation problem), για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 248: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem)



Εικόνα 249: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

Παρόλο που το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται και ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x αλλά και ως προς τις F_y , πρέπει να δούμε ως προς ποια κατεύθυνση εμφανίζονται οι μεγαλύτερες φορτίσεις συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού. Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει ώστε να παρουσιάσουμε τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ως προς τις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης. Στον Πίνακα 67 φαίνονται ως προς ποια κατεύθυνση ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού.

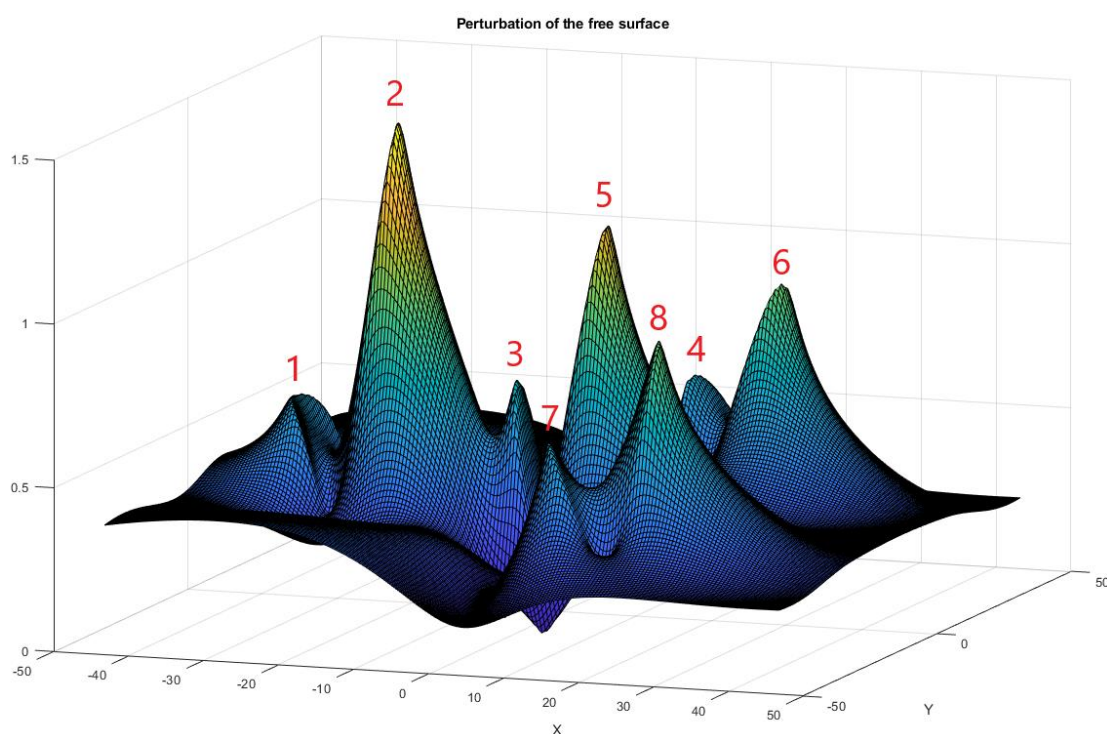
Πίνακας 67: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.06$	F_x	OXI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.62$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.09$	F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.08$	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.63$	F_y	NAI

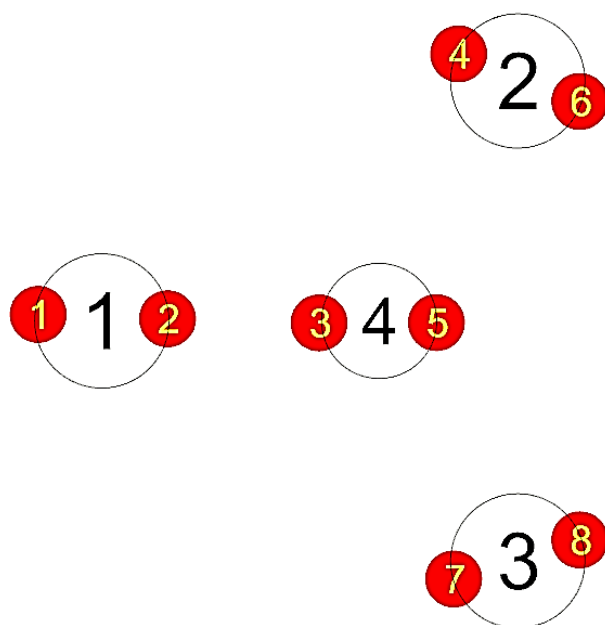
Στην Εικόνα 250 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 68 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 251 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 68: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.61 m
2	1.46 m
3	0.70 m
4	0.62 m
5	1.18 m
6	0.94 m
7	0.63 m
8	0.94 m



Εικόνα 250: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

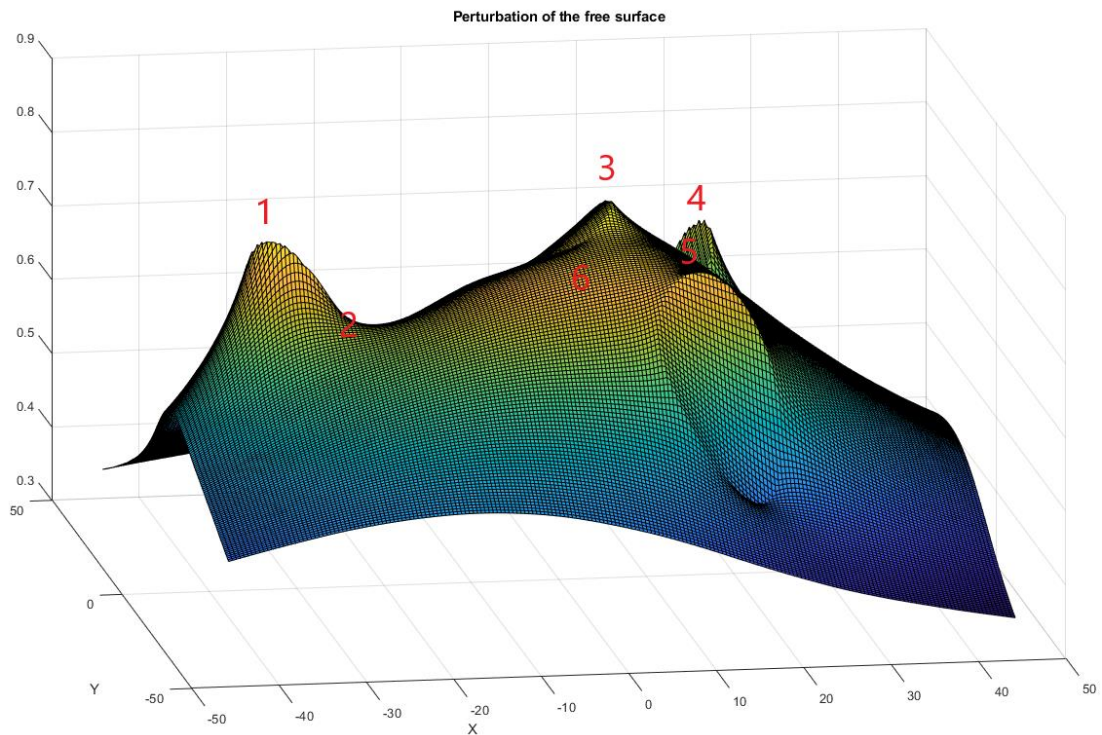


Εικόνα 251: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

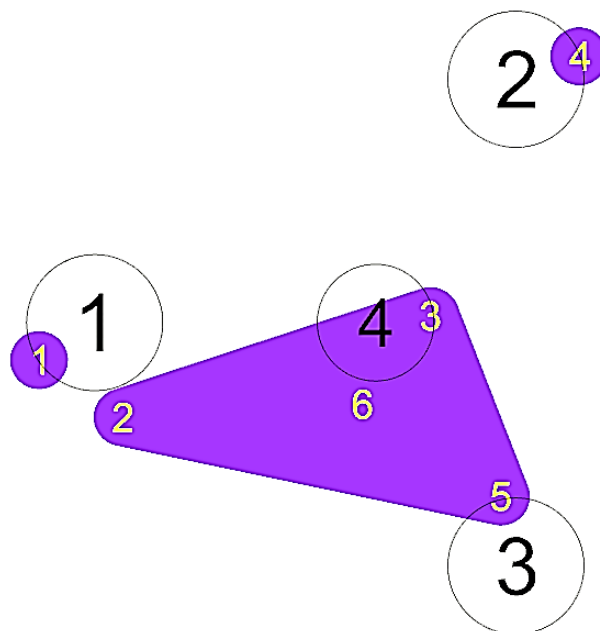
Στην Εικόνα 252 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 69 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 253 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 69: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.78 m
2	0.69 m
3	0.81 m
4	0.71 m
5	0.76 m
6	0.75 m



Εικόνα 252: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



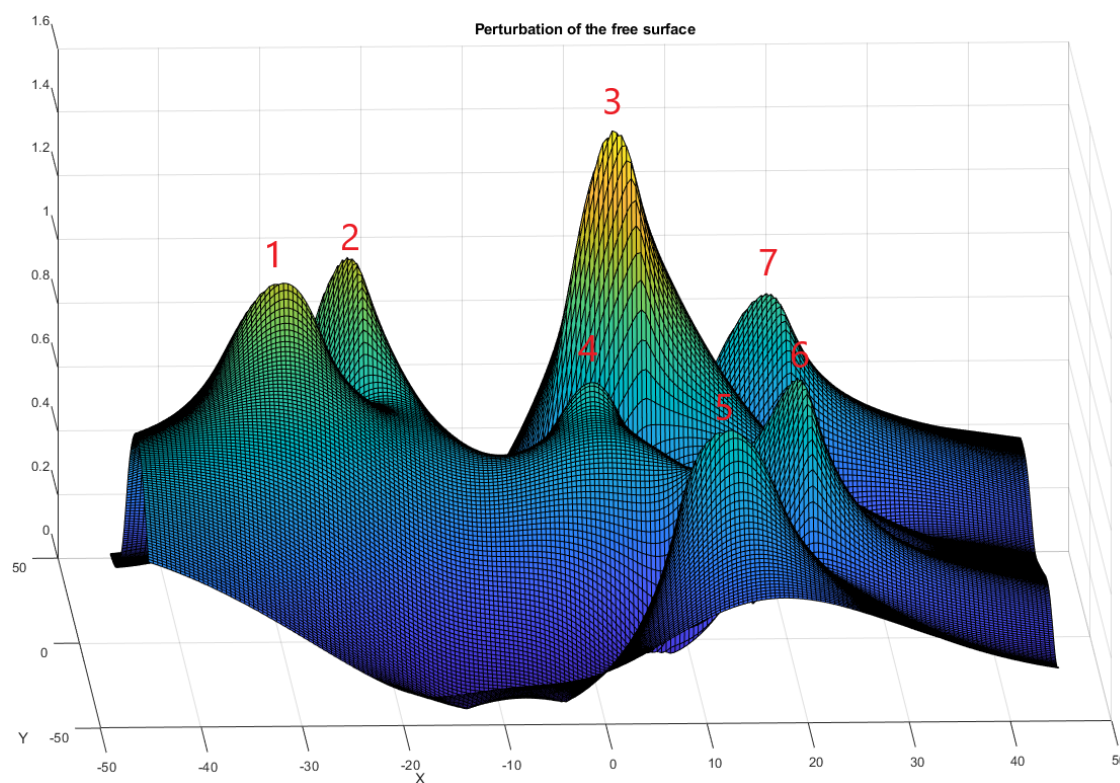
Εικόνα 253: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 254 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 70

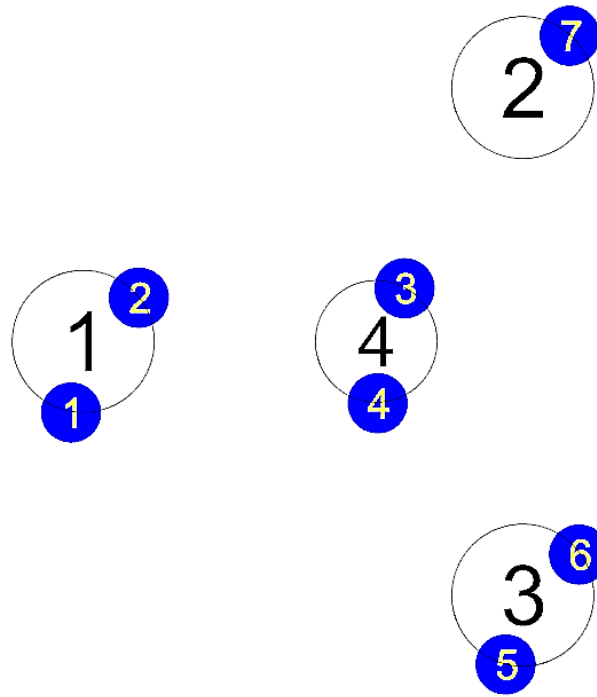
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 255 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 70: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.16 m
2	1.18 m
3	1.57 m
4	0.84 m
5	0.82 m
6	0.93 m
7	0.92 m



Εικόνα 254: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

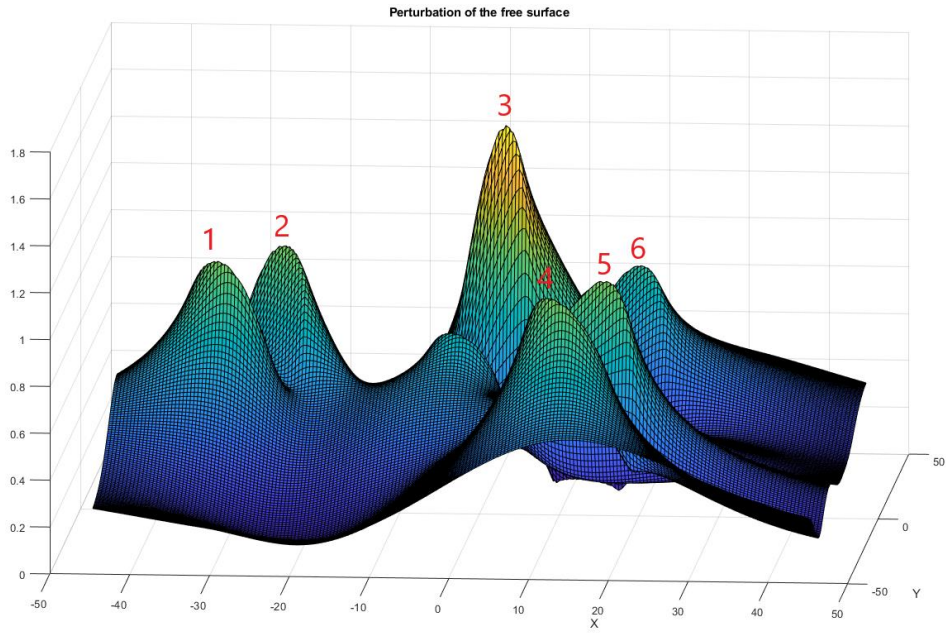


Εικόνα 255: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

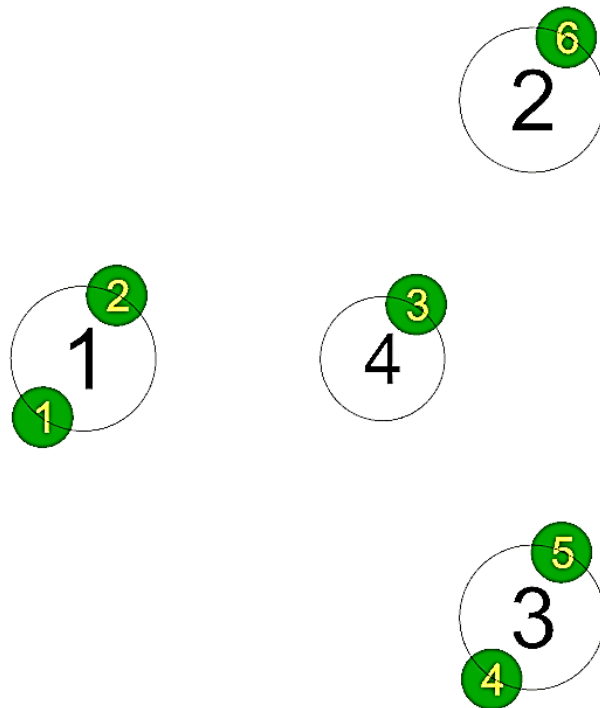
Στην Εικόνα 256 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 71 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 257 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 71: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.10 m
2	1.10 m
3	1.61 m
4	1.10 m
5	1.10 m
6	0.90 m



Εικόνα 256: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



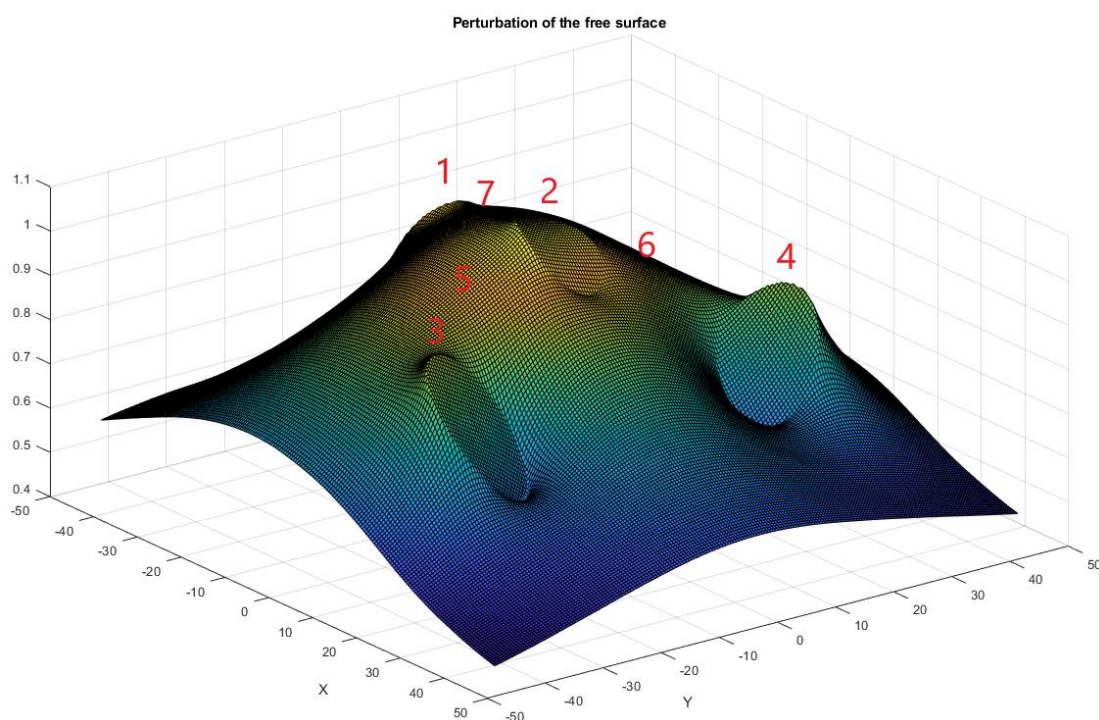
Εικόνα 257: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 258 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη

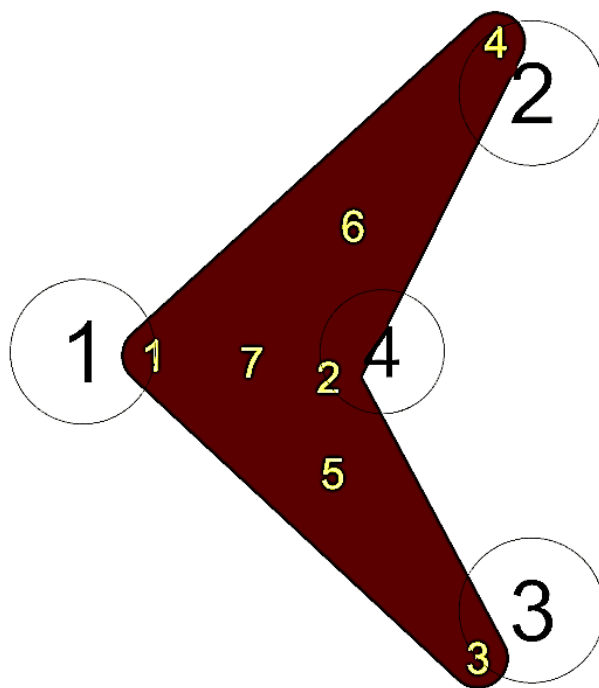
Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 72 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 259 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 72: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.03 m
2	1.07 m
3	0.90 m
4	0.88 m
5	1.00m
6	1.00 m
7	1.05 m

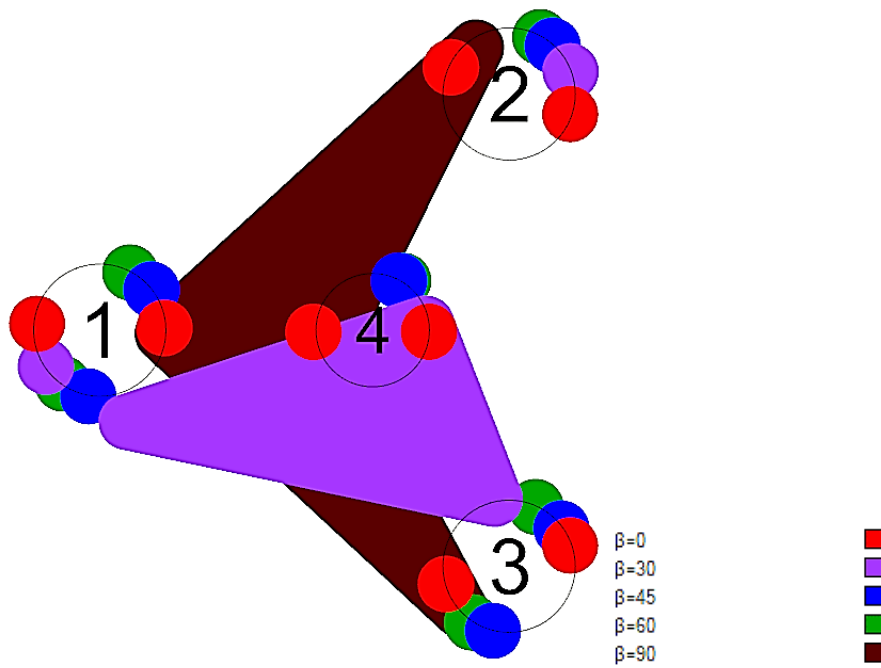


Εικόνα 258: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

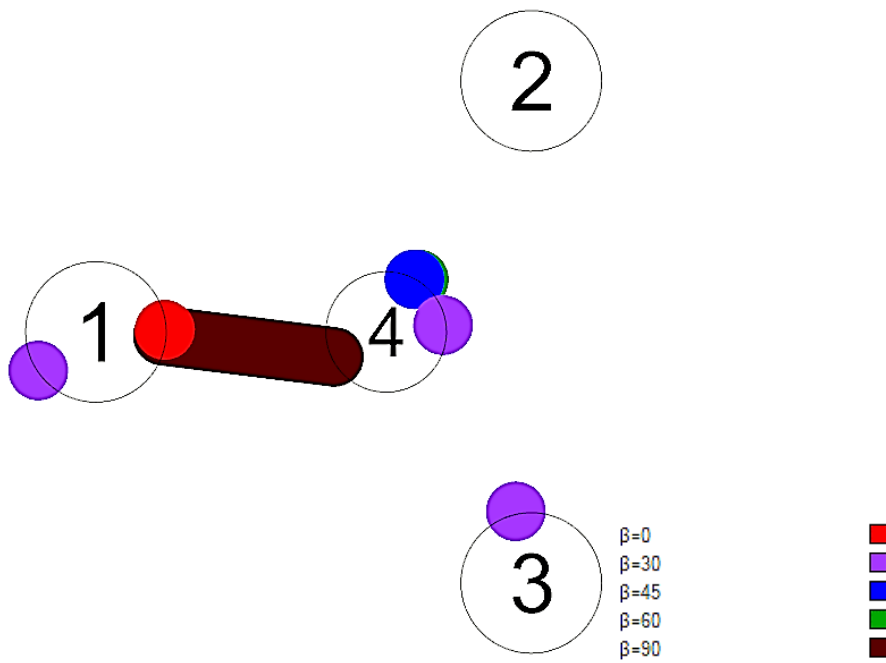


Εικόνα 259: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

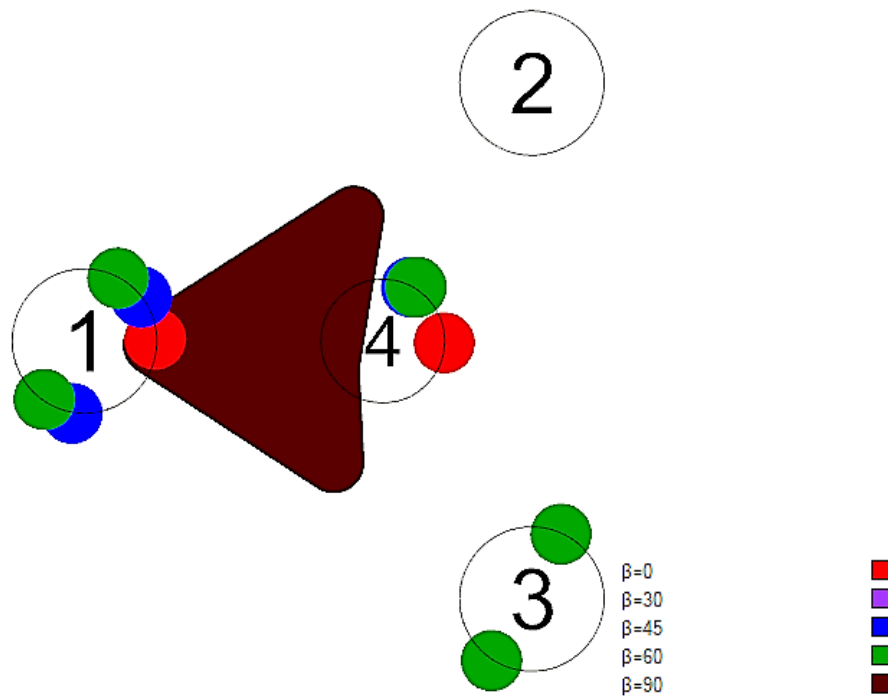
Στην Εικόνα 260 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 261 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 261 συμπεραίνουμε πως στην πλωτή κατασκευή μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1 και 4. Η συσκευή στον κύλινδρο 1 μπορεί να παράξει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι με $\beta = 0^\circ, 30^\circ$ και 90° . Αντίστοιχα η συσκευή του κυλίνδρου 4 μπορεί να παράξει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι με $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Συγκρίνοντας την κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν η πλωτή κατασκευή είναι ακίνητη με αυτήν που μελετήθηκε, παρατηρούμε πως οι ταλαντώσεις της κατασκευής δεν επηρεάζουν μόνο τις θέσεις των συσκευών αλλά και την απόδοσή τους. Στην Εικόνα 262 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 262 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 260: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

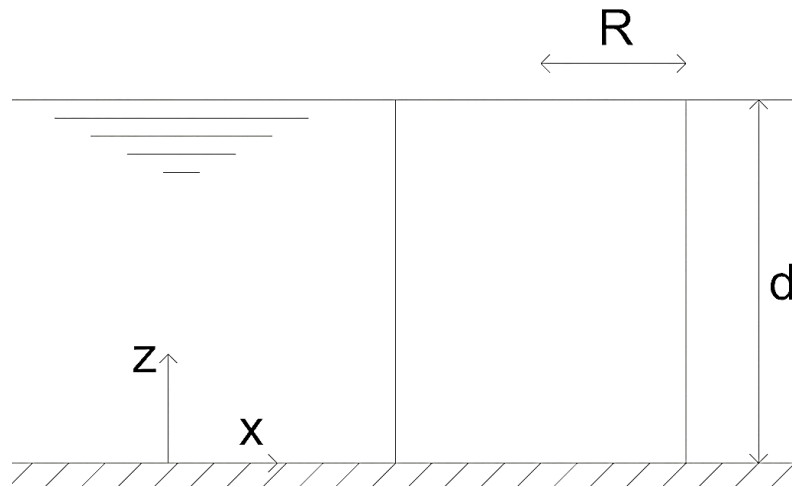


Εικόνα 261: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



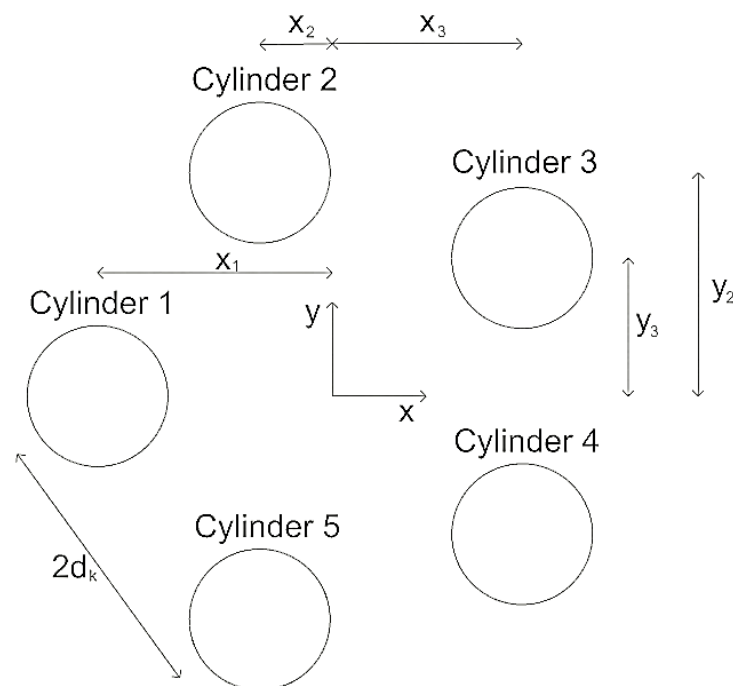
Εικόνα 262: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.5 Πέντε κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι



Εικόνα 263: Διαστάσεις πακτωμένου κυλίνδρου

Θεωρούμε πέντε κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους με ακτίνα R σε βάθος d , όπως φαίνεται στην Εικόνα 263 ενδεικτικά για έναν κύλινδρο.



Εικόνα 264: Κάτοψη της διάταξης των κυλίνδρων

Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι σε κυκλική μορφή με τα κέντρα τους να ισαπέχουν απόσταση $2d_k$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 264. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων εκφράζονται από τον ακόλουθο λόγο:

$$\frac{R}{d_k} = 0,8$$

Από την Εικόνα 264 έχουμε ότι η γενική μορφή των συντεταγμένων των κυλίνδρων, ως προς το επίπεδο xy είναι οι ακόλουθες:

- Κύλινδρος 1 ($x_1, 0$)
- Κύλινδρος 2 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 3 (x_3, y_3)
- Κύλινδρος 4 (x_3, y_3)
- Κύλινδρος 5 (x_2, y_2)

Η διακριτοποίηση που θα κάνουμε είναι ίδια με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.1. Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 8m$, με τα κέντρα τους να ισαπέχουν $2d_k = 20m$ και βρίσκονται σε βάθος $d = 8m$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 ($-17,0$)
- Κύλινδρος 2 ($-5.3, 16.2$)
- Κύλινδρος 3 ($13.8, 10$)
- Κύλινδρος 4 ($13.8, -10$)
- Κύλινδρος 5 ($-5.3, -16.2$)

Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αλλάζουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε την κυκλική διάταξη των πέντε πακτωμένων κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Evans και Porter (1997b), που κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων. Παράλληλα με τους 5 κύλινδρους θα μελετήσουμε και έναν πακτωμένο κύλινδρο με τις ίδιες διαστάσεις. Ο λόγος που το κάνουμε αυτό είναι επειδή οι Evans και Porter (1997b) διαιρούν τη συνολική οριζόντια δύναμη διέγερσης που ασκείται σε κάθε κύλινδρο με αυτήν του πακτωμένου.

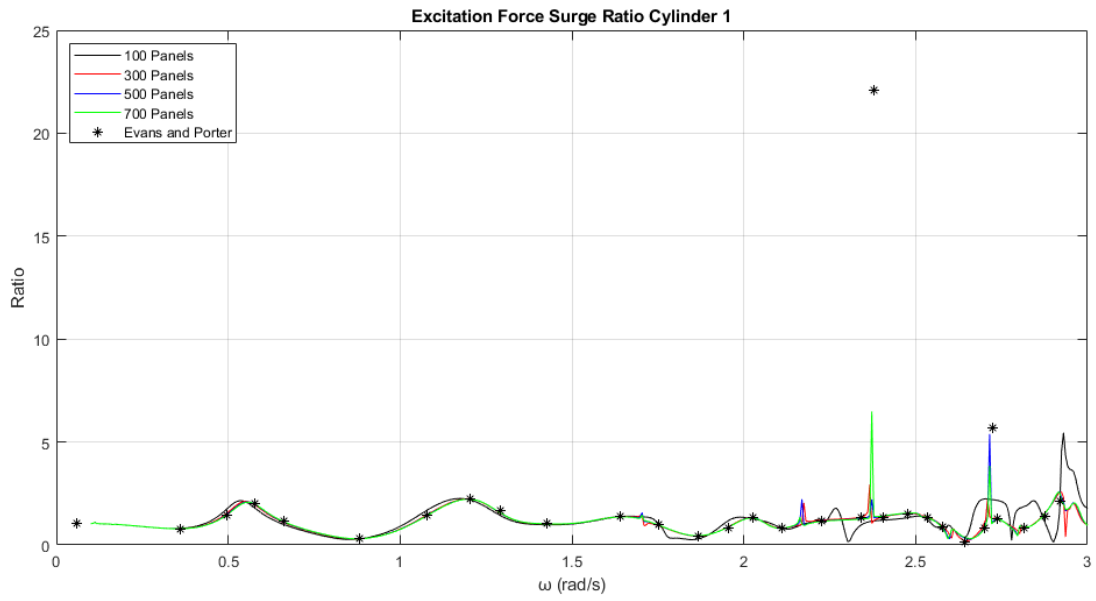
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.7, οι δυνάμεις διέγερσης εκφράζονται σε μορφή μιγαδικού αριθμού. Επομένως προκειμένου να βρούμε την συνολική οριζόντια δύναμη θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέτρο του μιγαδικού αριθμού. Δηλαδή:

$$F_{e_{x_k}} = \sqrt{Re_{x_k}^2 + Im_{x_k}^2} \quad (62)$$

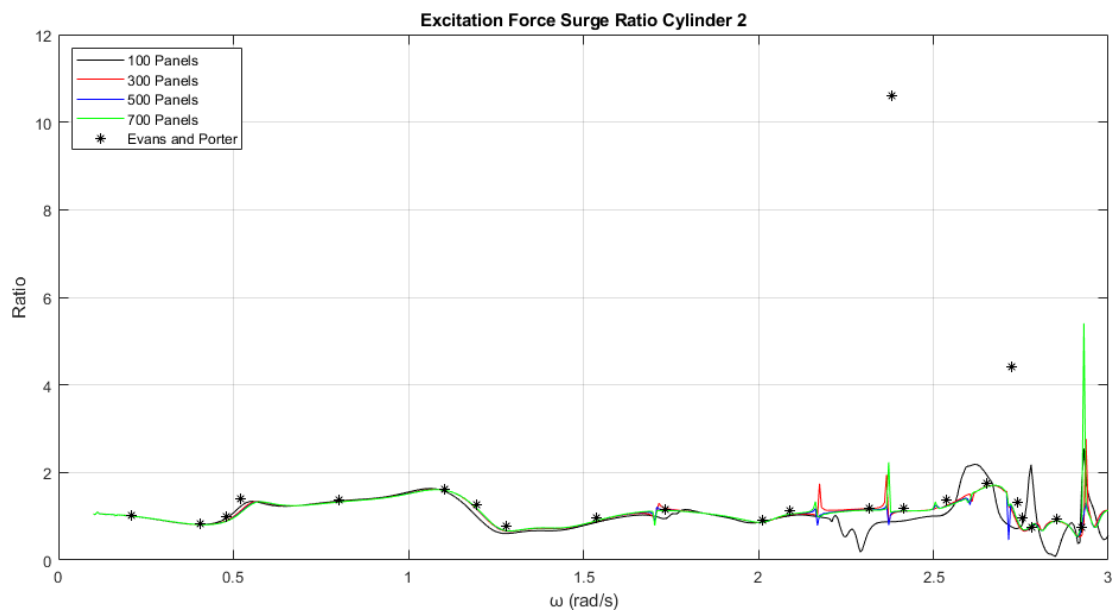
Όπου ο όρος $k = 1, 2, \dots, 5$ συμβολίζει τον κάθε κύλινδρο, Re_{x_k} το πραγματικό μέρος της δύναμης και αντίστοιχα Im_{x_k} το φανταστικό μέρος. Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το λόγο της συνολικής οριζόντιας δύναμης που ασκείται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης με αυτήν που ασκείται σε έναν πακτωμένο κύλινδρο. Δηλαδή:

$$\frac{F_{e_{x_k}}}{F_{e_{x_{one}}}}$$

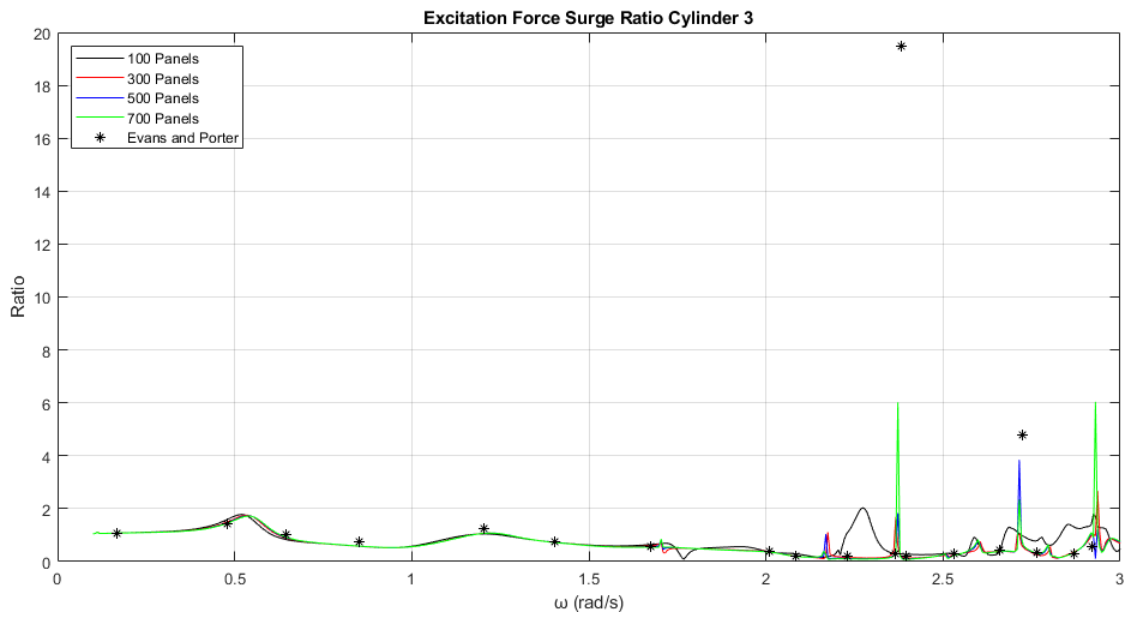
Τα αποτελέσματα για κάθε κύλινδρο φαίνονται στις Εικόνες 265-269.



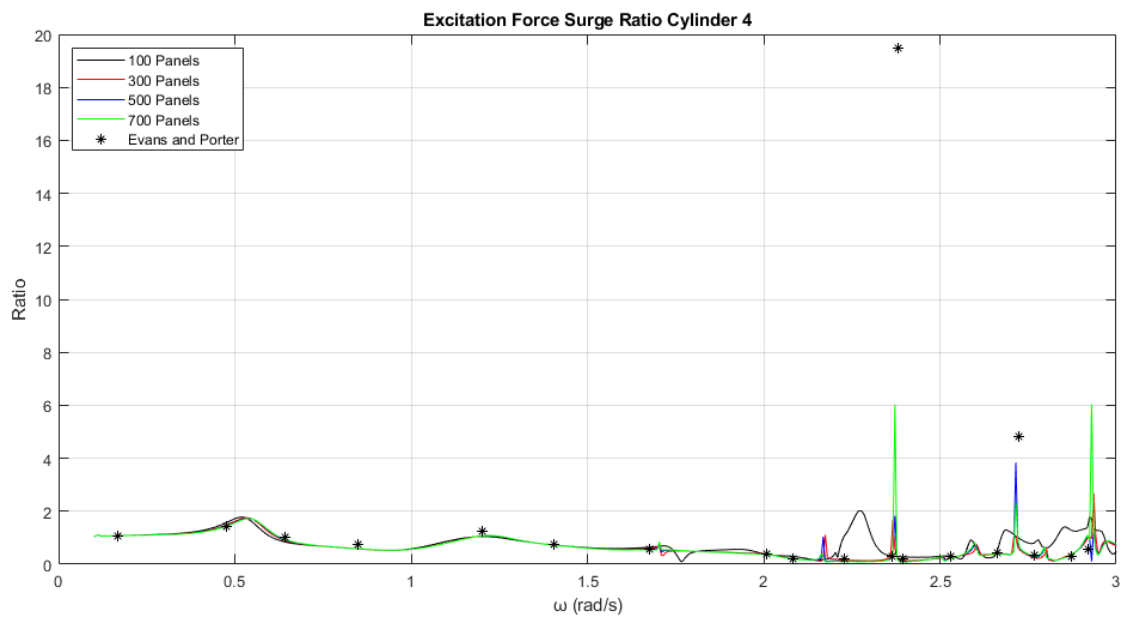
Εικόνα 265: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 1



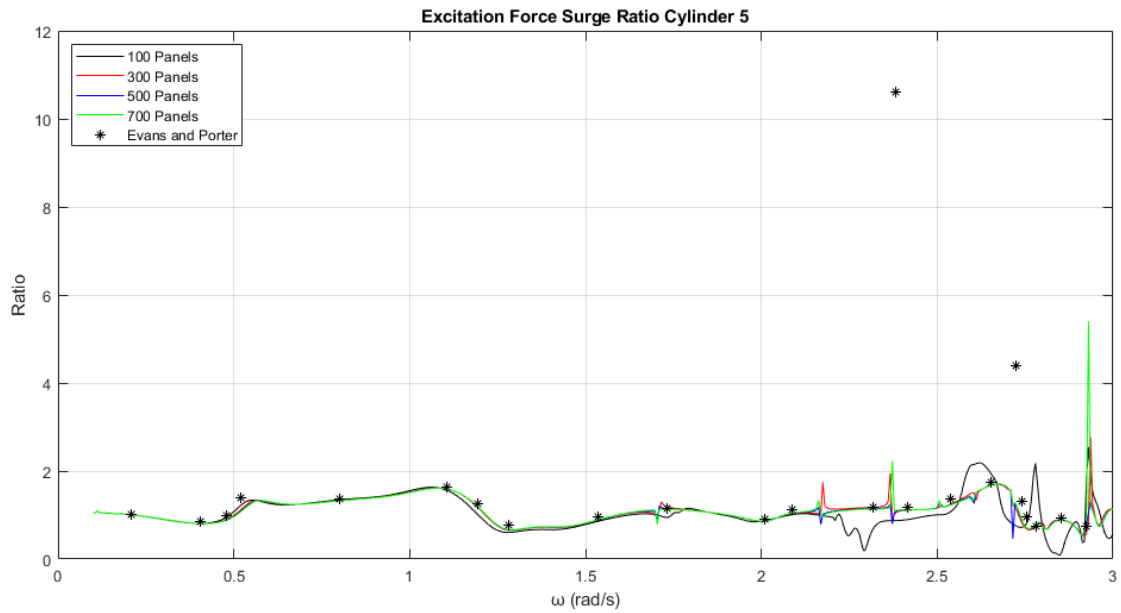
Εικόνα 266: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 2



Εικόνα 267: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 3

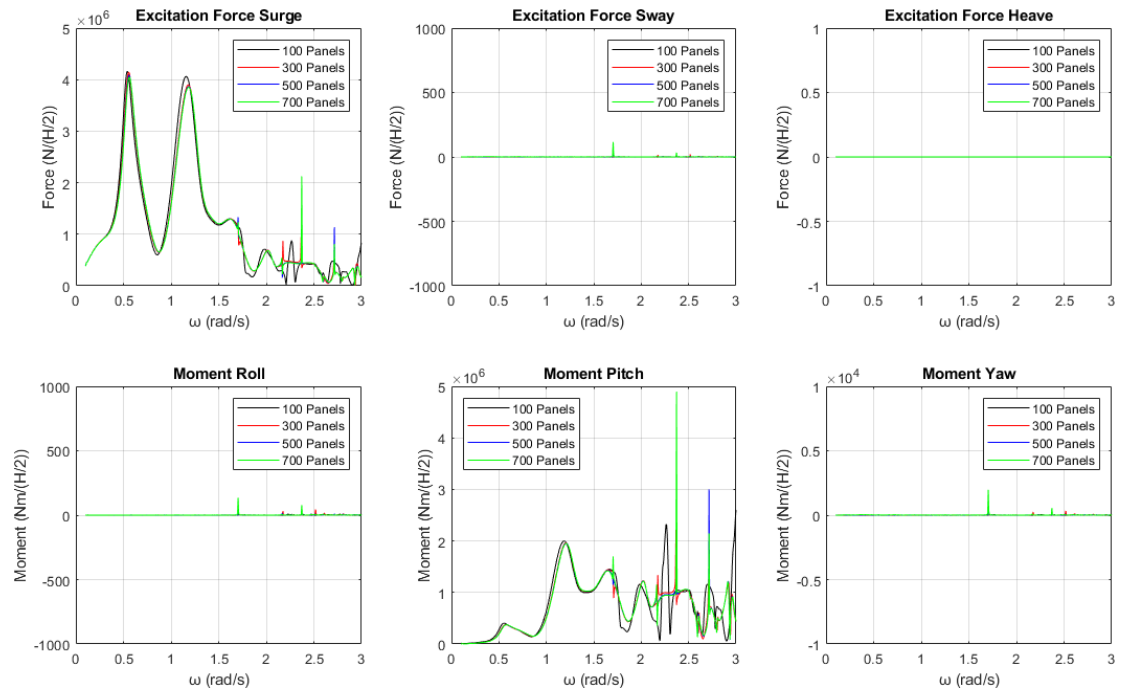


Εικόνα 268: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 4

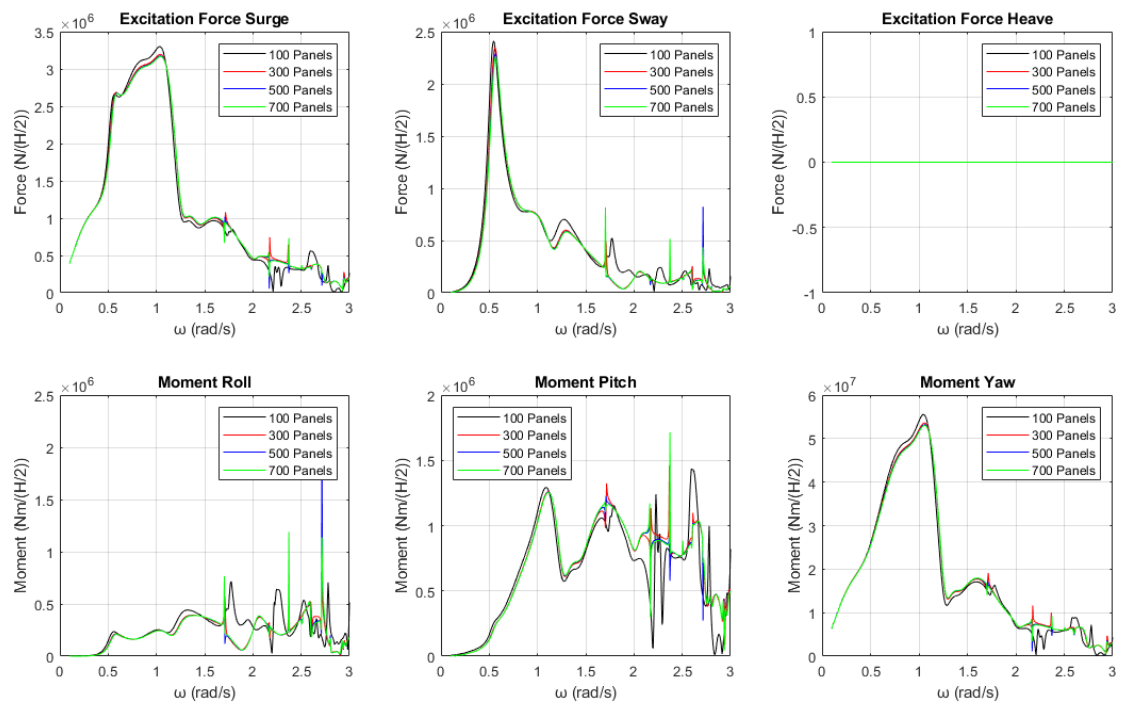


Εικόνα 269: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 5

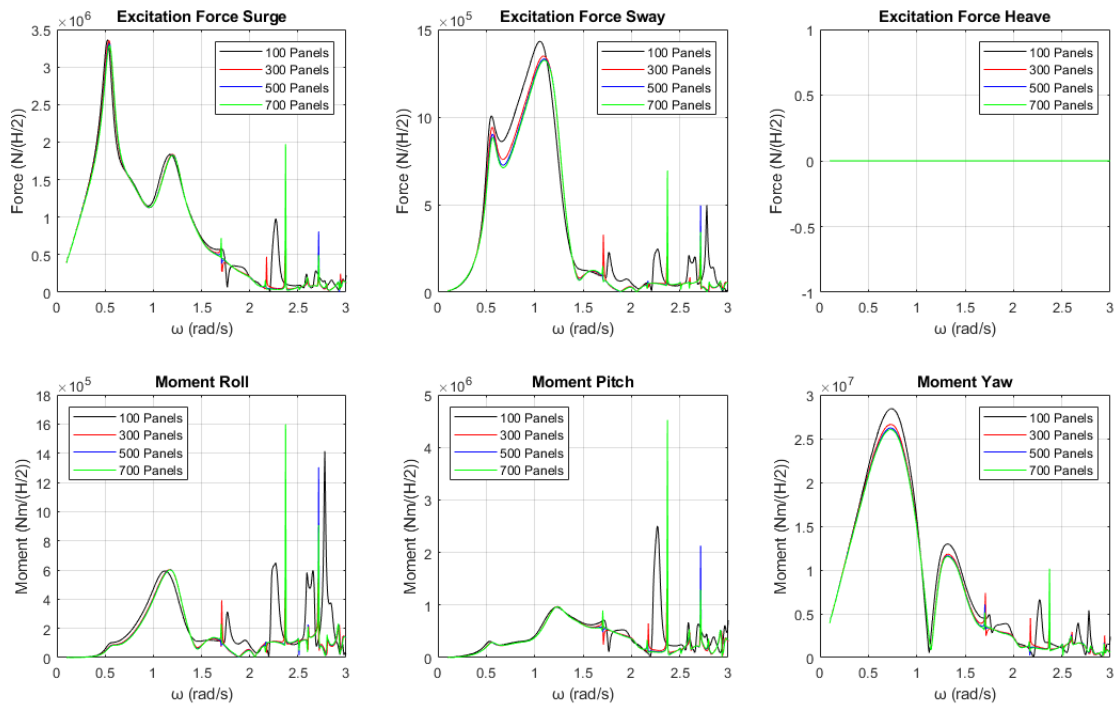
Από τις Εικόνες 265-269 παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα του προγράμματος BEM NEMOH συγκλίνουν με αυτά των Evans και Porter, όταν η διακριτοποίηση των κυλίνδρων αποτελείται από 500 στοιχεία και πάνω. Οι Evans και Porter, όμως, έχουν υπολογίσει δύο κορυφές στις συχνότητες $\omega \cong 2.38 \text{ r/s}$ και $\omega \cong 2.72 \text{ r/s}$, οι οποίες σηματοδοτούν την εμφάνιση της παγίδευσης των κυματισμών. Παρά το γεγονός ότι πήραμε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, το πρόγραμμα NEMOH δεν μπόρεσε να υπολογίσει τις συγκεκριμένες κορυφές με ακρίβεια. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι επειδή οι Evans και Porter κάνουν χρήση αναλυτικών σχέσεων. Όμως ο λόγος των οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης ενός κυλίνδρου της διάταξης προς τον ένα πακτωμένο (κύλινδρο) δεν εκφράζει τις πραγματικές συχνότητες στις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο. Στις Εικόνες 270-274 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης κάθε κυλίνδρου της διάταξης.



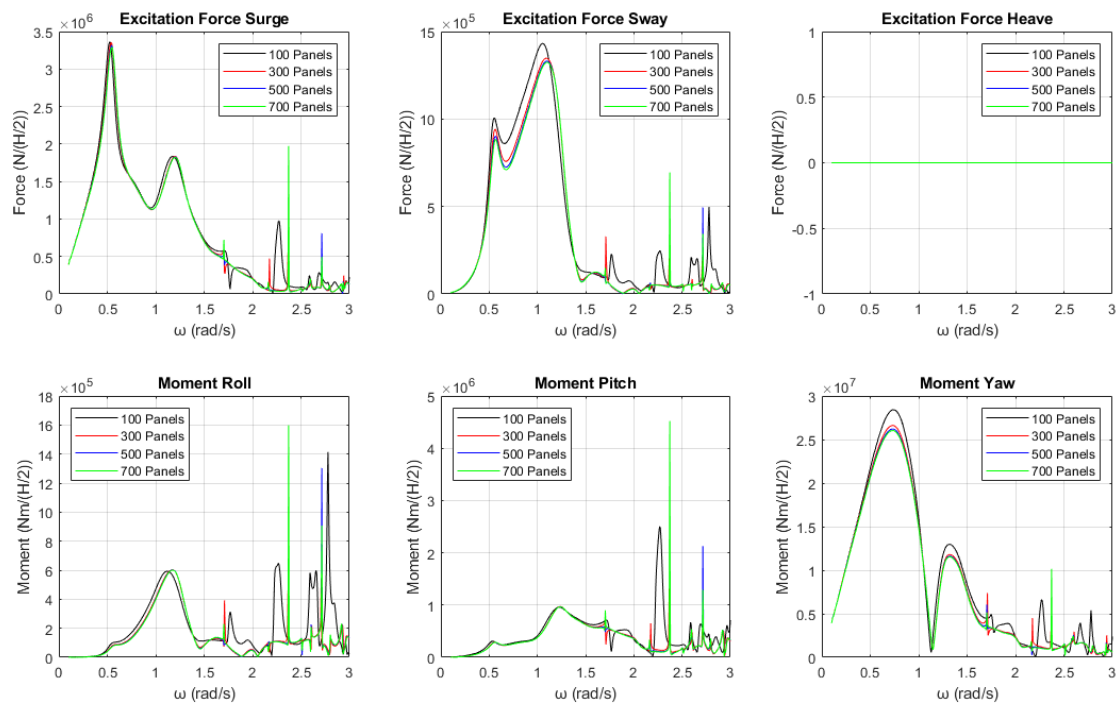
Εικόνα 270: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 της διάταξης



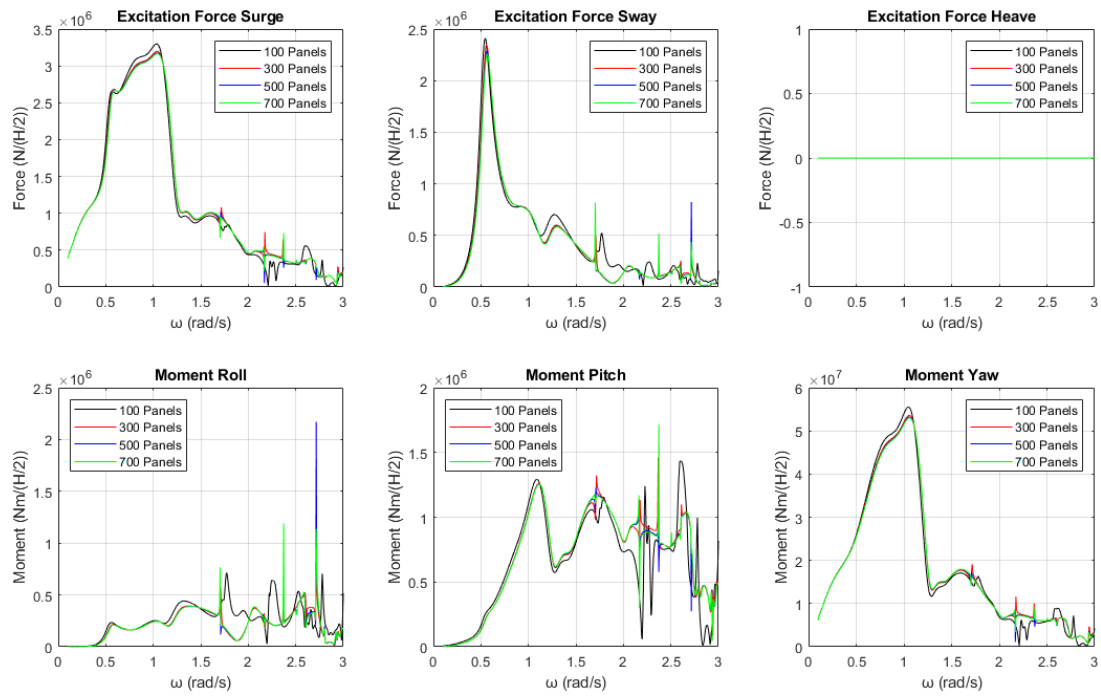
Εικόνα 271: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 της διάταξης



Εικόνα 272: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 της διάταξης

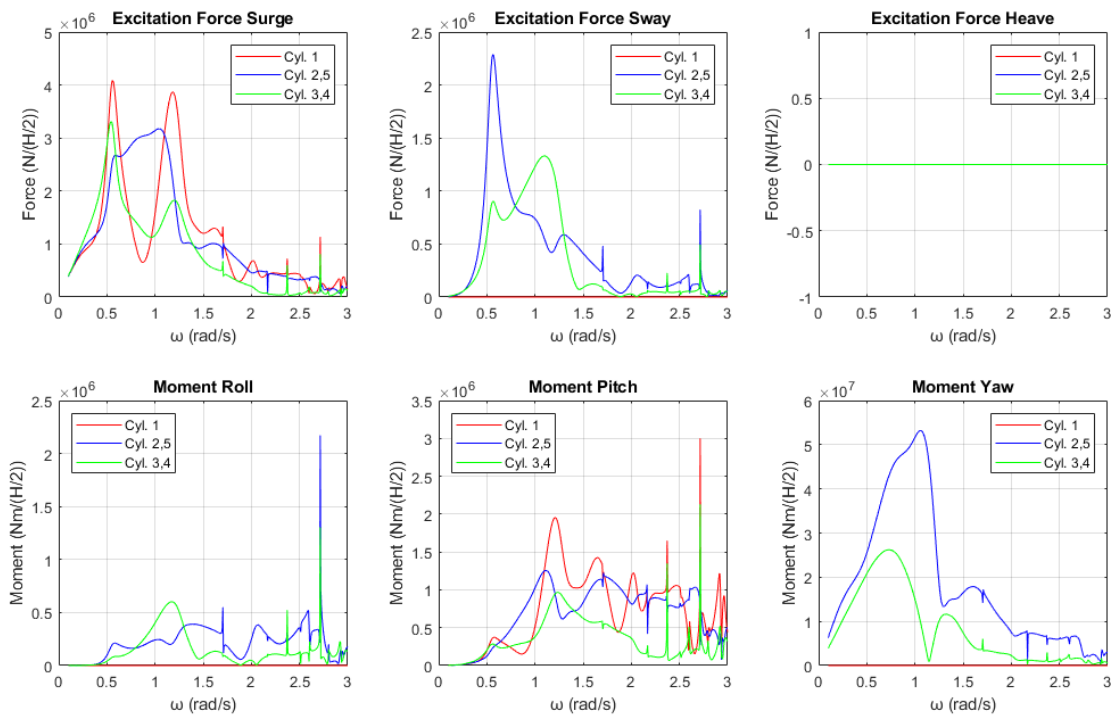


Εικόνα 273: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 της διάταξης

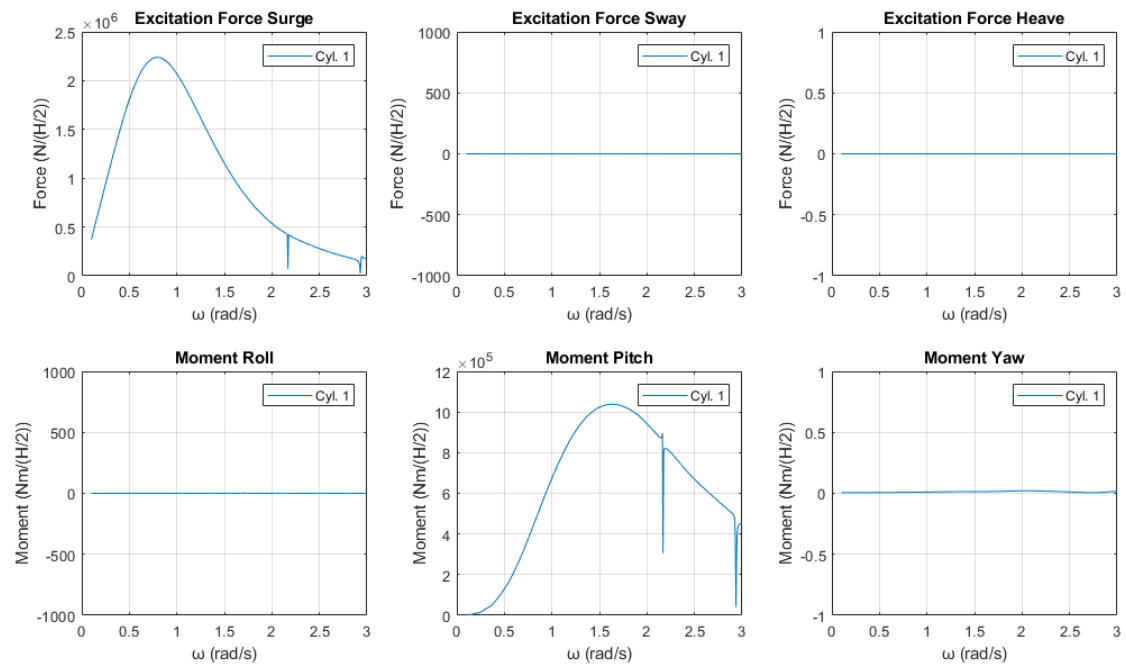


Εικόνα 274: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης

Από τις Εικόνες 270-274 παρατηρούμε πως η διακριτοποίηση των κυλίνδρων με 500 στοιχεία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των 700 στοιχείων δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις συγκρινόμενα με τα 500 στοιχεία. Στην Εικόνα 275 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης για κάθε κύλινδρο της διάταξης. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 276 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης για τον ένα πακτωμένο κύλινδρο.



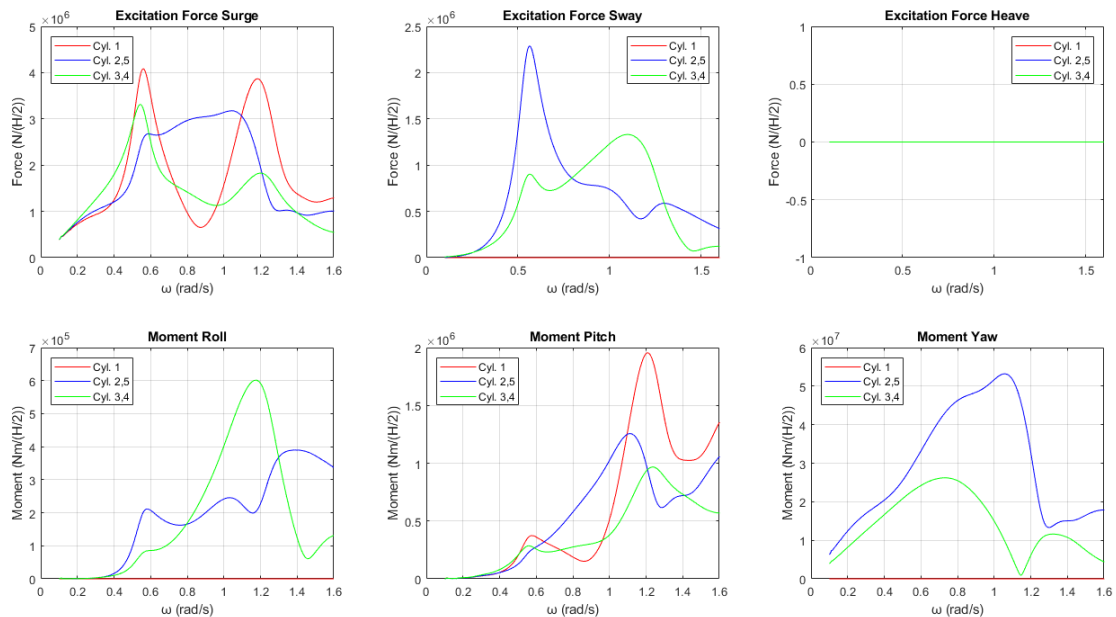
Εικόνα 275: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για κάθε κύλινδρο της διάταξης



Εικόνα 276: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον ένα πακτωμένο κύλινδρο

Συγκρίνοντας τις Εικόνες 275 και 276 παρατηρούμε πως στους πέντε κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους, οι συχνότητες $\omega \cong 2.38$ r/s και $\omega \cong 2.72$ r/s είναι πιθανές irregular frequencies, οπότε το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών δεν μπορεί να αναλυθεί με αξιοπιστία, όπως στη δημοσίευση των Evans και Porter, αλλά παρατηρείται μόνο στους κυλίνδρους 1, 3 και 4. Επίσης, από την Εικόνα 275, βλέπουμε

πως μετά τη συχνότητα $\omega \cong 1.7 \text{ r/s}$ εμφανίζονται irregular frequencies, κάτι το οποίο μπορεί να διορθωθεί μόνον εάν αυξήσουμε το πλήθος των στοιχείων του κάθε κυλίνδρου. Όμως αυτό δεν είναι εφικτό, διότι ο κώδικας NEMOH έχει περιορισμό στο πλήθος στοιχείων (όριο τα 4000), οπότε θα περιορίσουμε τη μελέτη μας μέχρι την συχνότητα $\omega \cong 1.6 \text{ r/s}$. Στην Εικόνα 277 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων.

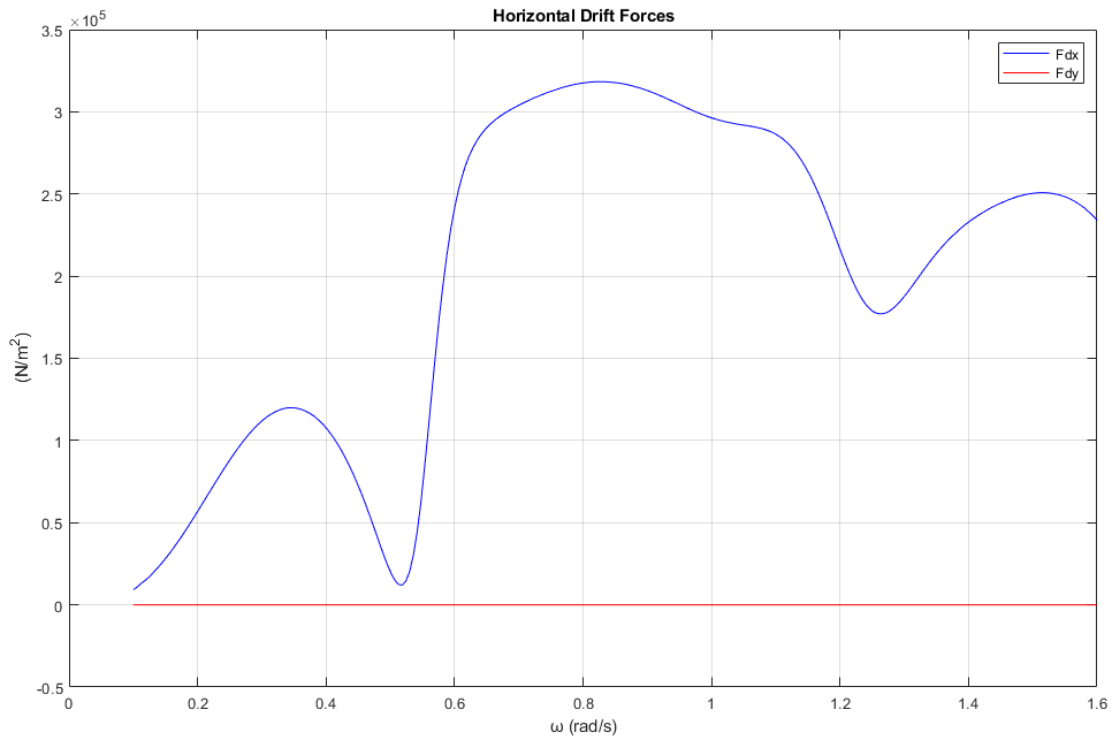


Εικόνα 277: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στους κυλίνδρους 1, 3 και 4 της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Για τον κύλινδρο 1 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.56 \text{ r/s}$ και αντιστοίχως η συνθήκη Dirichlet ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.18 \text{ r/s}$. Για τους κυλίνδρους 3 και 4 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.55 \text{ r/s}$ και αντιστοίχως η συνθήκη Dirichlet ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.20 \text{ r/s}$. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y το φαινόμενο εμφανίζεται μόνο στους κυλίνδρους 2 και 5 της διάταξης, όπου ικανοποιείται μόνο η συνθήκη Neumann στη συχνότητα $\omega \cong 0.56 \text{ r/s}$.

3.5.1 Οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται στη διάταξη φαίνονται στην Εικόνα 278.

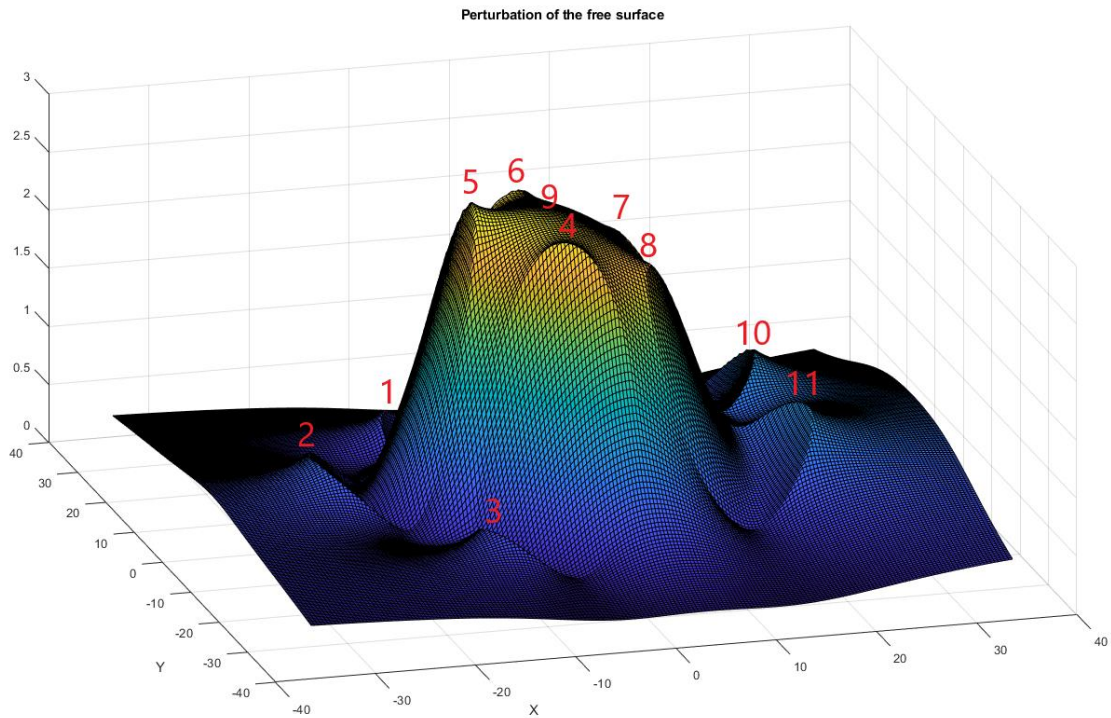


Εικόνα 278: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στην διάταξη

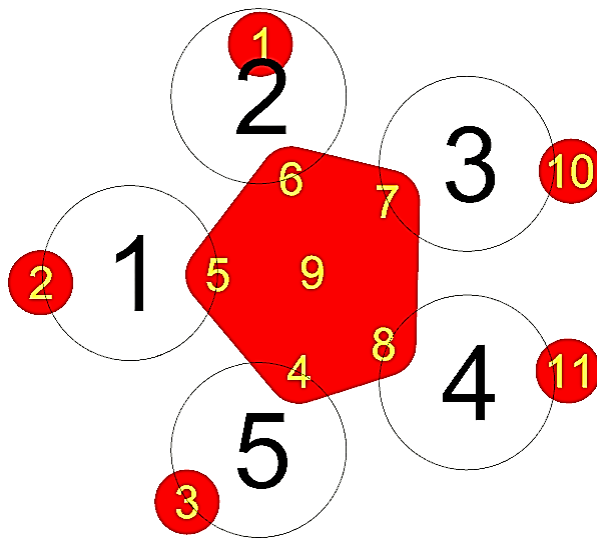
Στην Εικόνα 279 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Στον Πίνακα 73 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 280 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 73: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε κορυφή

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.44 m
2	0.78 m
3	0.56 m
4	2.70 m
5	2.86 m
6	2.70 m
7	2.39 m
8	2.39 m
9	2.74 m
10	1.13 m
11	1.13 m

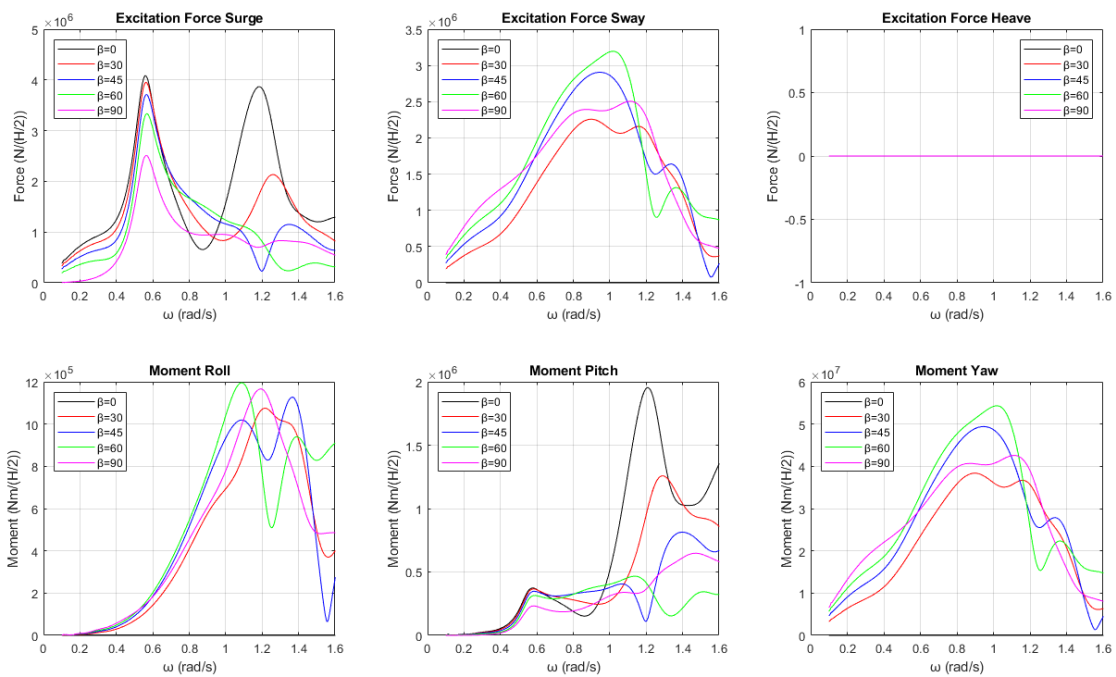


Εικόνα 279: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

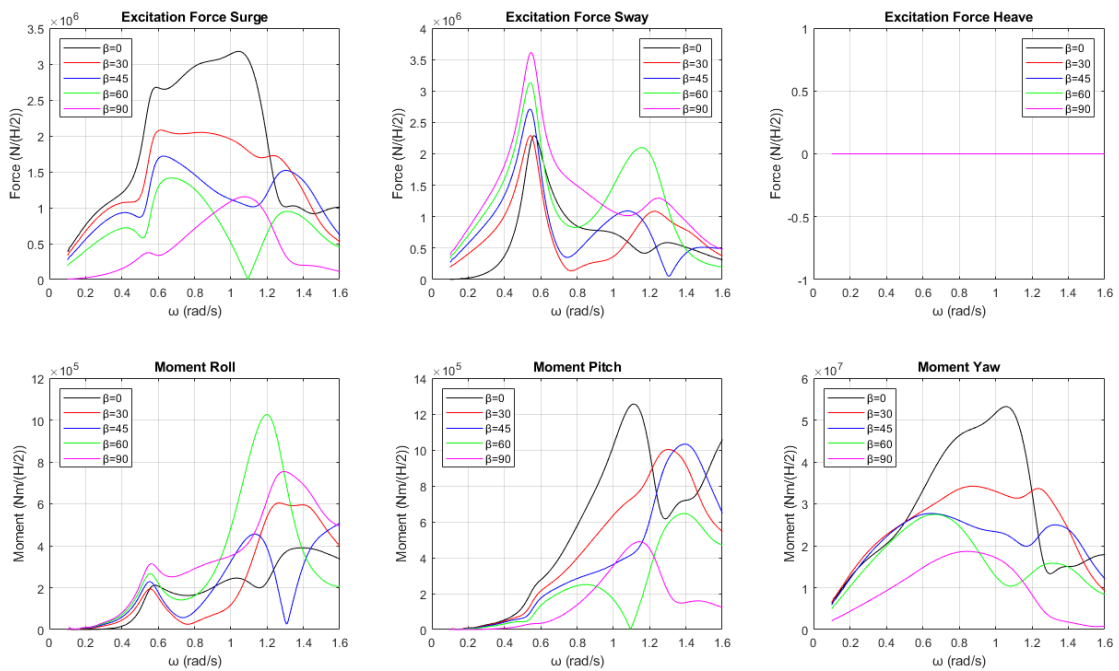


Εικόνα 280: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

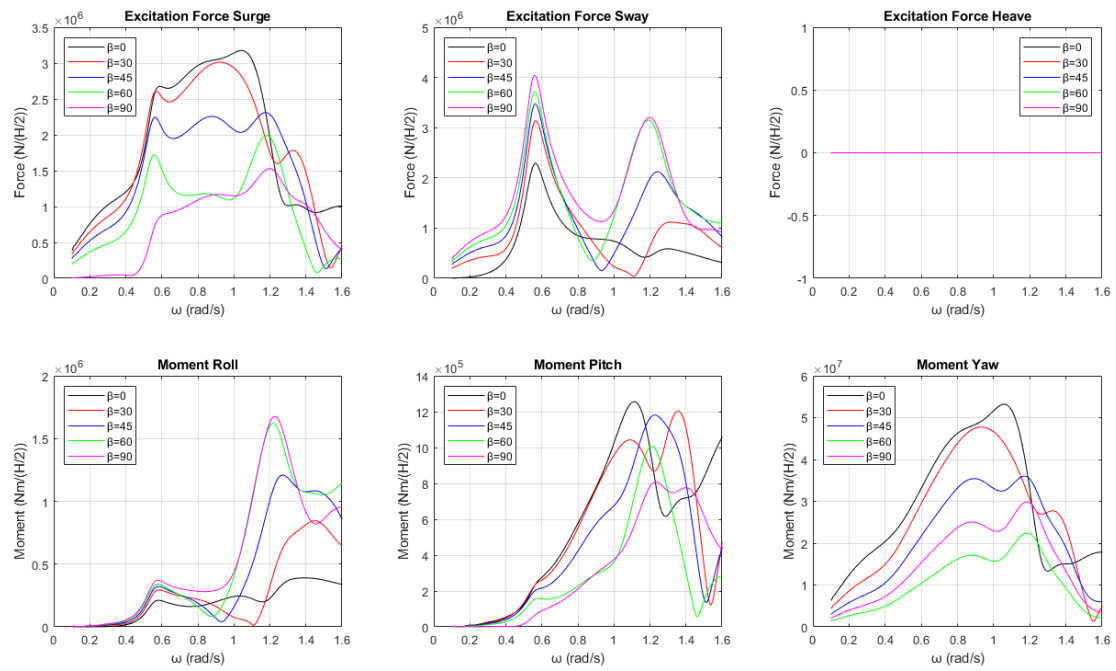
Προκειμένου να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν οι ασκούμενες δυνάμεις και ροπές στη διάταξη, το παραπάνω πρόβλημα θα μελετηθεί και για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 281-285 παρουσιάζονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



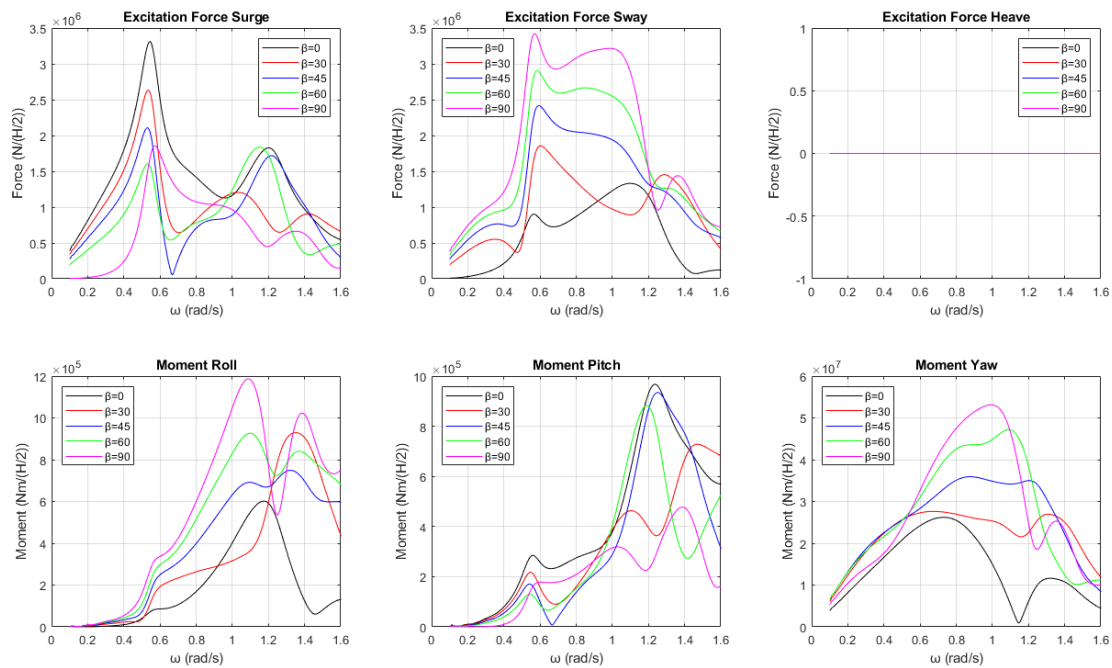
Εικόνα 281: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



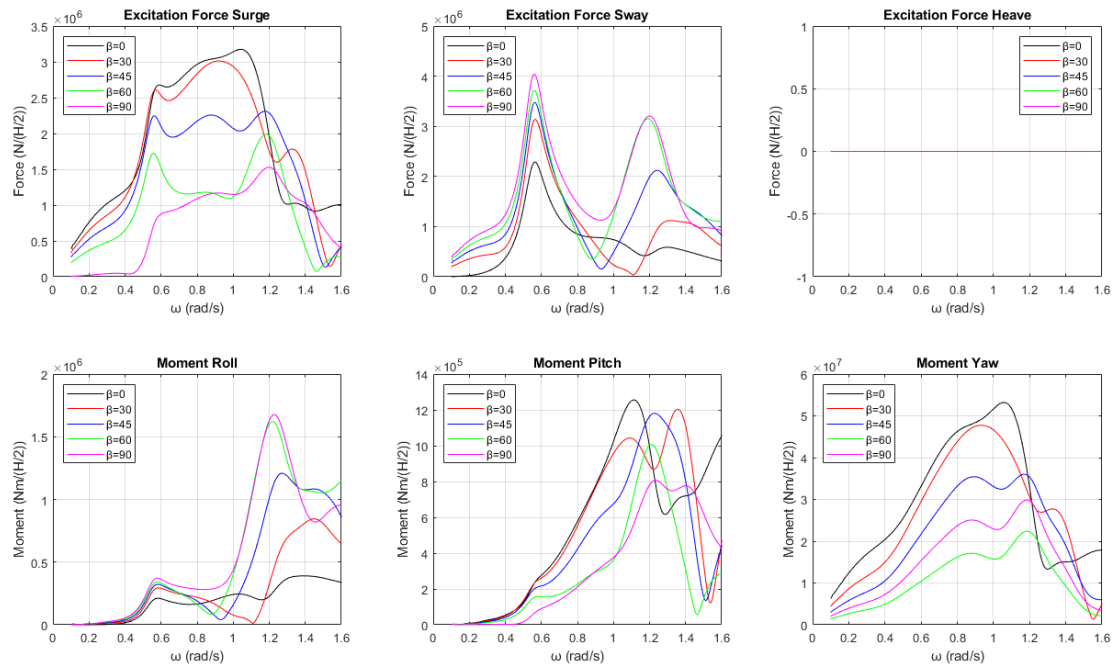
Εικόνα 282: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 283: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 284: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 285: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 281-285 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται και όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Στον Πίνακα 74 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet σε κάθε κύλινδρο της διάταξης ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης.

Πίνακας 74: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.18$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.26$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.35$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.56$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.56$	—
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—

$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.55$	$\cong 1.20$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.55$	$\cong 1.28$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.55$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.55$	$\cong 1.22$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.24$
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.55$	$\cong 1.20$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.54$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.53$	$\cong 1.22$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.53$	$\cong 1.15$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.57$	–
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	1.18	–
$\beta = 90^\circ$	–	–

Από τον Πίνακα 74 παρατηρούμε πως μόνο στους κυλίνδρους 1, 3 και 4 της διάταξης εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε περίπου ίδιες συχνότητες. Στον Πίνακα 75 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet σε κάθε κύλινδρο της διάταξης ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y .

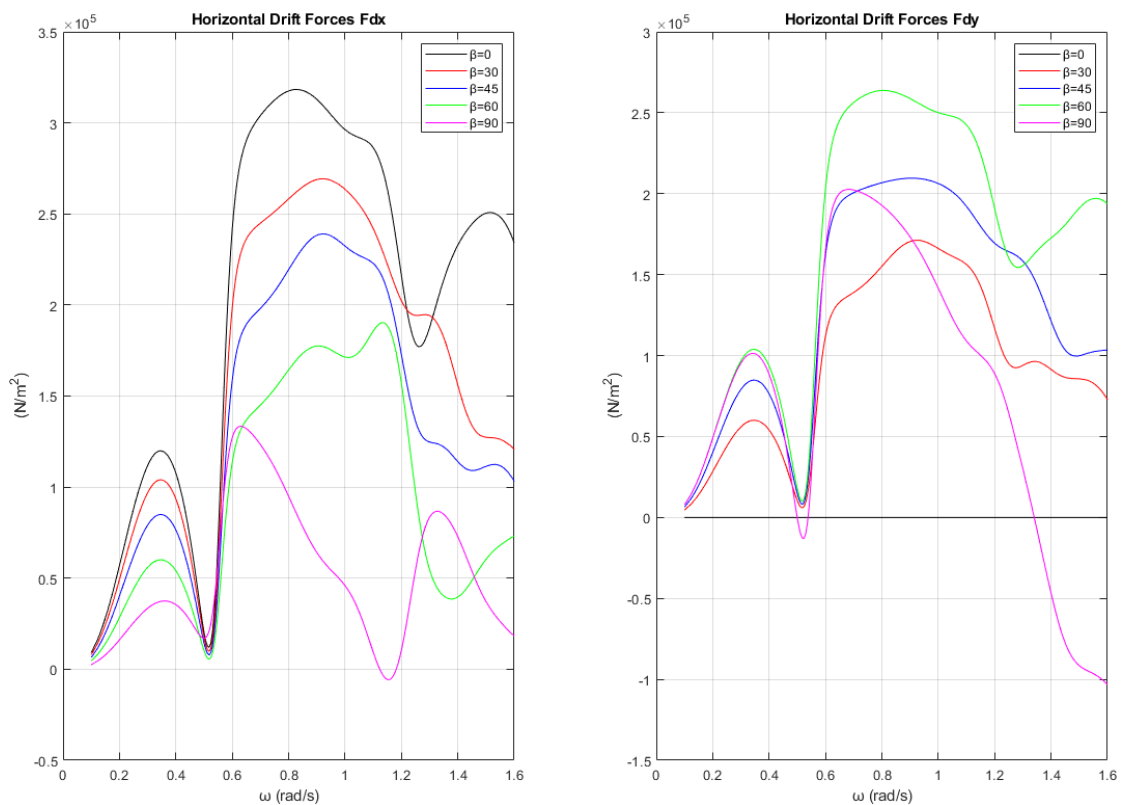
Πίνακας 75: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet σε κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–

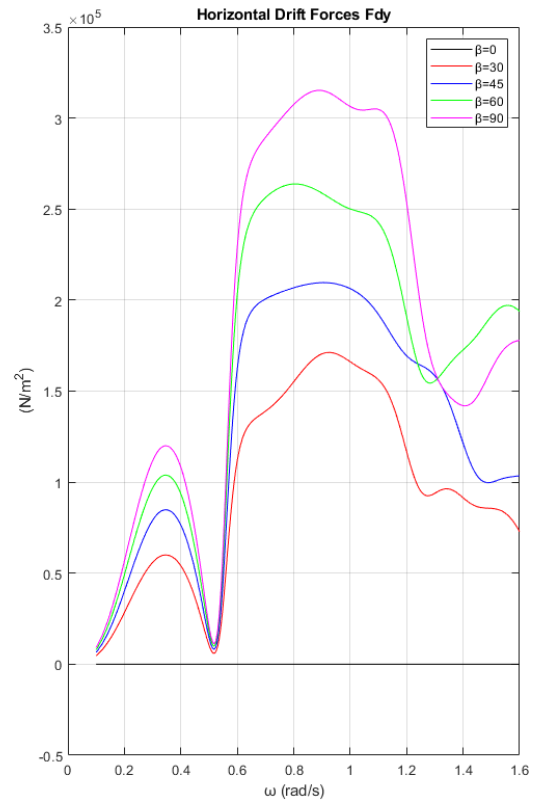
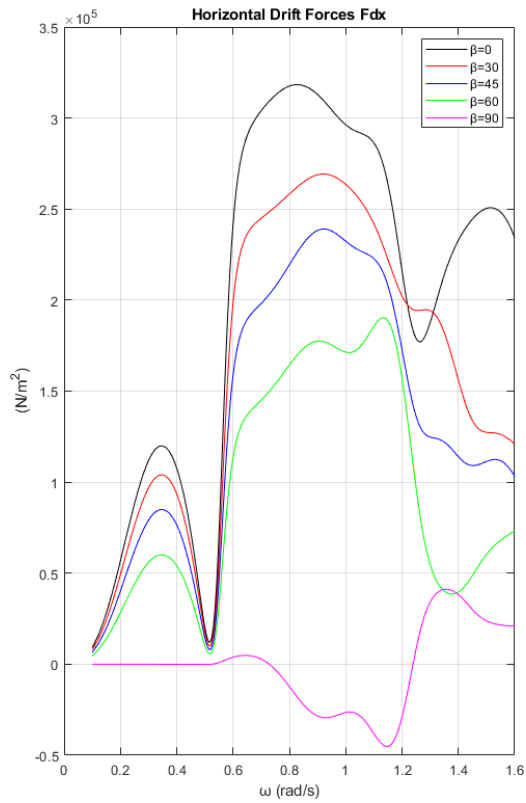
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.56$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.54$	$\cong 1.22$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.54$	$\cong 1.07$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.54$	$\cong 1.15$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.55$	$\cong 1.25$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	$\cong 1.01$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.55$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.55$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.55$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.54$	$\cong 1.12$
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.56$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.56$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.24$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.19$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.56$	$\cong 1.20$

Από τον Πίνακα 75 παρατηρούμε πως μόνο στους κυλίνδρους 2, 3 και 5 της διάταξης εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε περίπου ίδιες

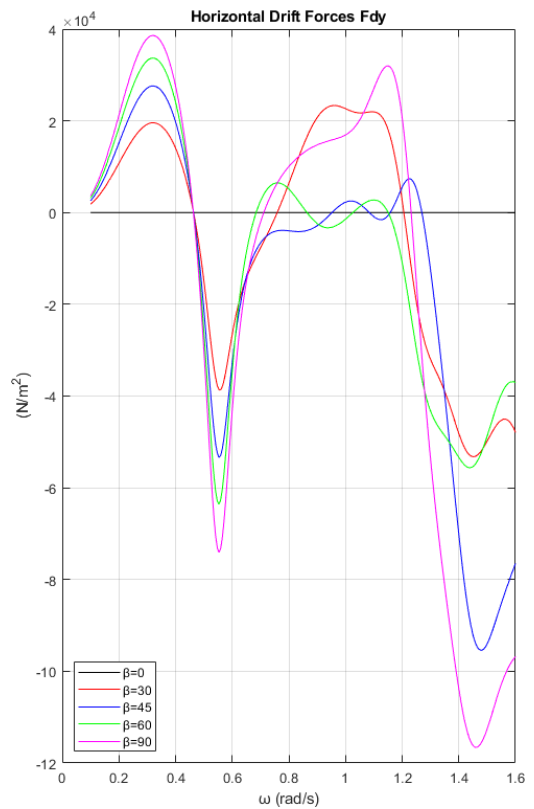
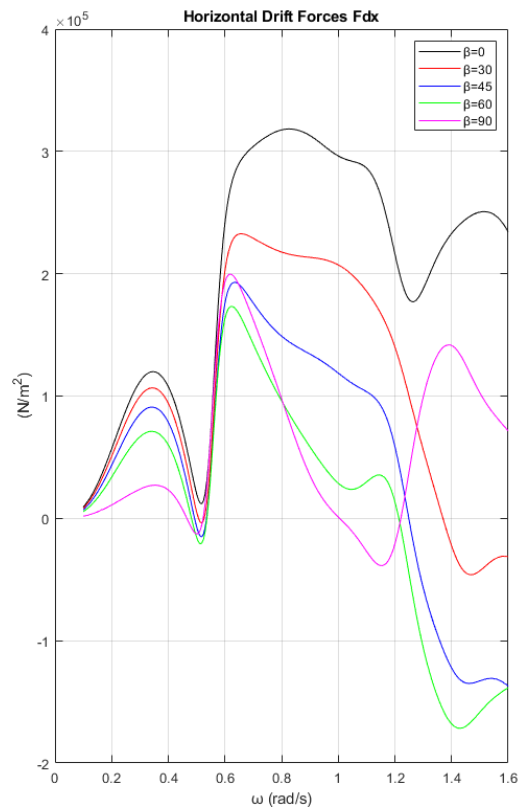
συχνότητες. Συγκρίνοντας τον Πίνακα 74 με τον Πίνακα 75 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Σε πρώτη εκτίμηση μπορούμε να υποθέσουμε πως οι κύλινδροι 1 και 5 της διάταξης είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς ασκούνται μεγάλες δυνάμεις διέγερσης για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στην Εικόνα 286 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 287-291 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



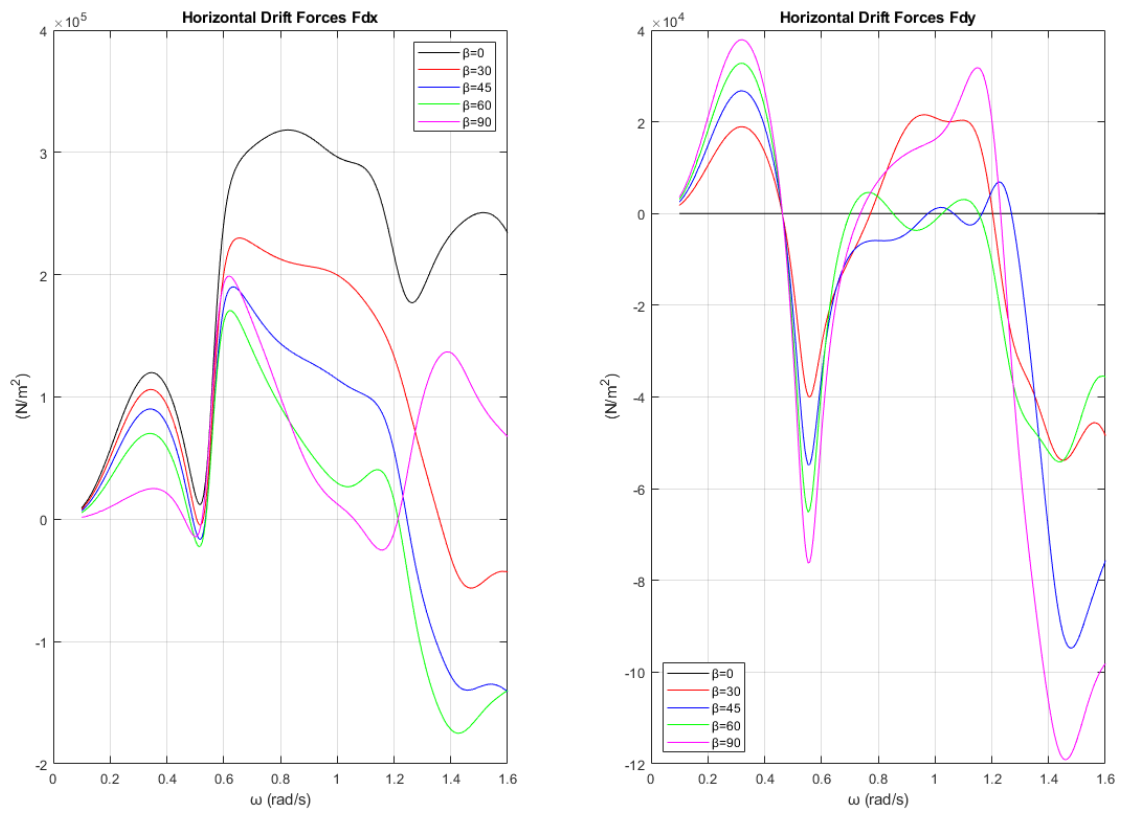
Εικόνα 286: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



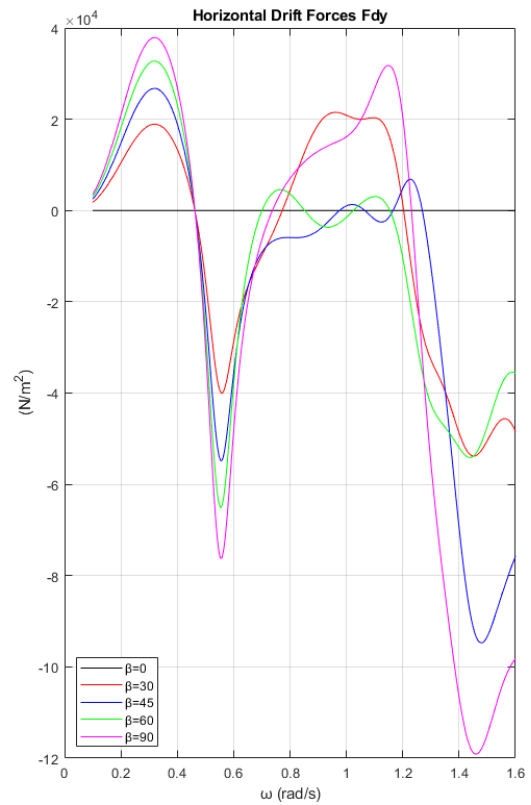
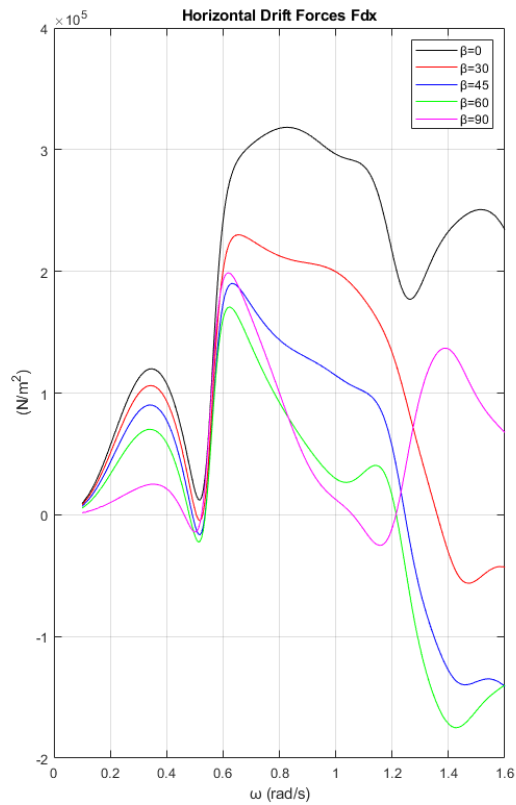
Εικόνα 287: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



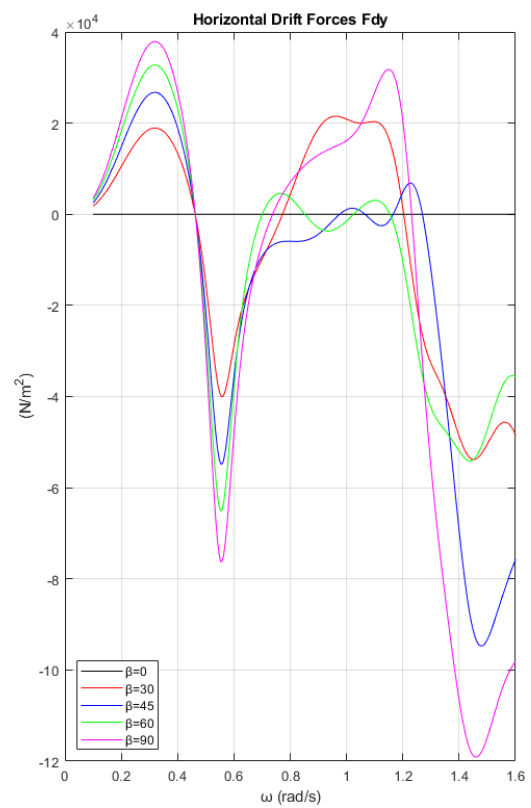
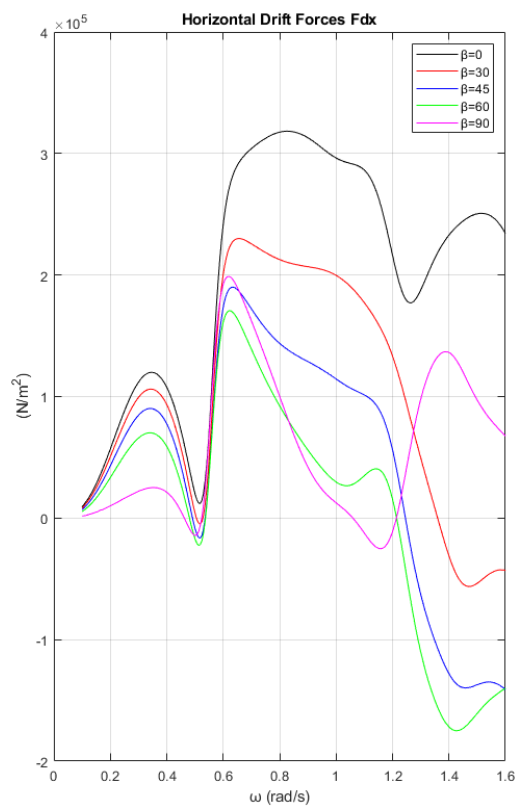
Εικόνα 288: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 289: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 290: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 291: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Για την αναπαράσταση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας θα πρέπει να βρούμε ως προς ποια συχνότητα και ως προς ποιον κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στον Πίνακα 76 φαίνονται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

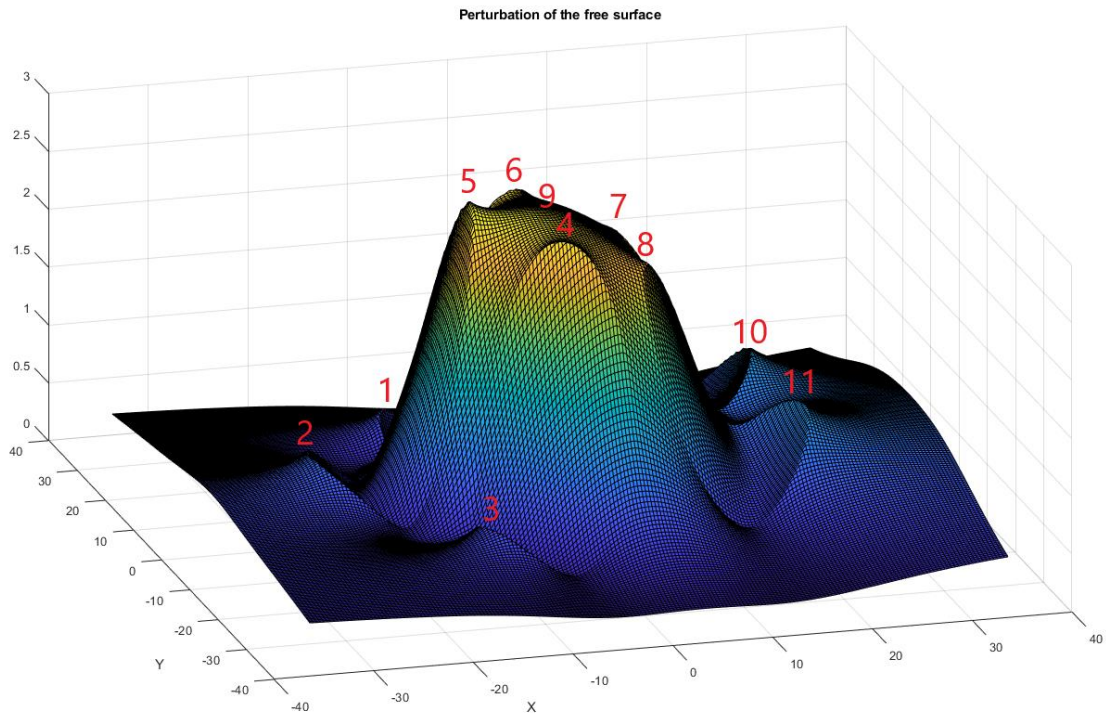
Πίνακας 76: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.56$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.56$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.56$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.56$	Κύλινδρος 5	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.56$	Κύλινδρος 5	F_y	ΝΑΙ

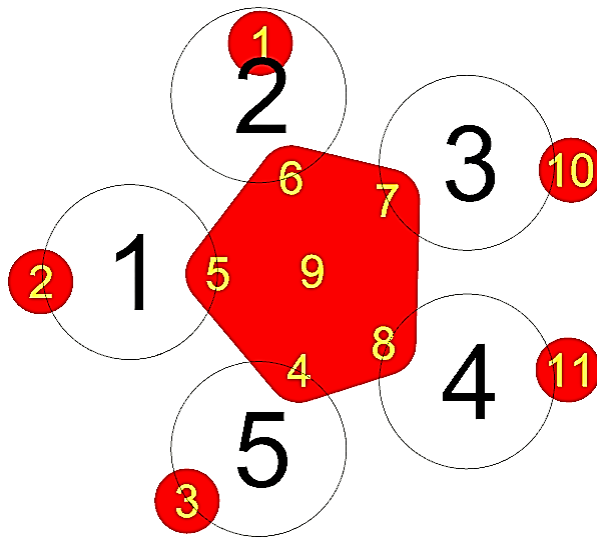
Στην Εικόνα 292 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 77 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 293 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 77: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.44 m
2	0.78 m
3	0.56 m
4	2.70 m
5	2.86 m
6	2.70 m
7	2.39 m
8	2.39 m
9	2.74 m
10	1.13 m
11	1.13 m



Εικόνα 292: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



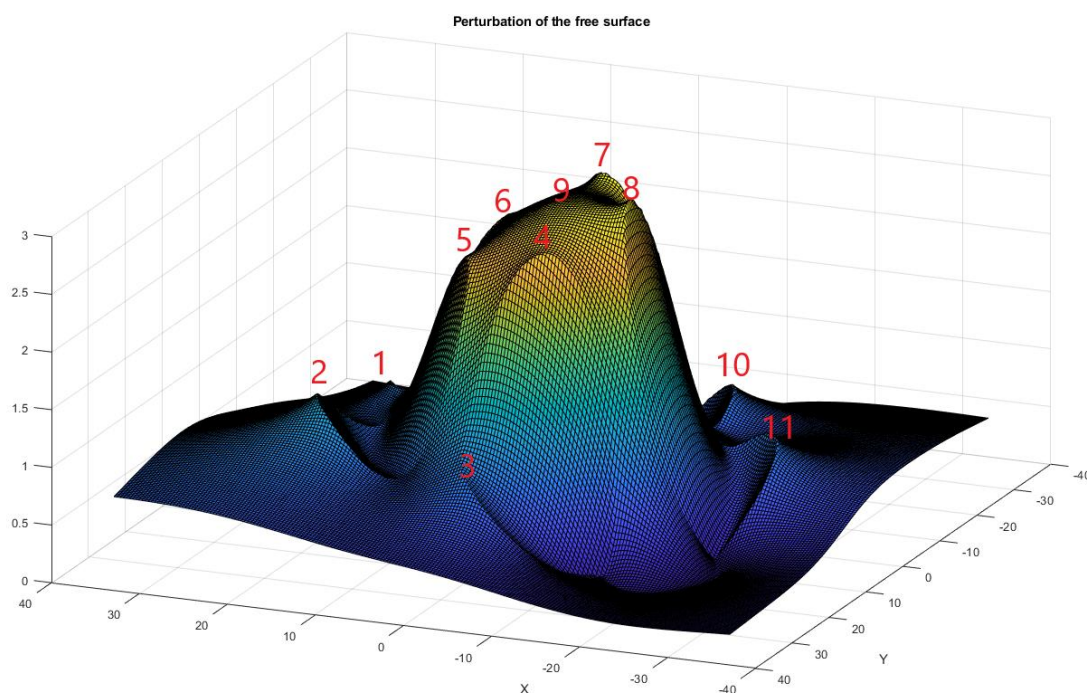
Εικόνα 293: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 294 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 78 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

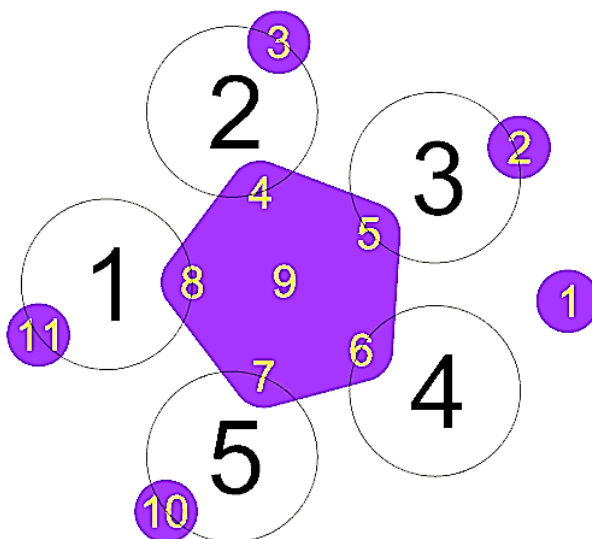
Εικόνα 295 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 78: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.71 m
2	1.18 m
3	0.75 m
4	2.55 m
5	2.35 m
6	2.48 m
7	2.86 m
8	2.89 m
9	2.80 m
10	0.84 m
11	0.87 m



Εικόνα 294: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

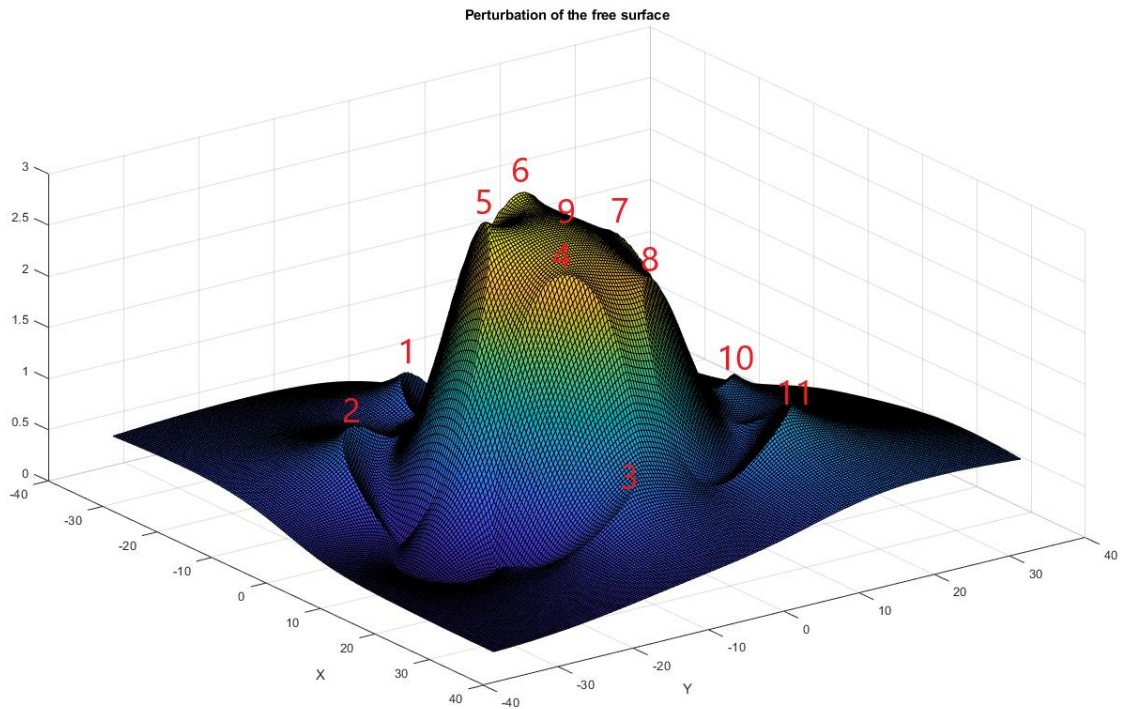


Εικόνα 295: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

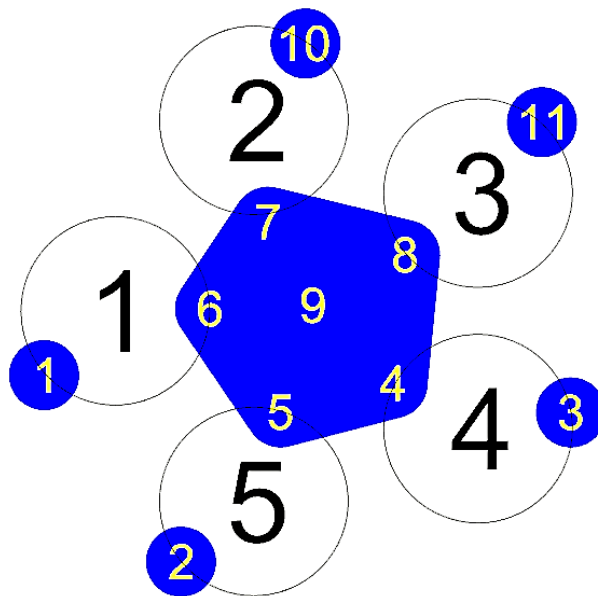
Στην Εικόνα 296 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 79 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 297 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 79: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.84 m
2	0.86 m
3	0.68 m
4	2.56 m
5	2.87 m
6	2.87 m
7	2.51 m
8	2.37 m
9	2.74 m
10	1.20 m
11	0.68 m



Εικόνα 296: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί την συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



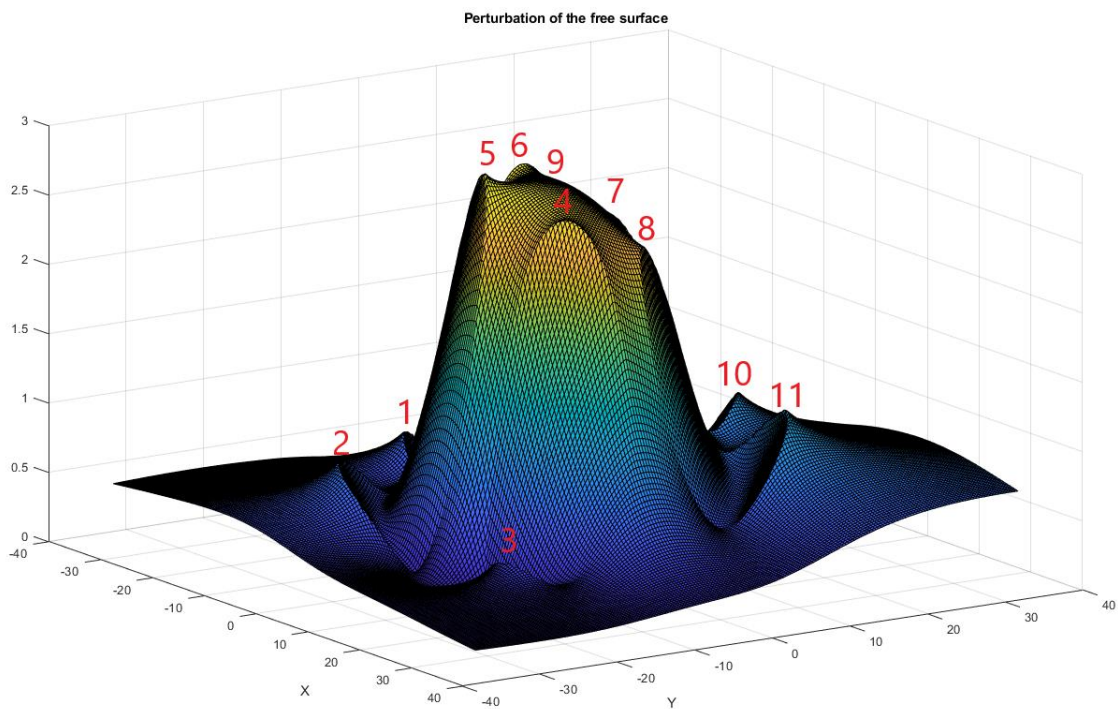
Εικόνα 297: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 298 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 80 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

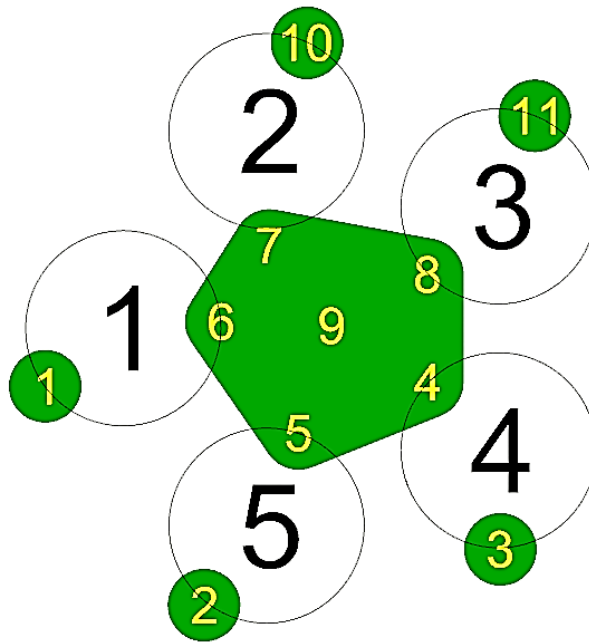
Εικόνα 299 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 80: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.71 m
2	0.80 m
3	0.36 m
4	2.62 m
5	2.87 m
6	2.78 m
7	2.42 m
8	2.37 m
9	2.76 m
10	1.02 m
11	1.18 m



Εικόνα 298: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

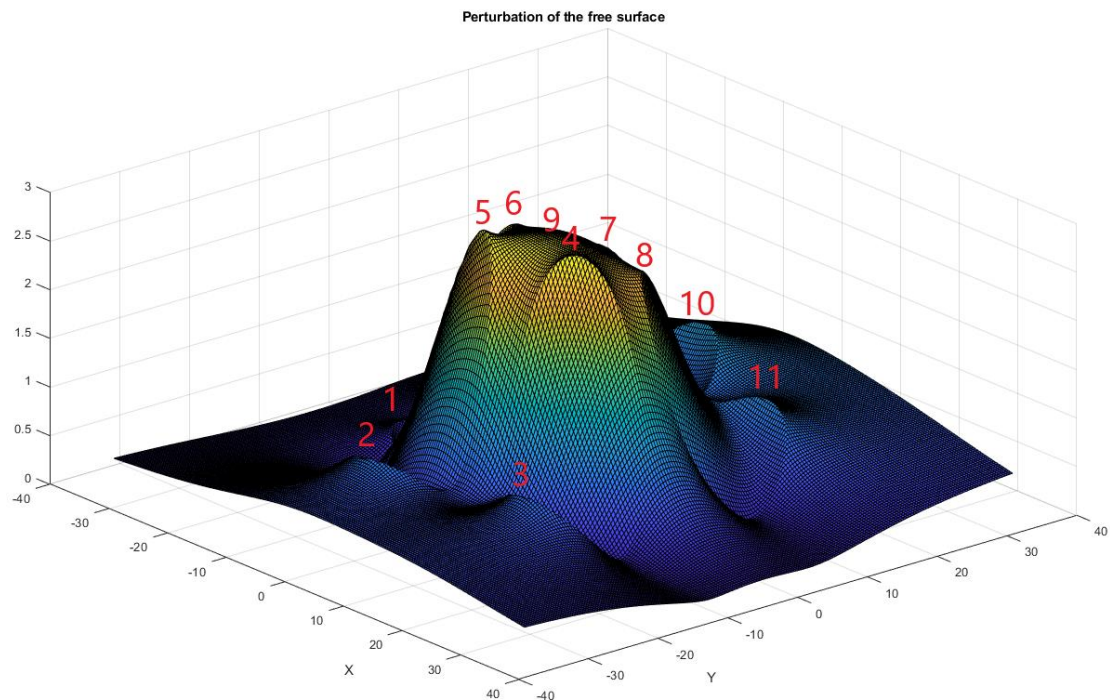


Εικόνα 299: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

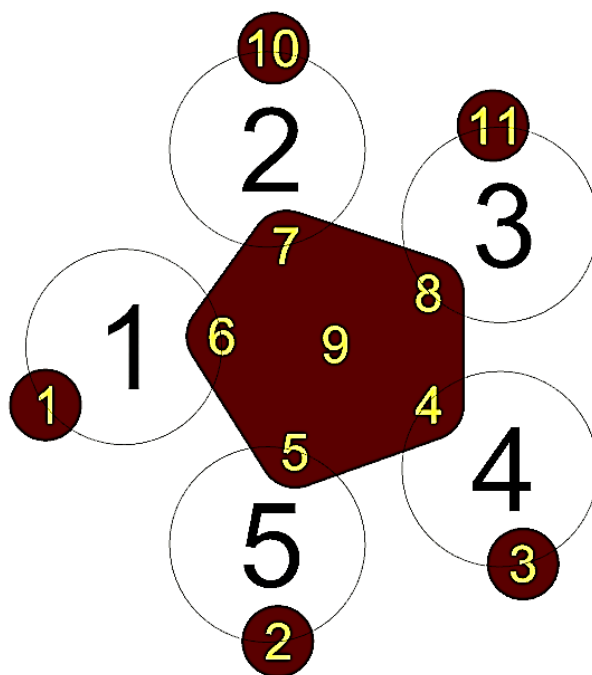
Στην Εικόνα 300 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 81 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 301 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 81: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.28 m
2	0.82 m
3	0.78 m
4	2.78 m
5	2.86 m
6	2.59 m
7	2.36 m
8	2.44 m
9	2.77 m
10	1.18 m
11	0.98 m



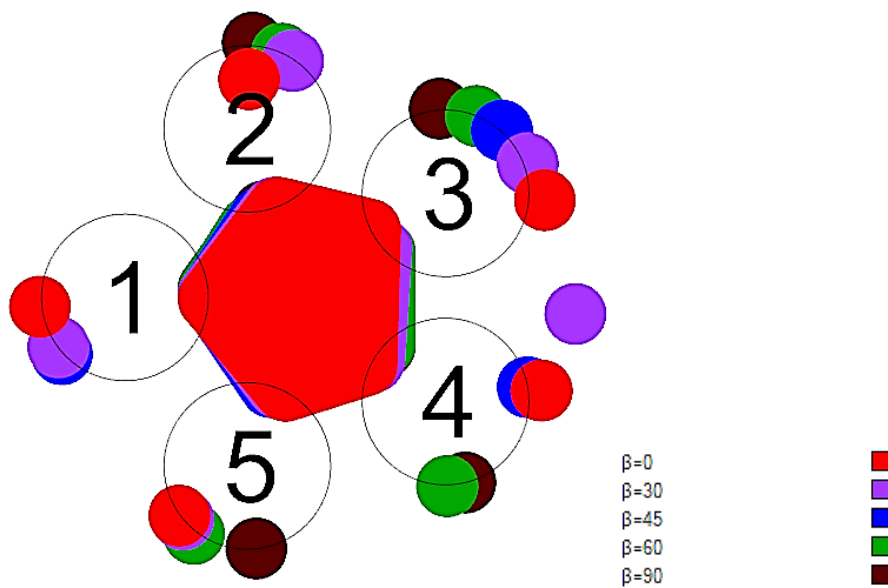
Εικόνα 300: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



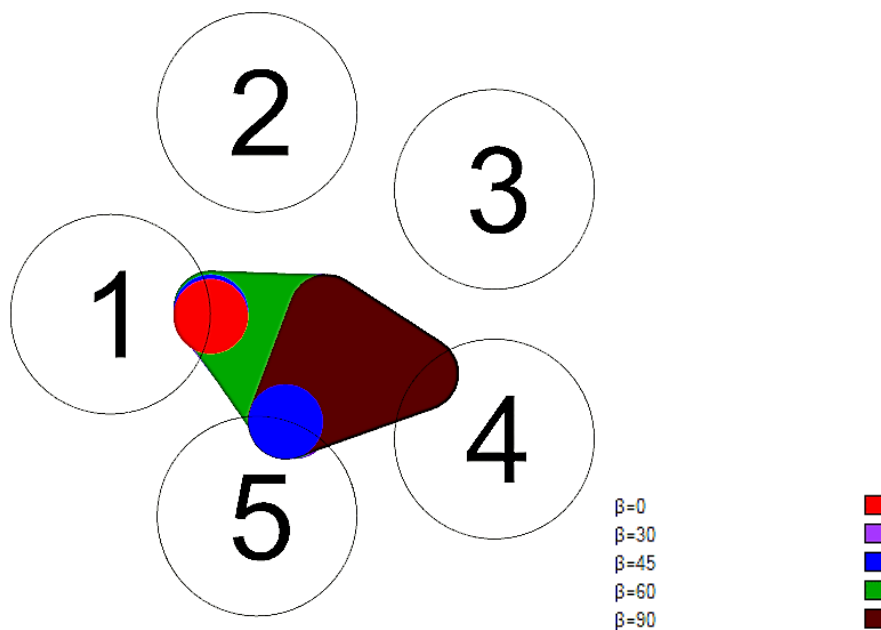
Εικόνα 301: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 302 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 303 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της

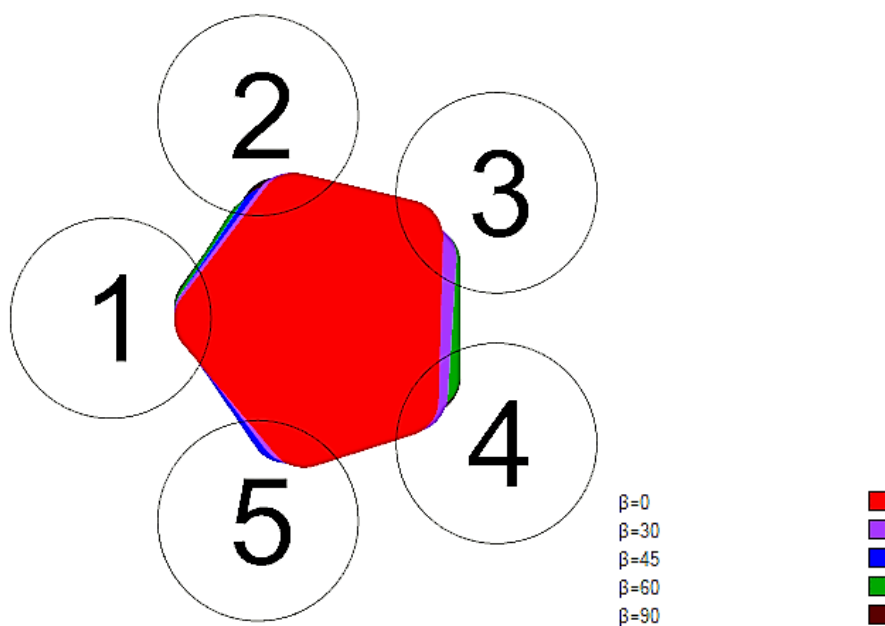
ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 303 παρατηρούμε πως στη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κύλινδρους 1 και 5. Όμως επειδή η Εικόνα 303, αποτελεί έναν οδηγό για τις θέσεις των μεγίστων κορυφών, τότε προκύπτει η Εικόνα 304, όπου φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 304 συμπεραίνουμε πως μπορούμε να εγκαταστήσουμε πέντε συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Ο κυματισμός που παγιδεύεται εντός της διάταξης είναι ένα φαινόμενο, το οποίο ονομάζεται «moosepool» και εμφανίζεται διότι οι κύλινδροι βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα της επιρροής που έχει η απόσταση των σωμάτων στο φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών.



Εικόνα 302: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 303: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

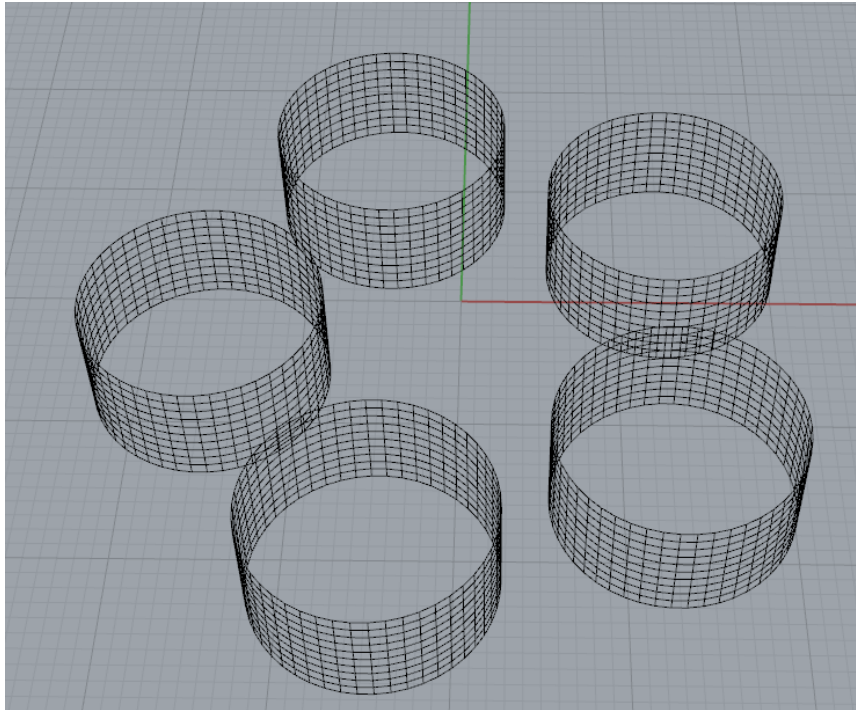


Εικόνα 304: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.5.2 Οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα

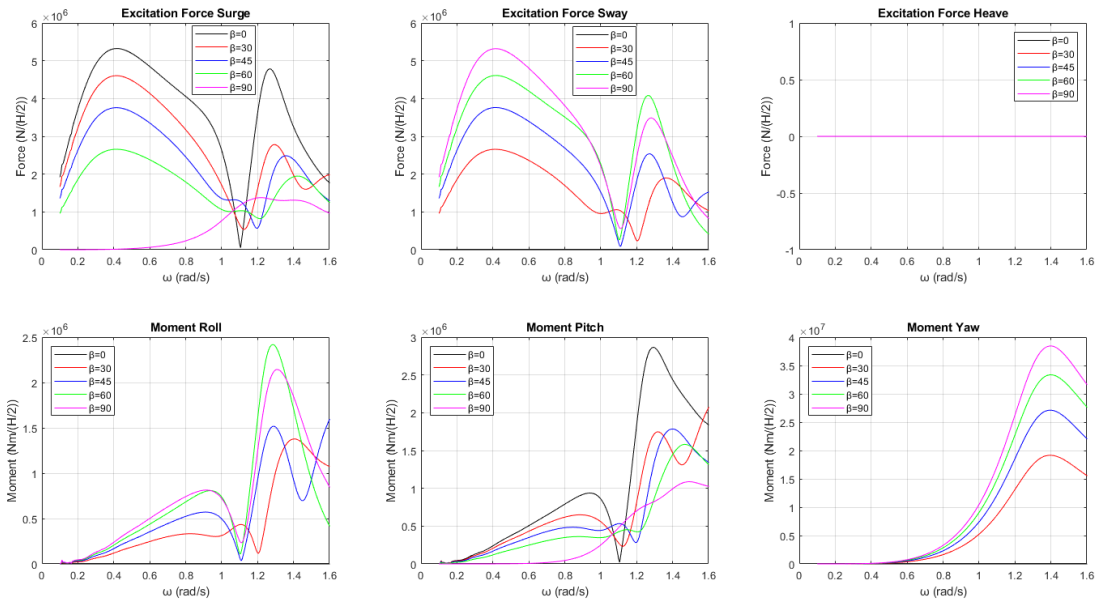
Έχοντας μελετήσει την παραπάνω διάταξη θεωρώντας τους κυλίνδρους ανεξάρτητα σώματα, θα υποθέσουμε στην ενότητα αυτή πως είναι ένα σώμα (βλ. παράγραφο 3.2.2).

Η διακριτοποίηση των κυλίνδρων με 500 στοιχεία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως είδαμε προηγουμένως. Στην Εικόνα 305 φαίνεται η διακριτοποίηση της διάταξης των πέντε κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα και αποτελείται από 2750 σημεία και 2500 στοιχεία.



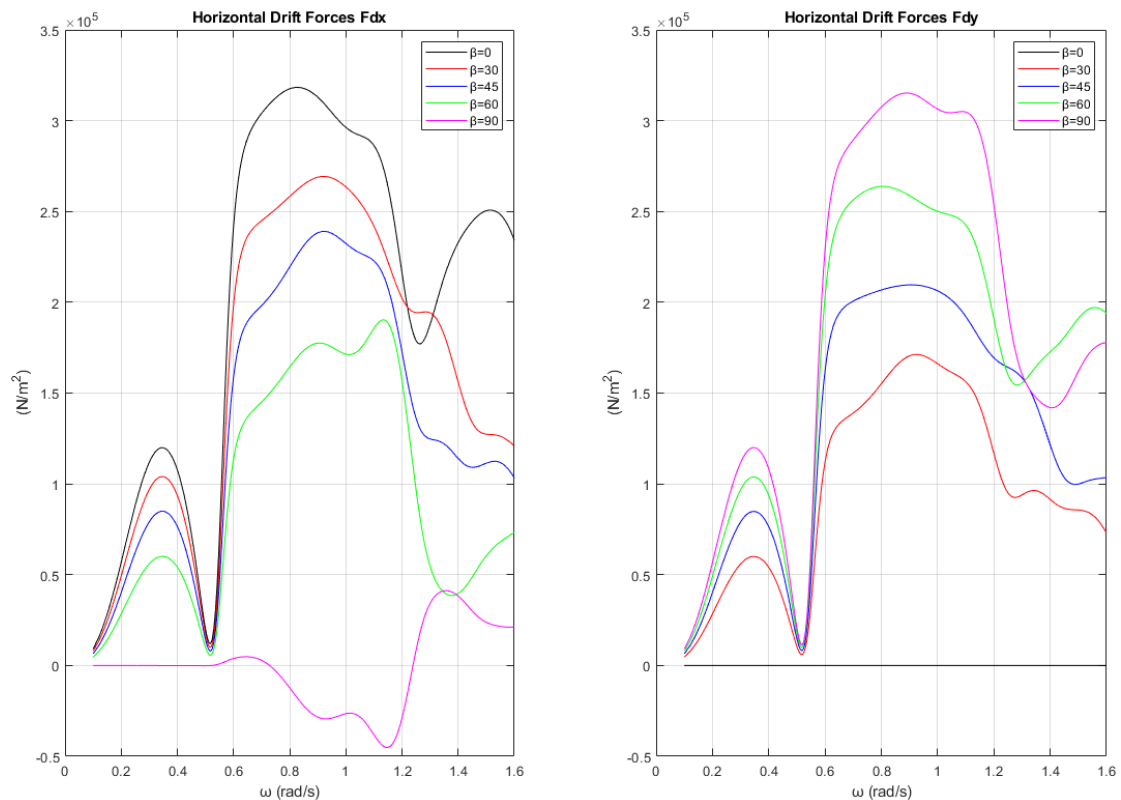
Εικόνα 305: Παράδειγμα διακριτοποίησης της διάταξης των πέντε κατακόρυφων κυλίνδρων σαν ένα σώμα που αποτελείται από 2750 σημεία και 2500 στοιχεία

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους πέντε κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα για τις υπό μελέτη γωνίες πρόπτωσης κυματισμού φαίνονται στην Εικόνα 306.



Εικόνα 306: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη των πέντε κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα

Οι συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη φαίνονται στην Εικόνα 307.



Εικόνα 307: Συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη από τον κυματισμό

Επειδή το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών δεν εμφανίζεται στη διάταξη ως ολότητα, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού. Στον Πίνακα 82 φαίνονται οι συχνότητες αυτές.

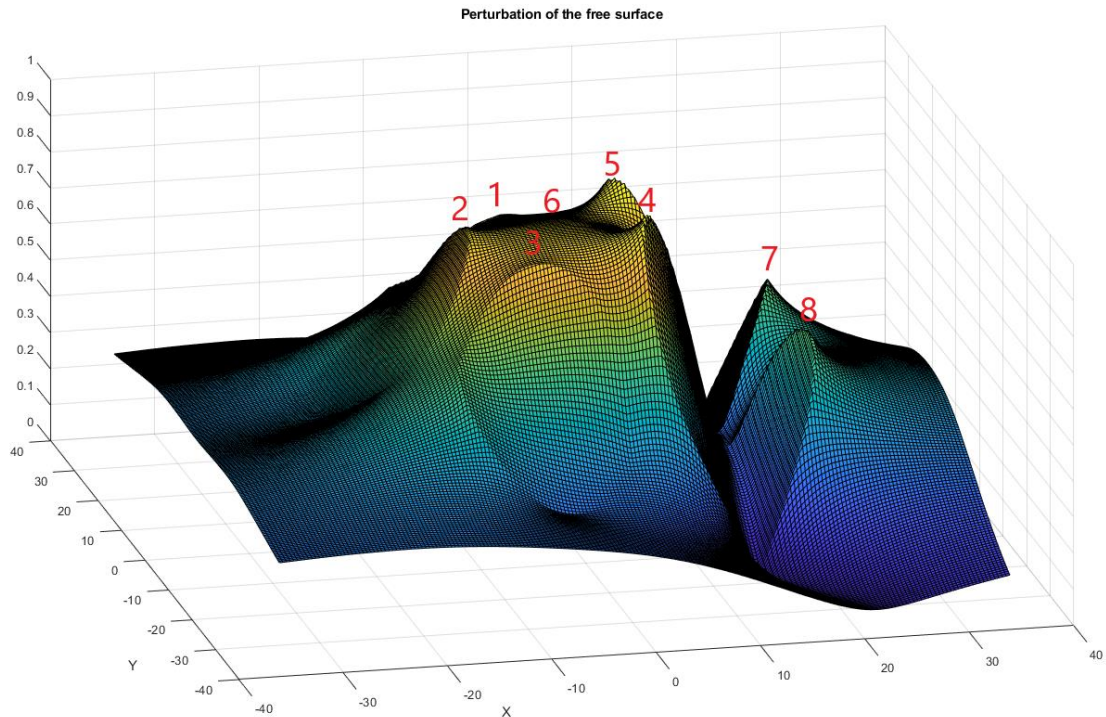
Πίνακας 82: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.42$	$F_{x\zeta}$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.42$	F_x
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.42$	F_x/F_y
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.42$	F_y
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.42$	F_y

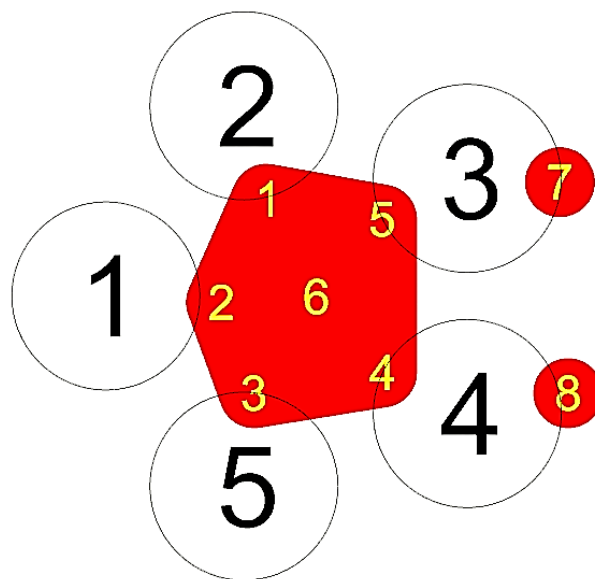
Στην Εικόνα 308 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Στον Πίνακα 83 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 309 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 83: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.82 m
2	0.85 m
3	0.82 m
4	0.92 m
5	0.92 m
6	0.86 m
7	0.57 m
8	0.57 m



Εικόνα 308: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

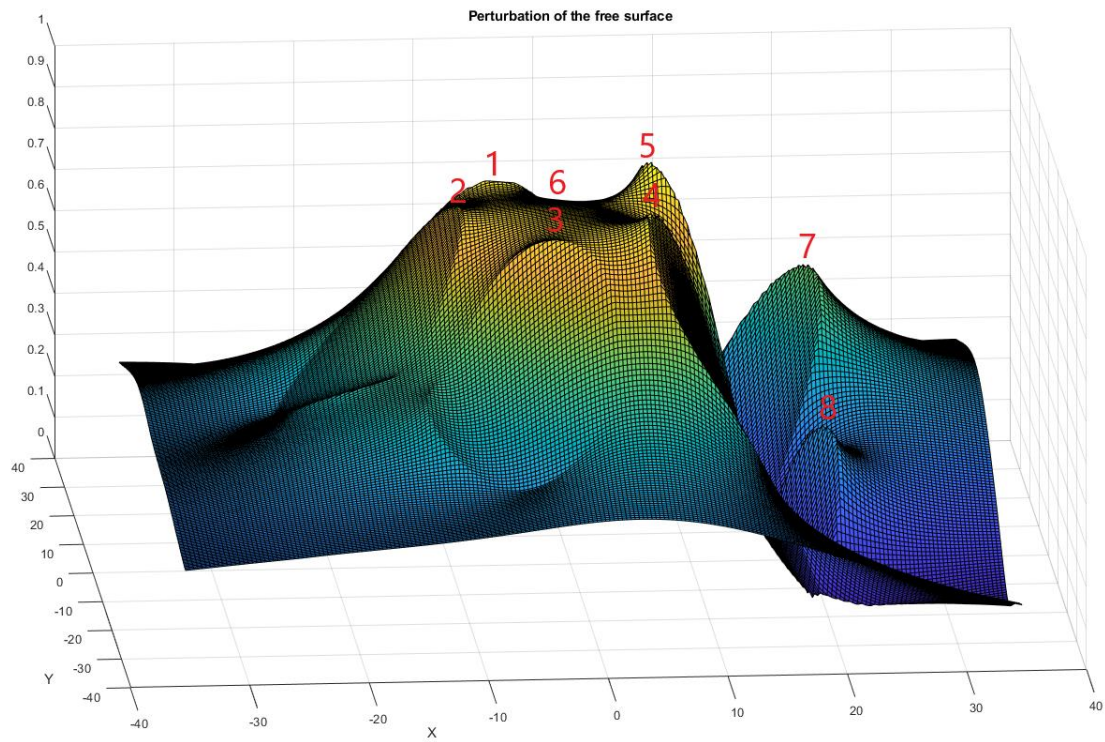


Εικόνα 309: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

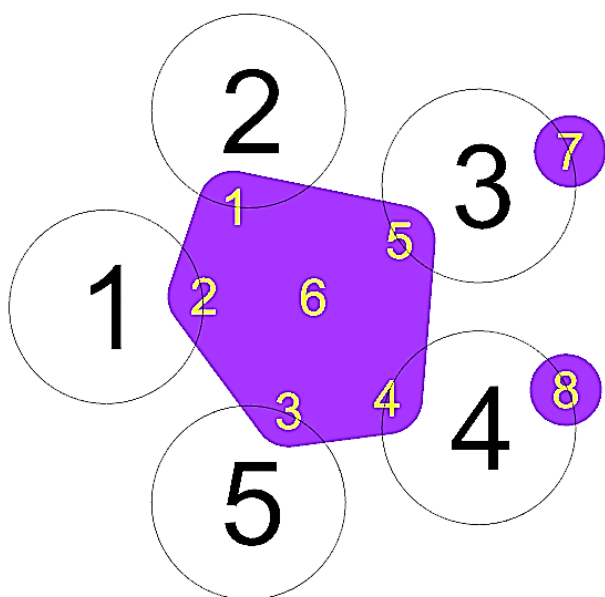
Στην Εικόνα 310 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 84 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 311 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 84: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.87 m
2	0.86 m
3	0.85 m
4	0.90 m
5	0.93 m
6	0.86 m
7	0.62 m
8	0.35 m



Εικόνα 310: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

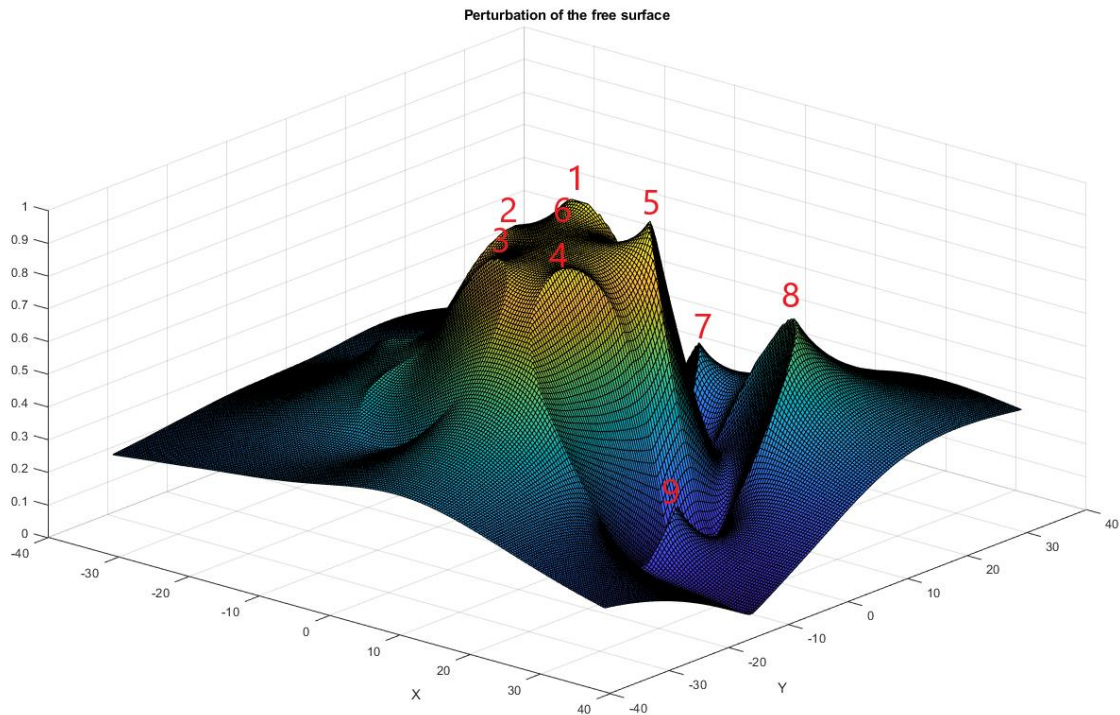


Εικόνα 311: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

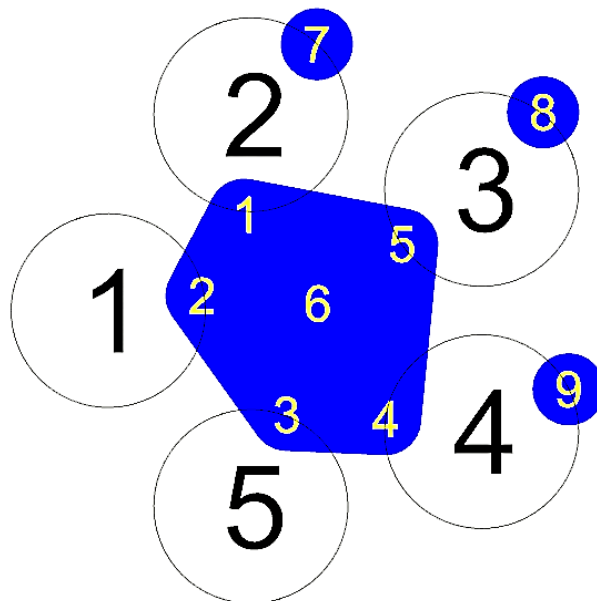
Στην Εικόνα 312 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ στη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Στον Πίνακα 85 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 313 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 85: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.89 m
2	0.83 m
3	0.86 m
4	0.87 m
5	0.93 m
6	0.86 m
7	0.40 m
8	0.61 m
8	0.22 m



Εικόνα 312: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



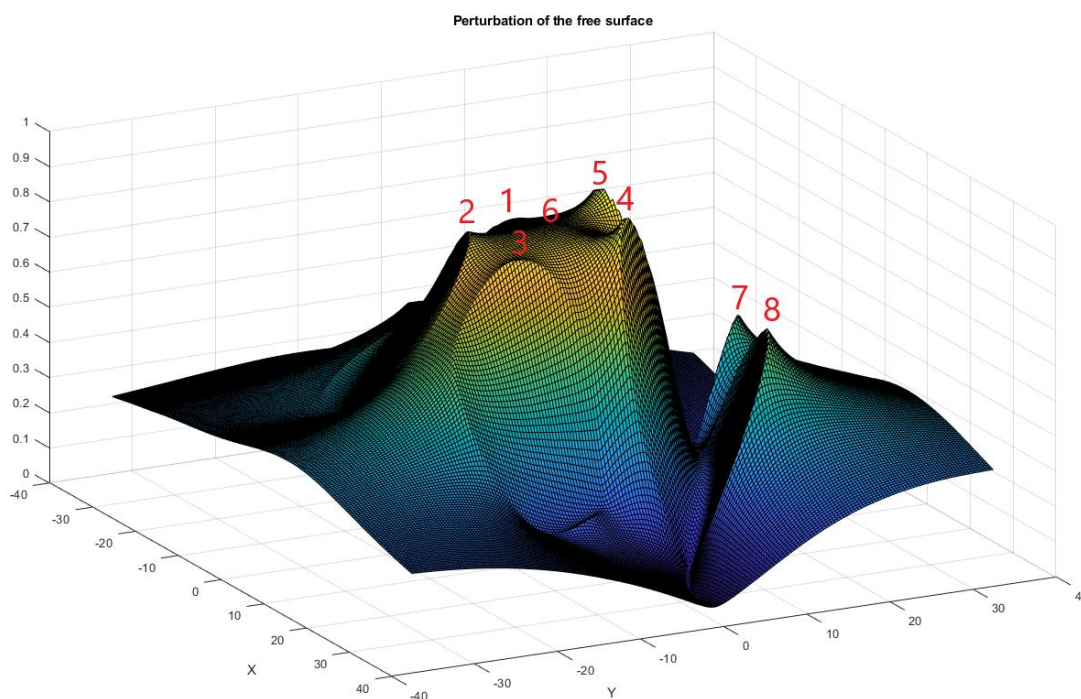
Εικόνα 313: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 314 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ στη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 86 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 315 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών

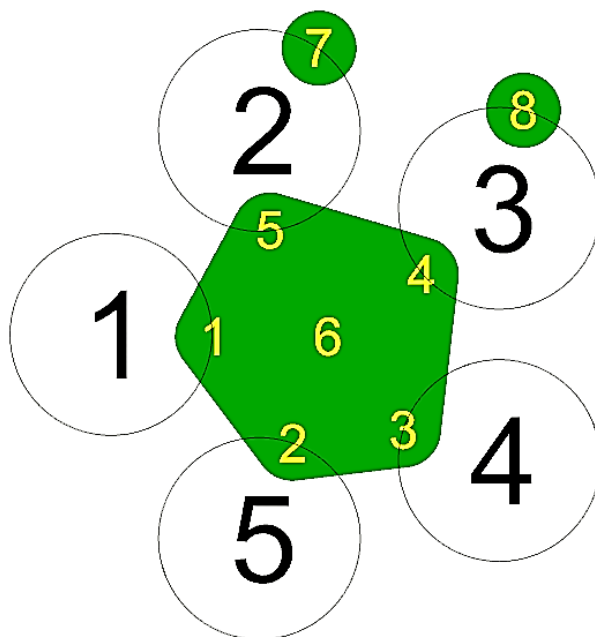
που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 86: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.82 m
2	0.86 m
3	0.83 m
4	0.92 m
5	0.91 m
6	0.86 m
7	0.53 m
8	0.62 m



Εικόνα 314: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

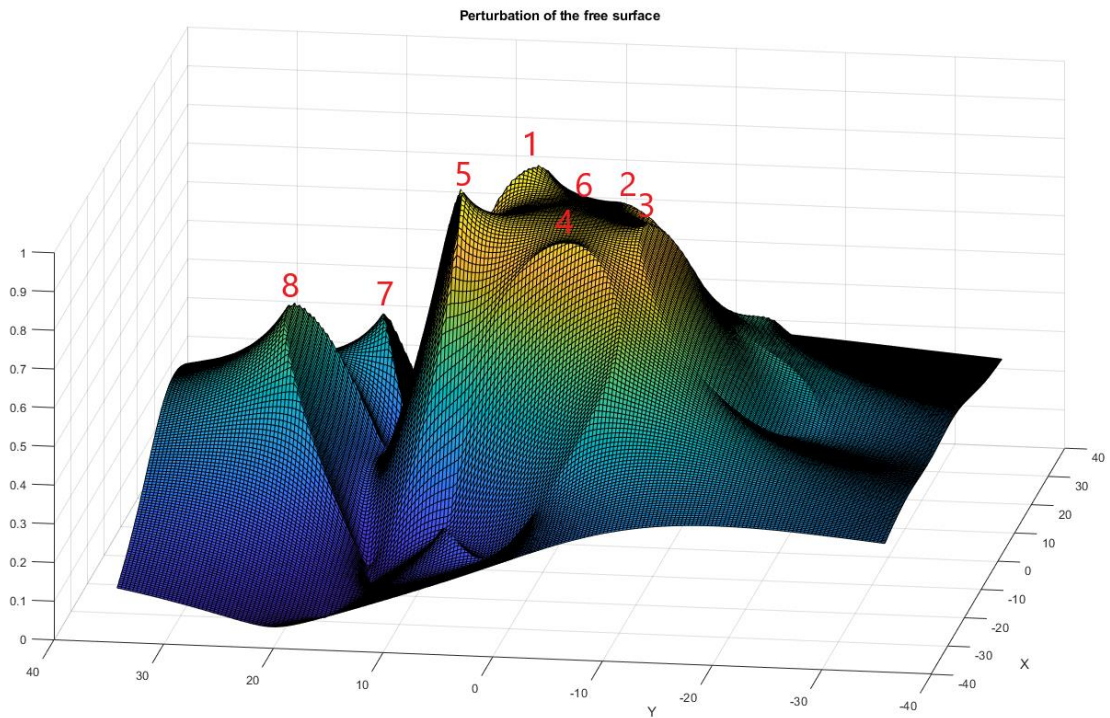


Εικόνα 315: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

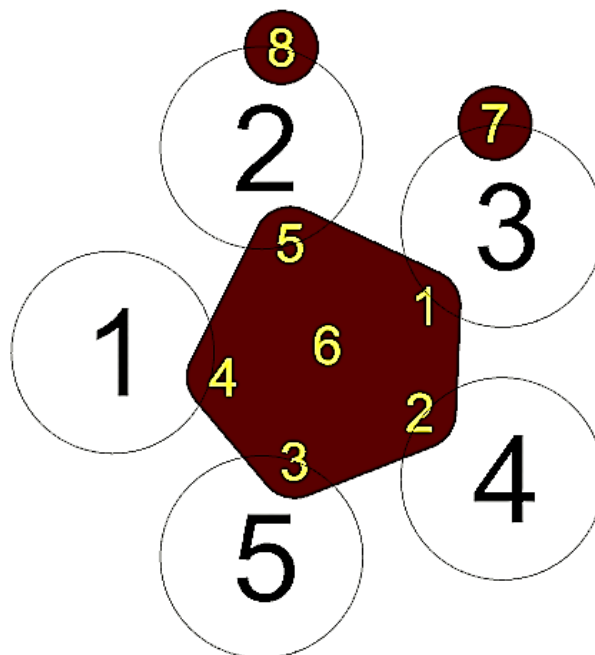
Στην Εικόνα 316 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ στη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Στον Πίνακα 87 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 317 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 87: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των μεγαλύτερων κορυφών που παρατηρούνται για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.89 m
2	0.83 m
3	0.86 m
4	0.84 m
5	0.92 m
6	0.86 m
7	0.48 m
8	0.62 m



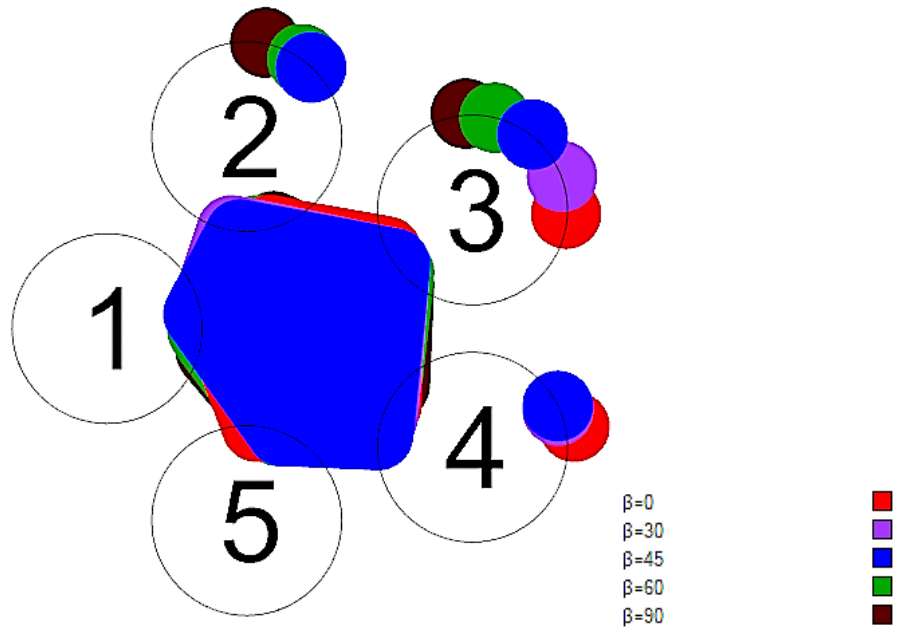
Εικόνα 316: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



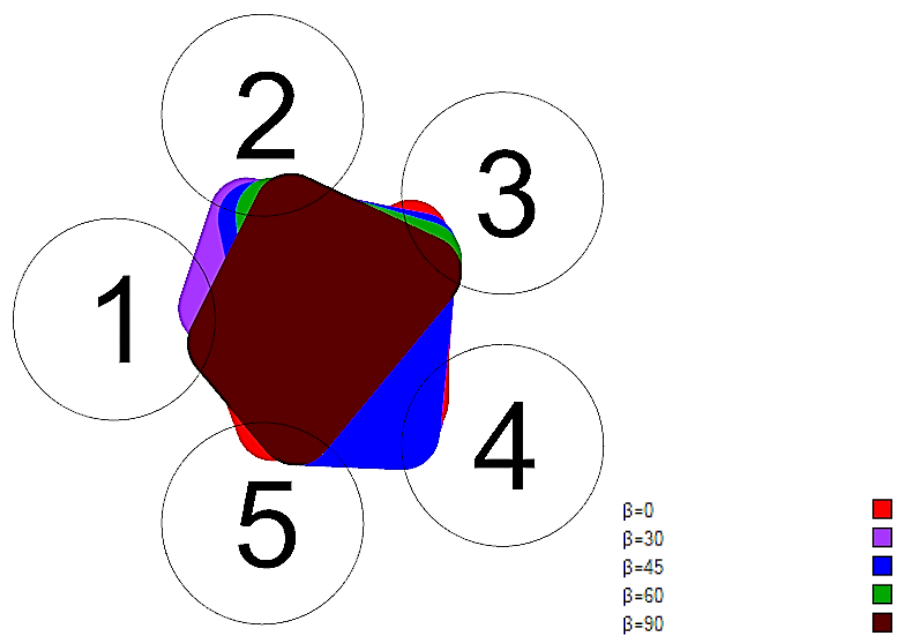
Εικόνα 317: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 318 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην Εικόνα 319 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της

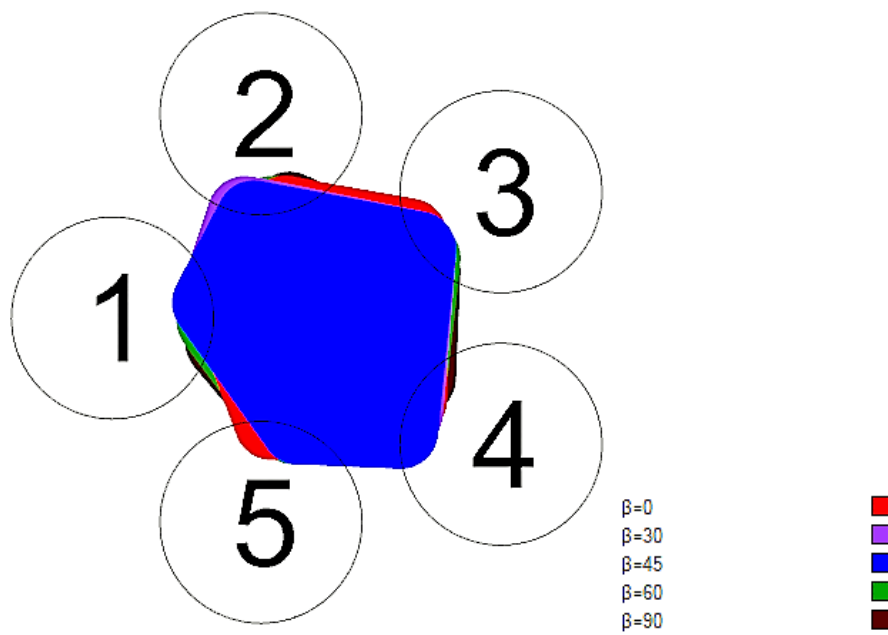
ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 319 παρατηρούμε πως στη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν πέντε συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι. Στην Εικόνα 320 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Παρόλο που συνεχίζει να εμφανίζεται το «ποσοστό», οι τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι μικρές.



Εικόνα 318: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

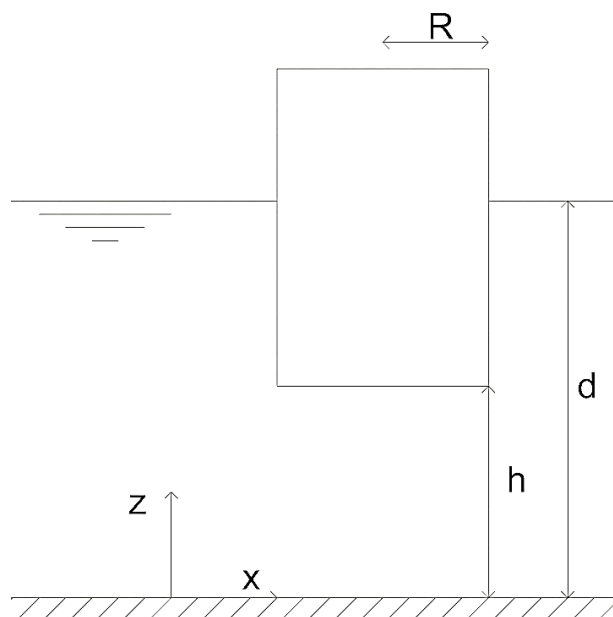


Εικόνα 319: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



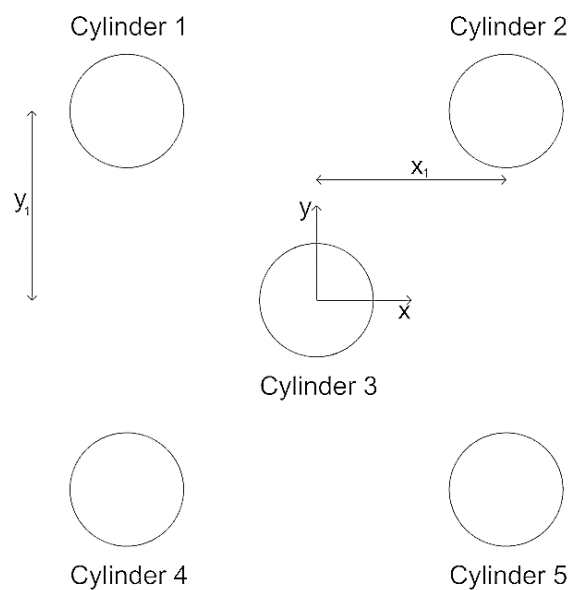
Εικόνα 320: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.6 Πέντε κατακόρυφοι πλωτοί κύλινδροι



Εικόνα 321: Σκαρίφημα τυχαίου κυλίνδρου της διάταξης

Θεωρούμε πέντε κατακόρυφους πλωτούς κυλίνδρους ακτίνας R σε βάθος περιοχής εγκατάστασης d , με τον πυθμένα τους να απέχει h από τον πυθμένα της θάλασσας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 321 ενδεικτικά για έναν πλωτό κύλινδρο. Η διάταξη αυτή βρίσκεται στη δημοσίευση των Mazarakos και Mantrakos (2020), την οποία μελετάμε στην παράγραφο κεφάλαιο 3.6.3.



Εικόνα 322: Κάτοψη διάταξης πέντε κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων

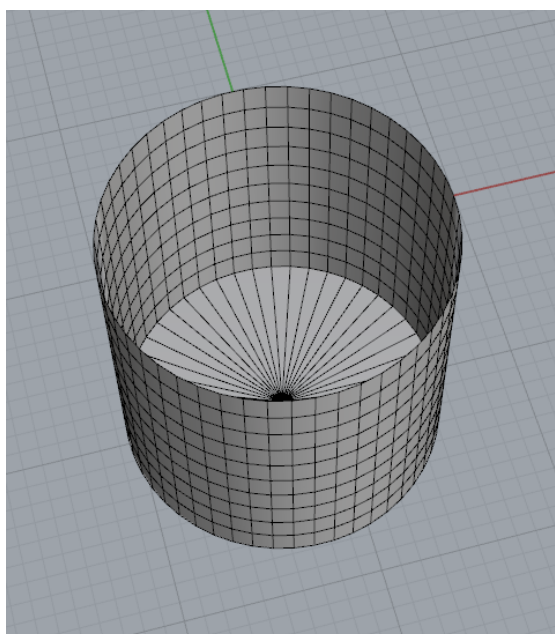
Οι τέσσερις από τους πέντε κυλίνδρους βρίσκονται σε διάταξη τετραγώνου, με τον πέμπτο κύλινδρο να βρίσκεται στο κέντρο της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 322. Από την Εικόνα 322 έχουμε ότι οι συντεταγμένες των κυλίνδρων, ως προς το επίπεδο xy είναι οι ακόλουθες:

- Κύλινδρος 1 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 2 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 3 $(0,0)$
- Κύλινδρος 4 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 5 (x_1, y_1)

Θεωρούμε ότι οι κύλινδροι έχουν ύψος $38.5m$, ακτίνα $R = 5m$, ο πυθμένας τους απέχει $h = 180m$ από τον πυθμένα της θάλασσας και βρίσκονται σε βάθος περιοχής εγκατάστασης $d = 200m$. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρούμε ότι όλοι οι κύλινδροι μπορούν να ταλαντωθούν ελεύθερα ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Οι συντεταγμένες των κυλίνδρων είναι οι ακόλουθες:

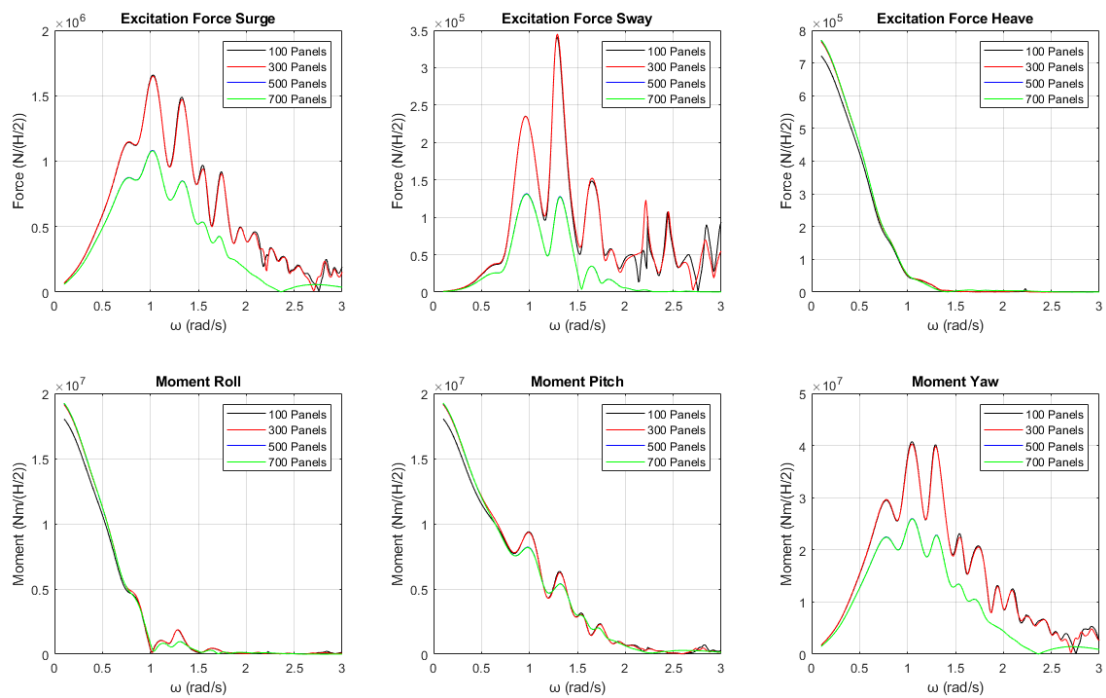
- Κύλινδρος 1 $(-25,25)$
- Κύλινδρος 2 $(25,25)$
- Κύλινδρος 3 $(0,0)$
- Κύλινδρος 4 $(-25,-25)$
- Κύλινδρος 5 $(25,-25)$

Η διακριτοποίηση που θα κάνουμε θα αφορά μόνο το βυθισμένο τμήμα του κυλίνδρου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 323.

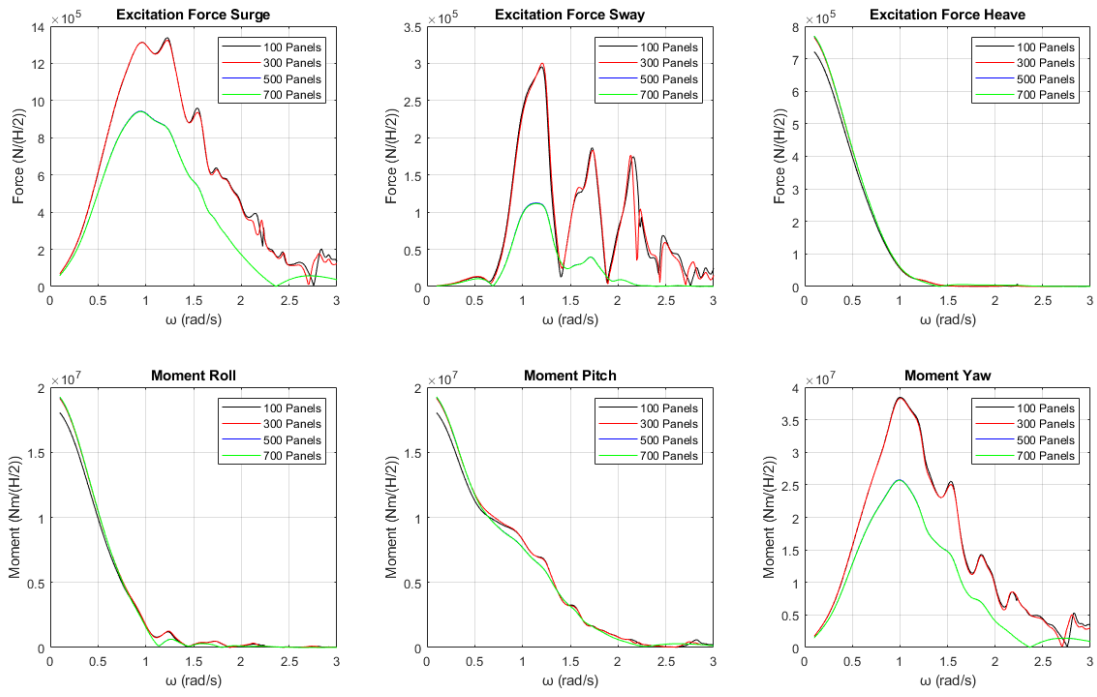


Εικόνα 323: Διακριτοποίηση βυθισμένου τμήματος κυλίνδρου που αποτελείται από 551 σημεία και 500 στοιχεία

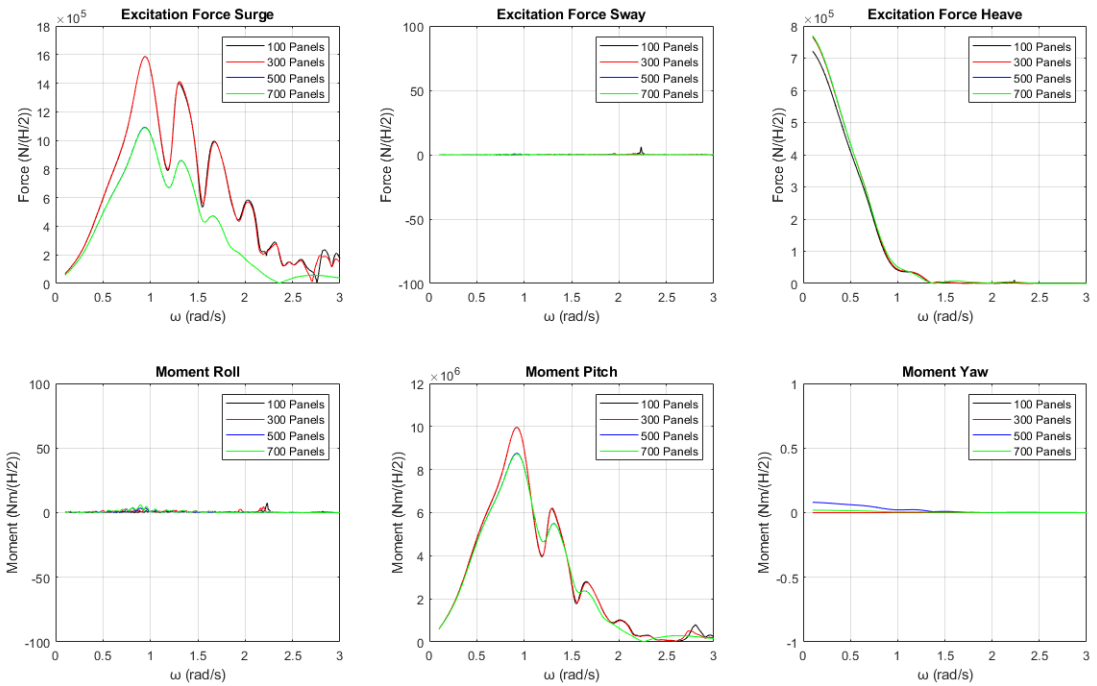
Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τη διάταξη των πέντε κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$. Στις Εικόνες 324-328 φαίνονται οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για όλους τους αριθμούς των στοιχείων.



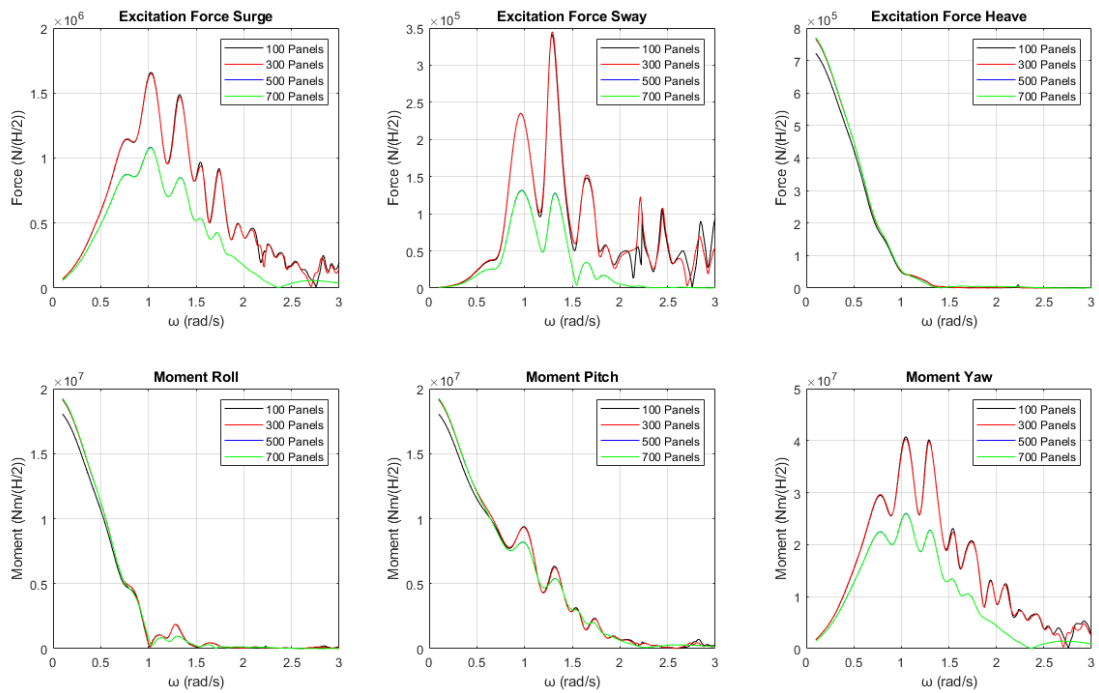
Εικόνα 324: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για διαφορετικό πλήθος στοιχείων



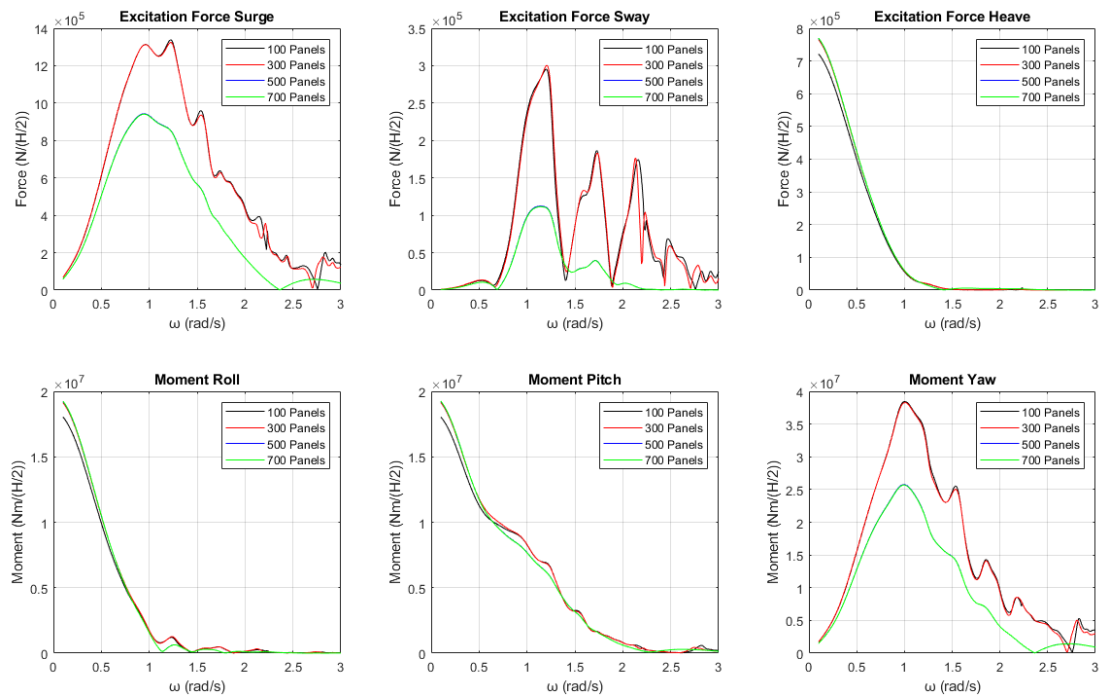
Εικόνα 325: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για διαφορετικό πλήθος στοιχείων



Εικόνα 326: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για διαφορετικό πλήθος στοιχείων



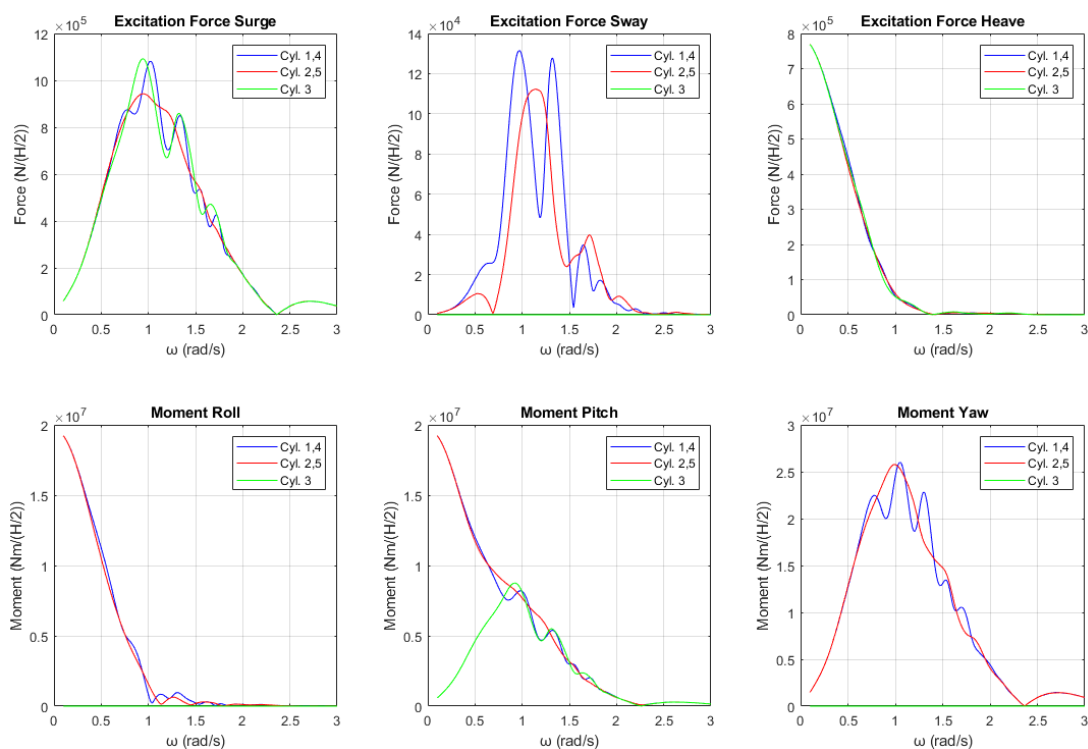
Εικόνα 327: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για διαφορετικό πλήθος στοιχείων



Εικόνα 328: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για διαφορετικό πλήθος στοιχείων

Από τις Εικόνες 324-328 παρατηρούμε πως το πρόγραμμα BEM NEMOH δίνει πολύ καλά αποτελέσματα όταν η διακριτοποίηση των κυλίνδρων αποτελείται από 500 στοιχεία. Αυτό είναι εμφανές, όταν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των 500 στοιχείων

με αυτά των 700, όπου παρατηρούμε πως συγκλίνουν μεταξύ τους. Επομένως, θα προχωρήσουμε στη μελέτη των πέντε κατακόρυφων κυλίνδρων με τη διακριτοποίηση των 500 στοιχείων για κάθε κύλινδρο. Στην Εικόνα 329 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης



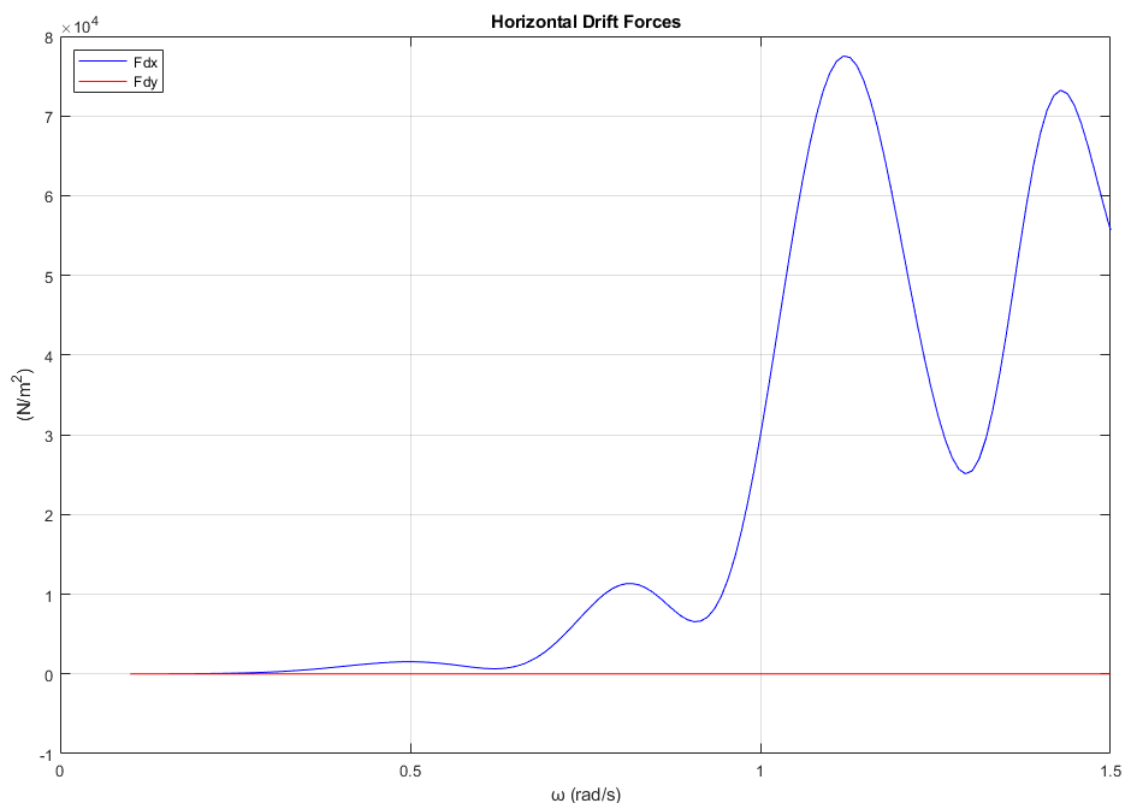
Εικόνα 329: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης

Από την Εικόνα 329 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης. Για τους κυλίνδρους 1 και 4 το φαινόμενο εμφανίζεται στις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Για τον κύλινδρο 3 της διάταξης αυτό εντοπίζεται μόνο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x , ενώ για τους κυλίνδρους 2 και 5 μόνο ως προς τις οριζόντιες F_y . Για τους κυλίνδρους 1 και 4, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης, η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.02$ r/s και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.33$ r/s. Για τον κύλινδρο 3 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.94$ r/s και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.32$ r/s. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y , για τους κυλίνδρους 1 και 4 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.97$ r/s και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.32$ r/s. Για τους κυλίνδρους 2 και 5 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.14$ r/s και η συνθήκη Dirichlet στην $\omega \cong 1.71$ r/s. Παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται και ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x αλλά και ως προς τις δυνάμεις F_y , παρατηρούμε πως οι μέγιστες φορτίσεις ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τη συχνότητα που ικανοποιείται η συνθήκη Neumann. Θα χωρίσουμε τη μελέτη της διάταξης των πέντε κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θα θεωρήσουμε

πως οι κύλινδροι είναι ακίνητοι (diffraction problem), ενώ στο δεύτερο μέρος θα εκτελούν ελεύθερη ταλάντωση (radiation problem).

3.6.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη, όταν οι κύλινδροι είναι ακίνητοι, φαίνονται στην Εικόνα 330.



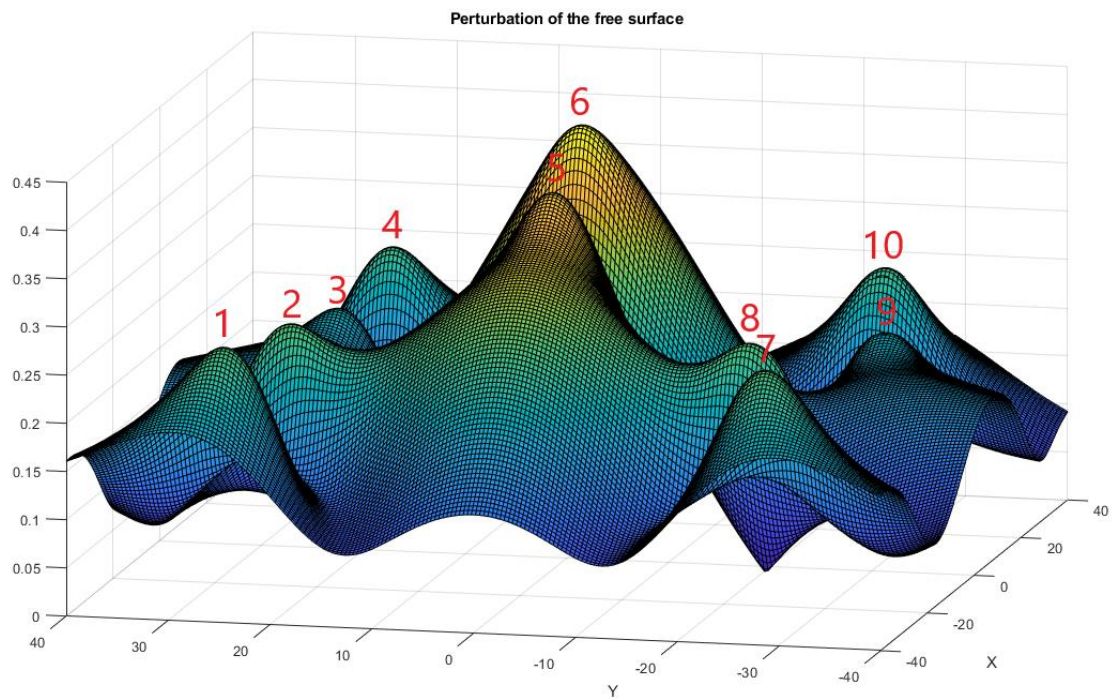
Εικόνα 330: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη

Στην Εικόνα 331 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 88 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 332 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

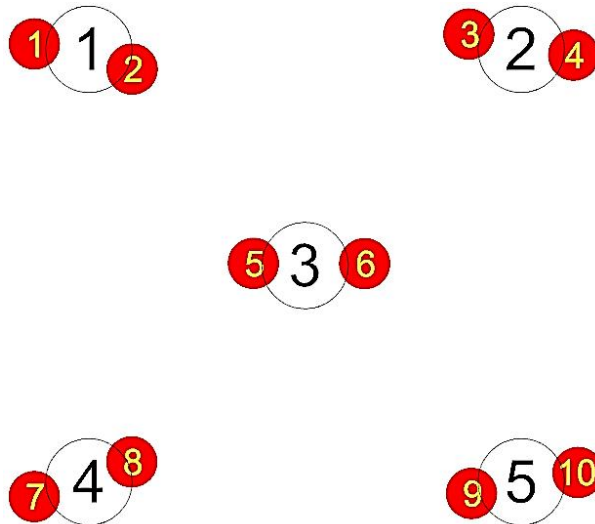
Πίνακας 88: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.27 m

2	0.27 m
3	0.21 m
4	0.25 m
5	0.39 m
6	0.44 m
7	0.27 m
8	0.27 m
9	0.21 m
10	0.25 m

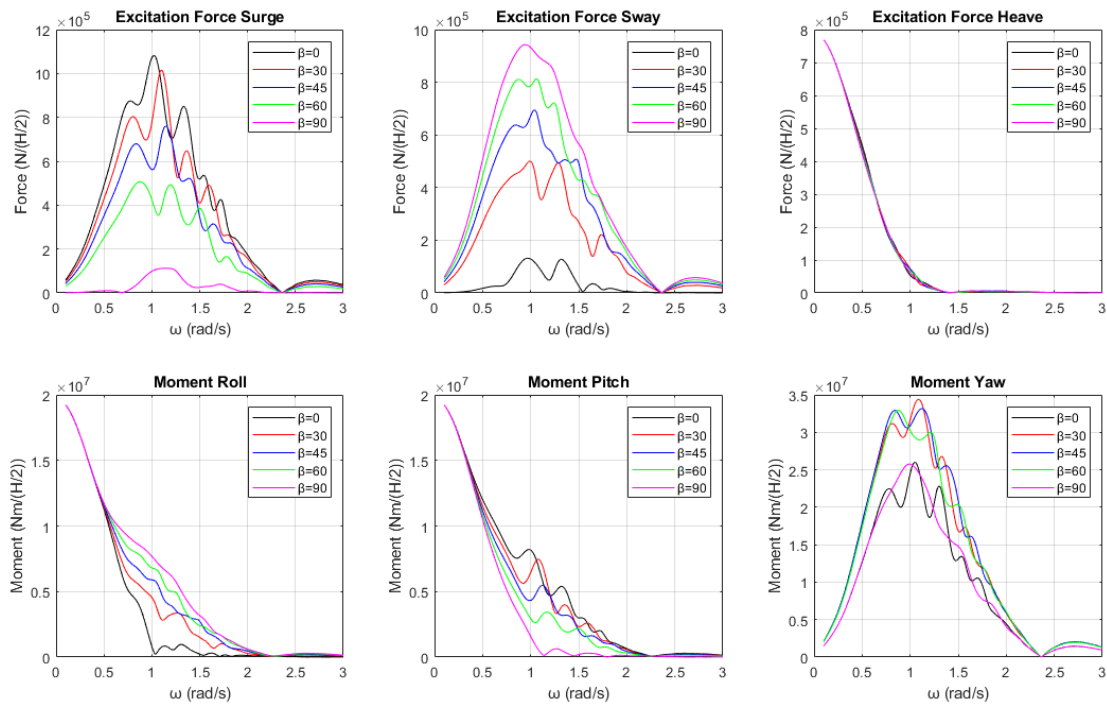


Εικόνα 331: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

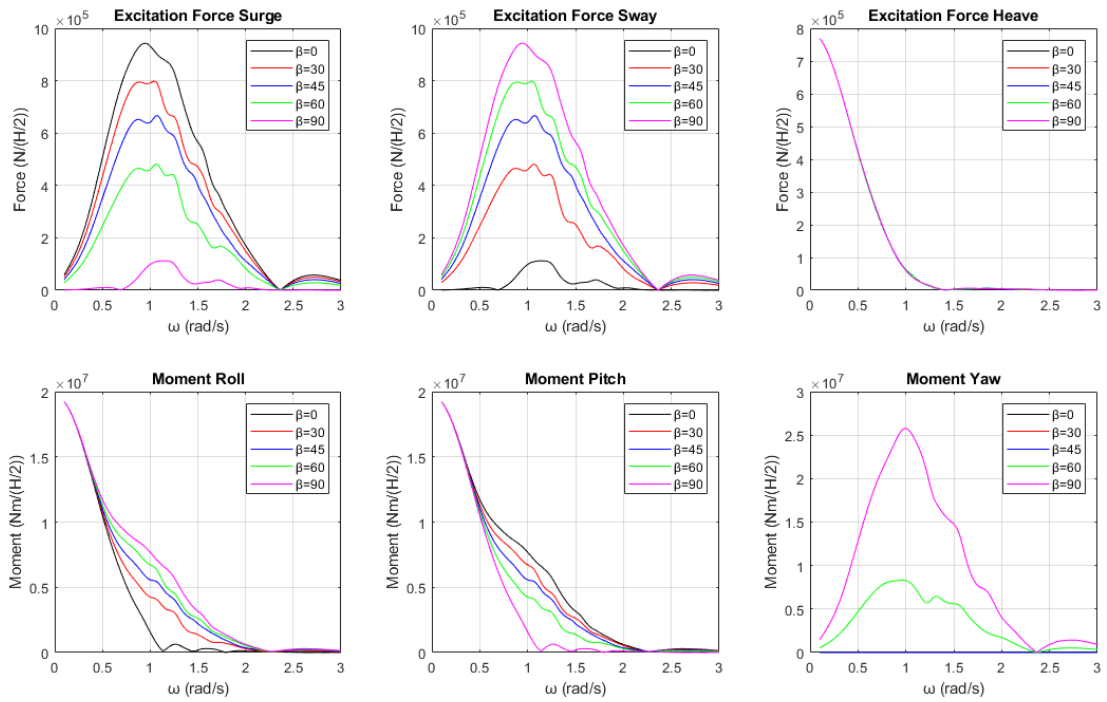


Εικόνα 332: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

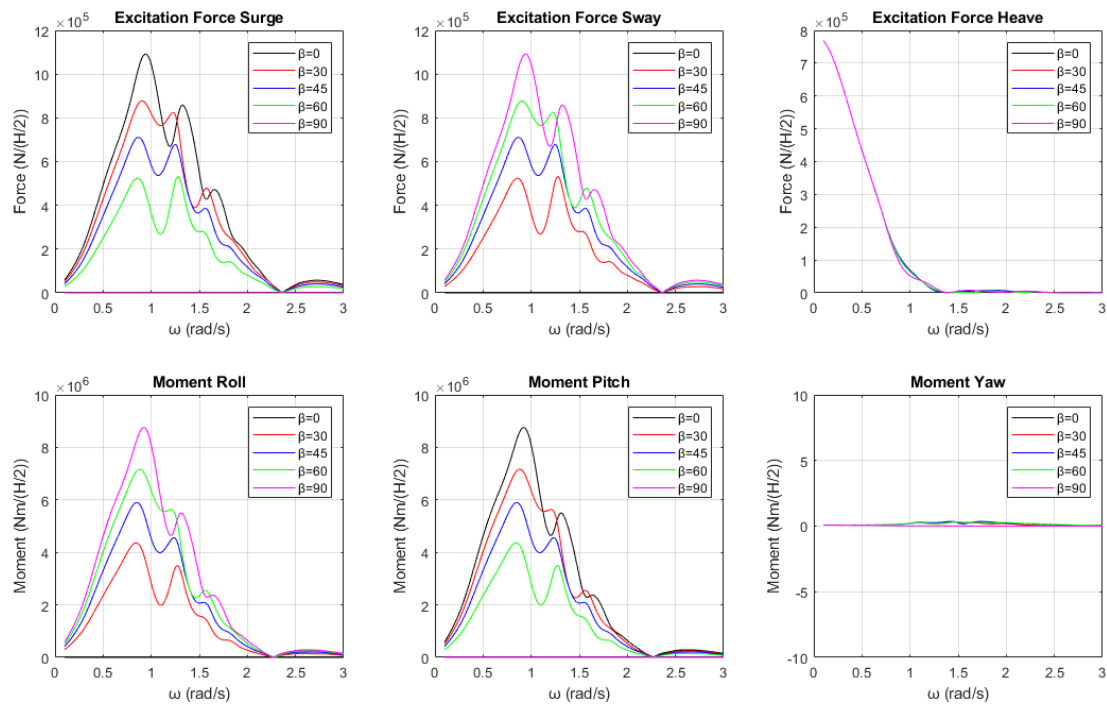
Προκειμένου να ελέγξουμε πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών όταν αλλάξει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, μελετάμε τη διάταξη για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 333-337 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



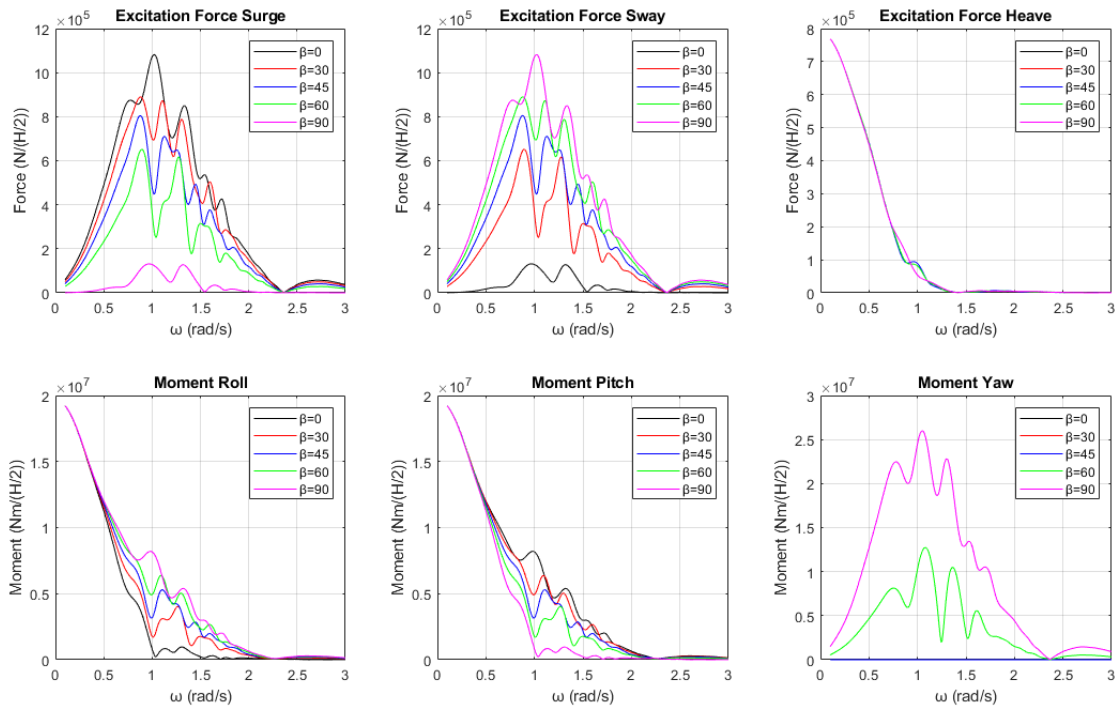
Εικόνα 333: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



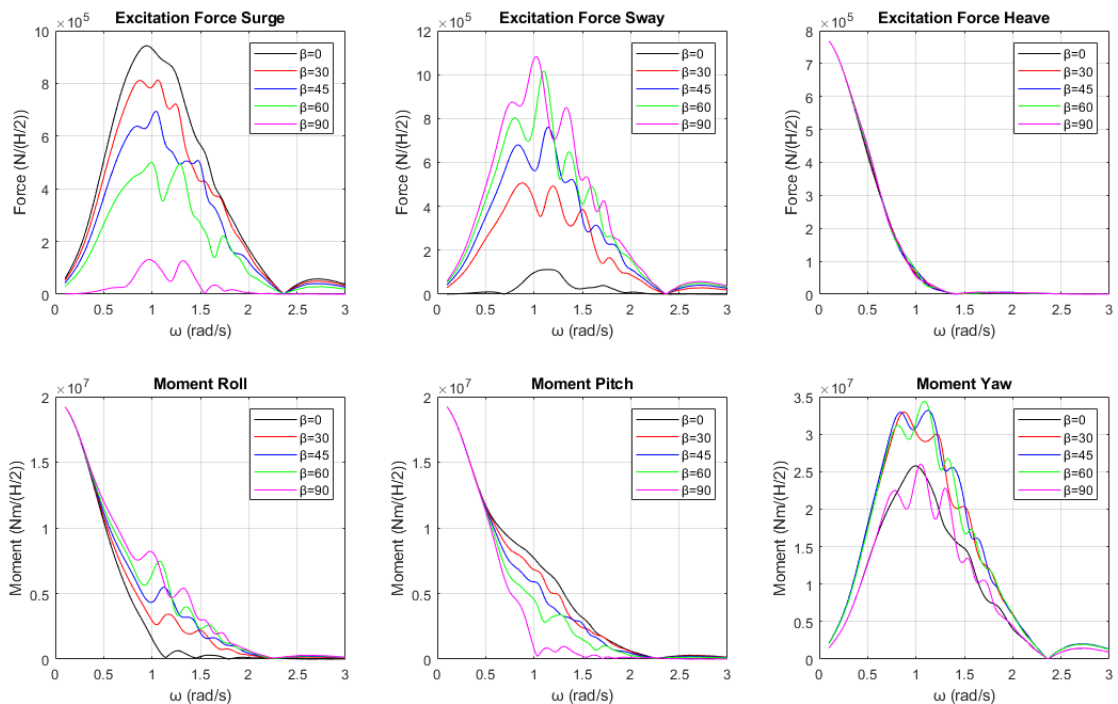
Εικόνα 334: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 335: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 336: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 337: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 333-337 παρατηρούμε πως παρόλο που αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών συνεχίζει να υπάρχει στη διάταξη. Όμως, οι συνθήκες Neumann και Dirichlet μεταβάλλονται. Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν

τις συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Επιπρόσθετα για να αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας θα πρέπει να εντοπίσουμε σε ποιον κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις και ως προς ποια συχνότητα, για κάθε γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Στον Πίνακα 89 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.

Πίνακας 89: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.33$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.10$	$\cong 1.36$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.14$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.20$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.14$	$\cong 1.72$
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.05$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.14$	$\cong 1.72$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.94$	$\cong 1.32$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.90$	$\cong 1.23$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.24$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.27$
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.33$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.11$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.13$

$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.90$	$\cong 1.27$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.32$
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.06$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.04$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.99$	$\cong 1.29$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.32$

Από τον Πίνακα 89 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους κύλινδρους της διάταξης για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στους κύλινδρους 2 και 5 της διάταξης. Αντίστοιχα, δεν εμφανίζεται στον κύλινδρο 3 όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 90^\circ$. Προκειμένου να αναπαραστήσουμε τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας είναι απαραίτητο να διακρίνουμε σε ποιον κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις για τις συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες δυνάμεις ασκούνται στον κύλινδρο 3. Αντίστοιχα, όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ$, τότε αυτές ασκούνται στον κύλινδρο 1. Τέλος, στον κύλινδρο 4 ασκούνται οι μεγαλύτερες φορτίσεις όταν η γωνία είναι ίση $\beta = 45^\circ, 60^\circ$ και 90° , όπου στην τελευταία γωνία αυτές ασκούνται και στον κύλινδρο 5. Στον Πίνακα 90 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y και τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.

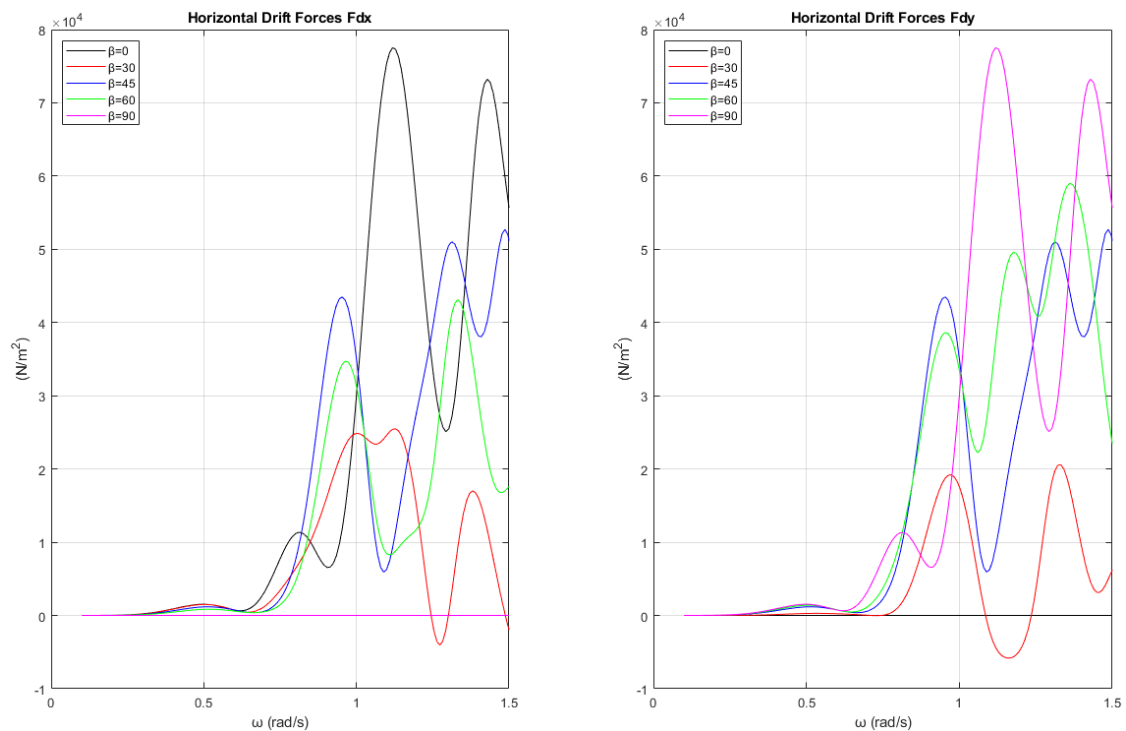
Πίνακας 90: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.32$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.99$	$\cong 1.29$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.04$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.06$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 2		

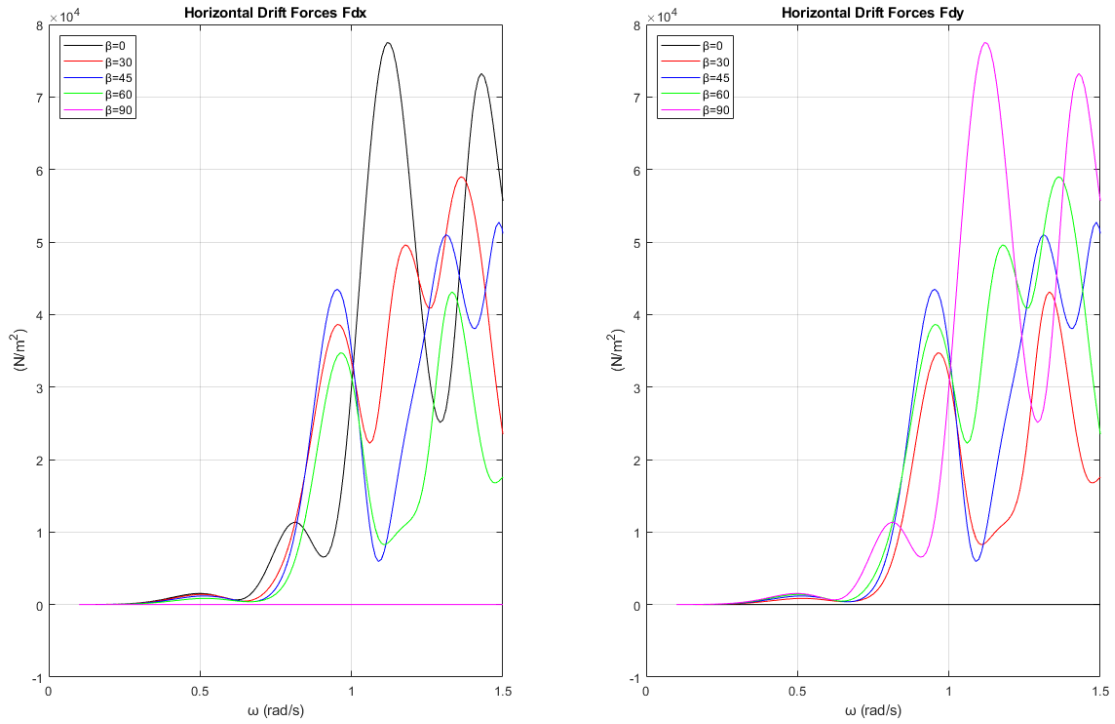
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.14$	$\cong 1.71$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.05$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.27$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.24$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.90$	$\cong 1.23$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.94$	$\cong 1.32$
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	$\cong 1.32$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.90$	$\cong 1.27$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.13$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.11$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.33$
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.14$	$\cong 1.71$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.20$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.14$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.10$	$\cong 1.36$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.02$	$\cong 1.33$

Από τον Πίνακα 90 παρατηρούμε πως όπως και στις δυνάμεις διέγερσης F_x έτσι και εδώ, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στον κύλινδρο 3 της διάταξης. Αντίστοιχα, δεν εμφανίζεται στους κυλίνδρους 1 και 2 όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 90^\circ$. Παρόλο που το φαινόμενο εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε σε ποιον κύλινδρο ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις για κάθε γωνία πρόσπτωσης που μελετήθηκε, όπως ακριβώς και προηγουμένως. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ, 30^\circ$

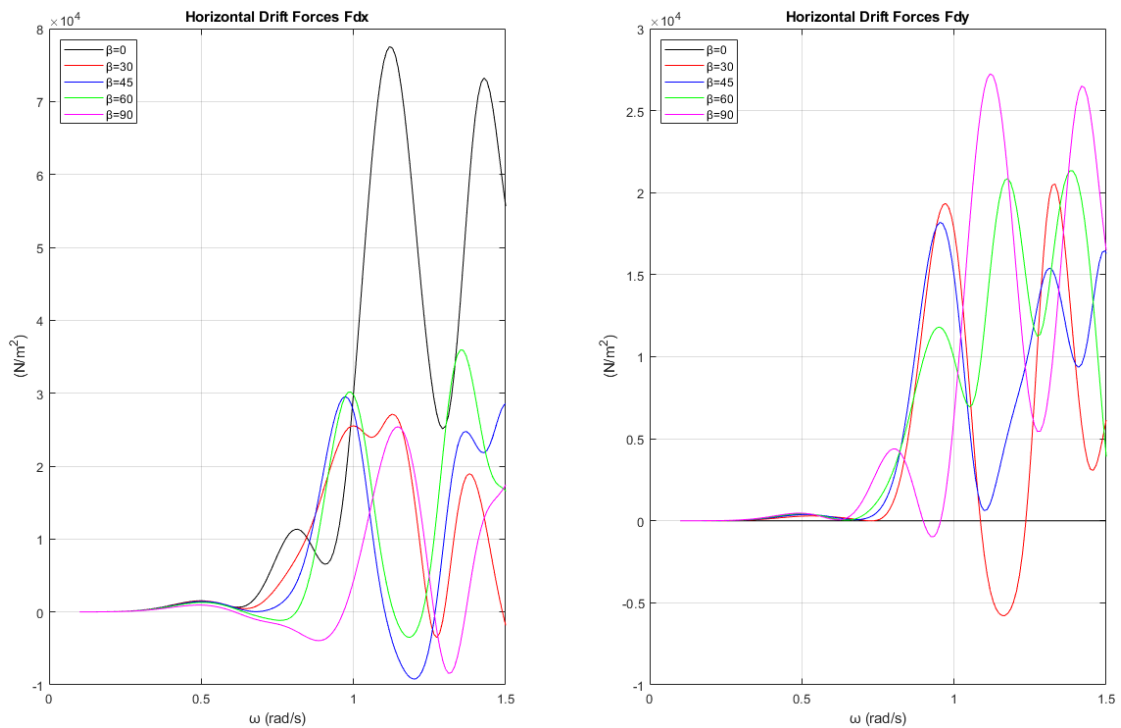
και 45° , τότε οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης, όπου για $\beta = 0^\circ$ ασκούνται και στον κύλινδρο 1. Όταν όμως η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$, τότε οι μεγαλύτερες φορτίσεις ασκούνται στους κύλινδρο 5. Αντίστοιχα όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$, τότε αυτές ασκούνται στον κύλινδρο 3. Σε πρώτη εκτίμηση συγκρίνοντας τον Πίνακα 89 με τον Πίνακα 90, μπορούμε να υποθέσουμε πως οι κύλινδροι 1, 3, 4 και 5 είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Οι κύλινδροι 3 και 4 είναι καταλληλότεροι, καθώς σε αυτούς ασκούνται μεγάλες φορτίσεις, για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού. Στην Εικόνα 338 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 339-343 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



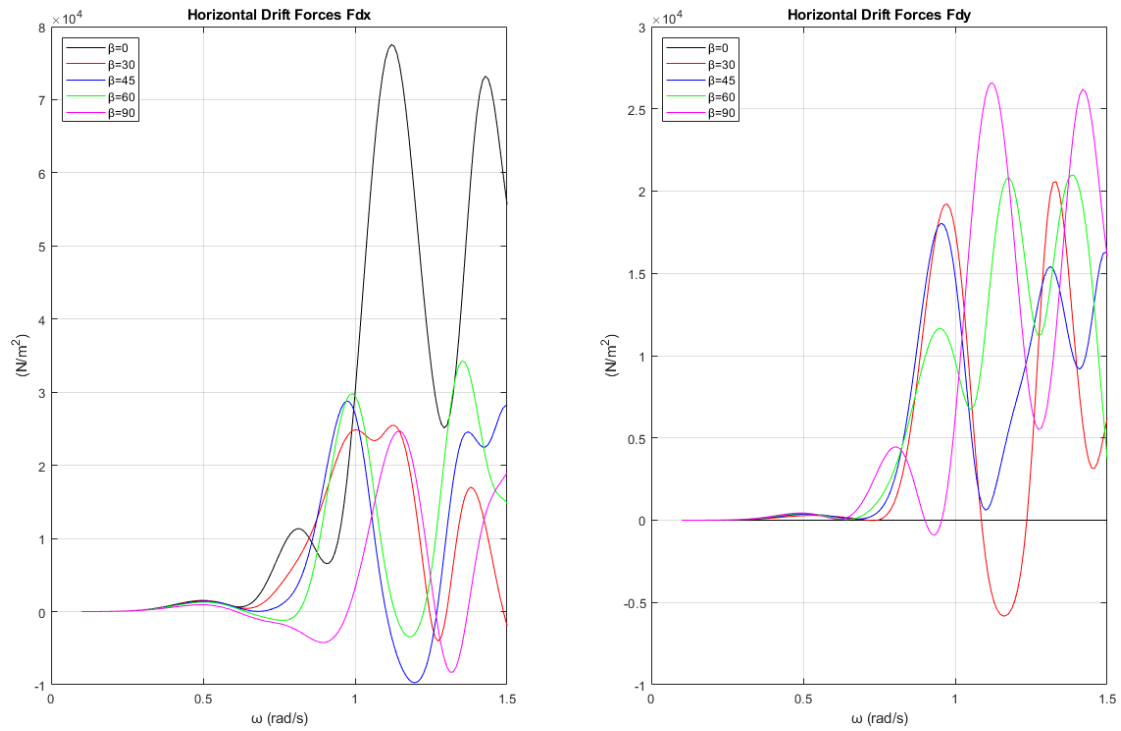
Εικόνα 338: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



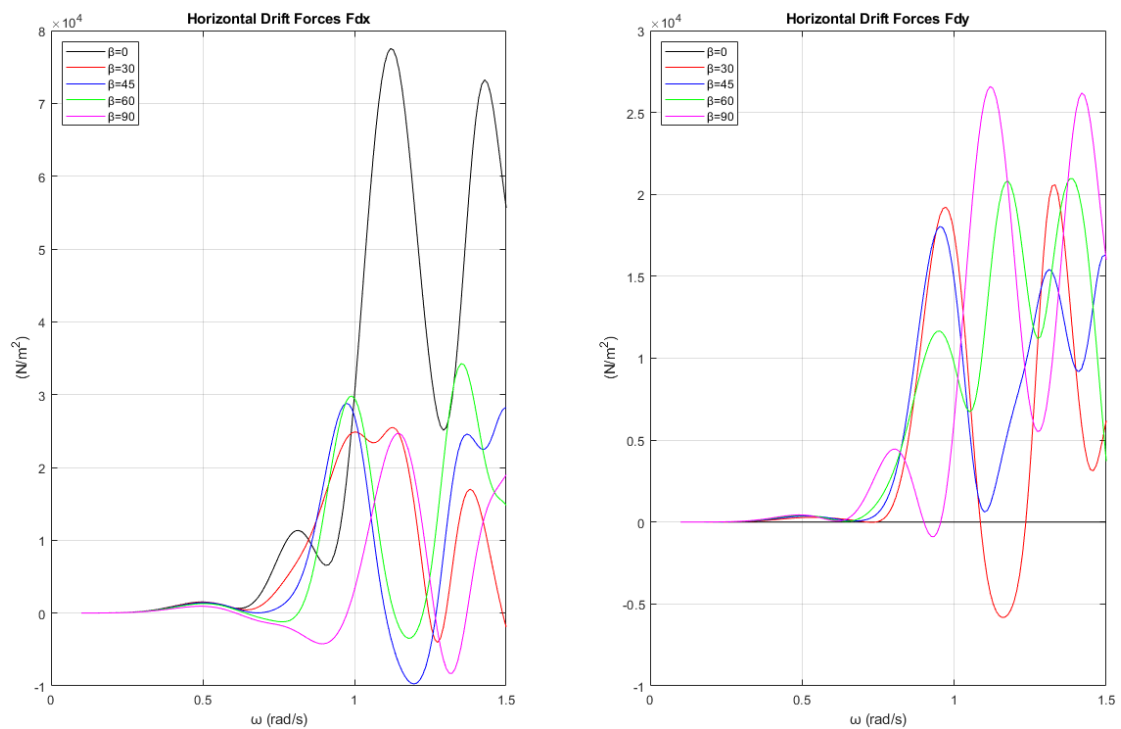
Εικόνα 339: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



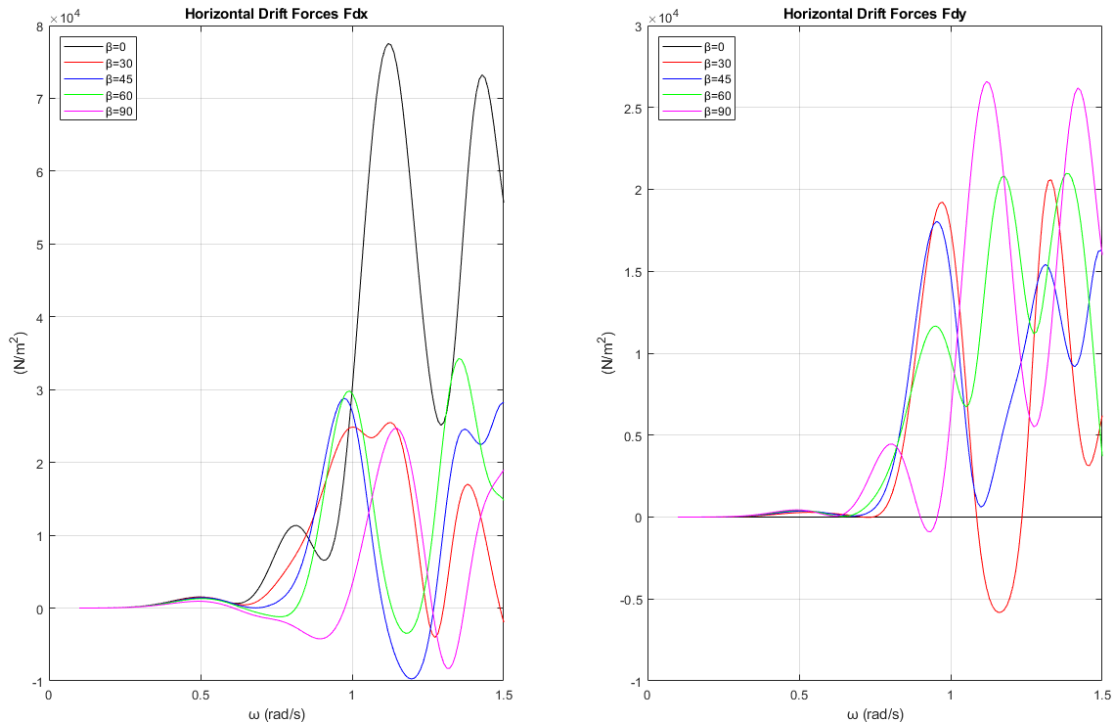
Εικόνα 340: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 341: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 342: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 343: Συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Για την αναπαράσταση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας θα αξιοποιήσουμε τις συχνότητες εκείνες που ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 91 φαίνεται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

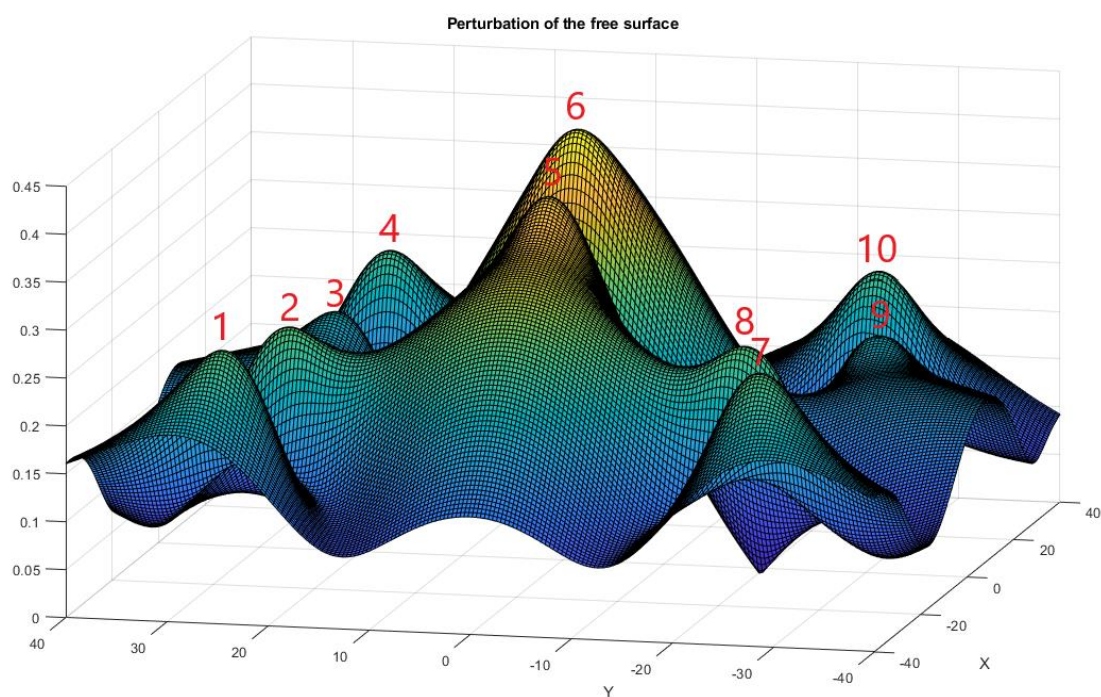
Πίνακας 91: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.94$	Κύλινδρος 3	F_x	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.10$	Κύλινδρος 1	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.86$	Κύλινδρος 4	F_x/F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.10$	Κύλινδρος 5	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.94$	Κύλινδρος 3	F_y	NAI

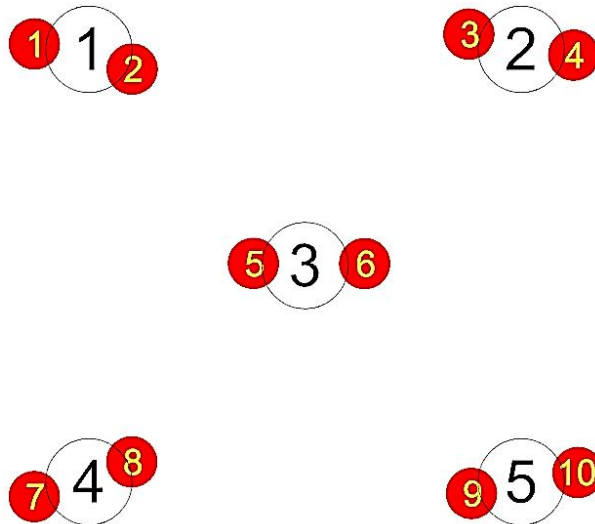
Στην Εικόνα 344 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 92 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 345 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 92: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.27 m
2	0.27 m
3	0.21 m
4	0.25 m
5	0.39 m
6	0.44 m
7	0.27 m
8	0.27 m
9	0.21 m
10	0.25 m



Εικόνα 344: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

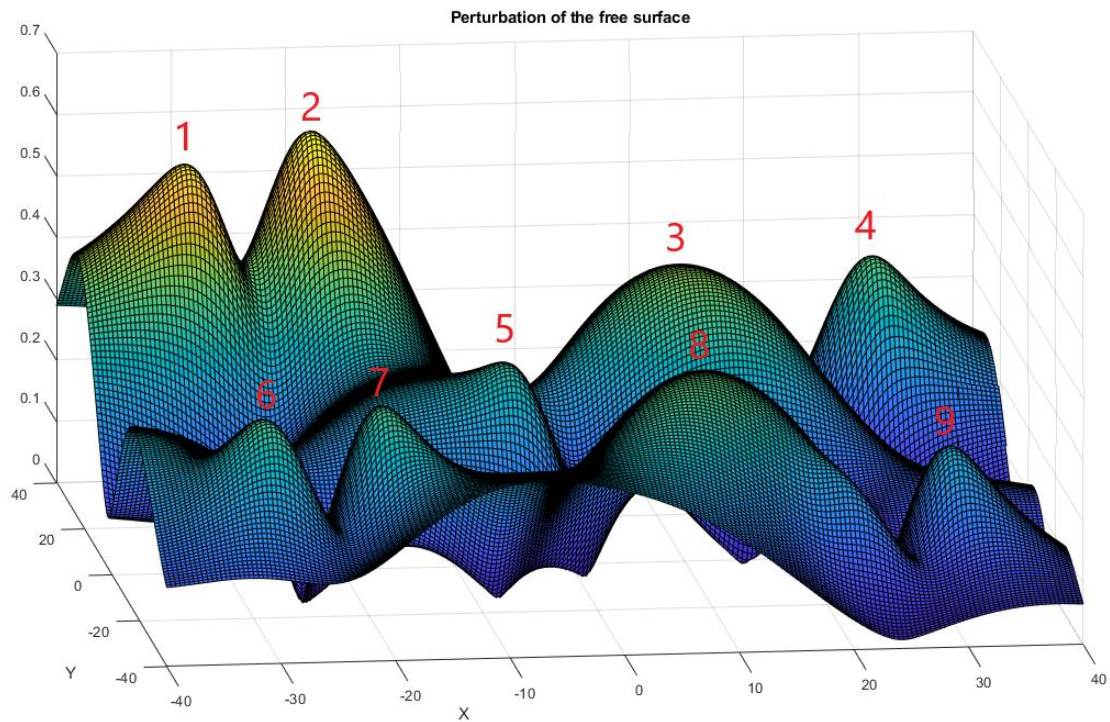


Εικόνα 345: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

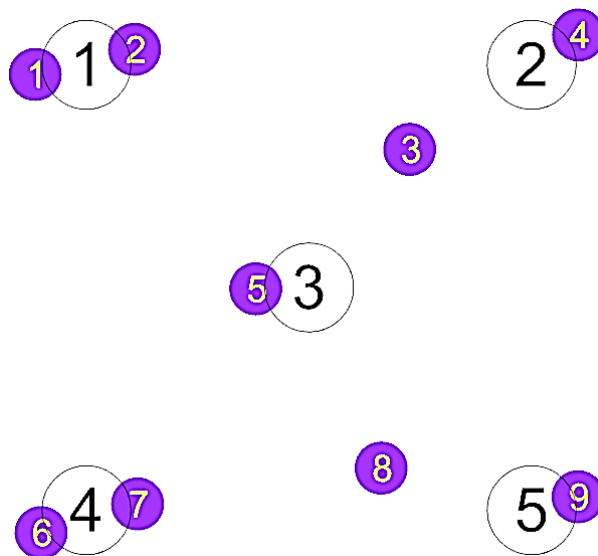
Στην Εικόνα 346 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 93 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 347 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς την συχνότητα αυτή.

Πίνακας 93: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.57 m
2	0.61 m
3	0.42 m
4	0.38 m
5	0.33 m
6	0.35 m
7	0.36 m
8	0.38 m
9	0.27 m



Εικόνα 346: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



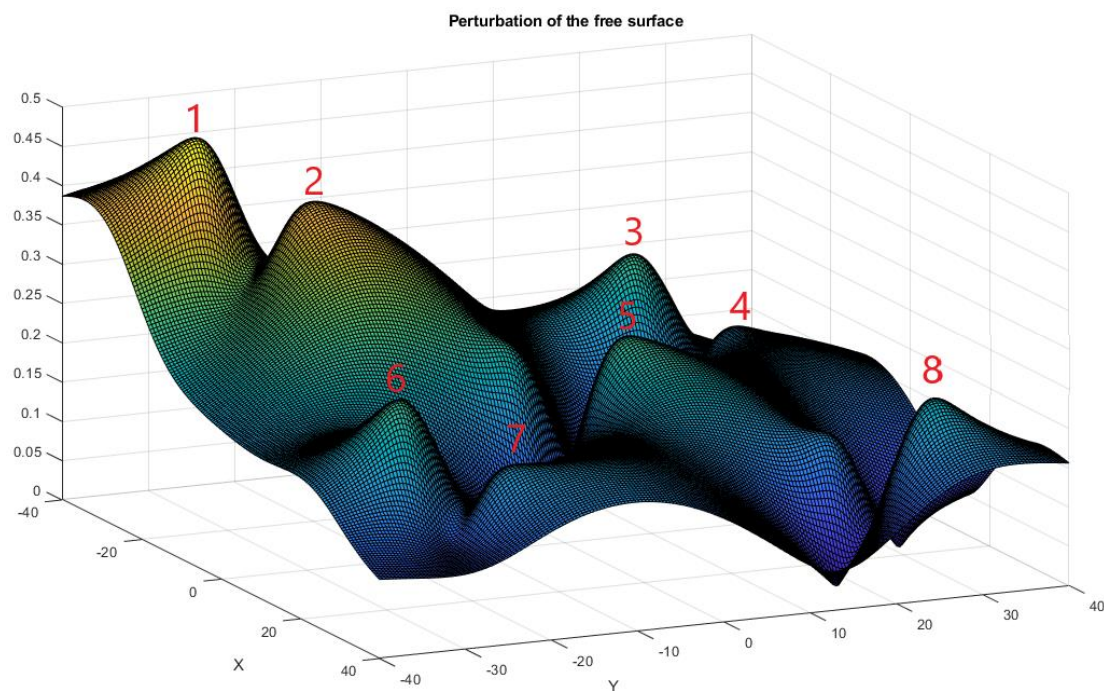
Εικόνα 347: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 348 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 4 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 94 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 349

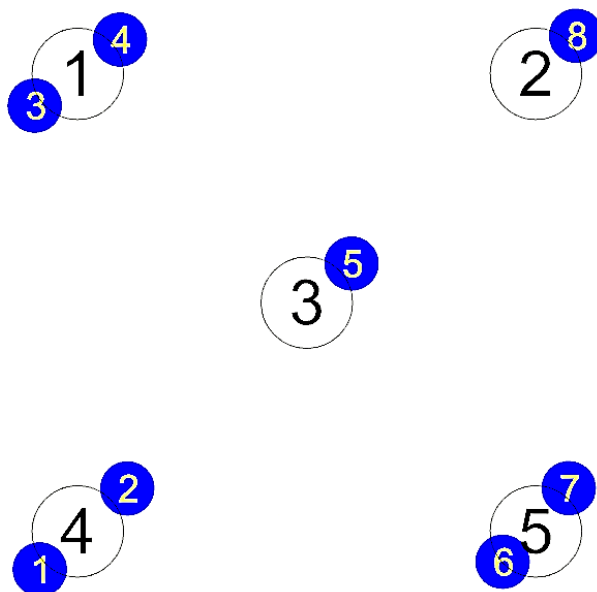
φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 94: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.47 m
2	0.41 m
3	0.27 m
4	0.19 m
5	0.27 m
6	0.27 m
7	0.19 m
8	0.22 m



Εικόνα 348: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 4 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

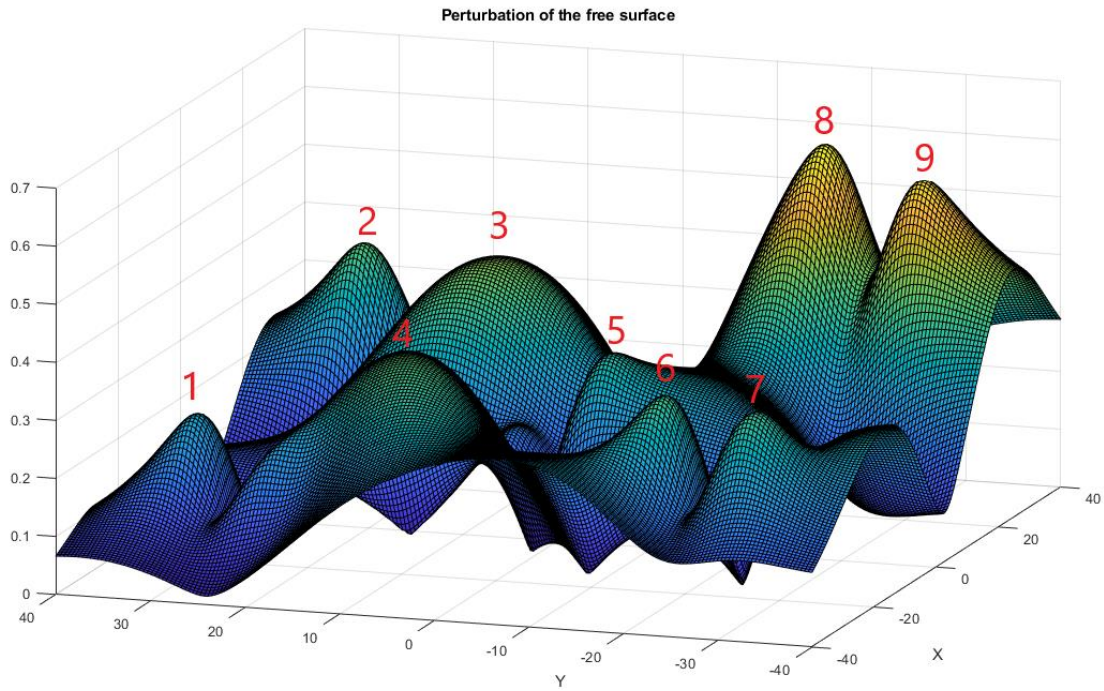


Εικόνα 349: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

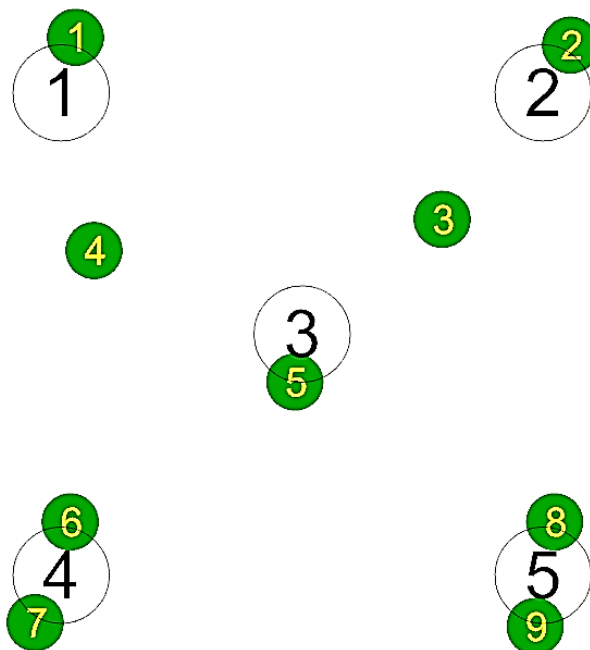
Στην Εικόνα 350 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 95 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 351 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 95: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.26 m
2	0.38 m
3	0.42 m
4	0.38 m
5	0.33 m
6	0.35 m
7	0.35 m
8	0.61 m
9	0.57 m



Εικόνα 350: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



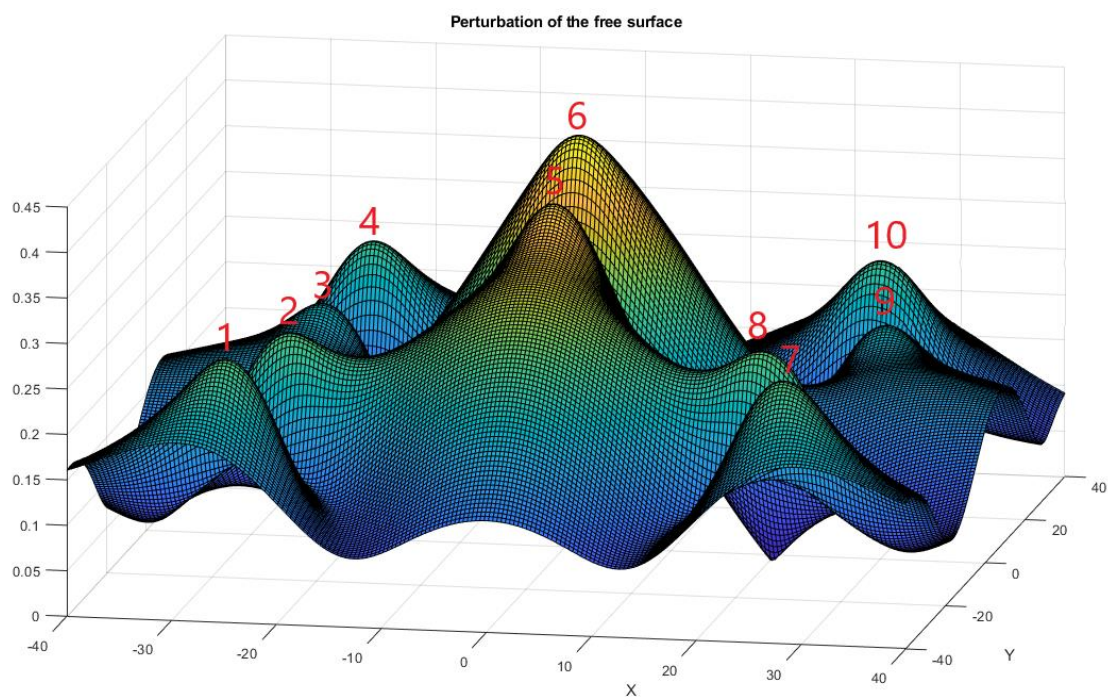
Εικόνα 351: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 352 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 96 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

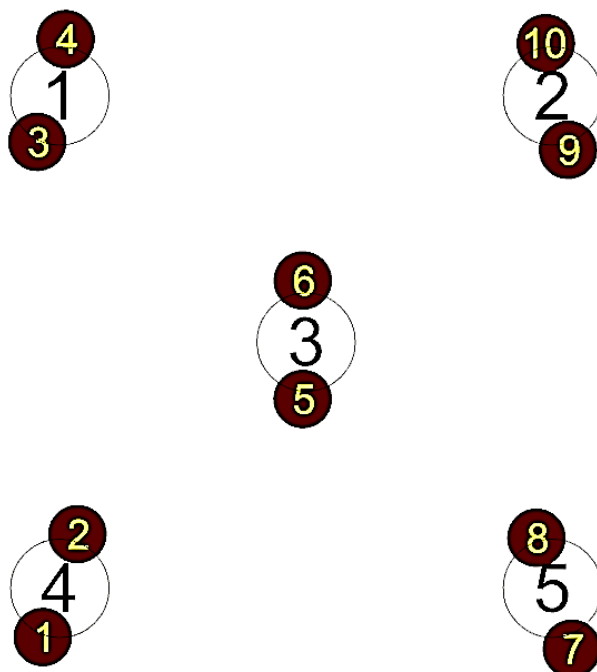
Εικόνα 353 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 96: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.26 m
2	0.27 m
3	0.20 m
4	0.25 m
5	0.39 m
6	0.44 m
7	0.27 m
8	0.27 m
9	0.21 m
10	0.25 m

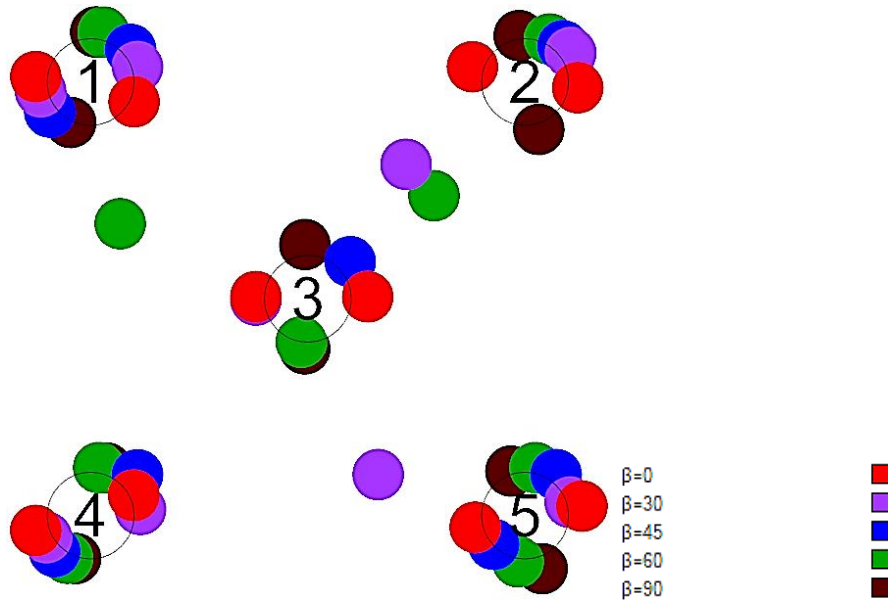


Εικόνα 352: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

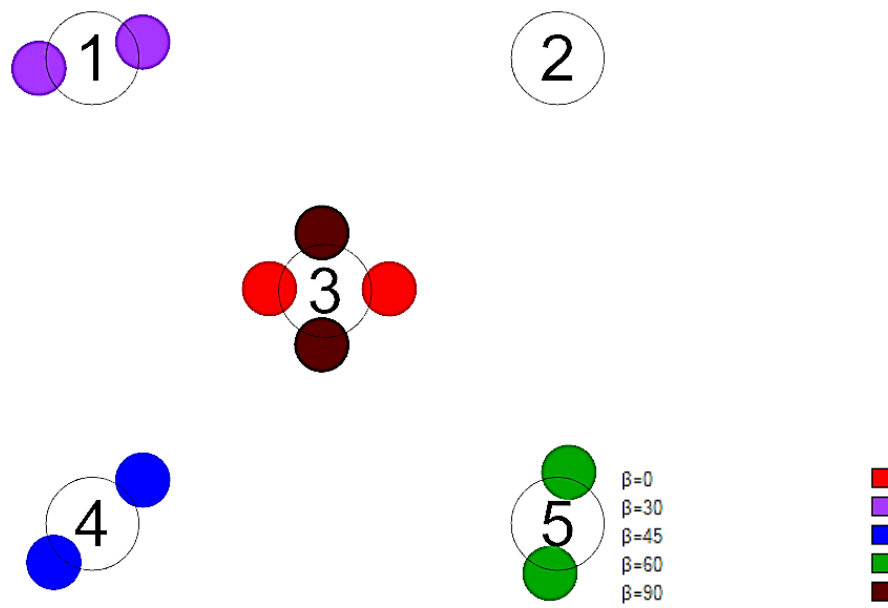


Εικόνα 353: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

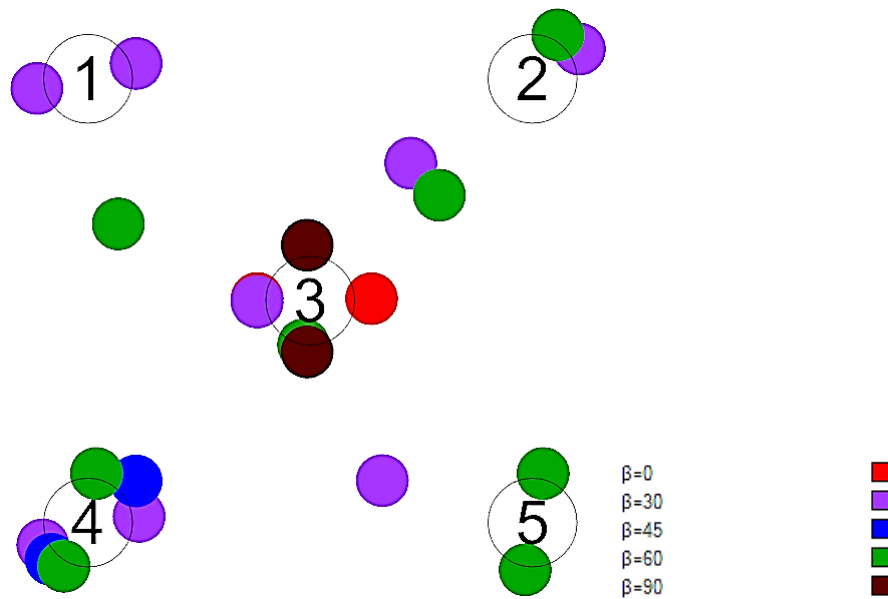
Στην Εικόνα 354 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην Εικόνα 355 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 355 συμπεραίνουμε πως στη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1, 3, 4 και 5 της διάταξης. Είναι εμφανές ότι κάθε συσκευή μπορεί να παράξει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια για κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Για παράδειγμα, η συσκευή του κυλίνδρου 3 παράγει μέγιστη ενέργεια όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ και 90° . Οι συσκευές των κυλίνδρων 1, 4 και 5 παράγουν τη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, 30° και 60° αντίστοιχα. Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εξαρτάται και από την απόσταση μεταξύ των σωμάτων. Λόγω, του ότι οι κύλινδροι στην συγκεκριμένη διάταξη δεν βρίσκονται κοντά μεταξύ τους δεν παρατηρούμε μεγάλες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 356 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 356 συμπεραίνουμε πως μάλλον μπορεί να εγκατασταθεί μόνο μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 3 της διάταξης, καθώς υπάρχει μια ευελιξία όσον αφορά τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 354: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



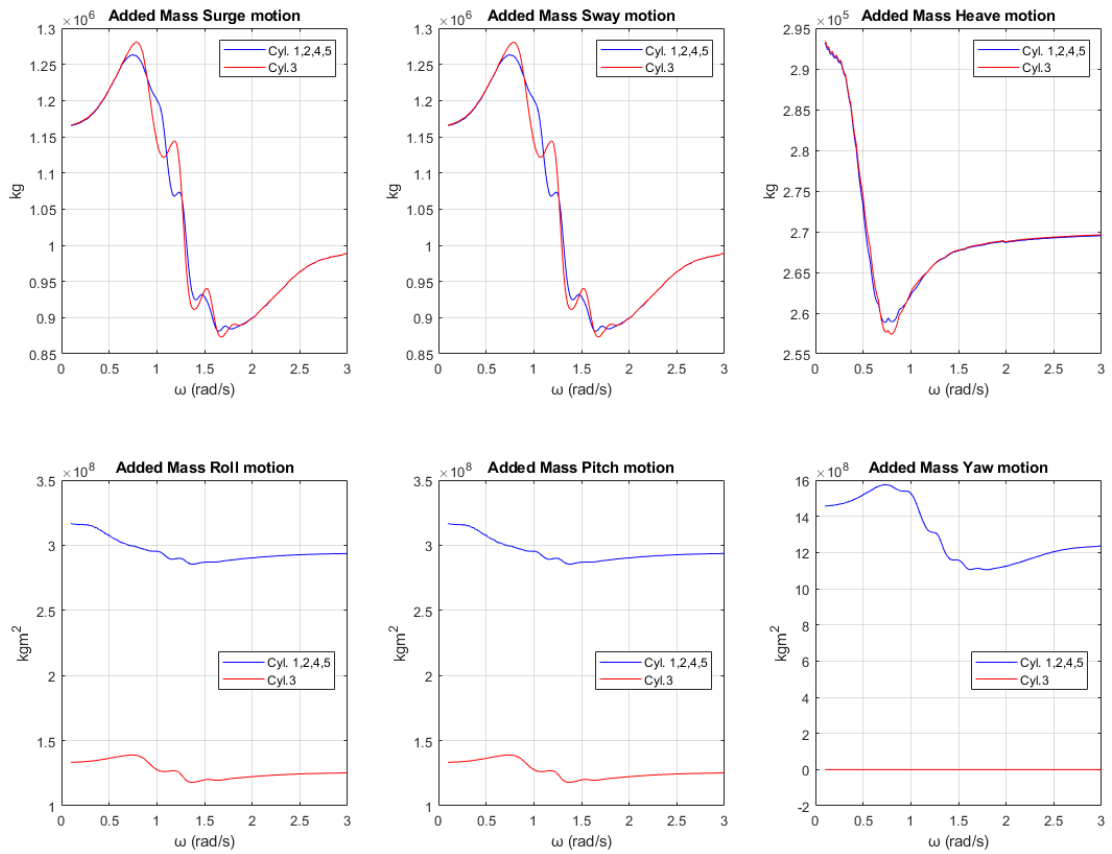
Εικόνα 355: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



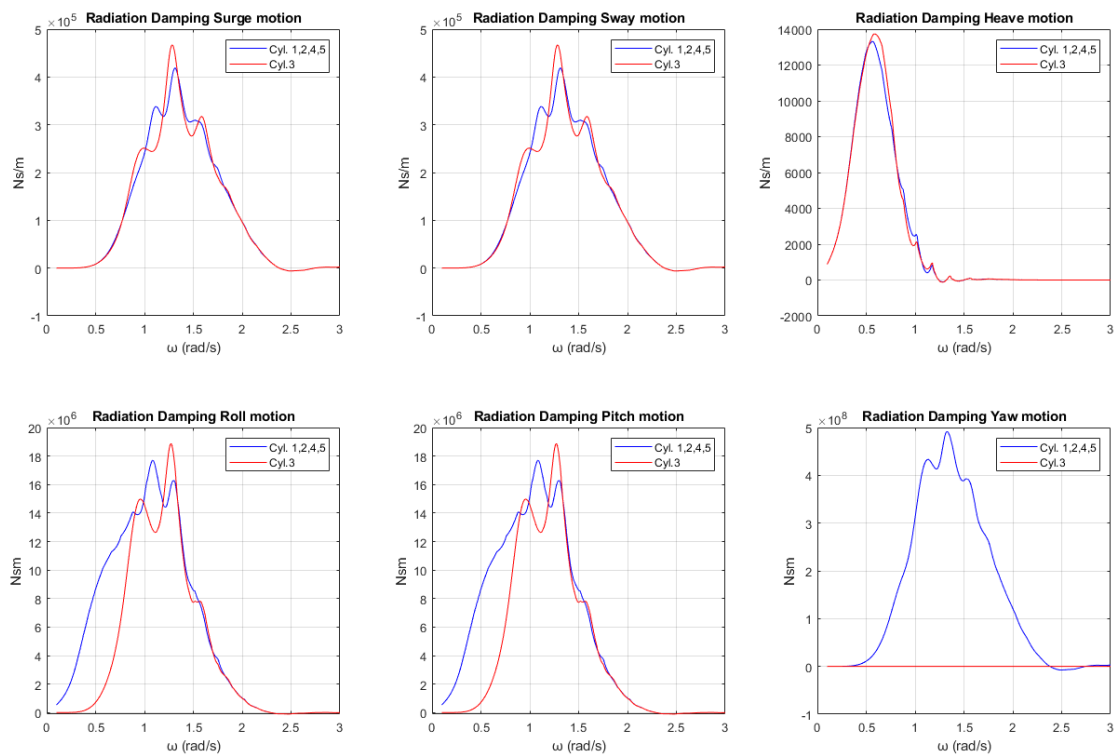
Εικόνα 356: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.6.2 Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem

Είναι σημαντικό να μελετήσουμε τη διάταξη των πέντε κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων στην περίπτωση που αυτοί είναι ελεύθεροι να ταλαντωθούν. Έτσι, θα ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης δεν εξαρτώνται από την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού παρά μόνο από την γεωμετρία του σώματος. Στην Εικόνα 357 φαίνονται οι συντελεστές πρόσθετης μάζας στους κυλίνδρους της διάταξης και αντίστοιχα στην Εικόνα 358 φαίνονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

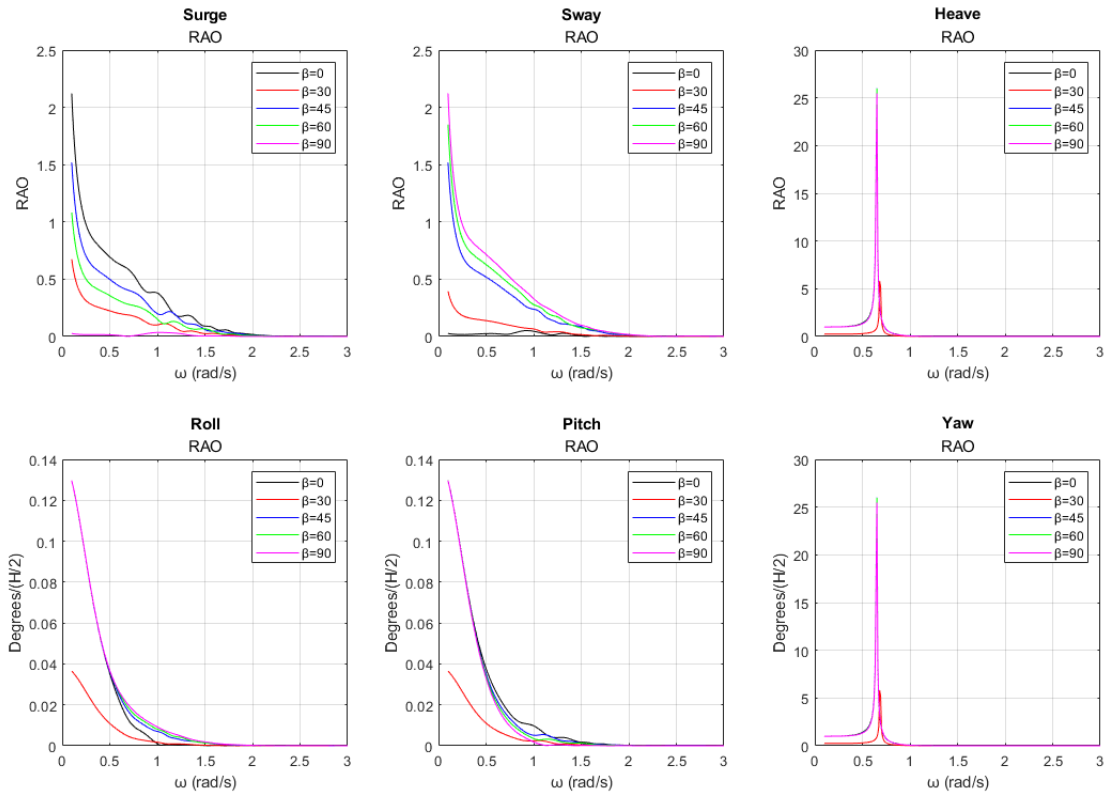


Εικόνα 357: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

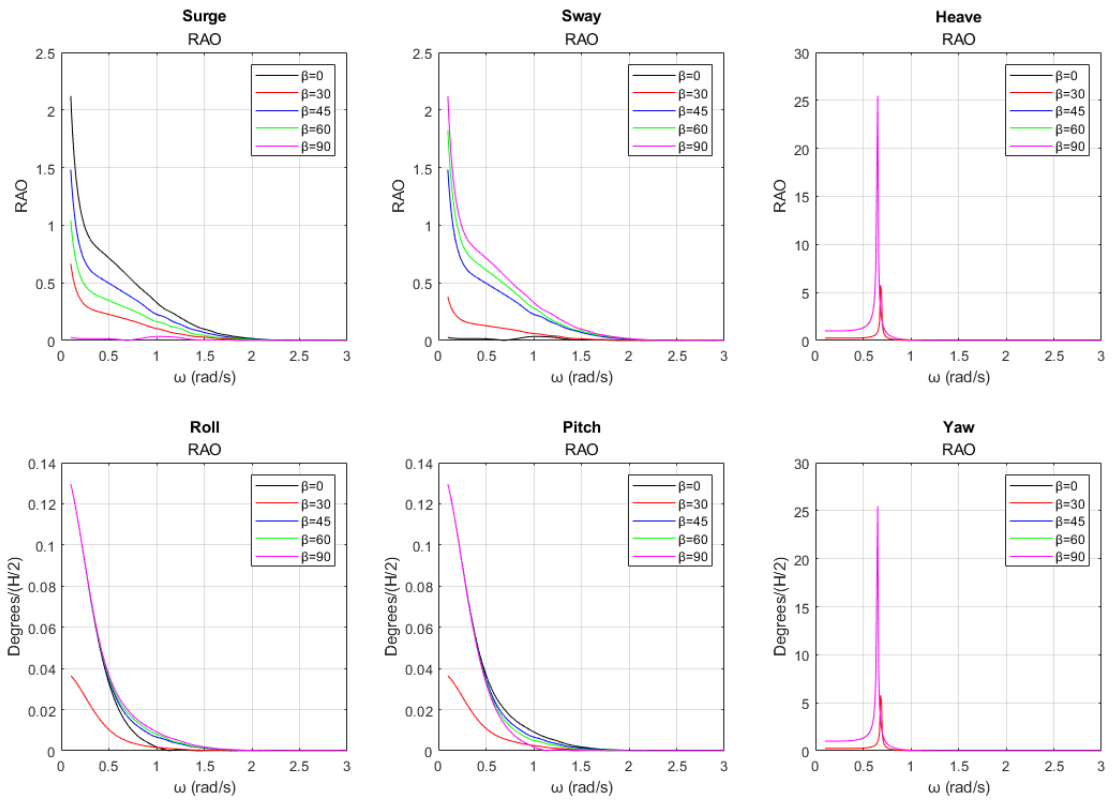


Εικόνα 358: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

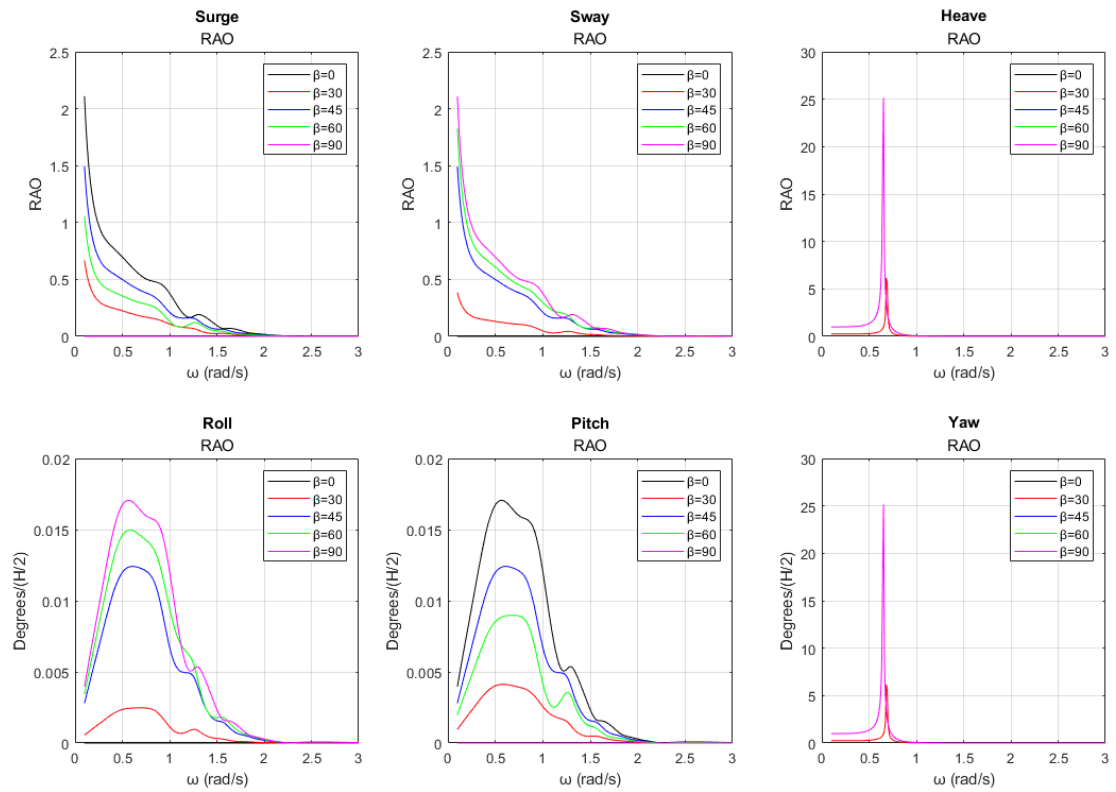
Οι κινήσεις των κυλίνδρων ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στις Εικόνες 359-363.



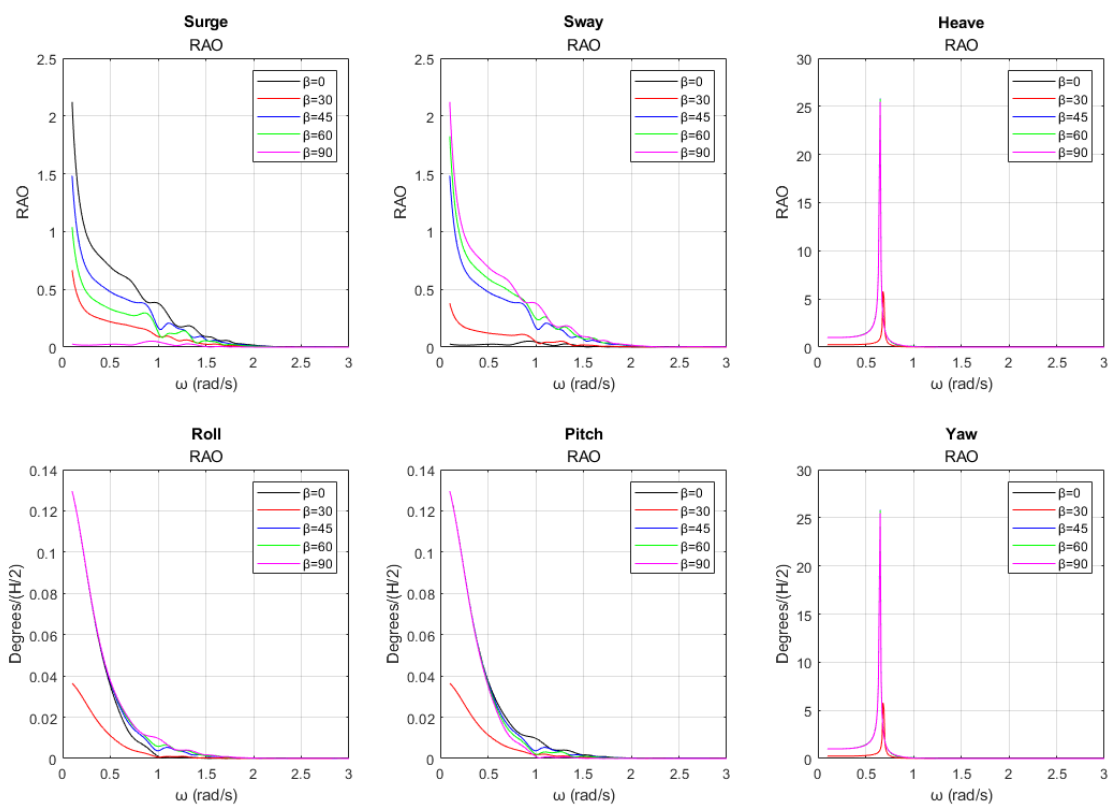
Εικόνα 359: Κινήσεις κυλίνδρου 1 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



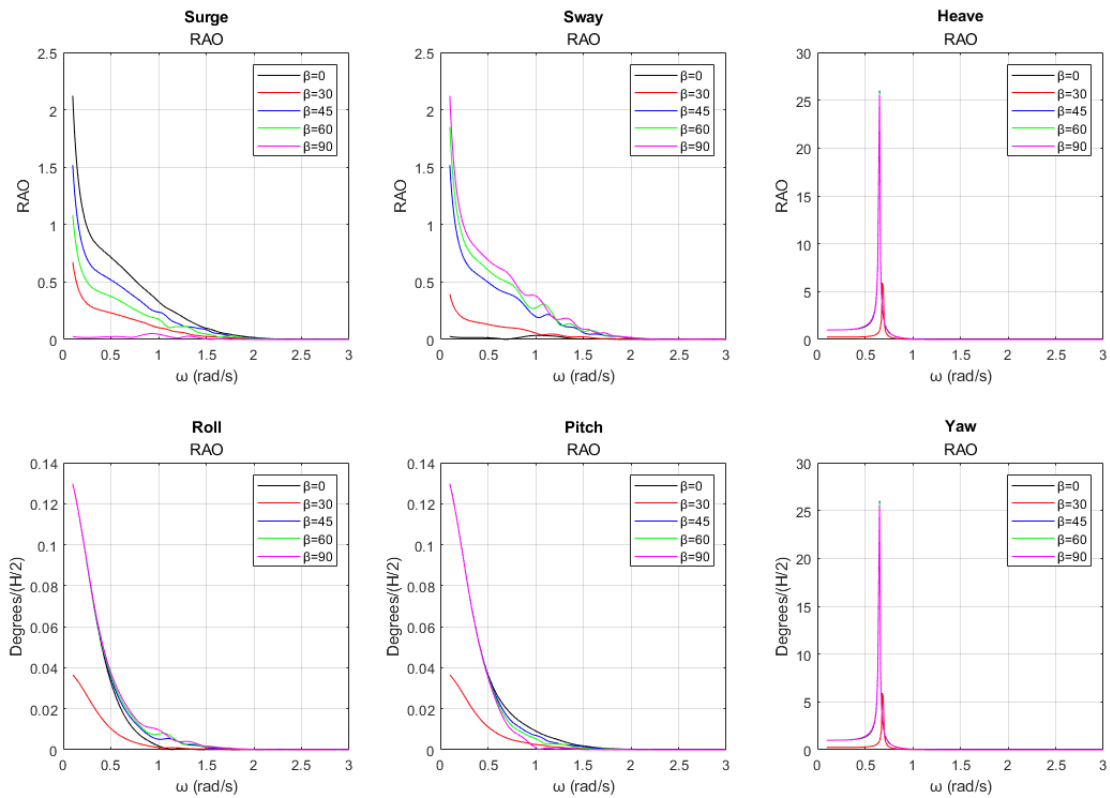
Εικόνα 360: Κινήσεις κυλίνδρου 2 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 361: Κινήσεις κυλίνδρου 3 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

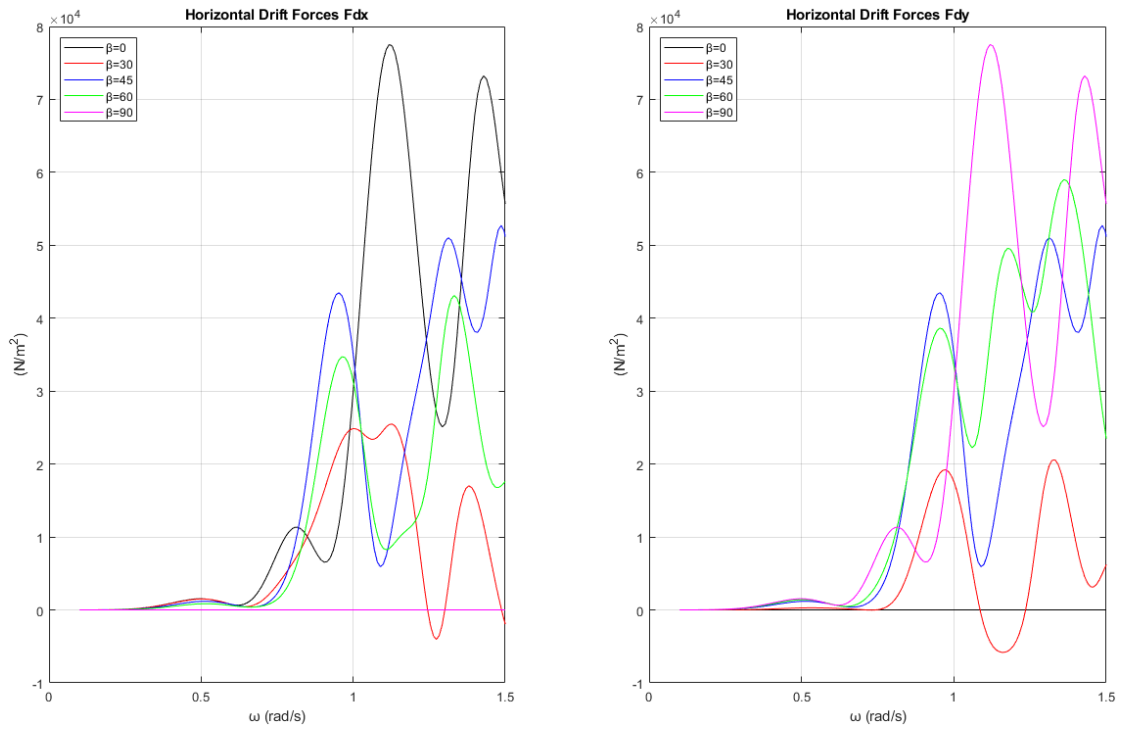


Εικόνα 362: Κινήσεις κυλίνδρου 4 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

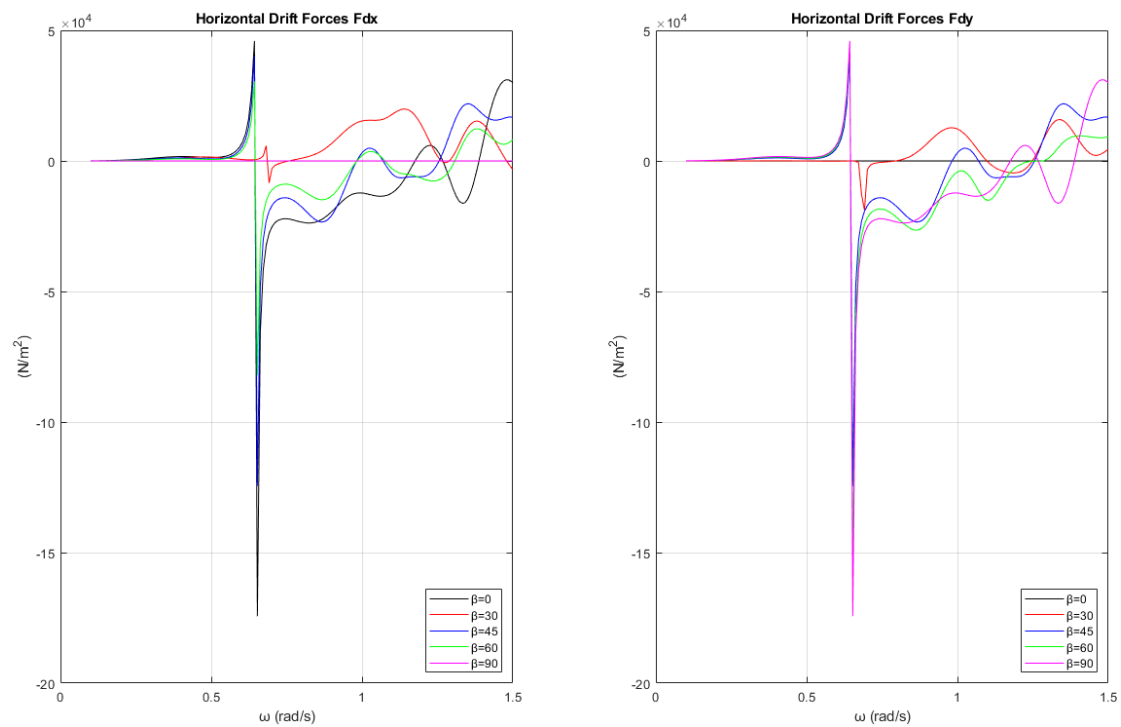


Εικόνα 363: Κινήσεις κυλίνδρου 5 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

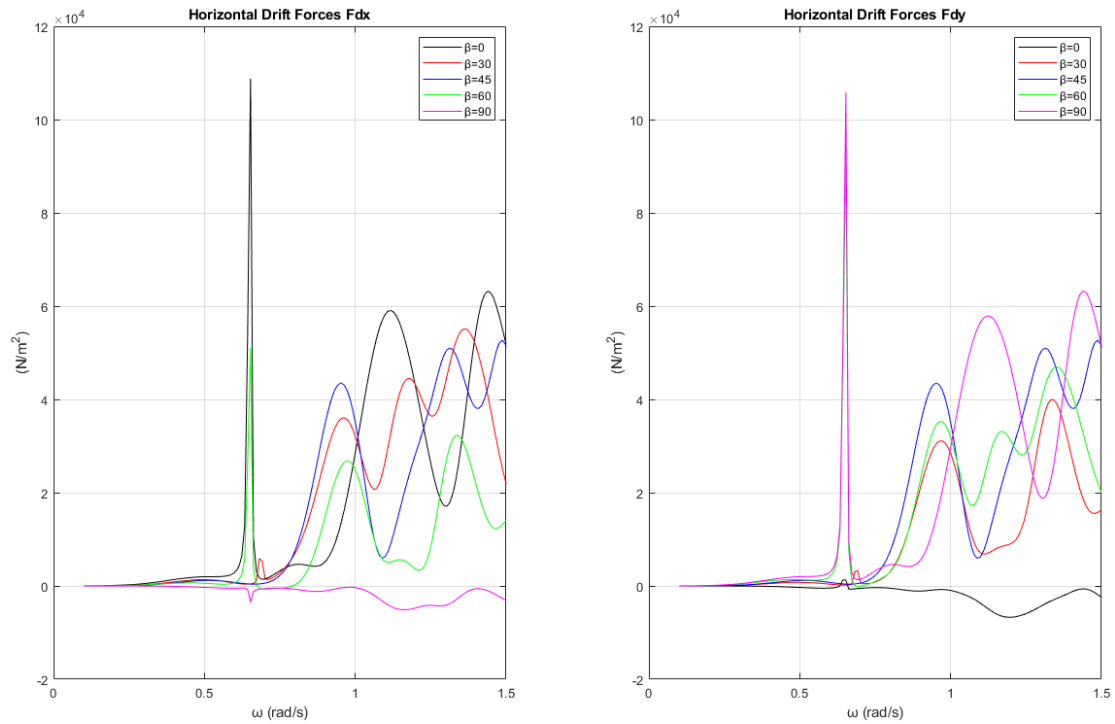
Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν επειδή αυτοί κινούνται, όμως αλλάζουν οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 364 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης όταν η διάταξη είναι ακίνητη. Αντίστοιχα στην Εικόνα 365 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη λόγω των κινήσεων των κυλίνδρων για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στις Εικόνες 366-370 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



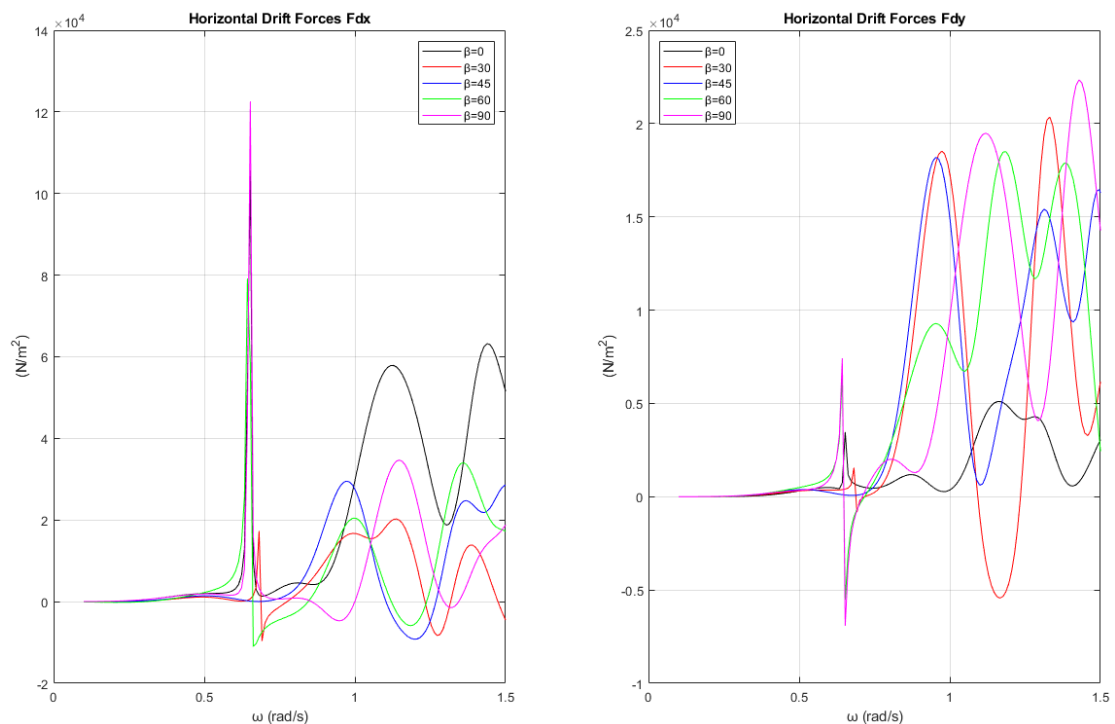
Εικόνα 364: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem)



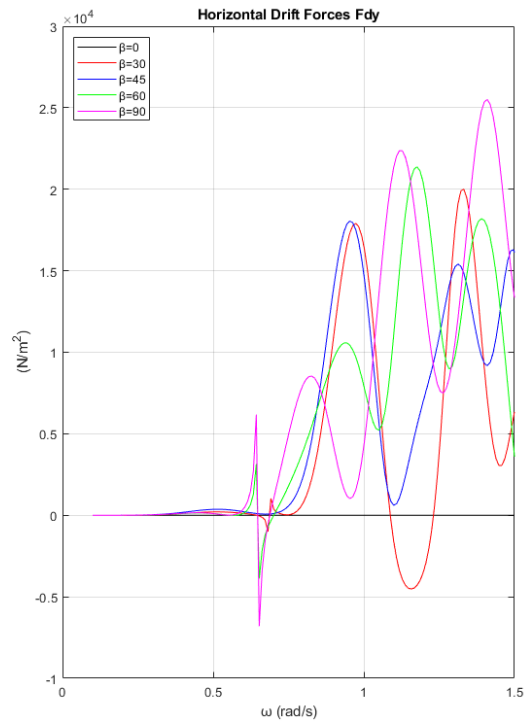
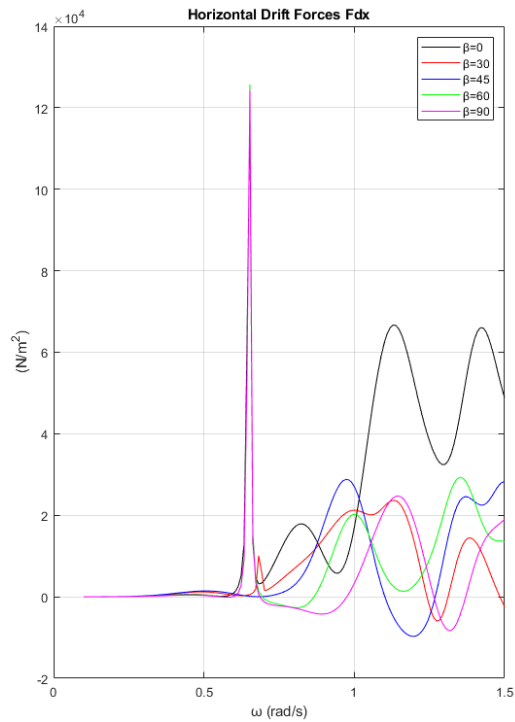
Εικόνα 365: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



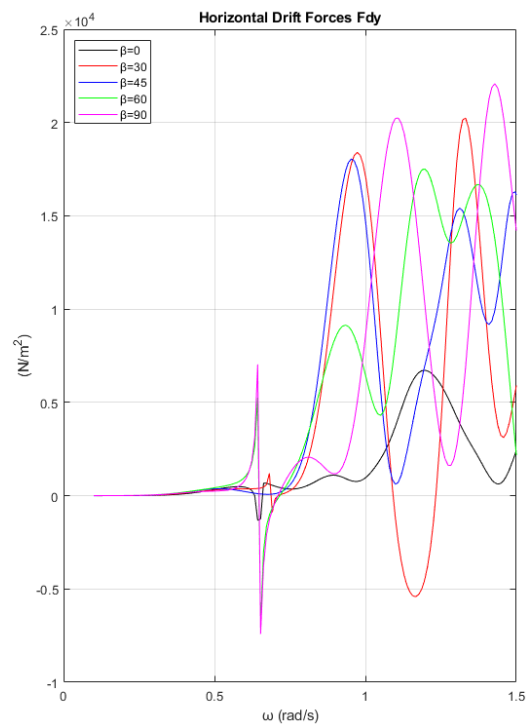
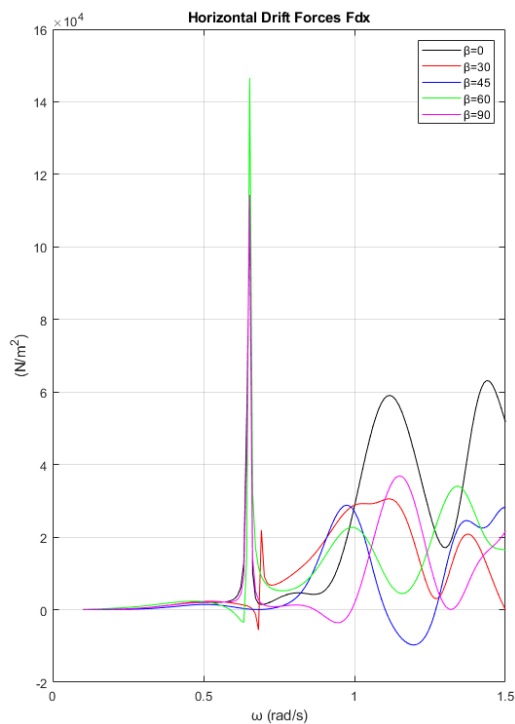
Εικόνα 366: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



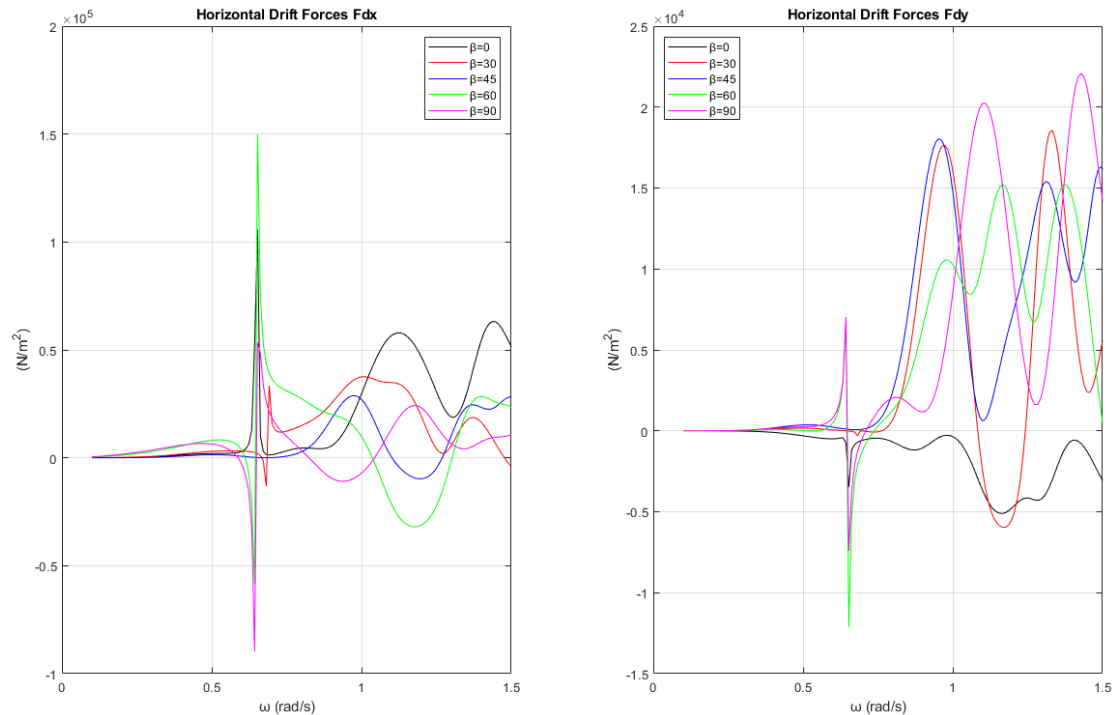
Εικόνα 367: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 368: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 369: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

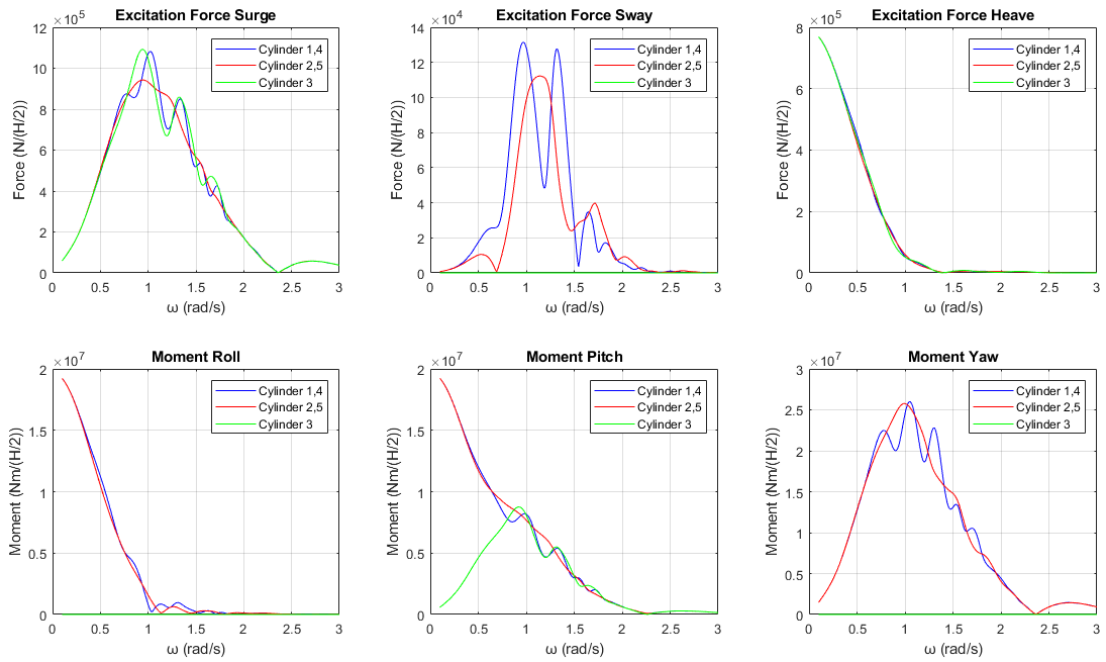


Εικόνα 370: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

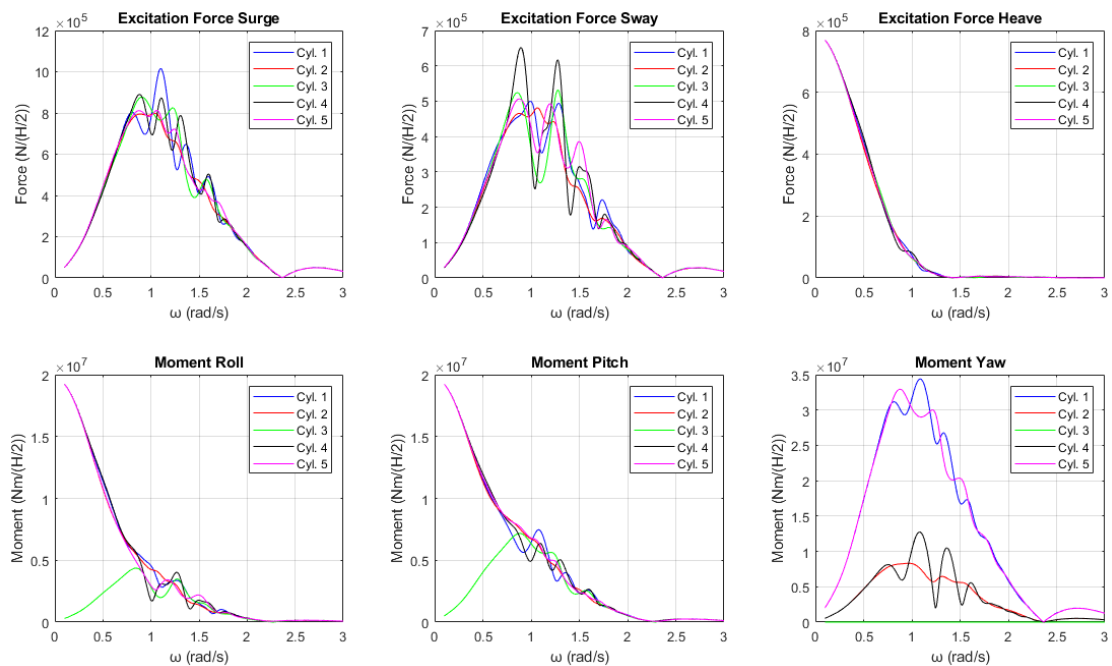
Προκειμένου να δούμε πως αλλάζει το μέτρο τη ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω των κινήσεων των σωμάτων, θα το αναπαραστήσουμε στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Επειδή το φαινόμενο εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους κυλίνδρους για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, τότε θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας μόνο για τις συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann, καθώς ασκούνται και οι μεγαλύτερες δυνάμεις στη συνθήκη αυτή. Στις Εικόνες 371-375 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης ανά γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Στον Πίνακα 97 υπενθυμίζονται οι συχνότητες στις οποίες παρατηρούμε τις μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης.

Πίνακας 97: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης

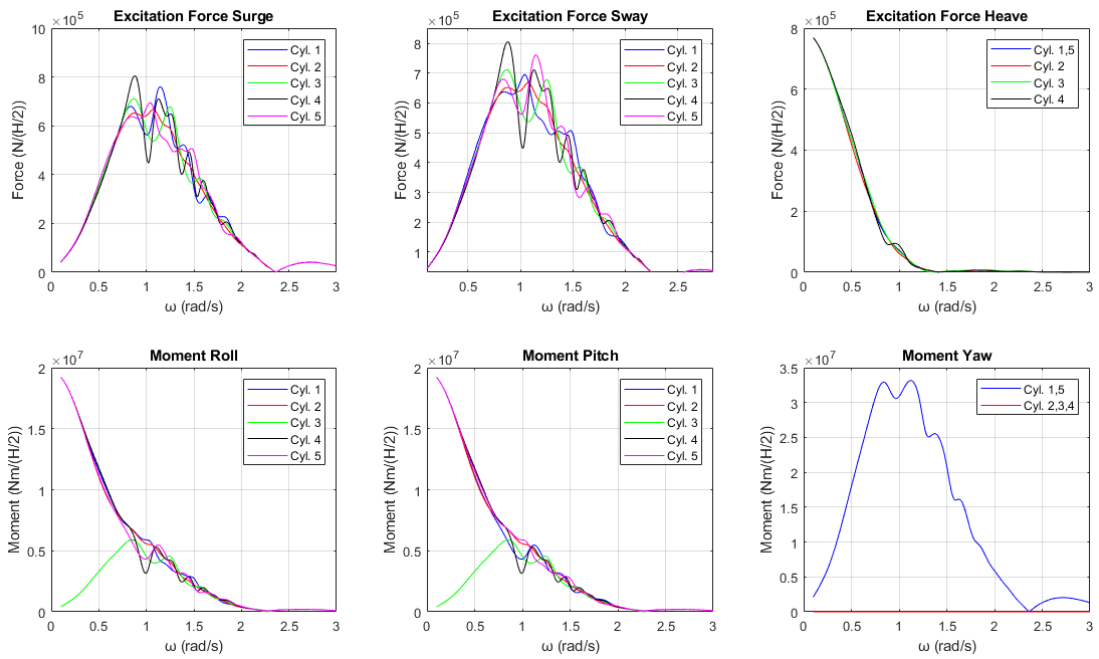
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.94$	Κύλινδρος 3	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.10$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.86$	Κύλινδρος 4	F_x/F_y	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.10$	Κύλινδρος 5	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.94$	Κύλινδρος 3	F_y	ΝΑΙ



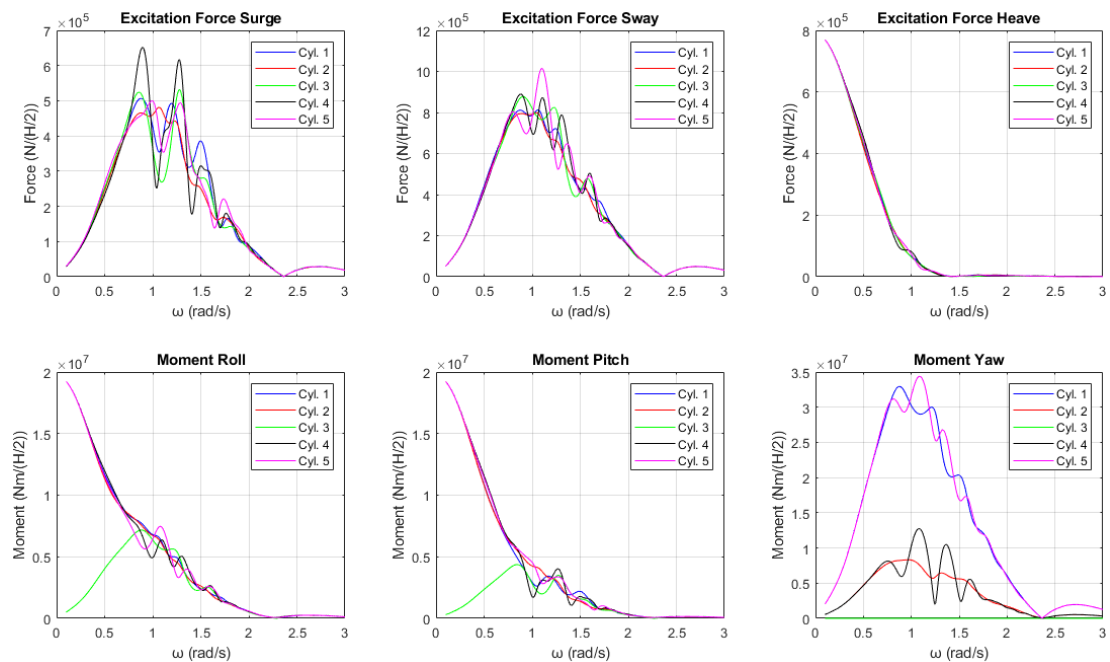
Εικόνα 371: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$



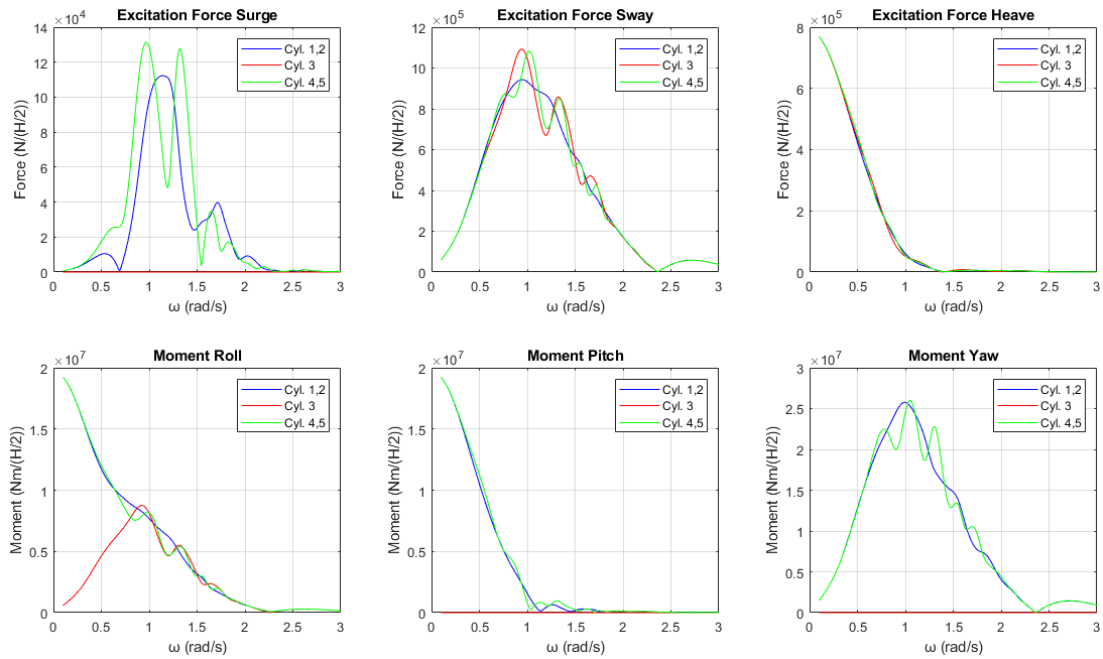
Εικόνα 372: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$



Εικόνα 373: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$



Εικόνα 374: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$

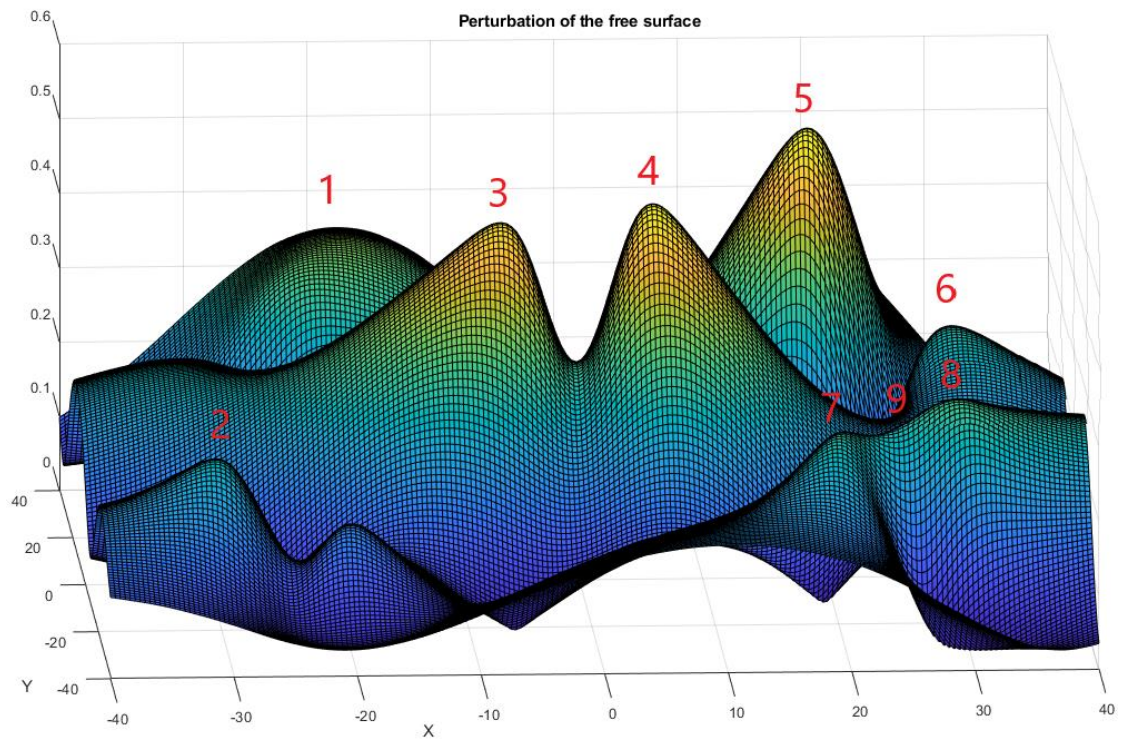


Εικόνα 375: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

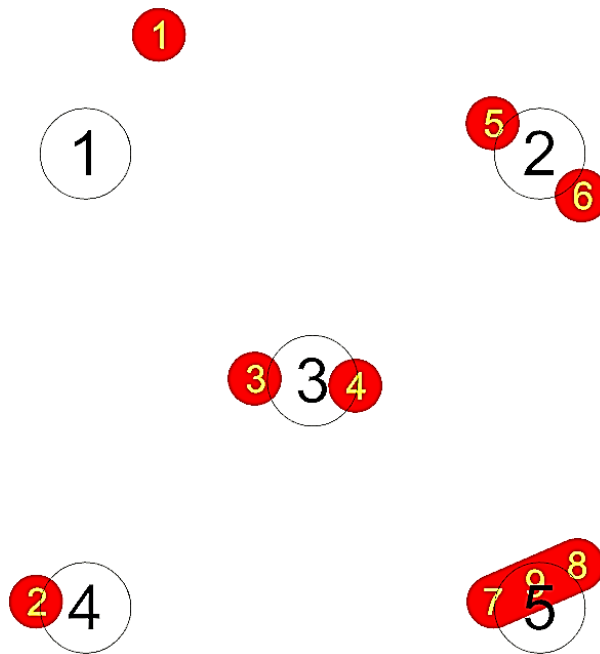
Στην Εικόνα 376 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 98 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 377 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 98: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.35 m
2	0.24 m
3	0.48 m
4	0.50 m
5	0.52 m
6	0.27 m
7	0.27 m
8	0.30 m
9	0.29 m



Εικόνα 376: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



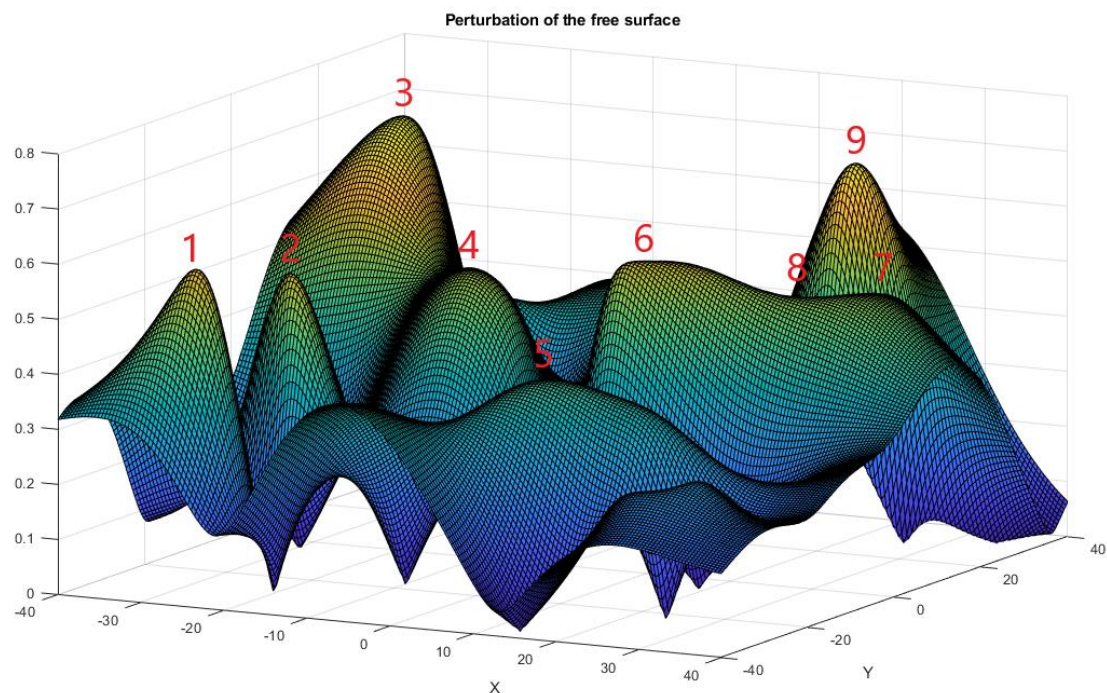
Εικόνα 377: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 378 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη

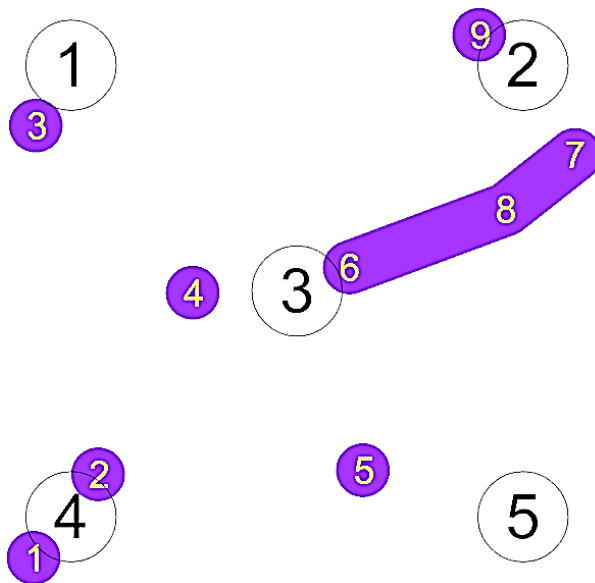
Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 99 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 379 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 99: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.58 m
2	0.55 m
3	0.72 m
4	0.52 m
5	0.40 m
6	0.55 m
7	0.49 m
8	0.52 m
9	0.57 m



Εικόνα 378: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

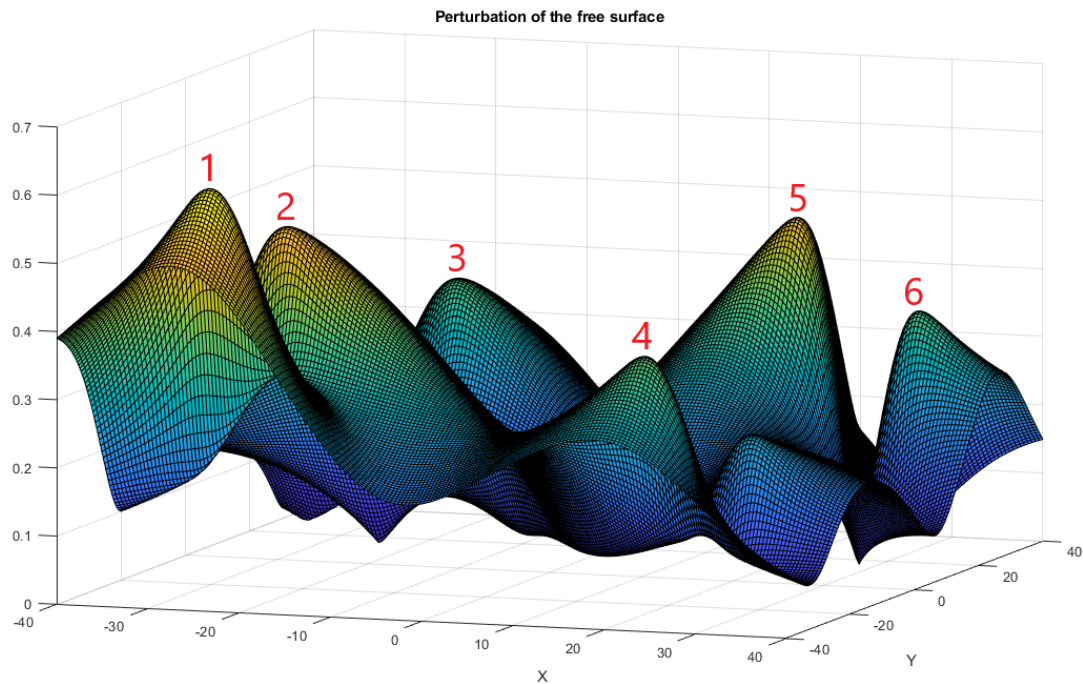


Εικόνα 379: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

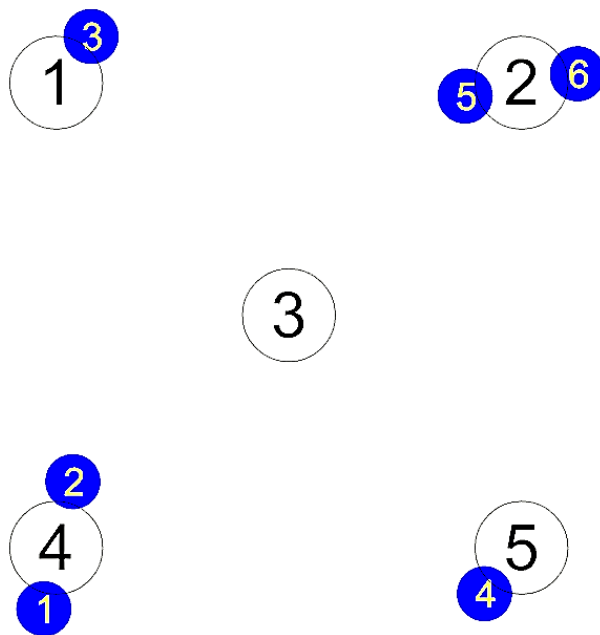
Στην Εικόνα 380 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 4 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Στον Πίνακα 100 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 381 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 100: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.60 m
2	0.52 m
3	0.36 m
4	0.38 m
5	0.49 m
6	0.36 m



Εικόνα 380: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 4 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



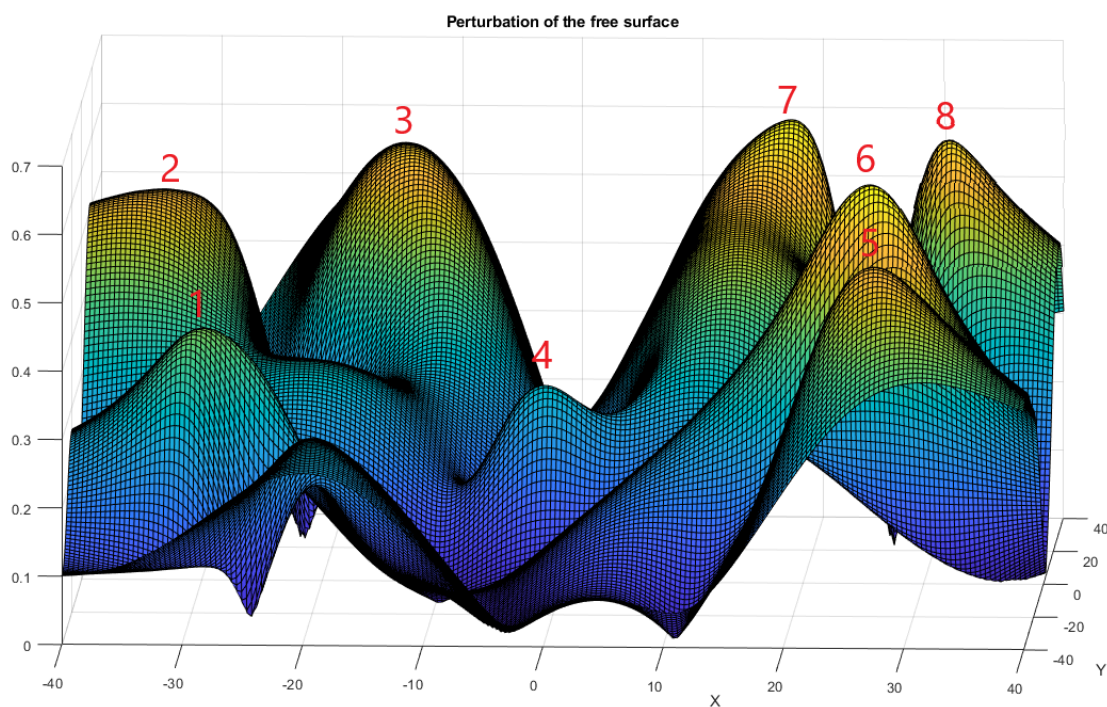
Εικόνα 381: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 382 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 101 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

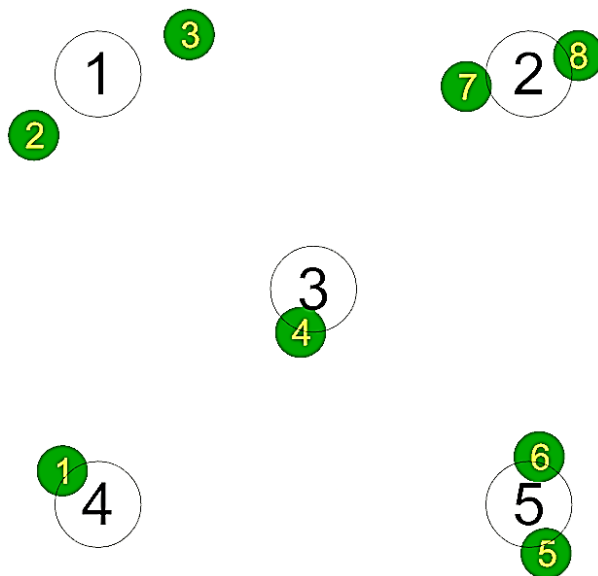
Εικόνα 383 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 101: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.42 m
2	0.52 m
3	0.56 m
4	0.30 m
5	0.54 m
6	0.63 m
7	0.62 m
8	0.58 m



Εικόνα 382: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

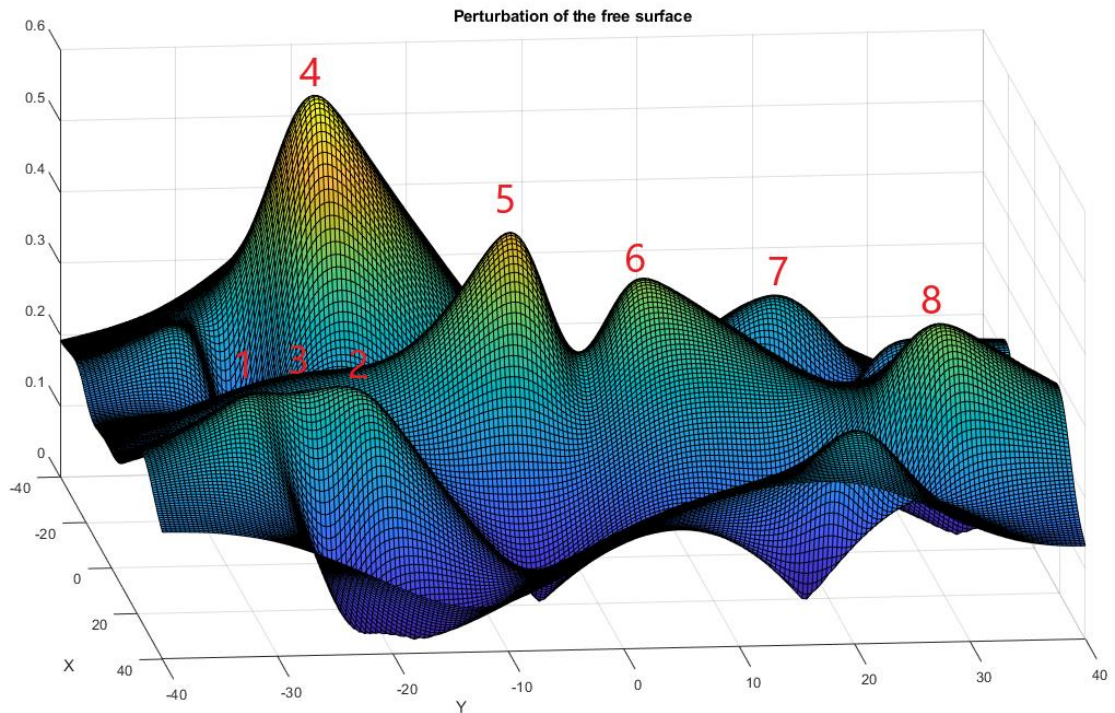


Εικόνα 383: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

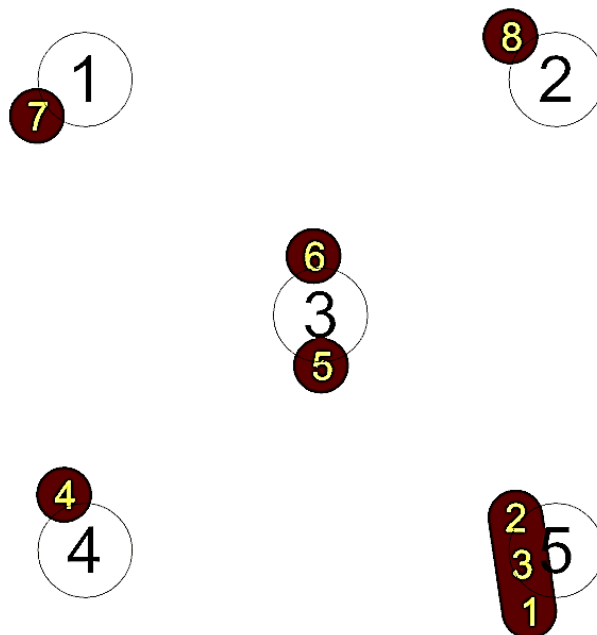
Στην Εικόνα 384 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 102 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 385 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 102: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.31 m
2	0.31 m
3	0.31 m
4	0.57 m
5	0.46 m
6	0.39 m
7	0.27 m
8	0.38 m



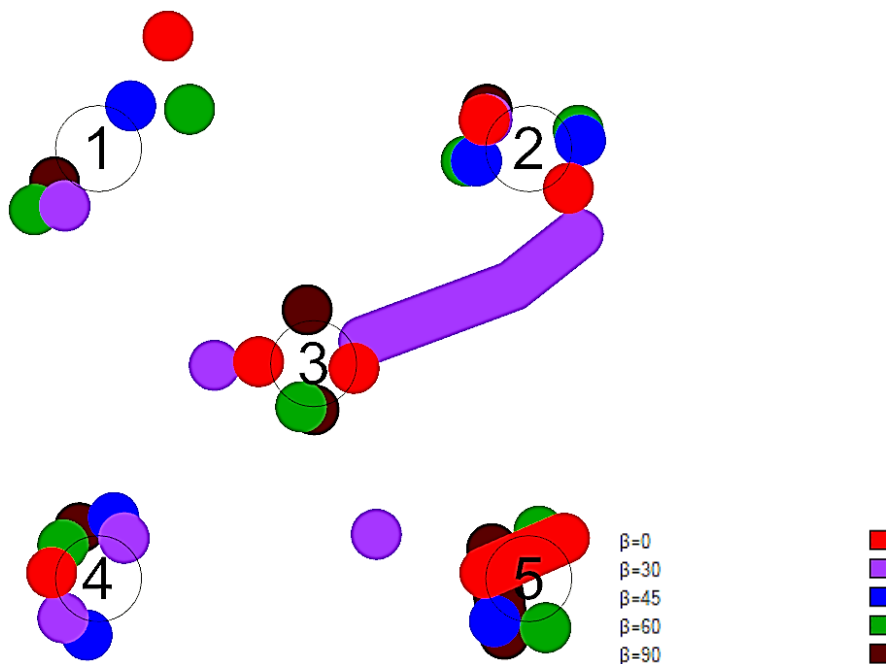
Εικόνα 384: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 3 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



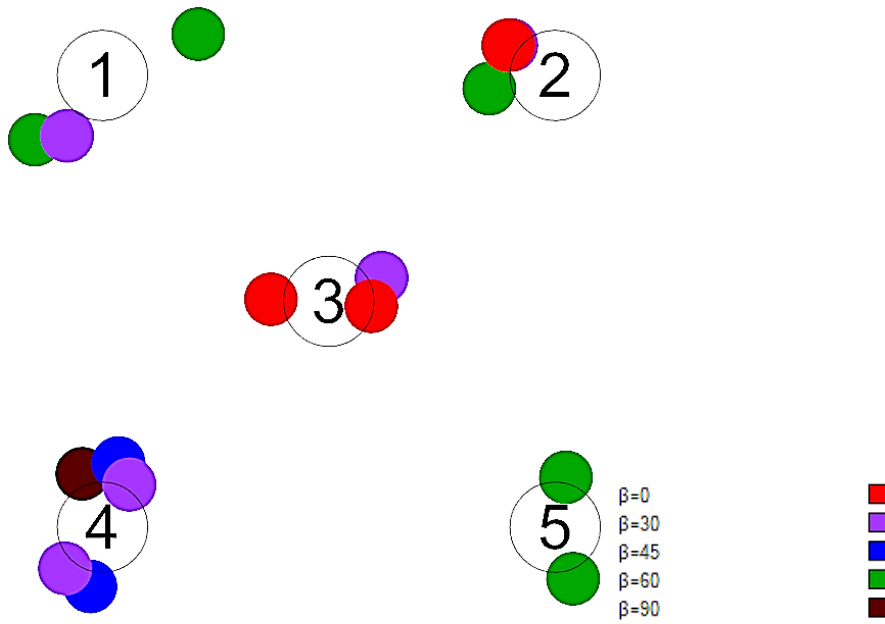
Εικόνα 385: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 386 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 387 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα

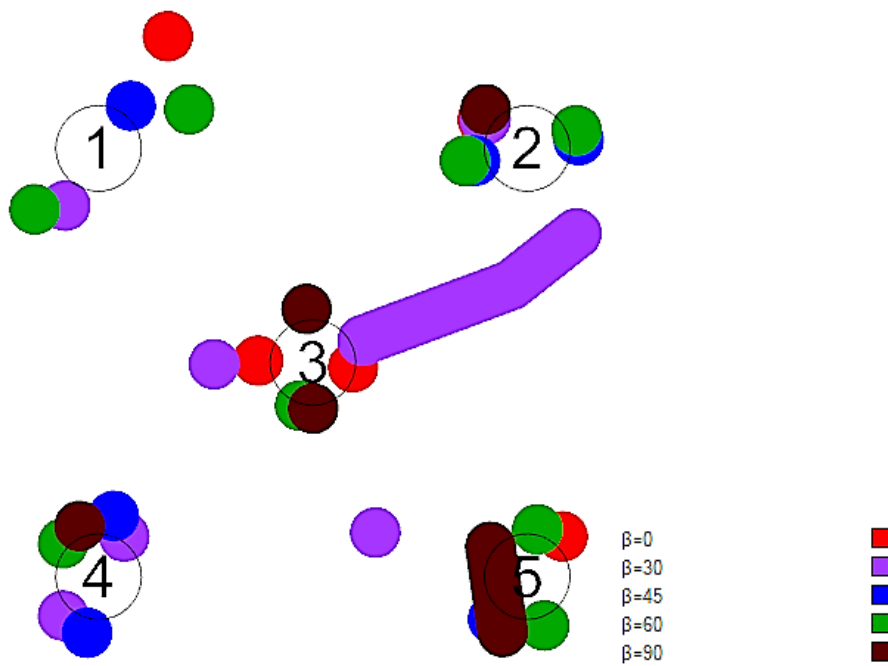
387 συμπεραίνουμε πως και στην περίπτωση των κινούμενων κυλίνδρων μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Οι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας περιορίζονται ως προς τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μπορεί να παραχθεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Δηλαδή, όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε οι συσκευές των κυλίνδρων 2 και 3 μπορούν να παράγουν τη μέγιστη ενέργεια. Αντίστοιχα, οι συσκευές των κυλίνδρων 3 και 4 λειτουργούν με μέγιστη απόδοση όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ$. Ομοίως και οι συσκευές των κυλίνδρων 2 και 5 όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση $\beta = 60^\circ$. Τέλος, η συσκευή του κυλίνδρου 4 μπορεί να παράξει μέγιστη ενέργεια για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού ίσες με $\beta = 45^\circ$ και 90° . Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.6.1, λόγω του ότι οι κύλινδροι της διάταξης δεν βρίσκονται σχετικά κοντά, δεν παρατηρούμε μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 388 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 388 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, στους κυλίνδρους που αναφέρθηκαν. Θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η διάταξη τοποθετώντας τους εξωτερικούς κυλίνδρους πιο κοντά στον κεντρικό και να ελεγχθεί πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών.



Εικόνα 386: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



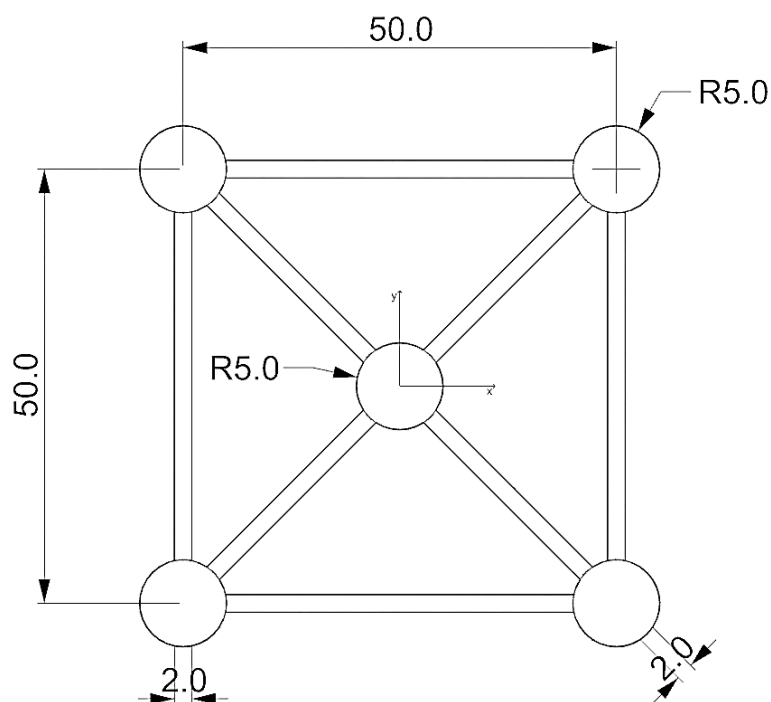
Εικόνα 387: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



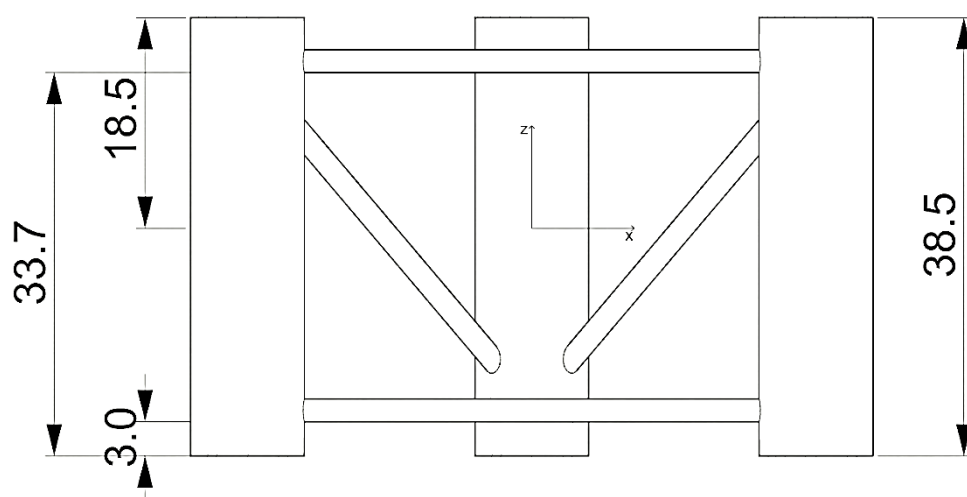
Εικόνα 388: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.6.3 Μελέτη της διάταξης ως ένα σώμα

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή των Mazarakos και Μανρακος (2020), της οποίας οι διαστάσεις φαίνονται στην Εικόνα 389 και στην Εικόνα 390 αντίστοιχα. Η κατασκευή έχει βύθισμα $20m$ και το βάθος της περιοχής εγκατάστασης είναι ίσο με $200m$.

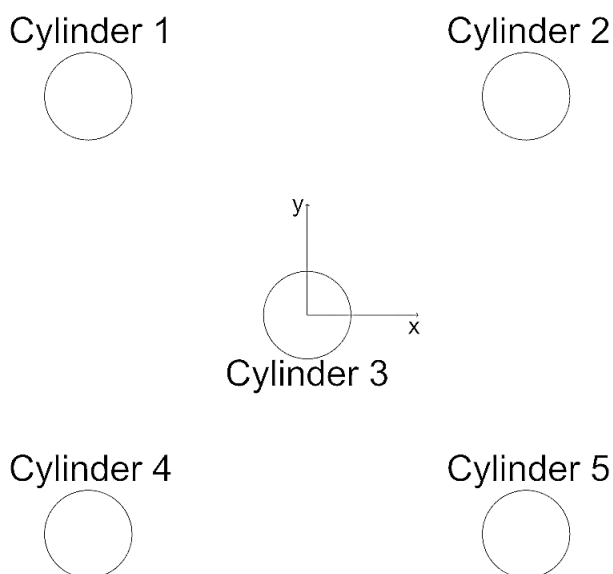


Εικόνα 389: Κάτοψη πλωτής κατασκευής (διαστάσεις σε m)



Εικόνα 390: Πλάγια όψη πλωτής κατασκευής (διαστάσεις σε m)

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Mazarakos και Mantrakos (2020), οι οποίοι κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων.

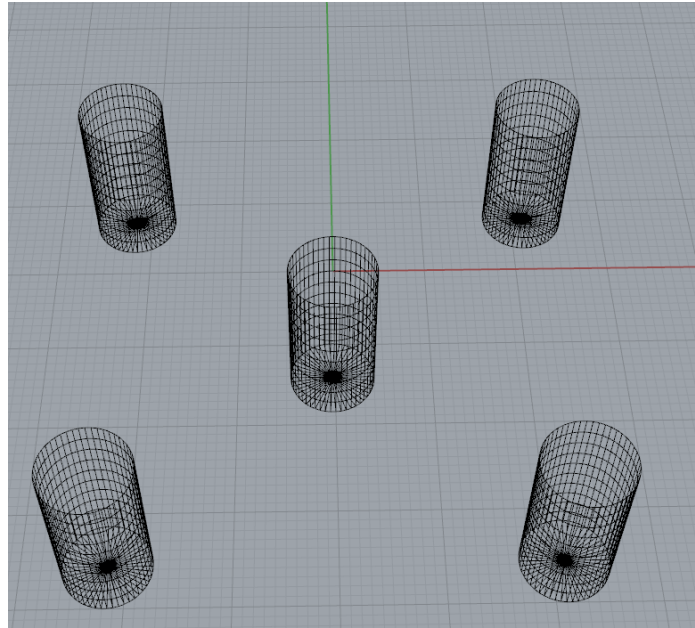


Εικόνα 391: Κάτοψη της πλωτής κατασκευής χωρίς τα μπρακέτα

Στην Εικόνα 391 φαίνεται η κάτοψη της πλωτής κατασκευής χωρίς τα μπρακέτα. Οι συντεταγμένες των κυλίνδρων είναι οι ακόλουθες:

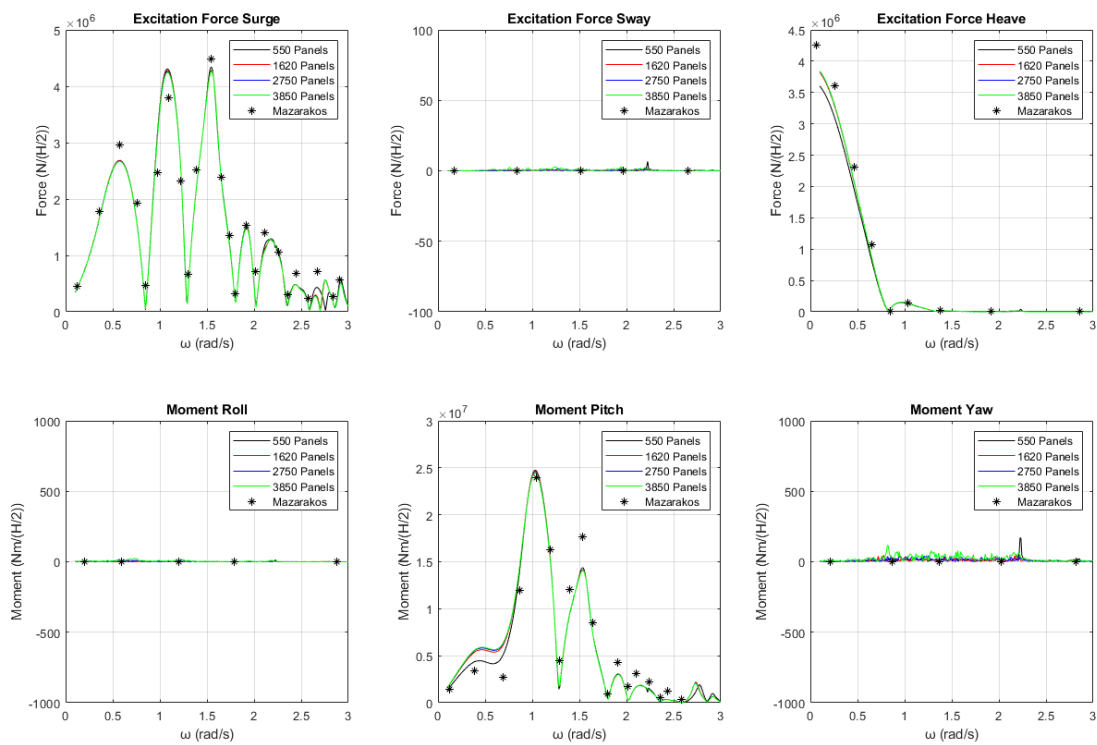
- Κύλινδρος 1 $(-25,25)$
- Κύλινδρος 2 $(25,25)$
- Κύλινδρος 3 $(0,0)$
- Κύλινδρος 4 $(-25,-25)$
- Κύλινδρος 5 $(25,-25)$

Θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή σαν μια διάταξη τεσσάρων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Η διακριτοποίηση του σώματος αποτελείται από 550, 1650, 2750 και 3850 στοιχεία ή αλλιώς κάθε κύλινδρος της διάταξης αποτελείται από 110, 330, 550 και 770 στοιχεία. Στην Εικόνα 392 φαίνεται ένα παράδειγμα από τη διακριτοποίηση.



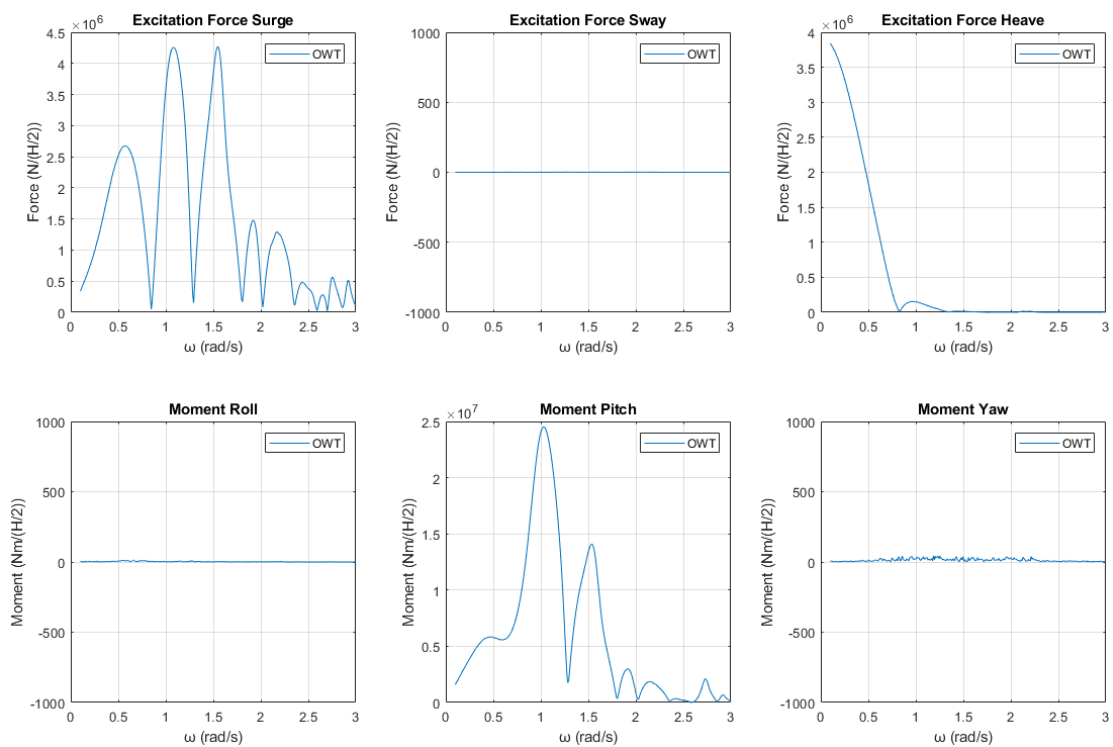
Εικόνα 392: Διακριτοποίηση διάταξης που αποτελείται από 2755 σημεία και 2750 στοιχεία

Στην Εικόνα 393 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης για τους διάφορους αριθμούς στοιχείων που διακριτοποιήθηκε η πλωτή κατασκευή για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$.

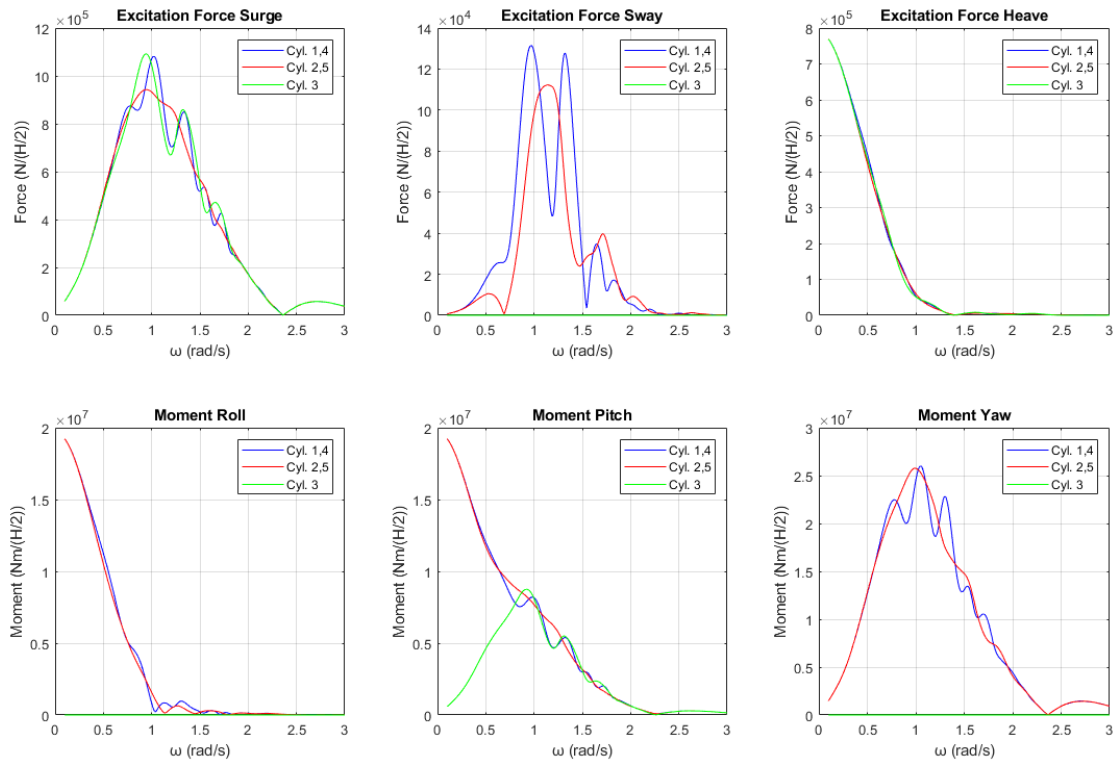


Εικόνα 393: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για διαφορετικό πλήθος στοιχείων

Από την Εικόνα 393 παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα BEM NEMOH συγκλίνουν με αυτά των Mazarakos και Mantrakos (2020). Στην Εικόνα 394 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή και αντίστοιχα στην Εικόνα 395 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



Εικόνα 394: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή

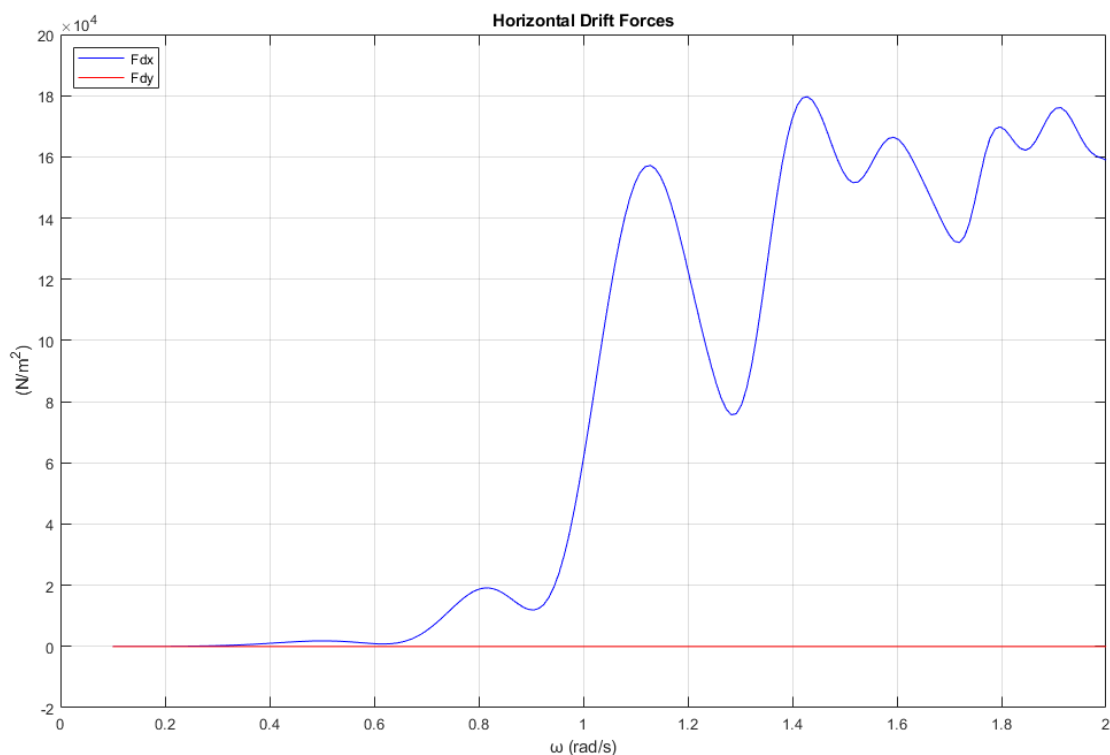


Εικόνα 395: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης

Από την Εικόνα 394 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στην πλωτή κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.55 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.92 \text{ r/s}$. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x το φαινόμενο παρατηρείται στους κυλίνδρους 1, 3 και 4 της διάταξης και αντίστοιχα ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y αυτό παρατηρείται στους κυλίνδρους 1, 2, 4 και 5. Για τους κυλίνδρους 1 και 4, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης, η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.02 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.33 \text{ rad/s}$. Για τον κύλινδρο 3 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.94 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.32 \text{ r/s}$. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για τους κυλίνδρους 1 και 4 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.97 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.32 \text{ r/s}$. Αντίστοιχα, για τους κυλίνδρους 2 και 5 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.14 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.71 \text{ r/s}$. Θα μελετήσουμε την πλωτή κατασκευή ώστε να δούμε πως μεταβάλλεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην πρώτη περίπτωση θα θεωρήσουμε πως η πλωτή κατασκευή είναι ακίνητη (diffraction problem) και δεν μπορεί να ταλαντωθεί, ενώ στην δεύτερη θα υποθέσουμε ότι μπορεί να ταλαντωθεί (radiation problem).

3.6.3.1 Ακίνητη κατασκευή - diffraction problem

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται συνολικά στην πλωτή κατασκευή για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ φαίνονται στην Εικόνα 396, όταν αυτή είναι ακίνητη (diffraction problem).



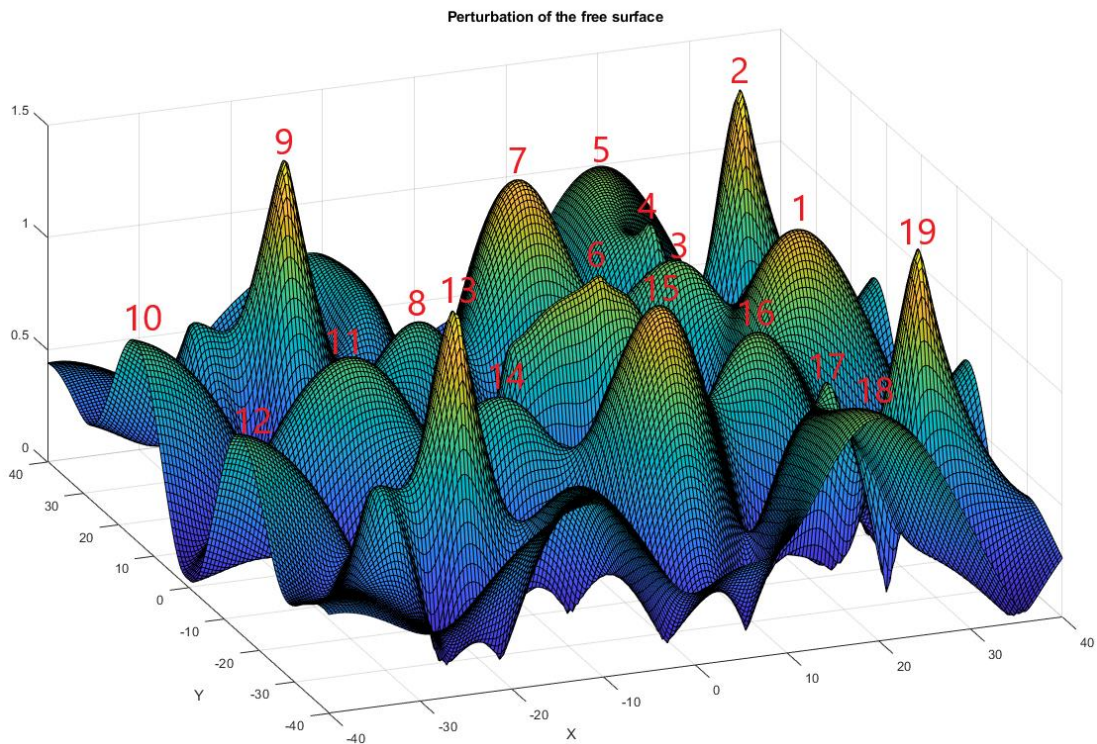
Εικόνα 396: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{dx} και F_{dy} που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή

Στην Εικόνα 397 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 103 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 398 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

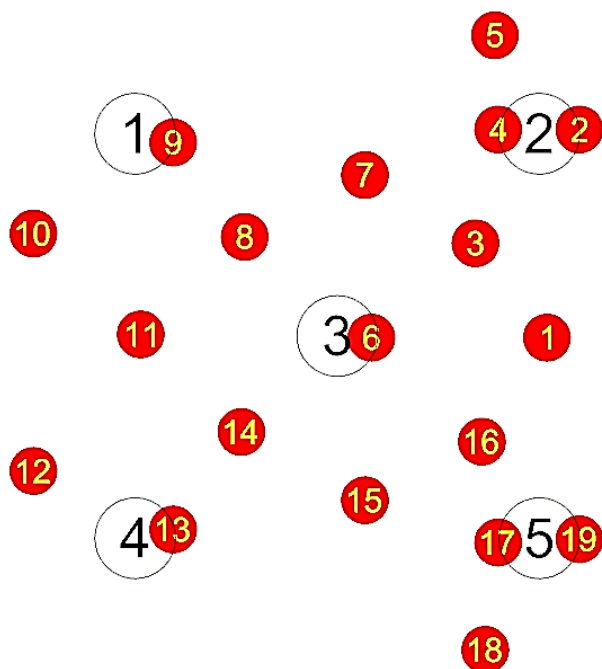
Πίνακας 103: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.23 m
2	1.49 m
3	0.98 m
4	0.94 m

5	1.00 m
6	1.14 m
7	1.30 m
8	0.84 m
9	1.46 m
10	0.81 m
11	0.91 m
12	0.81 m
13	1.46 m
14	0.84 m
15	1.30 m
16	0.98 m
17	0.94 m
18	1.00 m
19	1.49 m

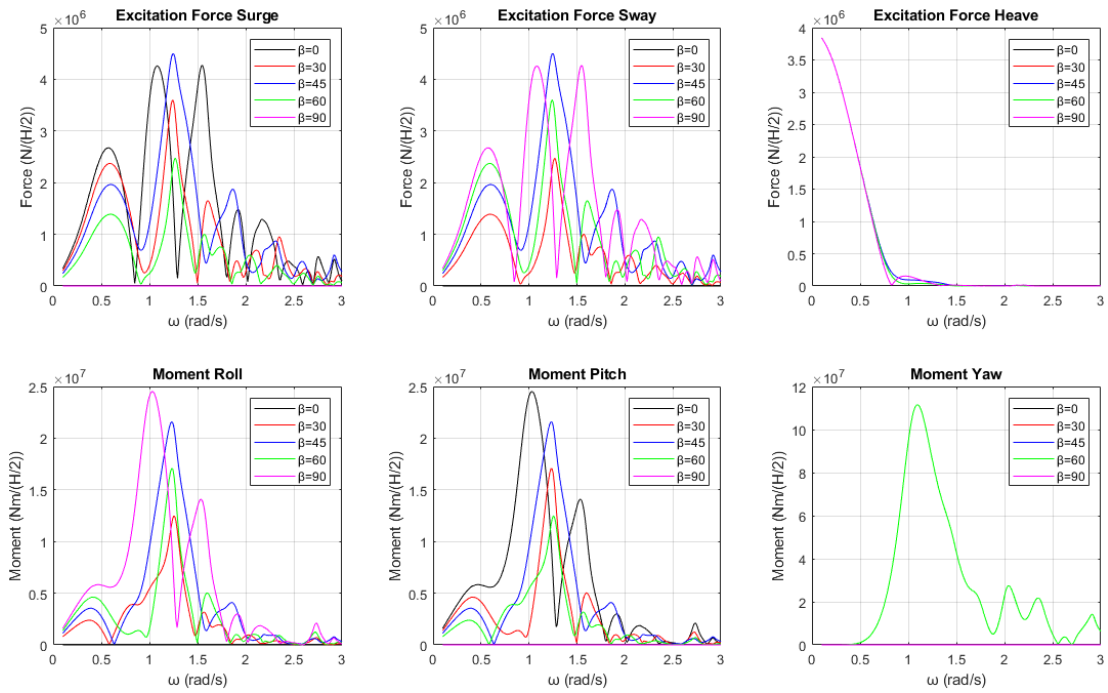


Εικόνα 397: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

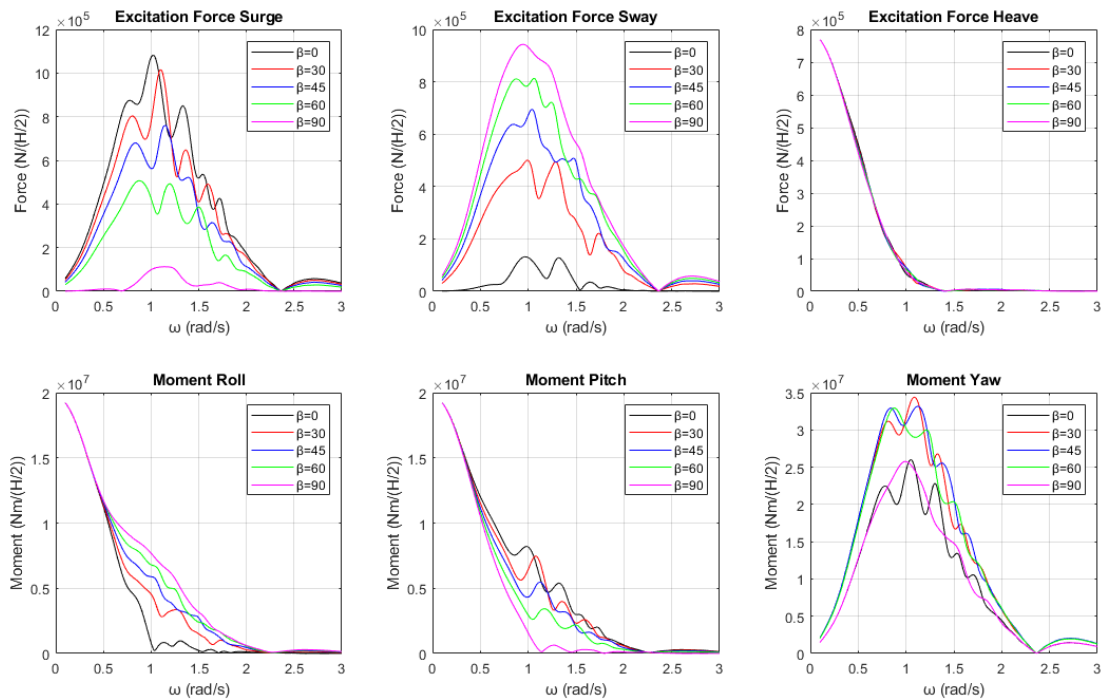


Εικόνα 398: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

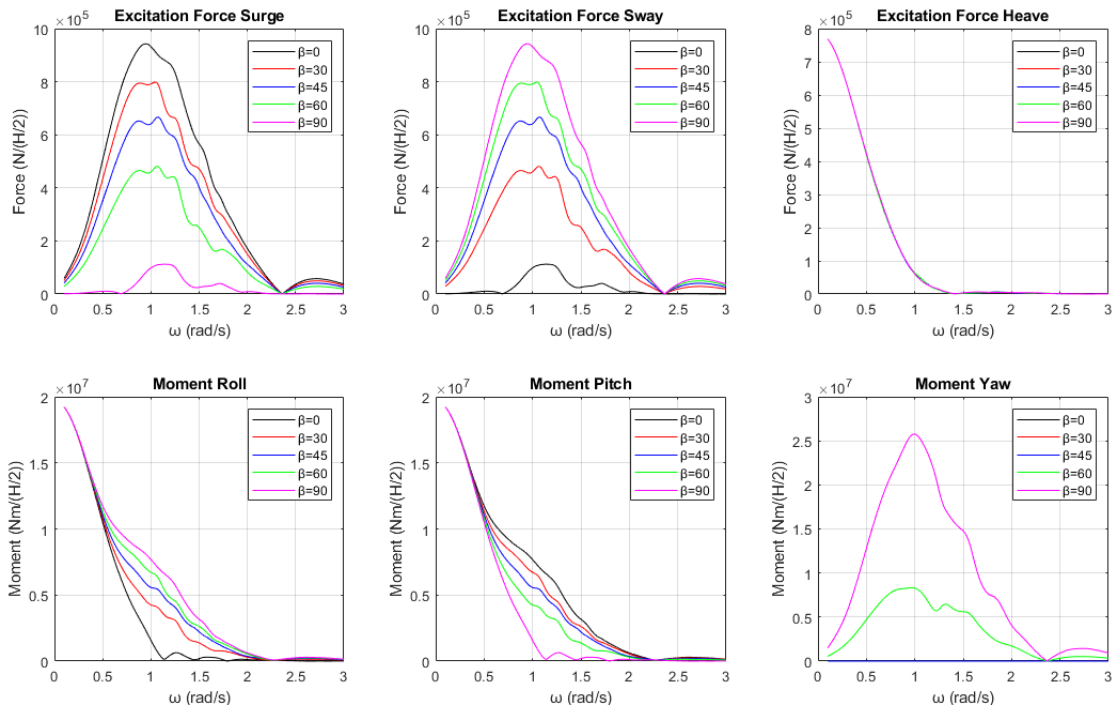
Όπως και με τις προηγούμενες διατάξεις, θα αλλάξουμε τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού έτσι ώστε να ελέγξουμε πως αλλάζει η κατανομή των δυνάμεων διέγερσης και πως αυτή επηρεάζει το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών. Στην Εικόνα 399 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για $\beta = 0^\circ, 30, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Αντίστοιχα στις Εικόνες 400-404 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της πλωτής κατασκευής για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



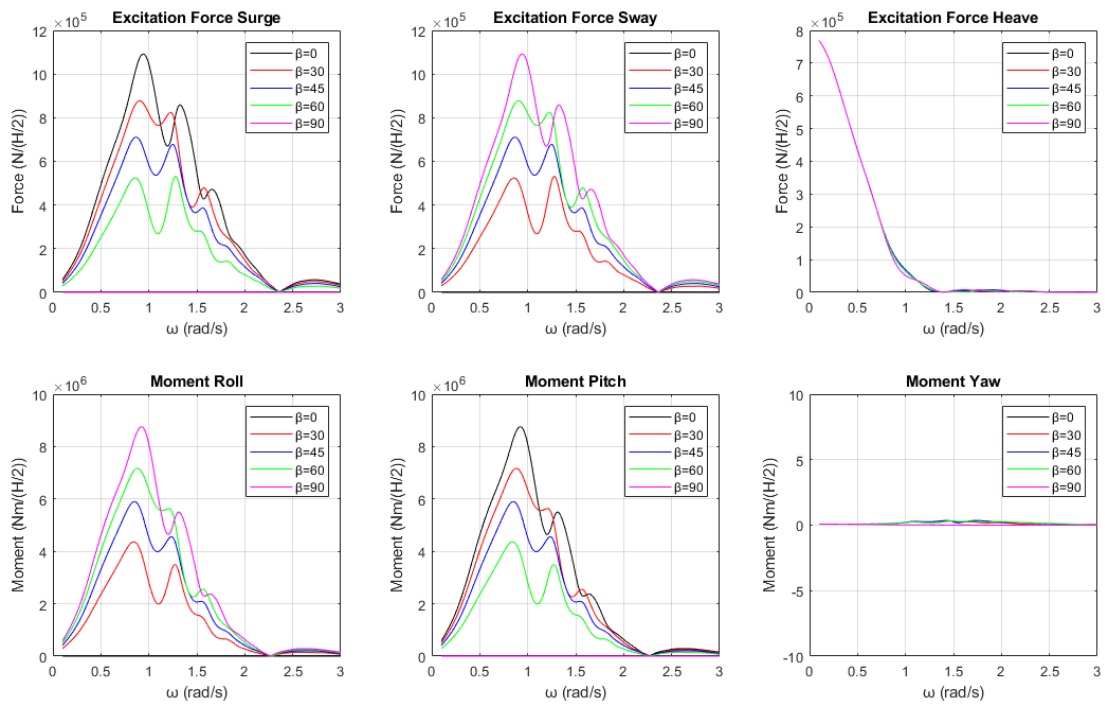
Εικόνα 399: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



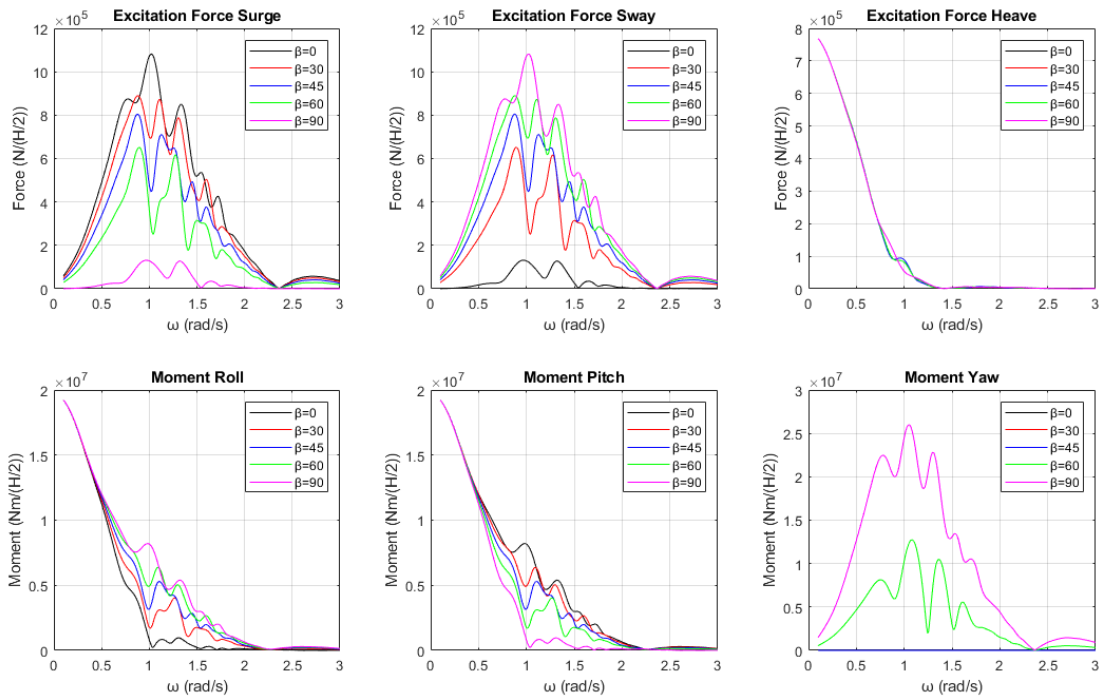
Εικόνα 400: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



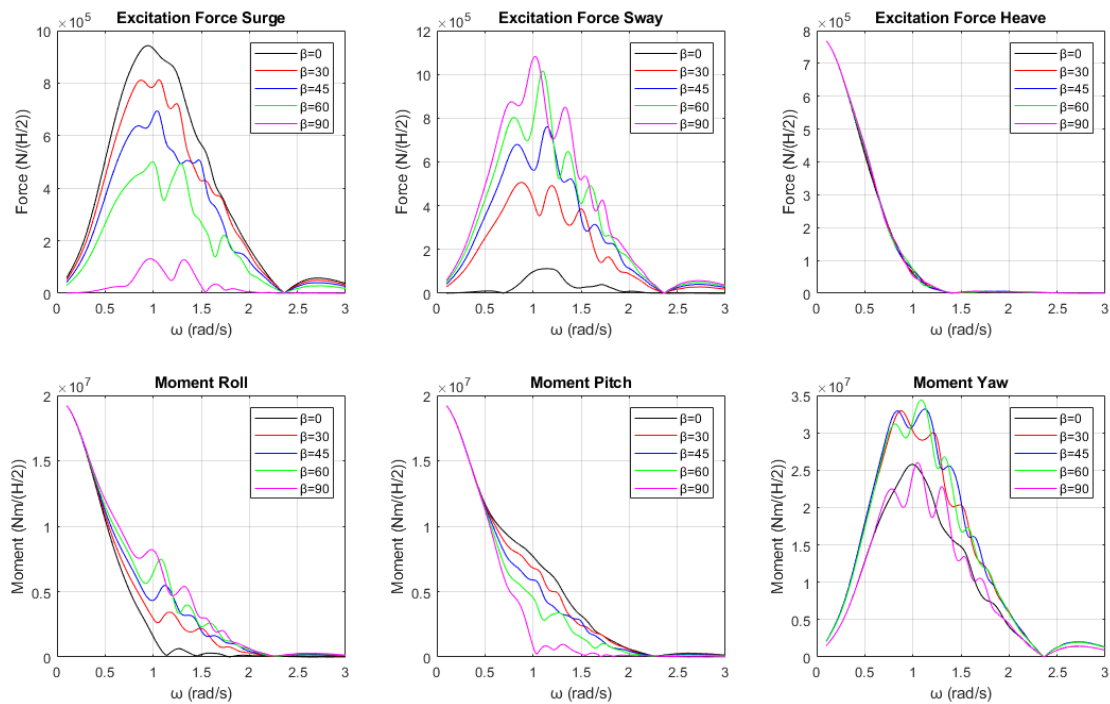
Εικόνα 401: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 402: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 403: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 404: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

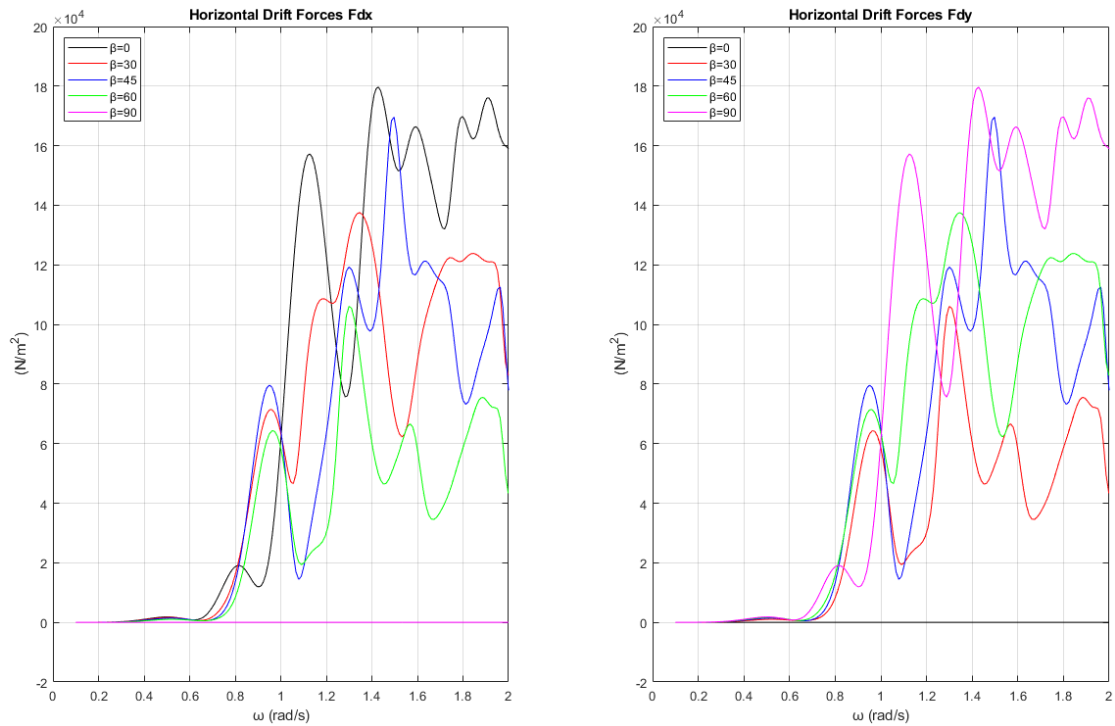
Από τις Εικόνες 399-404 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών επηρεάζεται από τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Στον Πίνακα 104

φαίνονται οι κατευθύνσεις που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες φορτίσεις και οι αντίστοιχες συχνότητες.

Πίνακας 104: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.55$	$\cong 1.92$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.24$	$\cong 1.61$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.24$	$\cong 1.76$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.26$	$\cong 1.57$
$\beta = 90^\circ$	–	–
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.26$	$\cong 1.57$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.24$	$\cong 1.76$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.24$	$\cong 1.61$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.55$	$\cong 1.92$

Από τον Πίνακα 104 παρατηρούμε πως ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x , εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού που μελετήθηκαν. Όμως, παρόλο που εμφανίζεται σε όλες τις γωνίες δεν σημαίνει ότι ασκούνται και οι μεγαλύτερες δυνάμεις. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 45^\circ$, τότε ασκούνται στη διάταξη οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x ακαι F_y για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το γεγονός πως ικανοποιείται και η συνθήκη Dirichlet για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν, κάτι το οποίο σε προηγούμενες διατάξεις παρατηρήσαμε ότι δεν ίσχυε πάντα. Στην Εικόνα 405 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή.



Εικόνα 405: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην πλωτή κατασκευή

Λόγω του ότι δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 105 φαίνεται η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 105: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

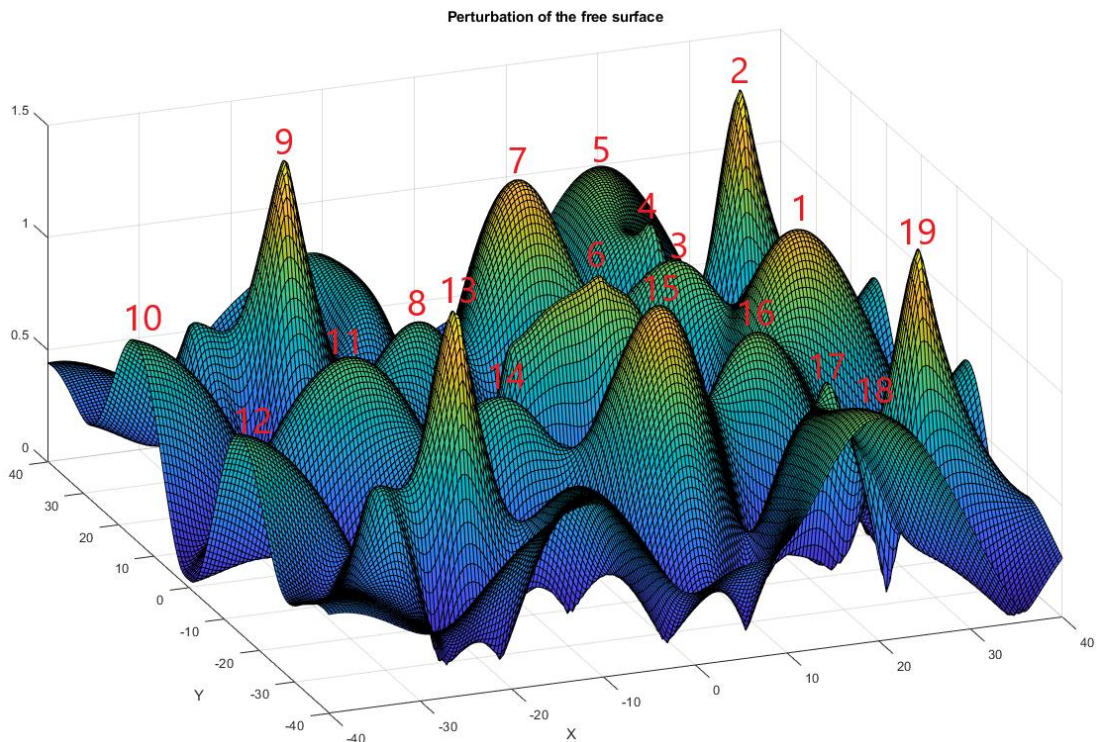
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.55$	$F_{x\zeta}$	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.24$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.24$	F_x/F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.24$	F_x	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.55$	F_x	NAI

Στην Εικόνα 406 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 106 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 407 φαίνονται οι θέσεις

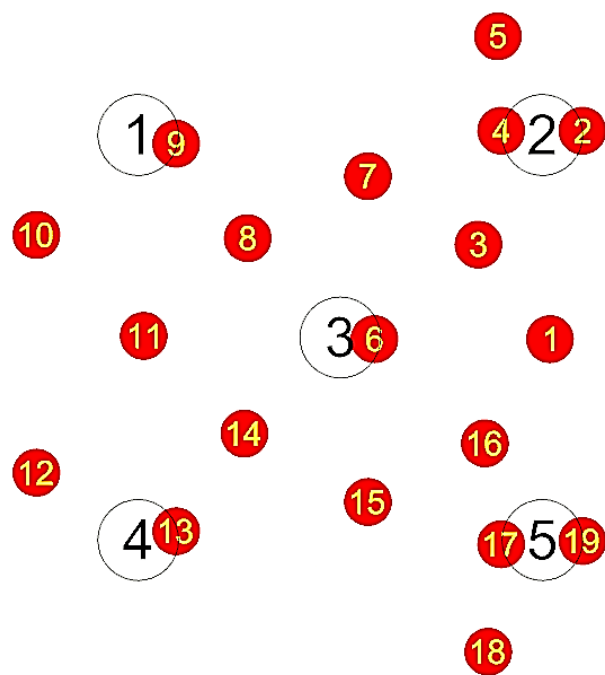
των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 106: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.23 <i>m</i>
2	1.49 <i>m</i>
3	0.98 <i>m</i>
4	0.94 <i>m</i>
5	1.00 <i>m</i>
6	1.14 <i>m</i>
7	1.30 <i>m</i>
8	0.84 <i>m</i>
9	1.46 <i>m</i>
10	0.81 <i>m</i>
11	0.91 <i>m</i>
12	0.81 <i>m</i>
13	1.46 <i>m</i>
14	0.84 <i>m</i>
15	1.30 <i>m</i>
16	0.98 <i>m</i>
17	0.94 <i>m</i>
18	1.00 <i>m</i>
19	1.49 <i>m</i>



Εικόνα 406: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



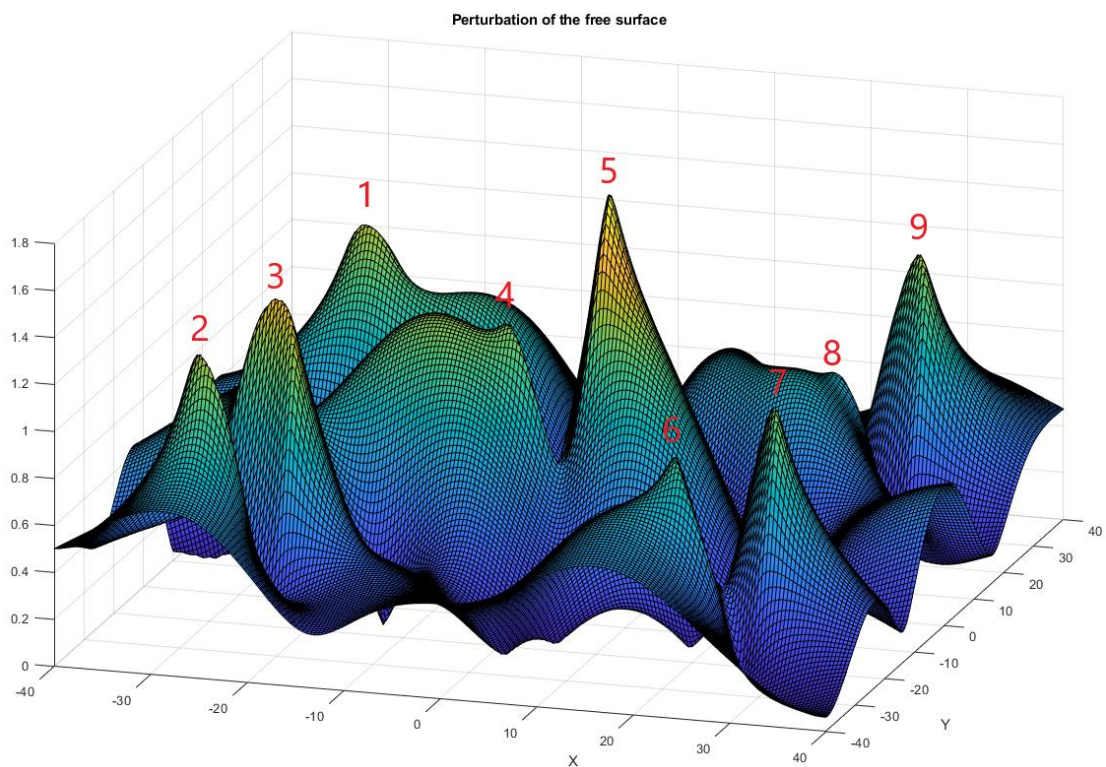
Εικόνα 407: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 408 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 107

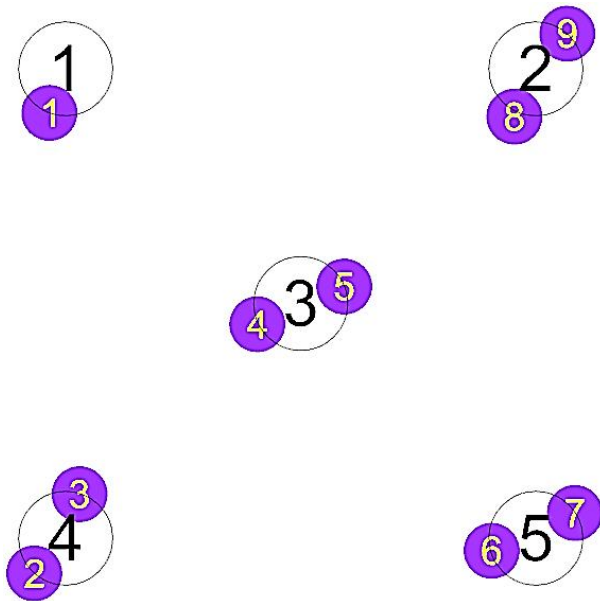
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 409 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 107: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.24 m
2	1.24 m
3	1.39 m
4	1.15 m
5	1.69 m
6	0.94 m
7	1.15 m
8	0.78 m
9	1.22 m



Εικόνα 408: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

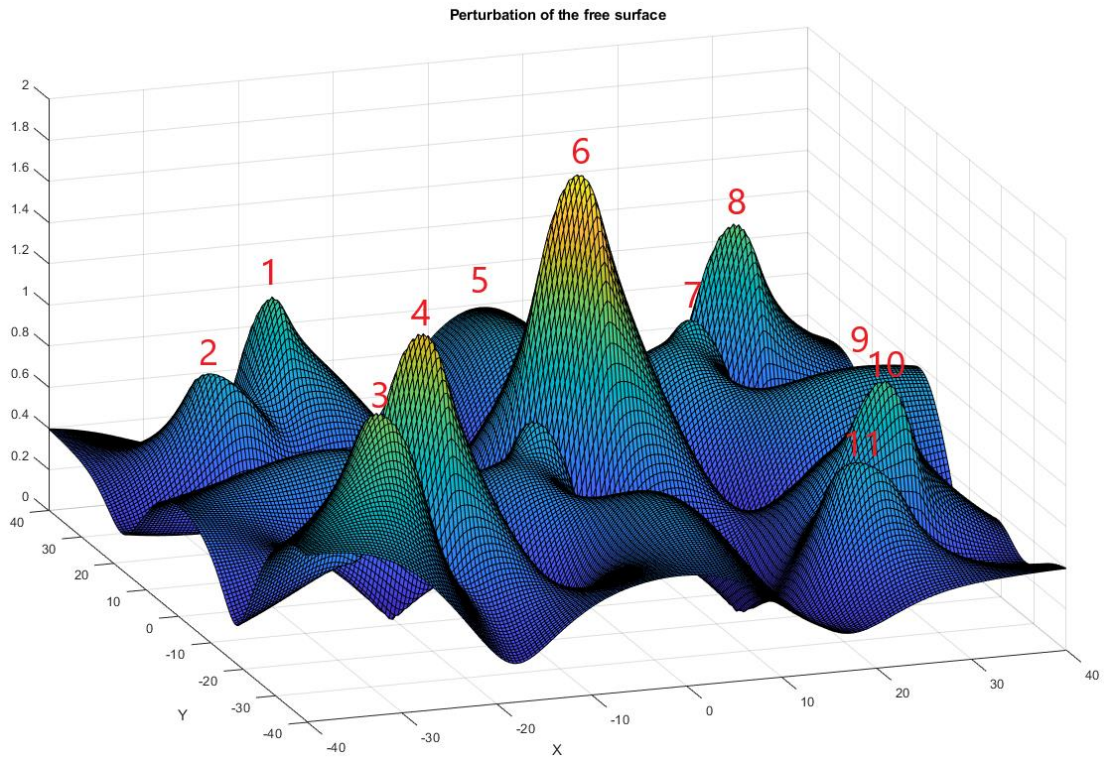


Εικόνα 409: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

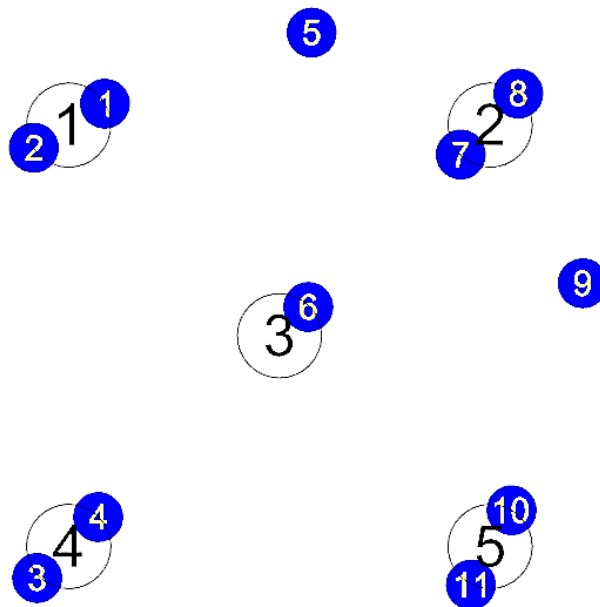
Στην Εικόνα 410 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 108 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 411 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 108: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.11 m
2	0.84 m
3	1.29 m
4	1.57 m
5	0.81 m
6	1.90 m
7	0.89 m
8	1.24 m
9	0.81m
10	1.11 m
11	0.84 m



Εικόνα 410: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



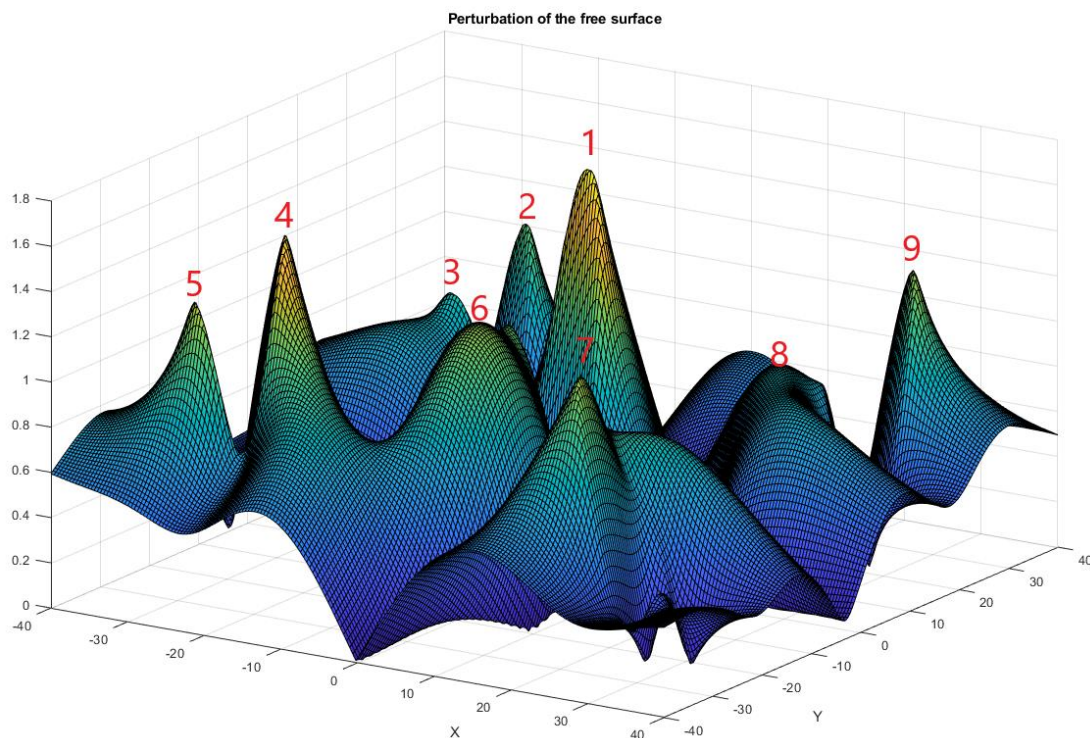
Εικόνα 411: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 412 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 109

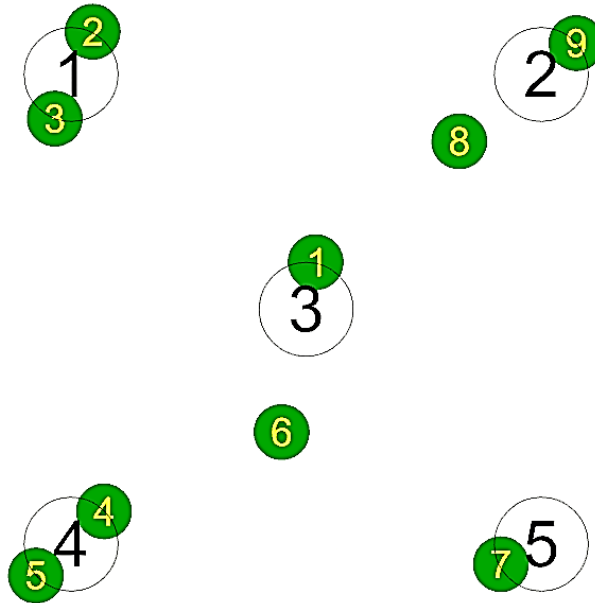
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 413 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 109: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.76 m
2	1.15 m
3	0.91 m
4	1.57 m
5	1.31 m
6	1.22 m
7	1.22 m
8	0.85 m
9	1.25 m



Εικόνα 412: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



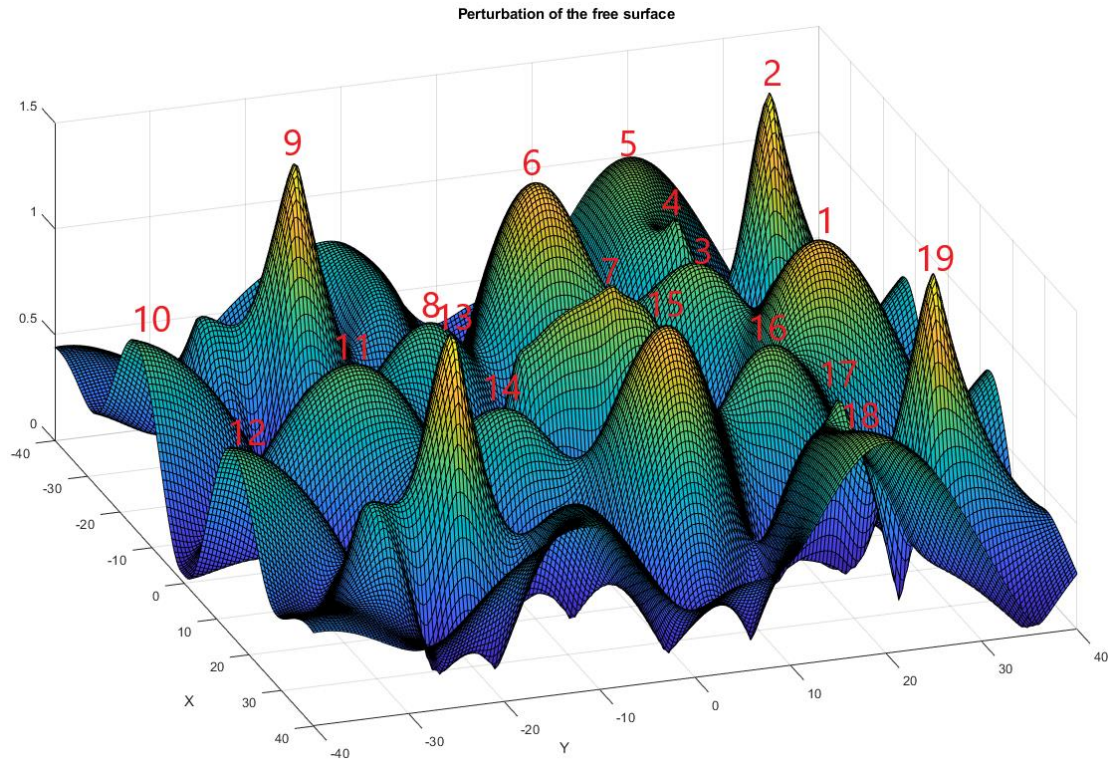
Εικόνα 413: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις κάθετες δυνάμεις διέγερσης

Στην Εικόνα 414 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 110 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 415 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

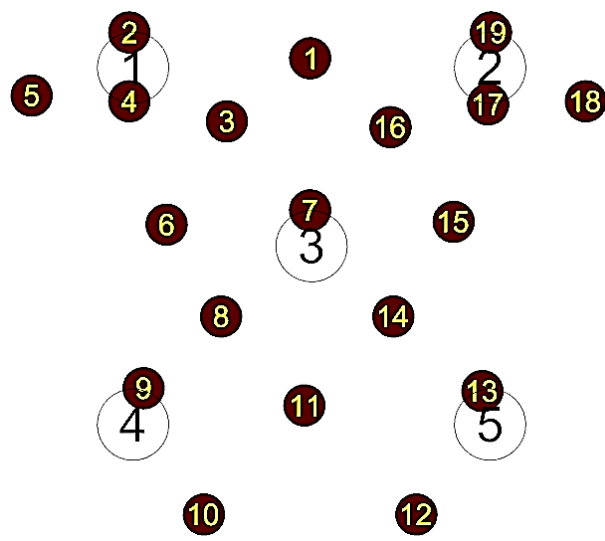
Πίνακας 110: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.24 m
2	1.49 m
3	0.98 m
4	0.95 m
5	1.00m
6	1.30 m
7	1.15 m
8	0.85 m
9	1.46 m
10	0.85m
11	0.92 m
12	0.85 m
13	1.46 m
14	0.85 m
15	1.30m

16	0.98 m
17	0.94 m
18	1.00 m
19	1.49 m

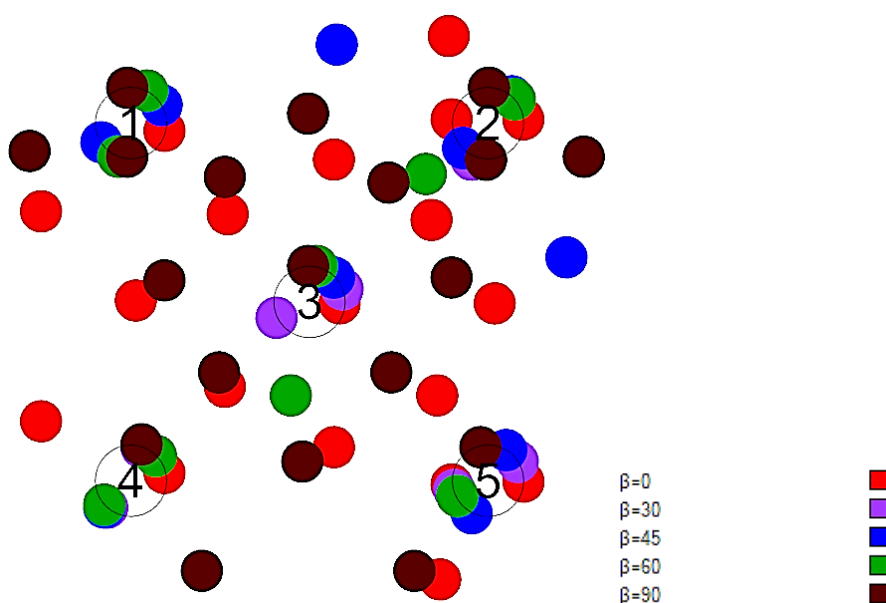


Εικόνα 414: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

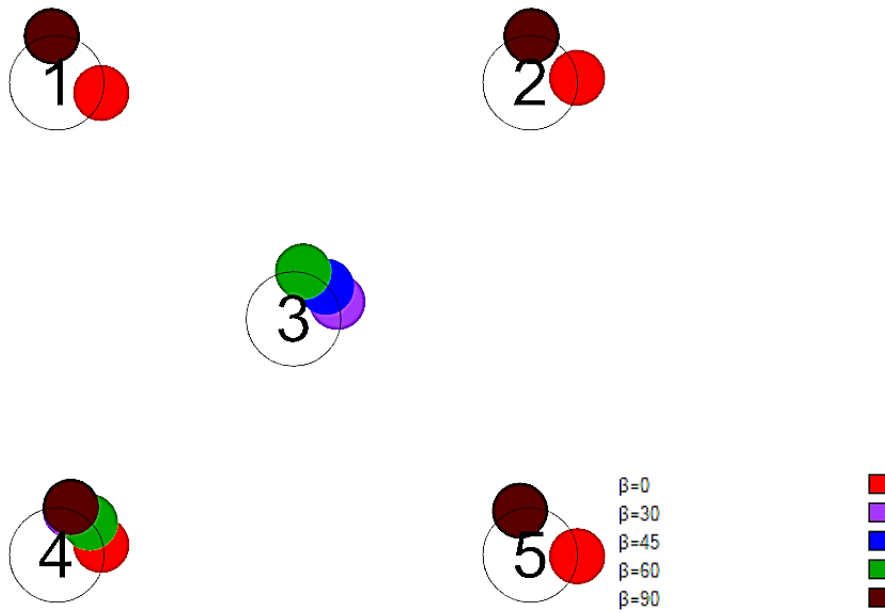


Εικόνα 415: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

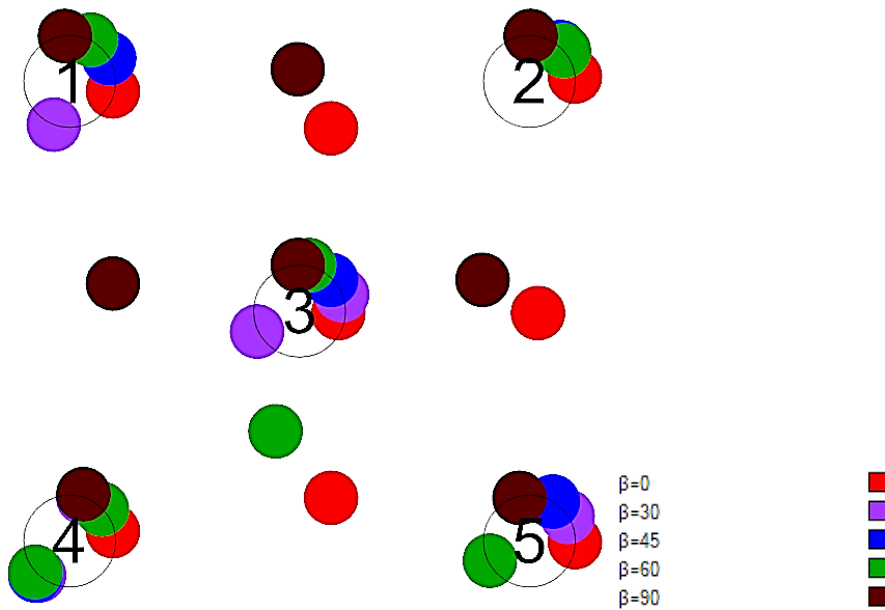
Στην Εικόνα 416 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 417 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Παρατηρούμε πως οι συσκευές των εξωτερικών κυλίνδρων λειτουργούν με μέγιστη απόδοση όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$ και 90° . Η συσκευή του κυλίνδρου 4, όμως, μπορεί να παράξει ηλεκτρική ενέργεια και για τις υπόλοιπες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού. Επιπρόσθετα από την Εικόνα 417, παρατηρούμε πως η συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας του εσωτερικού κυλίνδρου λειτουργεί στο μέγιστο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ και 60° . Η Εικόνα 417 αποτελεί έναν οδηγό ως προς το ποια γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού σε κάθε συσκευή, παράγει μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως, για να είναι πιο ακριβείς οι θέσεις των συσκευών πρέπει να αναπαραστήσουμε τις κορυφές εκείνες που μπορούν να αξιοποιηθούν. Στην Εικόνα 418 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 418 παρατηρούμε πως για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού οι συσκευές της πλωτής κατασκευής μπορούν να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.6.1, η πλωτή κατασκευή θα μπορούσε να μελετηθεί με τους κυλίνδρους να βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους, ώστε να ελεγχθεί πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών από την απόσταση των κυλίνδρων και αντίστοιχα το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.



Εικόνα 416: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 417: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

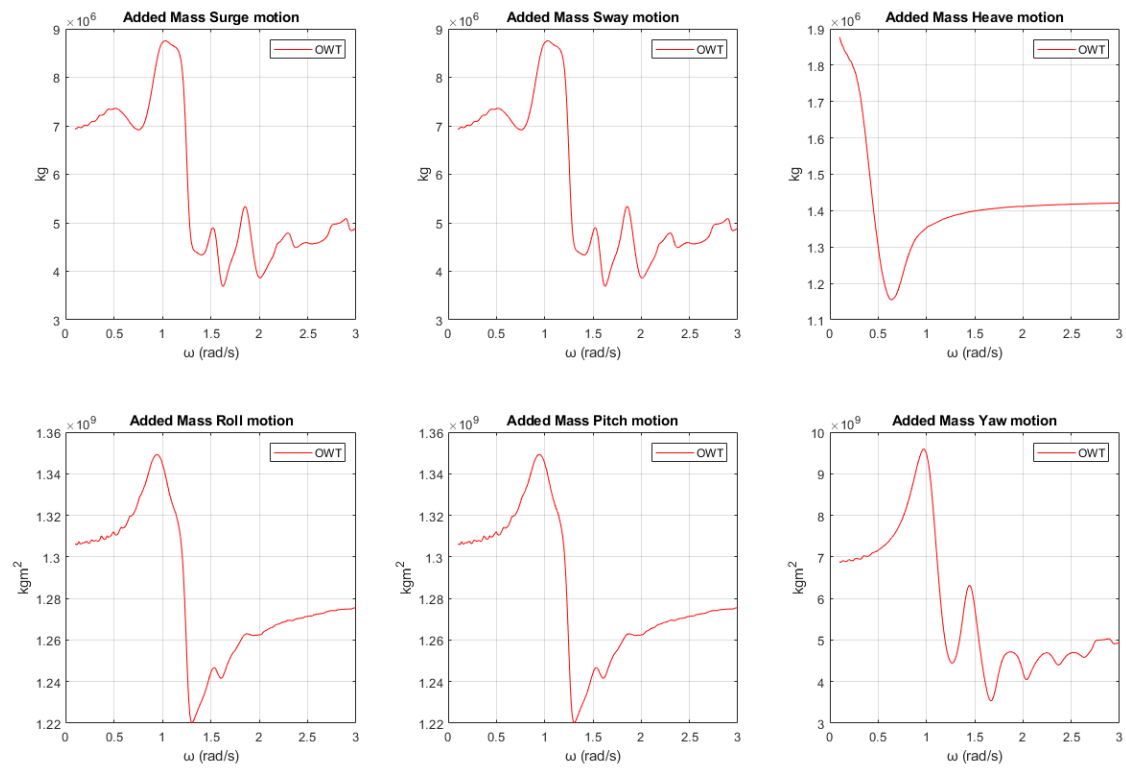


Εικόνα 418: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

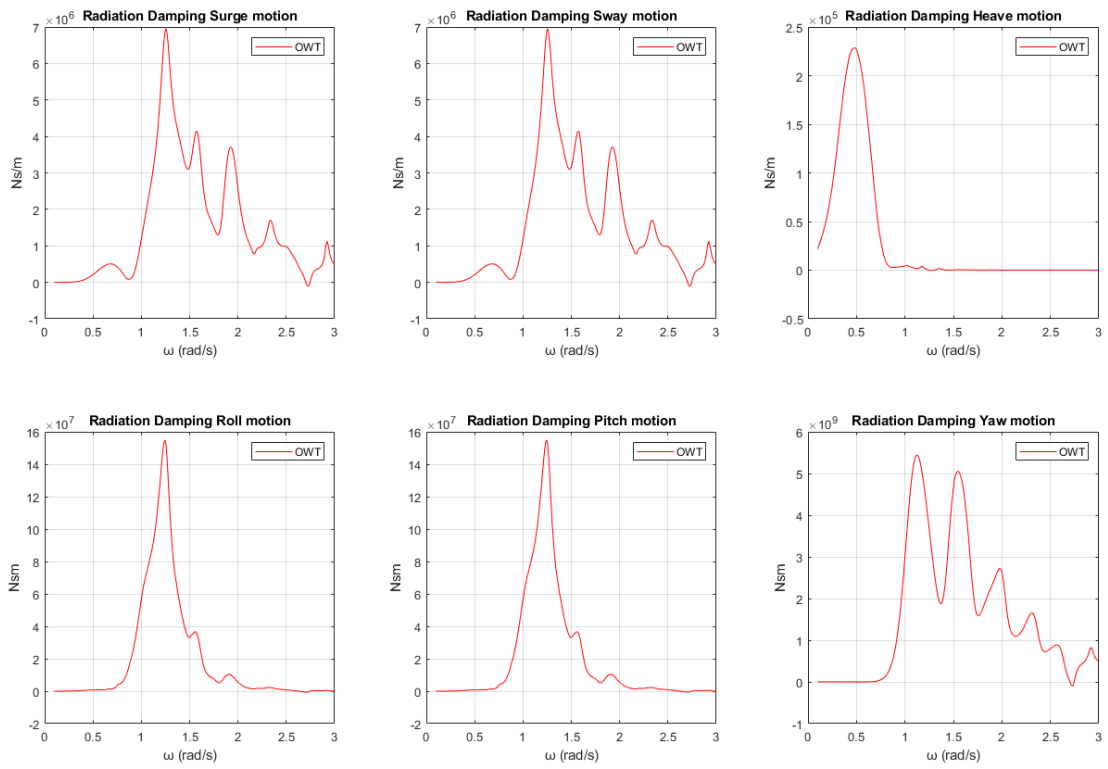
3.6.3.2 Η πλωτή κατασκευή ταλαντώνεται ελεύθερα – radiation problem

Στην Εικόνα 419 φαίνονται οι συντελεστές πρόσθετης μάζας της πλωτής κατασκευής και αντίστοιχα στην Εικόνα 420 φαίνονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

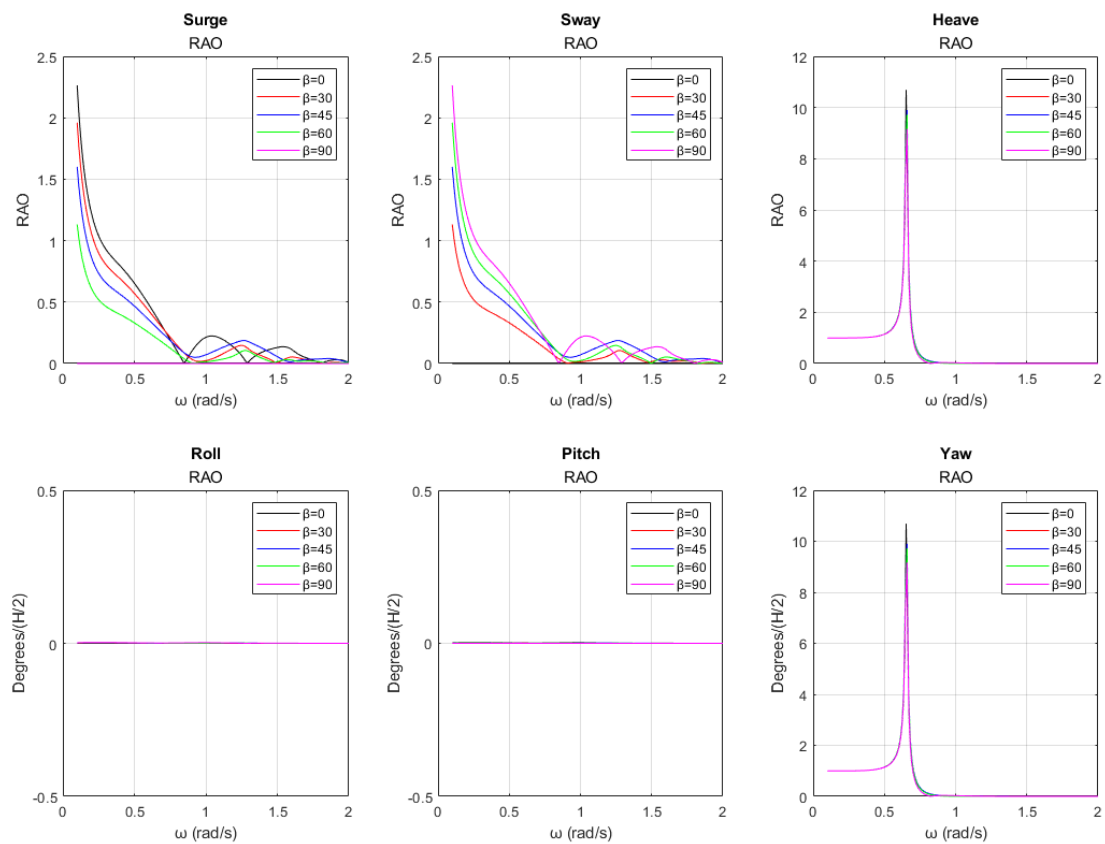
Οι κινήσεις της πλωτής κατασκευής ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας φαίνονται στην Εικόνα 421 για όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 419: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ της πλωτής κατασκευής

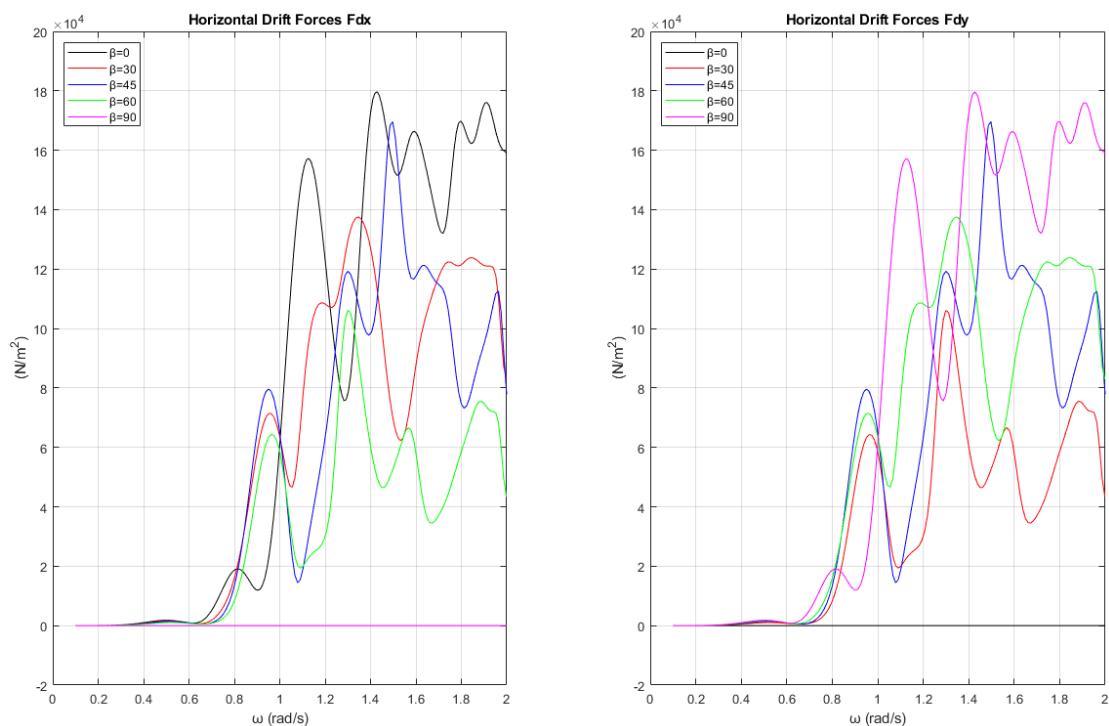


Εικόνα 420: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ της πλωτής κατασκευής

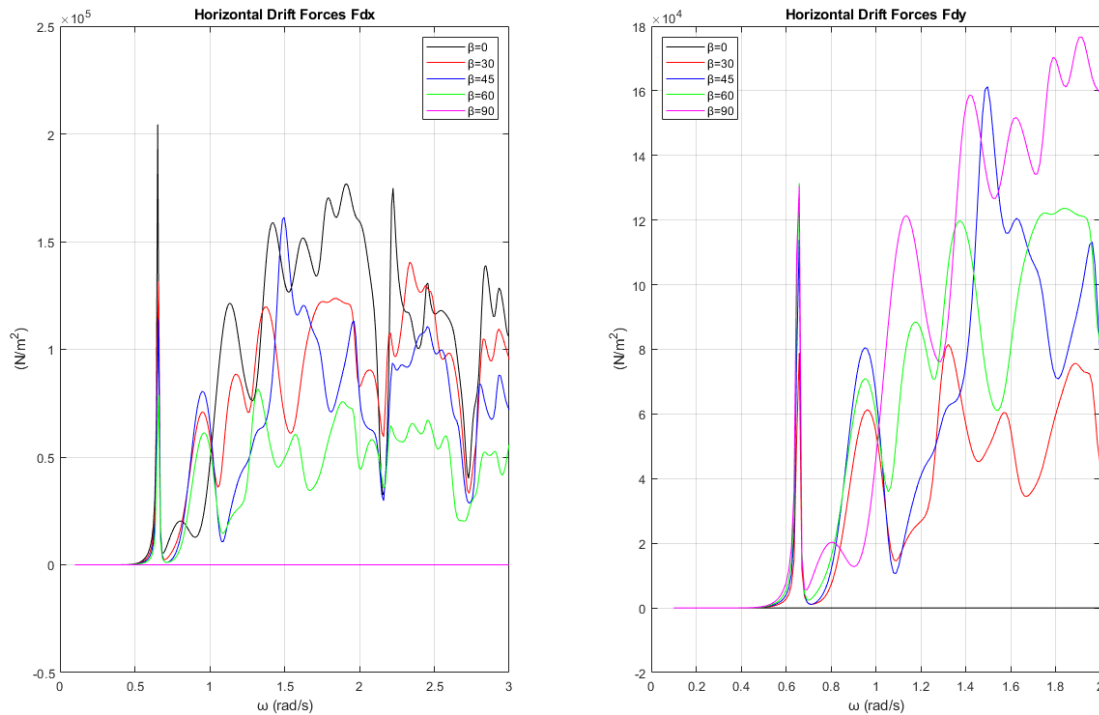


Εικόνα 421: Κινήσεις της πλωτής κατασκευής ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν όταν αυτοί κινούνται, όμως αλλάζουν οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 422 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Αντίστοιχα στην Εικόνα 423 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη, λόγω των κινήσεων της πλωτής κατασκευής, για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



Εικόνα 422: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem)



Εικόνα 423: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

Παρόλο που το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται και ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x αλλά και τις F_y , πρέπει να ελέγξουμε ως προς ποια κατεύθυνση εμφανίζονται οι μεγαλύτερες φορτίσεις συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού. Η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει ώστε να παρουσιάσουμε τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ως προς τις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης και ικανοποιούν τη συνθήκη Neuman. Στον Πίνακα 111 φαίνονται ως προς ποια κατεύθυνση ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού.

Πίνακας 111: Κατεύθυνση που ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης για τις συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann

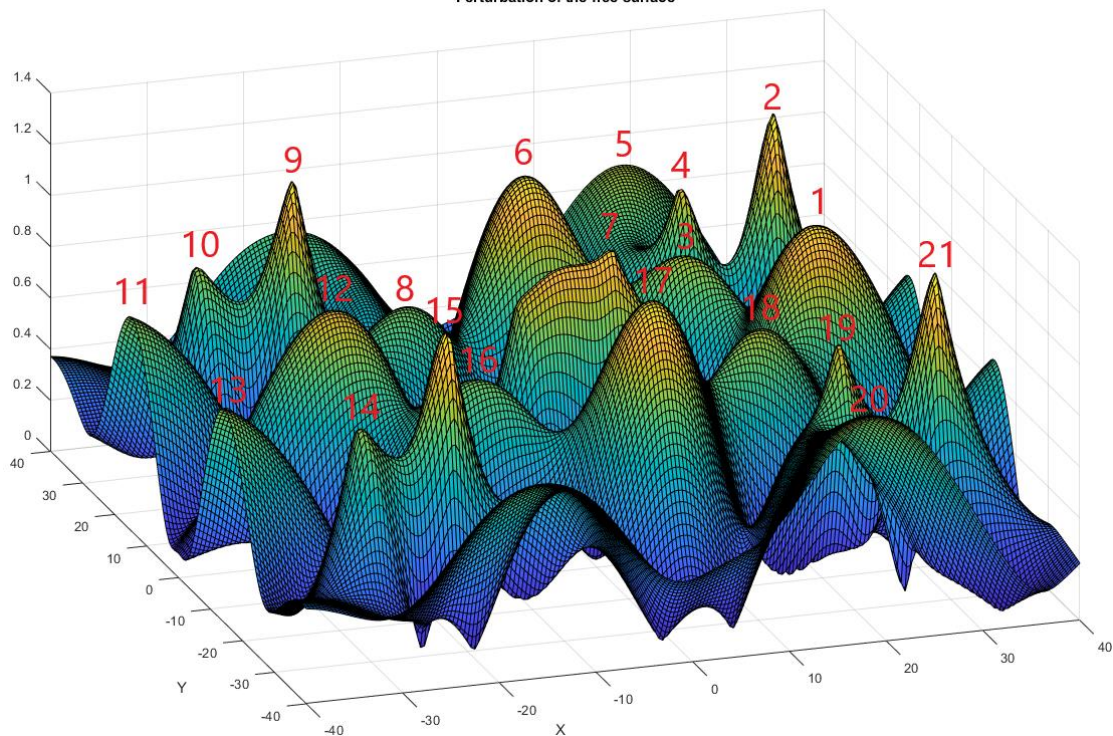
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.55$	F_x	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.24$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.24$	F_x/F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.24$	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.55$	F_y	NAI

Στην Εικόνα 424 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 112 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 425 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

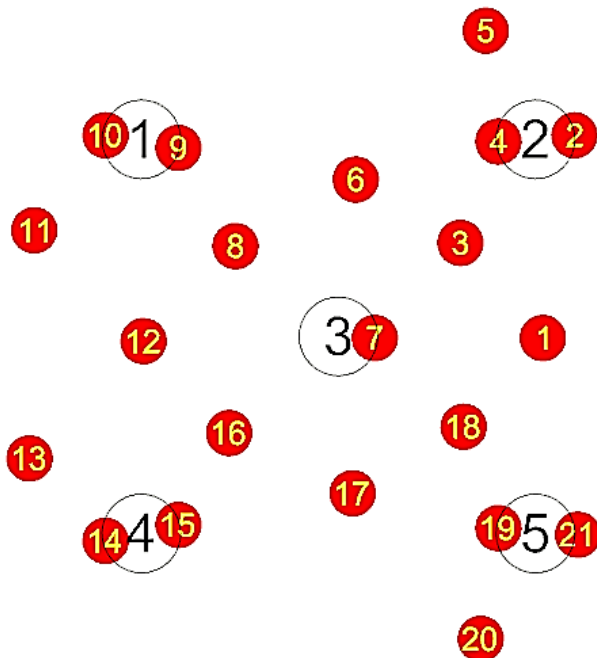
Πίνακας 112: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.10 m
2	1.21 m
3	0.88 m
4	0.96 m
5	0.87 m
6	1.15 m
7	1.09 m
8	0.80 m
9	1.17 m
10	0.85 m
11	0.82 m
12	0.97 m
13	0.82 m
14	0.85 m
15	1.17 m
16	0.80 m
17	1.15 m
18	0.88 m
19	0.96 m
20	0.87 m
21	1.21 m

Perturbation of the free surface



Εικόνα 424: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



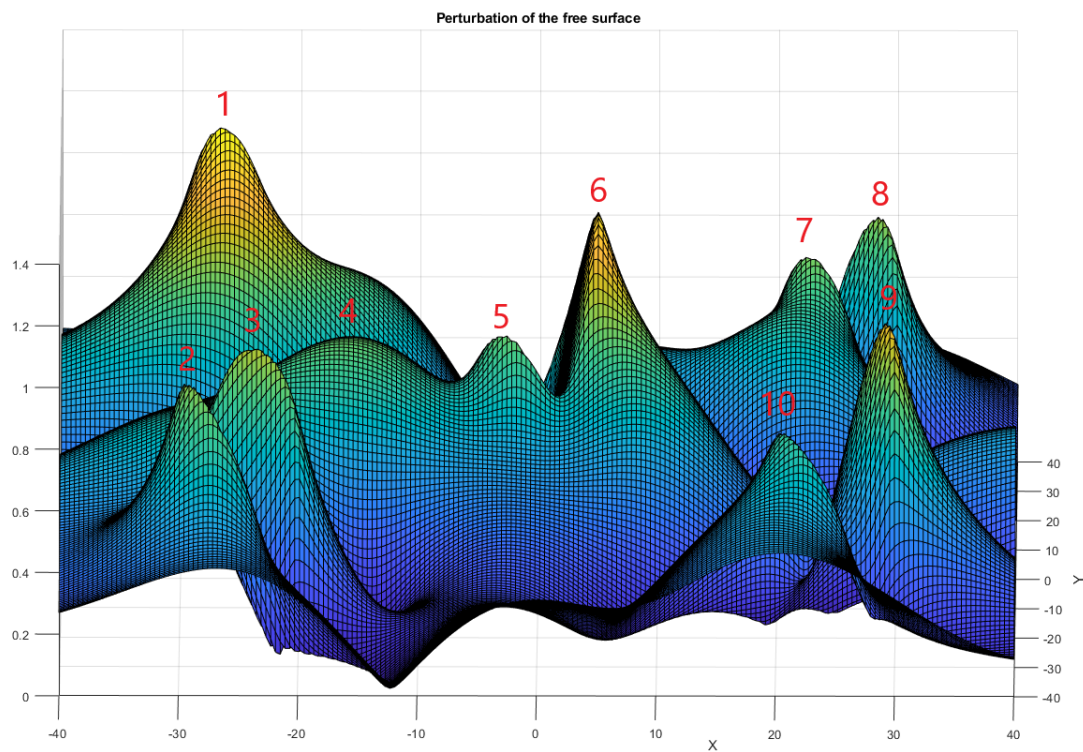
Εικόνα 425: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 426 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 113

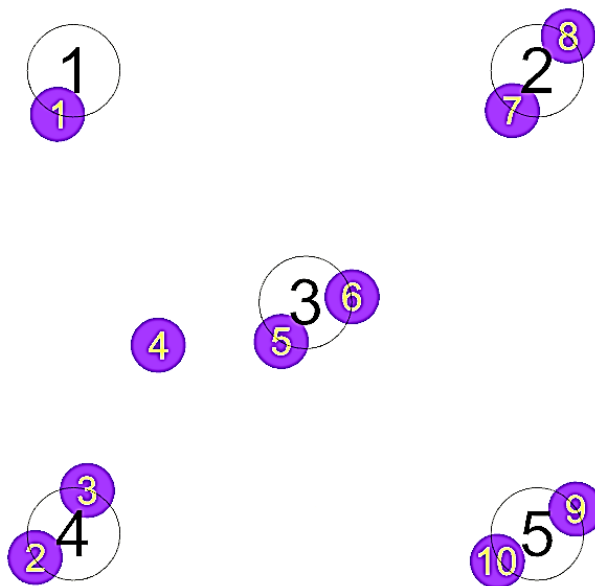
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 427 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 113: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.27 m
2	0.89 m
3	0.94 m
4	0.80 m
5	0.83 m
6	1.18 m
7	0.89 m
8	0.90 m
9	1.04 m
10	0.73 m



Εικόνα 426: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

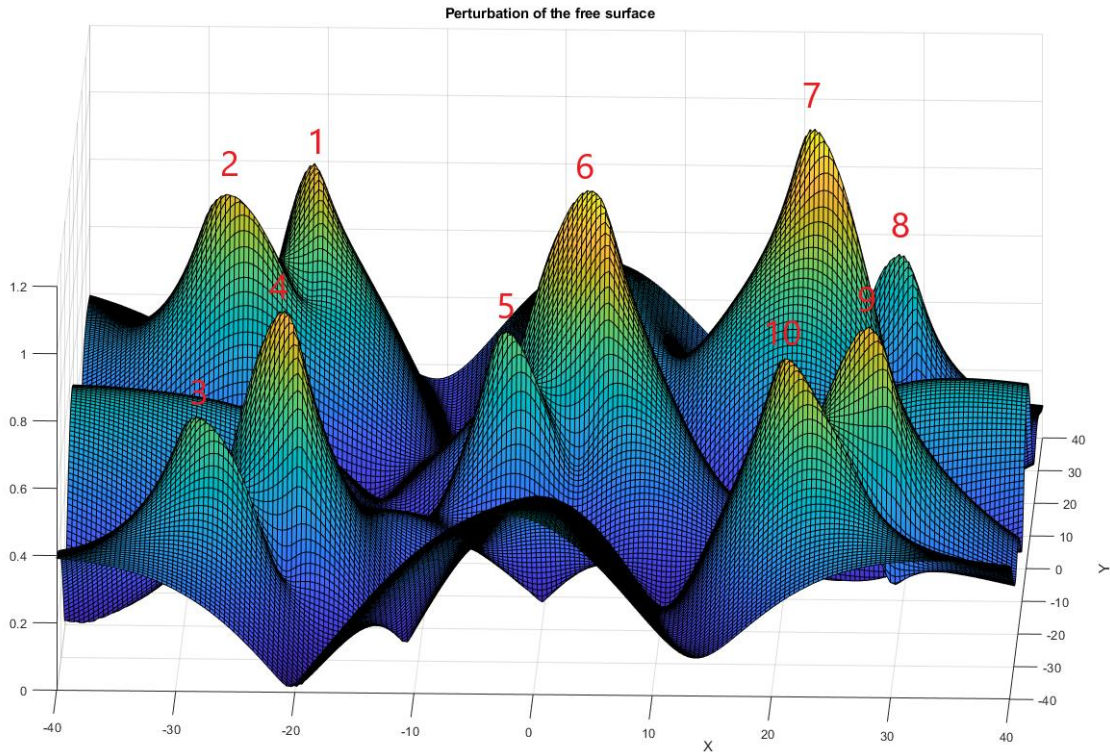


Εικόνα 427: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

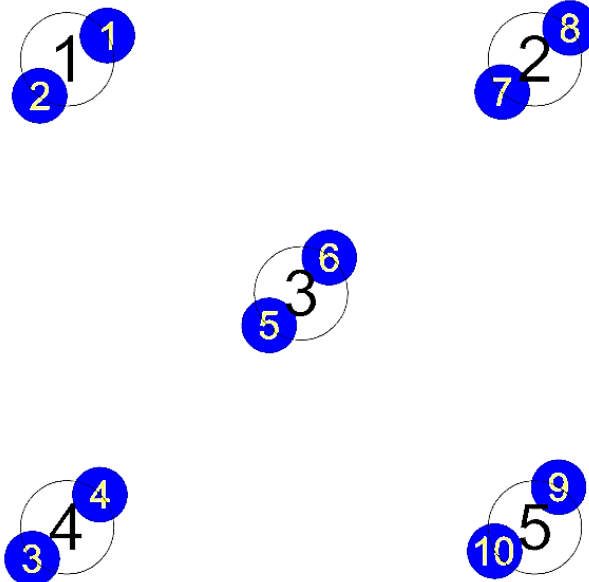
Στην Εικόνα 428 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 114 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 429 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 114: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.92 m
2	0.88 m
3	0.70 m
4	0.95 m
5	0.72 m
6	1.07 m
7	1.09 m
8	0.65 m
9	0.92 m
10	0.88 m



Εικόνα 428: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



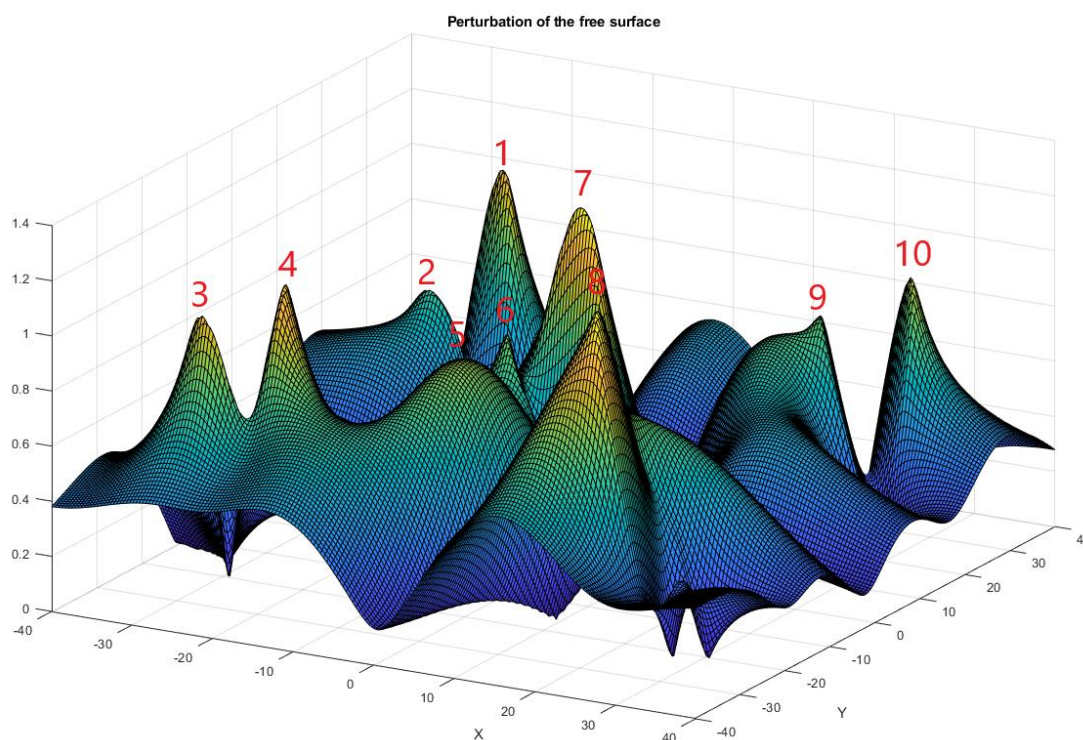
Εικόνα 429: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 430 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 115

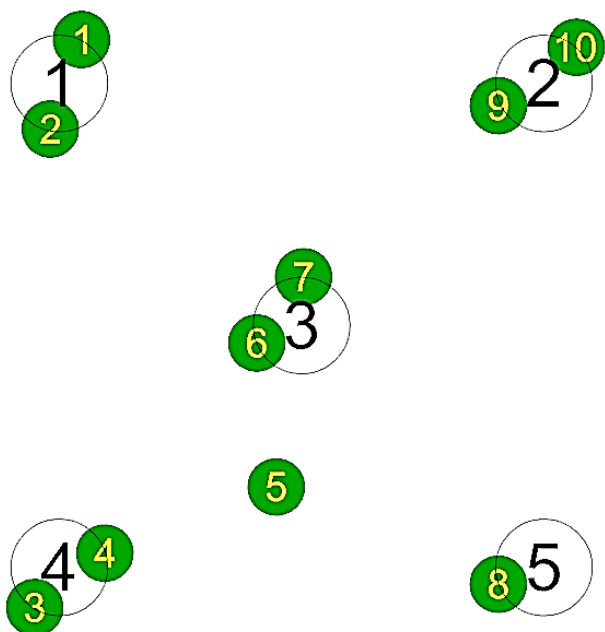
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 431 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 115: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.08 m
2	0.69 m
3	1.03 m
4	1.13 m
5	0.88 m
6	0.84 m
7	1.26 m
8	1.27 m
9	0.82 m
10	0.95 m



Εικόνα 430: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



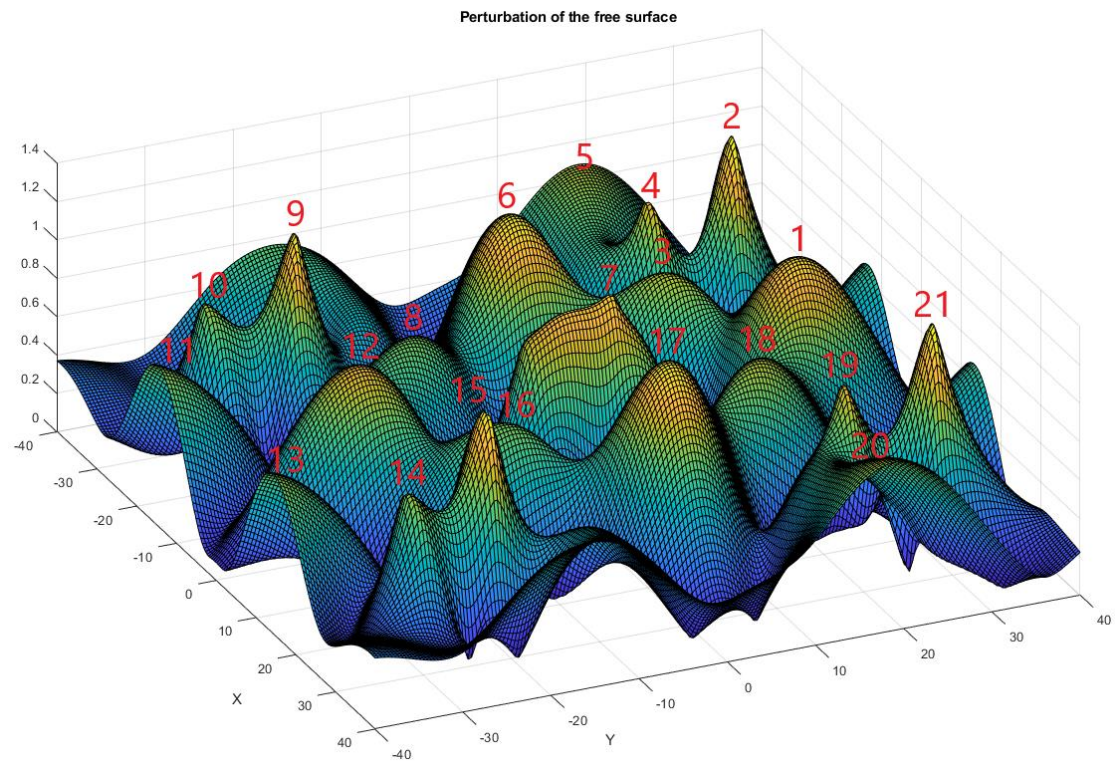
Εικόνα 431: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 432 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 116 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 433 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

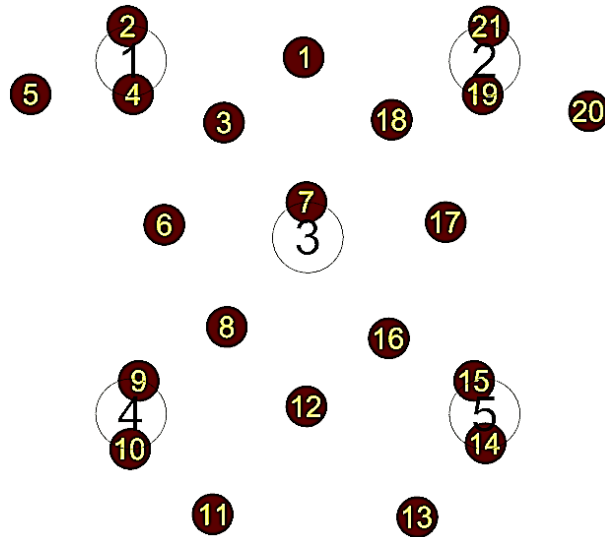
Πίνακας 116: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.10 m
2	1.21 m
3	0.88 m
4	0.96 m
5	0.87 m
6	1.15 m
7	1.09 m
8	0.8 m
9	1.17 m
10	0.85 m
11	0.82 m
12	0.97 m
13	0.82 m
14	0.85 m
15	1.17 m

16	0.8 m
17	1.15 m
18	0.88 m
19	0.96 m
20	0.87 m
21	1.21 m

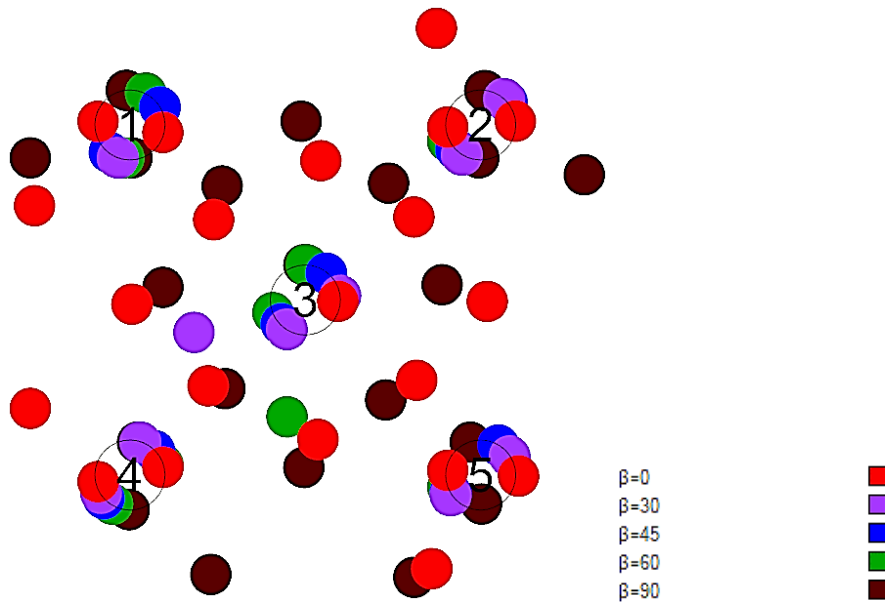


Εικόνα 432: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

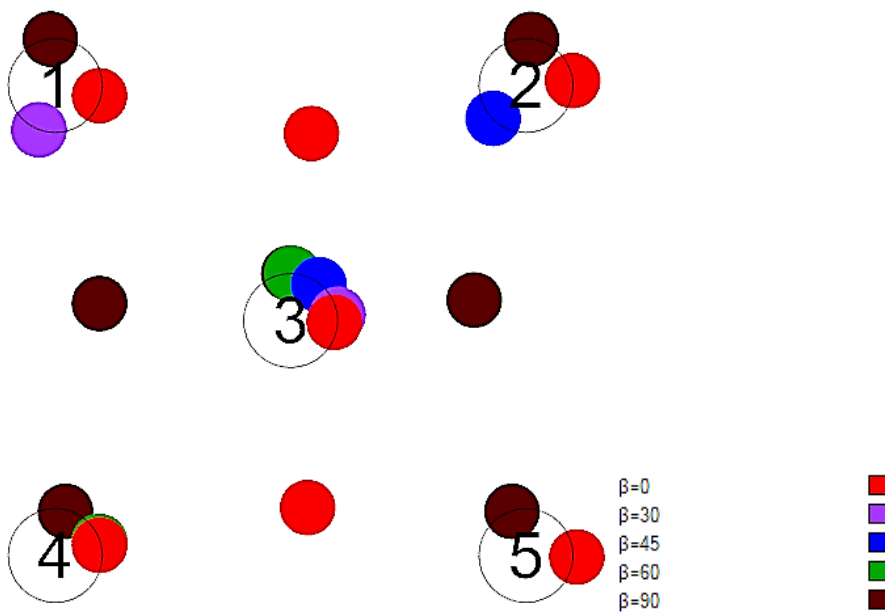


Εικόνα 433: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

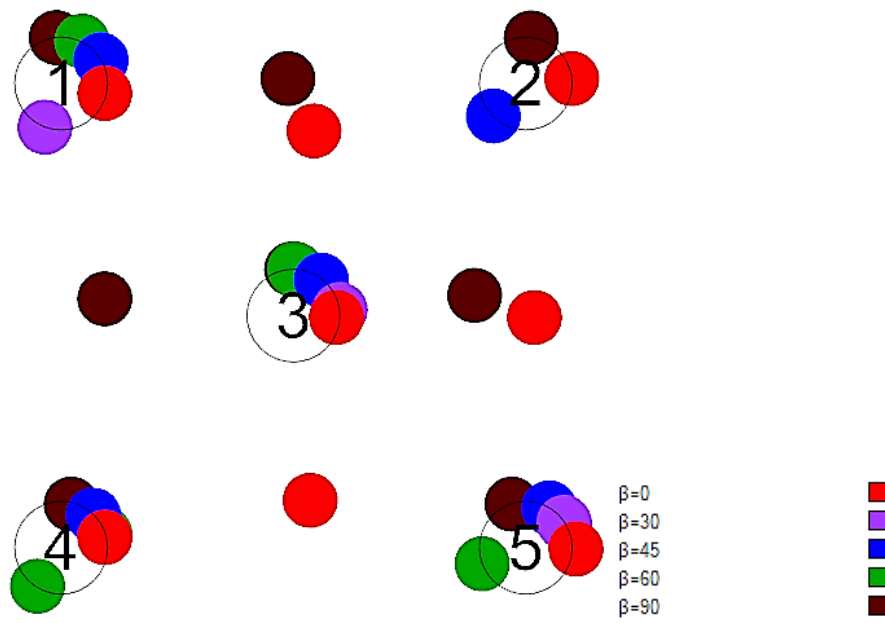
Στην Εικόνα 434 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 435 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ μπορούν να εγκατασταθούν 5 συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Η βασική διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση βρίσκεται στις γωνίες πρόσπτωσης που οι συσκευές των εξωτερικών κυλίνδρων έχουν την μέγιστη απόδοση, με εξαίρεση τις γωνίες $\beta = 0^\circ$ και 90° που όλοι οι κύλινδροι λειτουργούν σε αυτήν. Η συσκευή του κυλίνδρου 1 παράγει την μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$. Αντίστοιχα η συσκευή του κυλίνδρου 2 στη γωνία $\beta = 45^\circ$ και του κυλίνδρου 4 στην $\beta = 60^\circ$. Η συσκευή, όμως, του κυλίνδρου 3 είναι αυτή που επηρεάζεται θετικά από τις κινήσεις της πλωτής κατασκευής, καθώς μπορεί να λειτουργήσει με μέγιστη απόδοση για όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση η Εικόνα 435 αποτελεί έναν οδηγό για τις θέσεις των μέγιστων κορυφών. Στην Εικόνα 436 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Παρόλο που οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, συμπεραίνουμε πως οι κινήσεις της πλωτής κατασκευής μειώνουν την παραγωγή ενέργειας. Αυτό είναι εμφανές αν παρατηρήσουμε τις τιμές που έχουν οι κορυφές όταν η πλωτή κατασκευή είναι ακίνητη με τις τιμές όταν αυτή ταλαντώνεται ελεύθερη.



Εικόνα 434: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

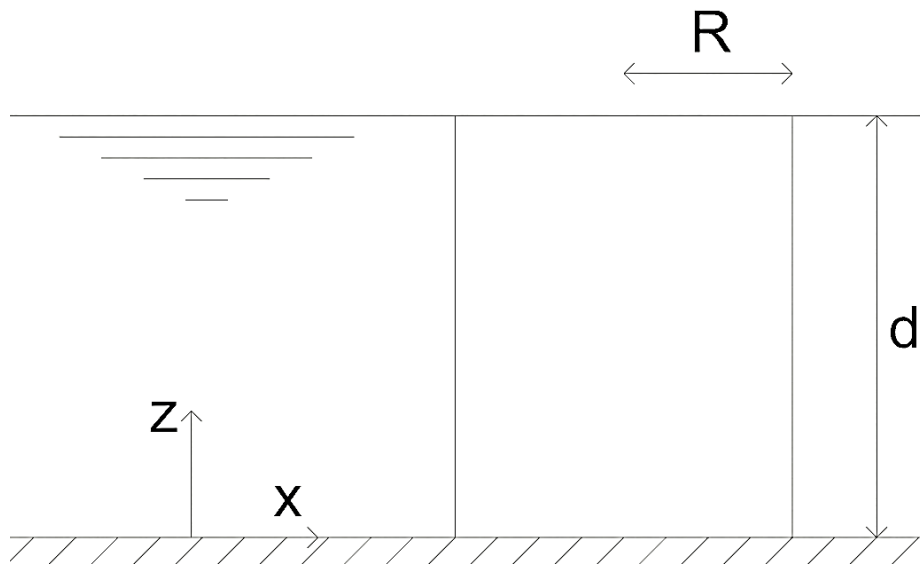


Εικόνα 435: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



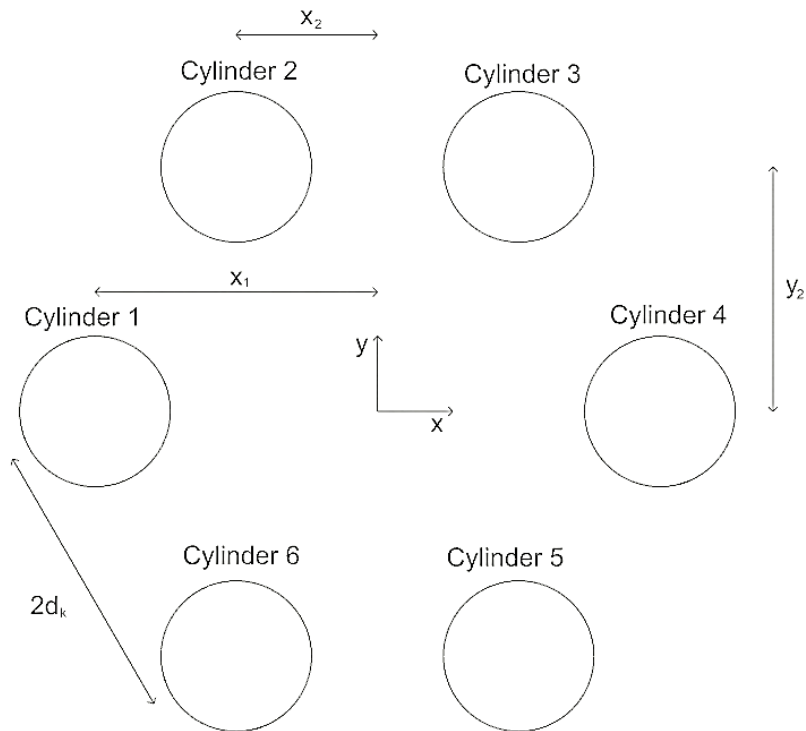
Εικόνα 436: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.7 Έξι κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι



Εικόνα 437: Σκαρίφημα πακτωμένου κύλινδρου

Θεωρούμε έξι κατακόρυφους πακτωμένους κύλινδρους με ακτίνα R σε βάθος περιοχής εγκατάστασης d , όπως φαίνεται στην Εικόνα 437 ενδεικτικά για έναν κύλινδρο.



Εικόνα 438: Κάτοψη διάταξης έξι κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων

Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι σε κυκλική μορφή με τα κέντρα τους να ισαπέχουν απόσταση $2d$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 438. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων εκφράζονται από τους λόγους:

$$\frac{d}{R} = 1 \text{ και } \frac{R}{d_K} = 0,7$$

Από την Εικόνα 438, έχουμε ότι η γενική μορφή των συντεταγμένων των κυλίνδρων, ως προς το επίπεδο xy είναι οι ακόλουθες:

- Κύλινδρος 1 ($x_1, 0$)
- Κύλινδρος 2 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 3 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 4 ($x_1, 0$)
- Κύλινδρος 5 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 6 (x_2, y_2)

Η διακριτοποίηση που θα κάνουμε είναι ίδια με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.1. Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 7m$, με τα κέντρα τους να ισαπέχουν $2d_k = 20m$ και βρίσκονται σε βάθος περιοχής εγκατάστασης $d = 7m$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς την αρχή των αξόνων $(0,0)$ στο επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 $(-20,0)$
- Κύλινδρος 2 $(-10,17.3)$
- Κύλινδρος 3 $(10,17.3)$
- Κύλινδρος 4 $(20,0)$
- Κύλινδρος 5 $(10,-17.3)$
- Κύλινδρος 6 $(-10,-17.3)$

Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξήσουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε την κυκλική διάταξη των έξι πακτωμένων κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Evans και Porter (1997b), που κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων. Για να γίνουν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων με αυτά των Evans και Porter (1997b), θα μελετήσουμε έναν πακτωμένο κύλινδρο ίδιων διαστάσεων, όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.5.

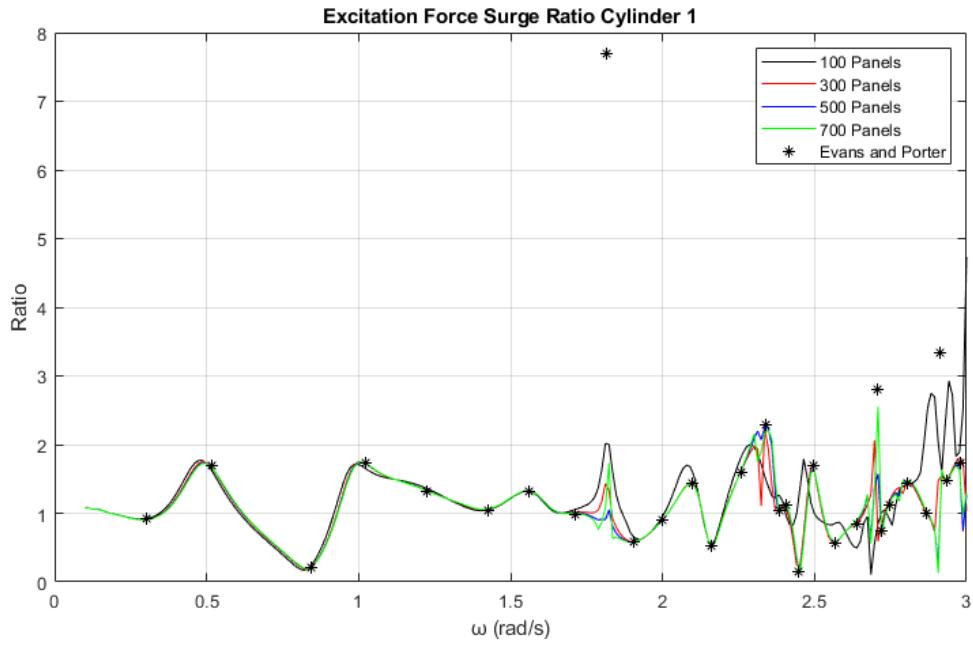
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.7, οι δυνάμεις διέγερσης εκφράζονται σε μορφή μιγαδικού αριθμού. Επομένως προκειμένου να βρούμε την συνολική οριζόντια δύναμη θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέτρο του μιγαδικού αριθμού. Δηλαδή θα κάνουμε

χρήση της σχέσης (62): $F_{e_{x_k}} = \sqrt{Re_{x_k}^2 + Im_{x_k}^2}$

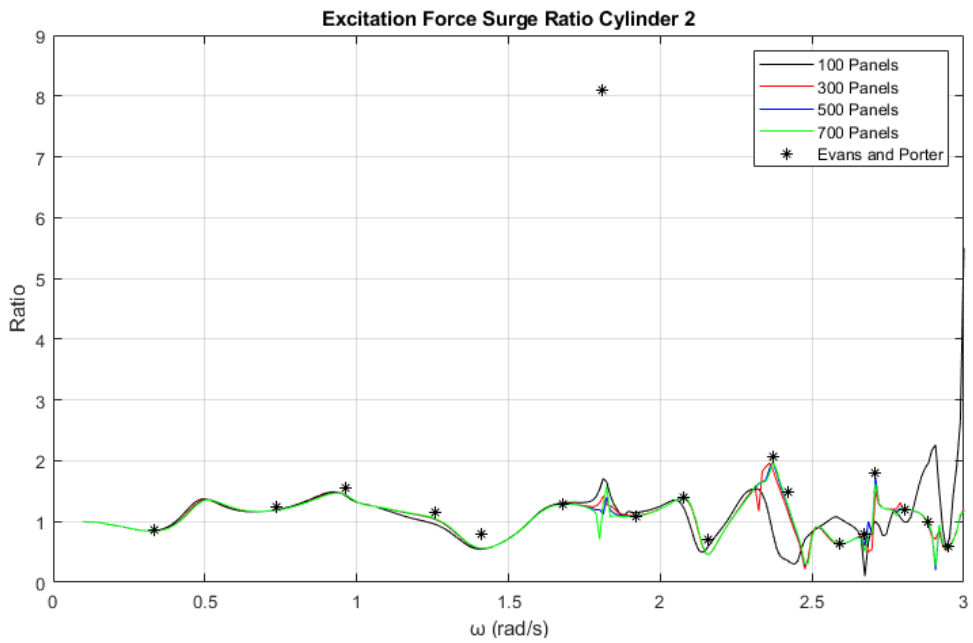
Όπου ο όρος $k = 1, 2, \dots, 6$ συμβολίζει τον κάθε κύλινδρο, Re_{x_k} είναι το πραγματικό μέρος της δύναμης και αντίστοιχα Im_{x_k} το φανταστικό μέρος της. Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το λόγο της συνολικής οριζόντιας δύναμης που ασκείται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης με αυτήν που ασκείται σε έναν πακτωμένο κύλινδρο. Δηλαδή:

$$\frac{F_{exk}}{F_{exone}}$$

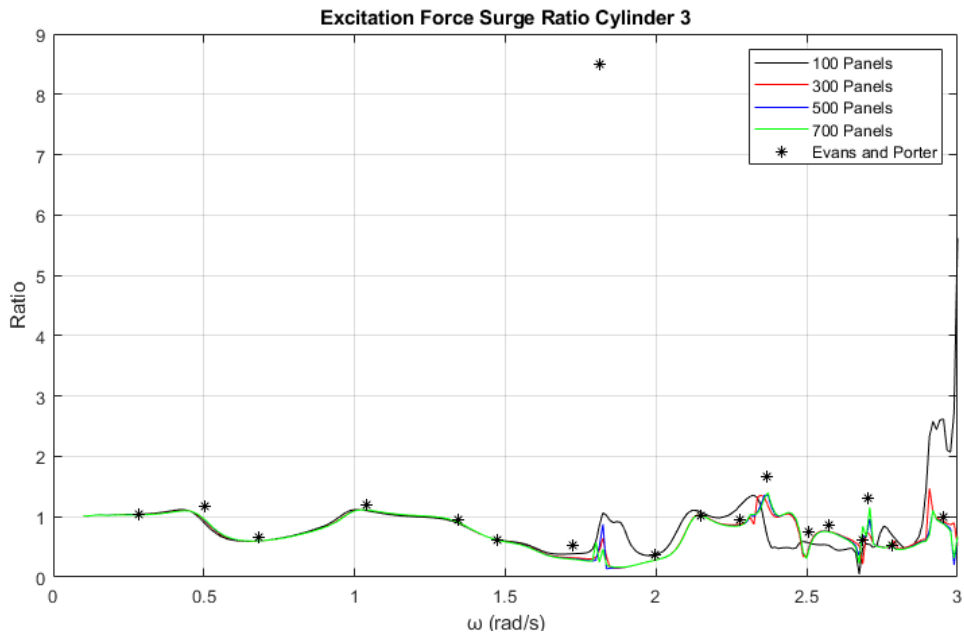
Τα αποτελέσματα για κάθε κύλινδρο ξεχωριστά φαίνονται στις Εικόνες 439-444.



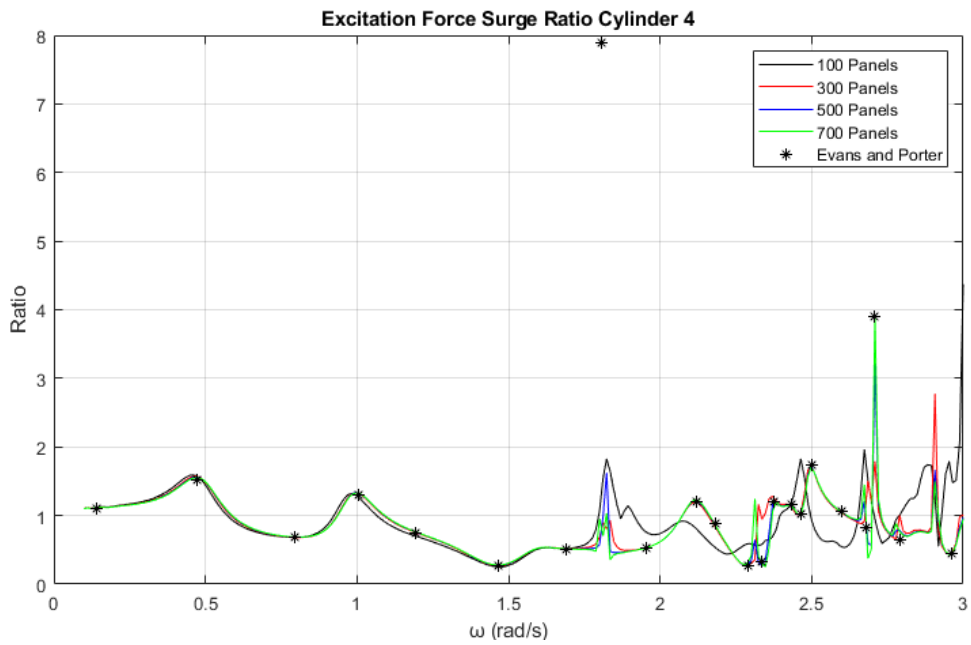
Εικόνα 439: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 1



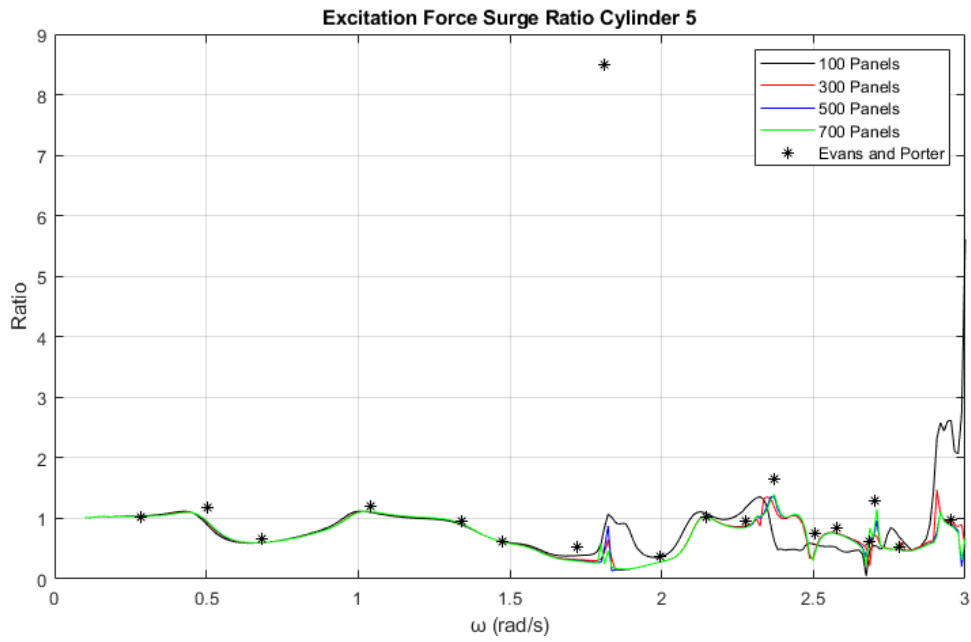
Εικόνα 440: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 2



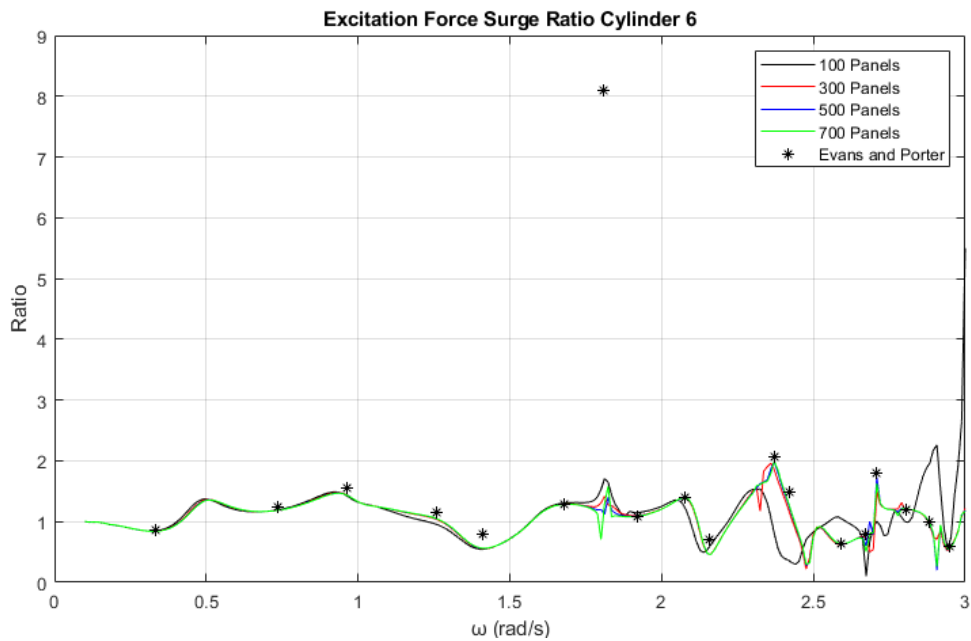
Εικόνα 441: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 3



Εικόνα 442: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 4



Εικόνα 443: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 5

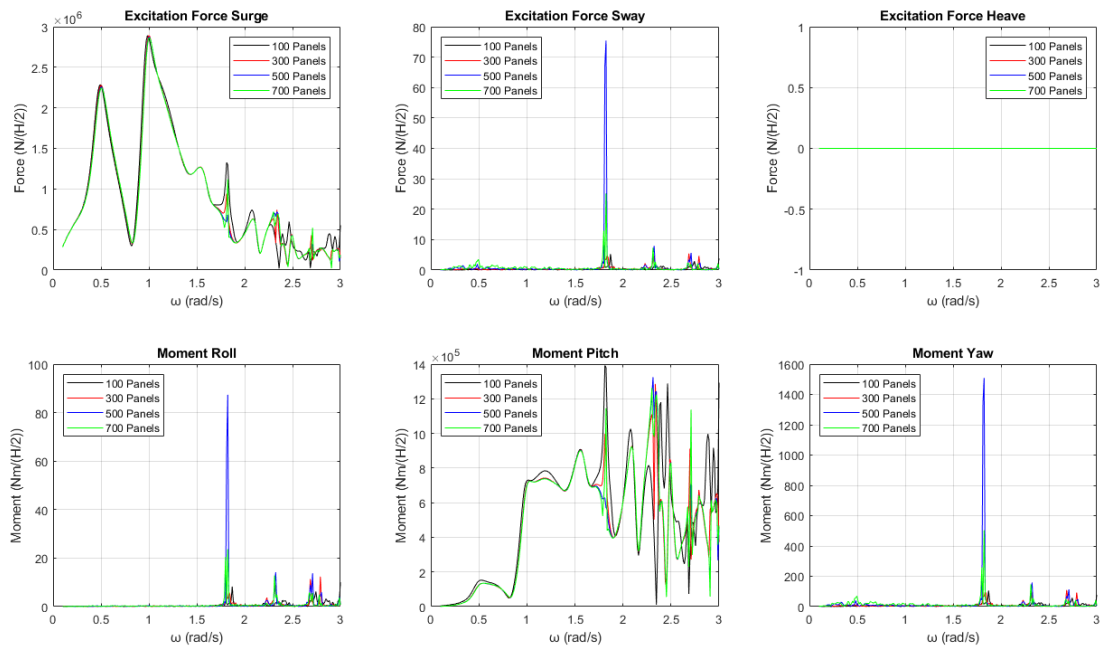


Εικόνα 444: Λόγος οριζόντιων δυνάμεων διέγερσης για τον κύλινδρο 6

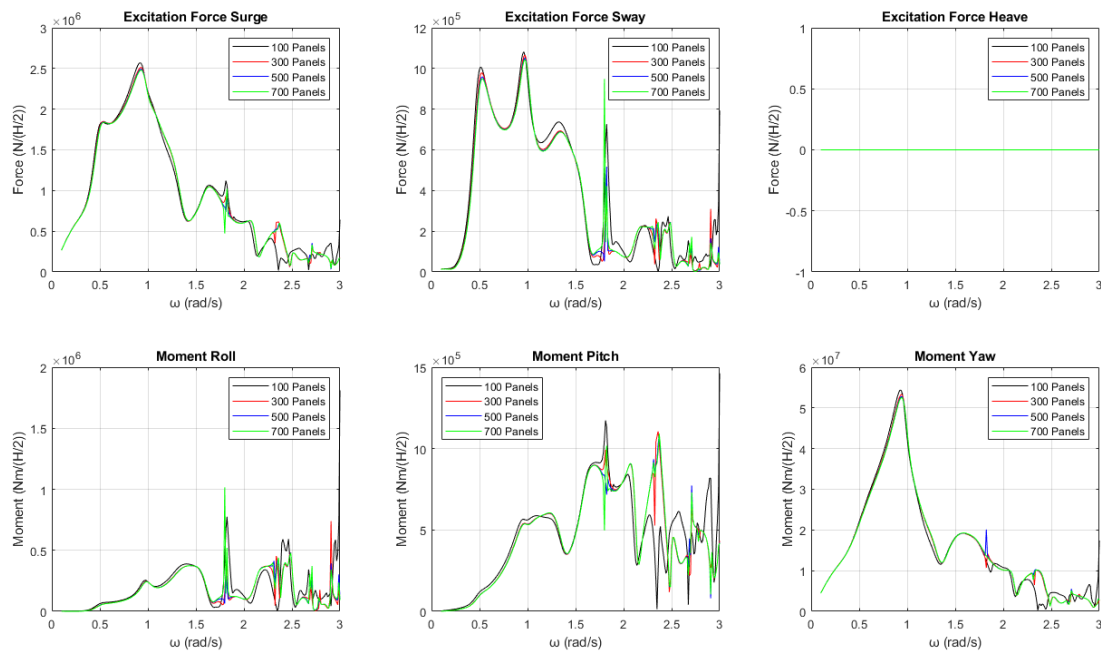
Όπως και στην περίπτωση των πέντε κατακόρυφων κυλίνδρων στην παράγραφο 3.5, έτσι και εδώ, το πρόγραμμα BEM NEMOH δίνει πολύ καλά αποτελέσματα τα οποία συγκλίνουν αρκετά με αυτά των Evans και Porter. Εξαιρέση αποτελεί η συχνότητα $\omega \cong 1.80 \text{ r/s}$.

3.7.1 Μελέτη της διάταξης σαν ανεξάρτητα σώματα

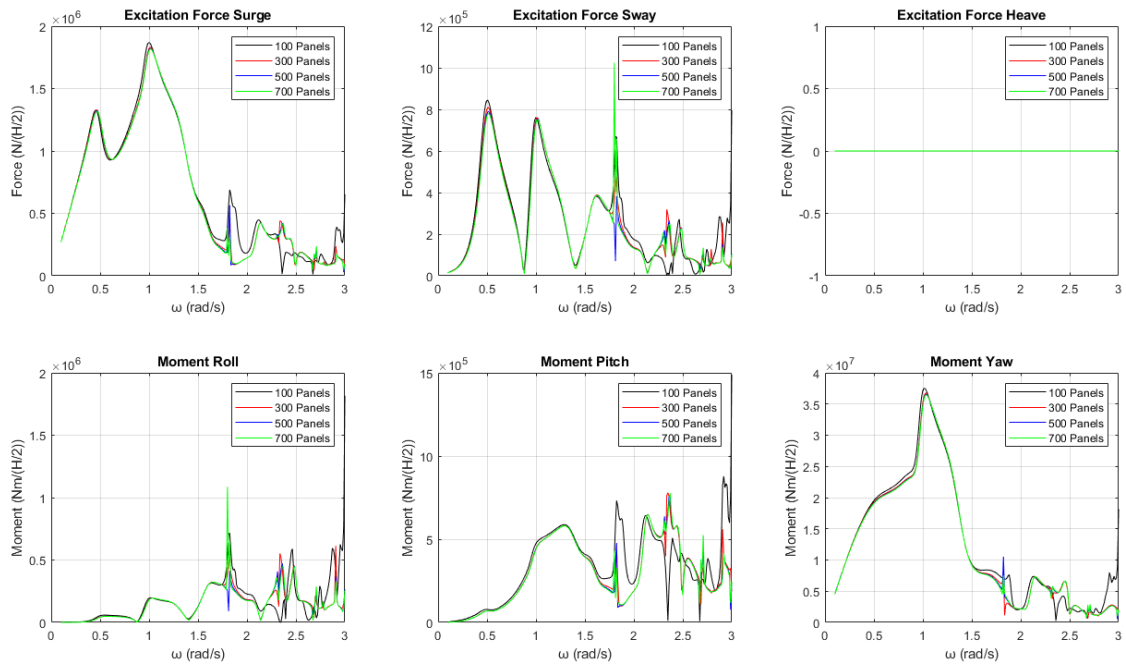
Στις Εικόνες 445-450 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο ανάλογα τον αριθμό των στοιχείων τους.



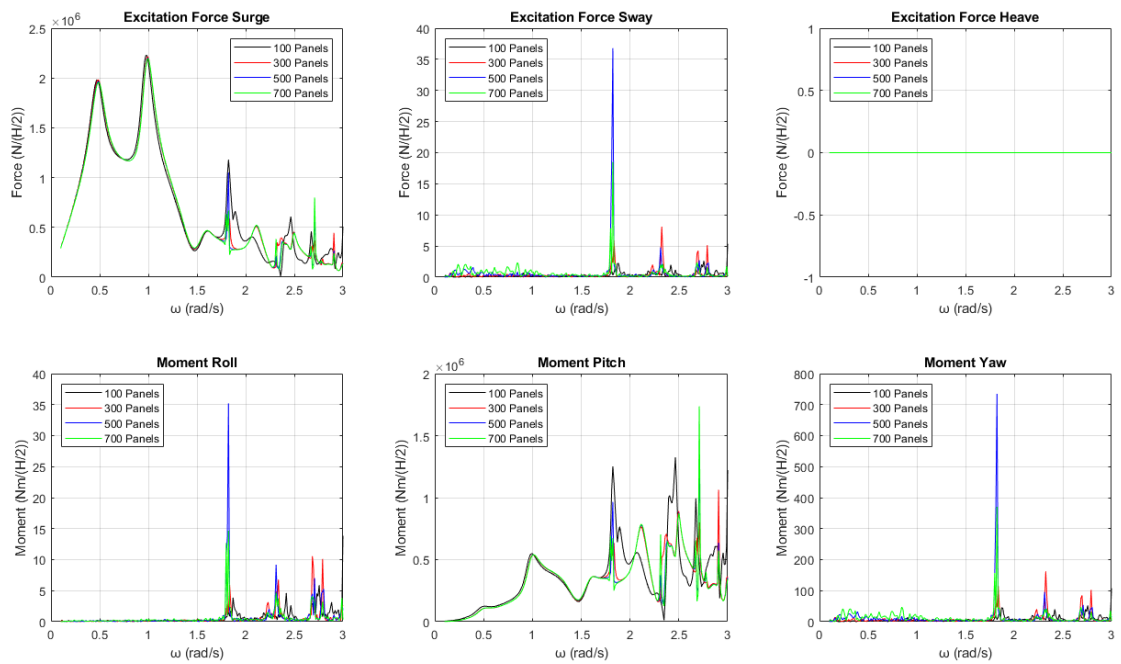
Εικόνα 445: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 της διάταξης



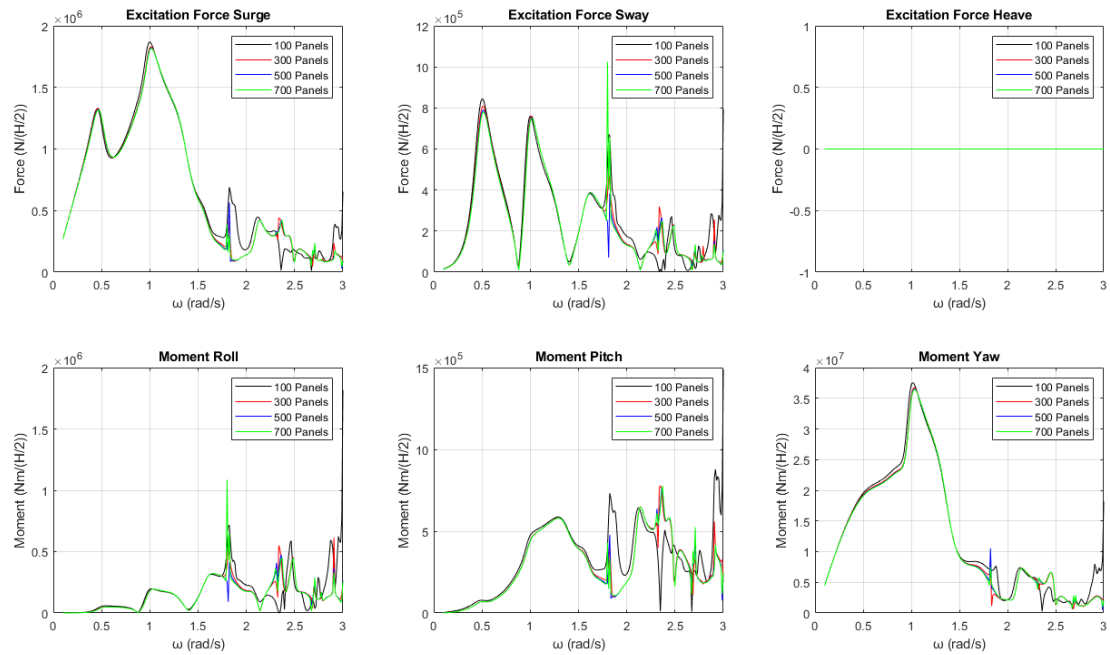
Εικόνα 446: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 της διάταξης



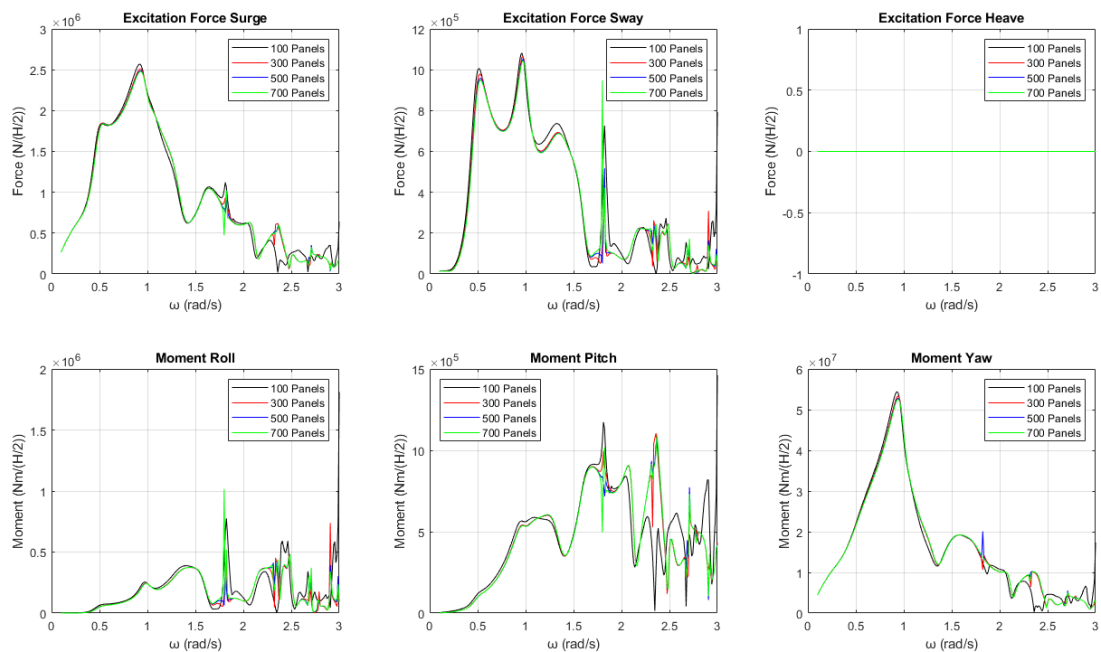
Εικόνα 447: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 της διάταξης



Εικόνα 448: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 της διάταξης

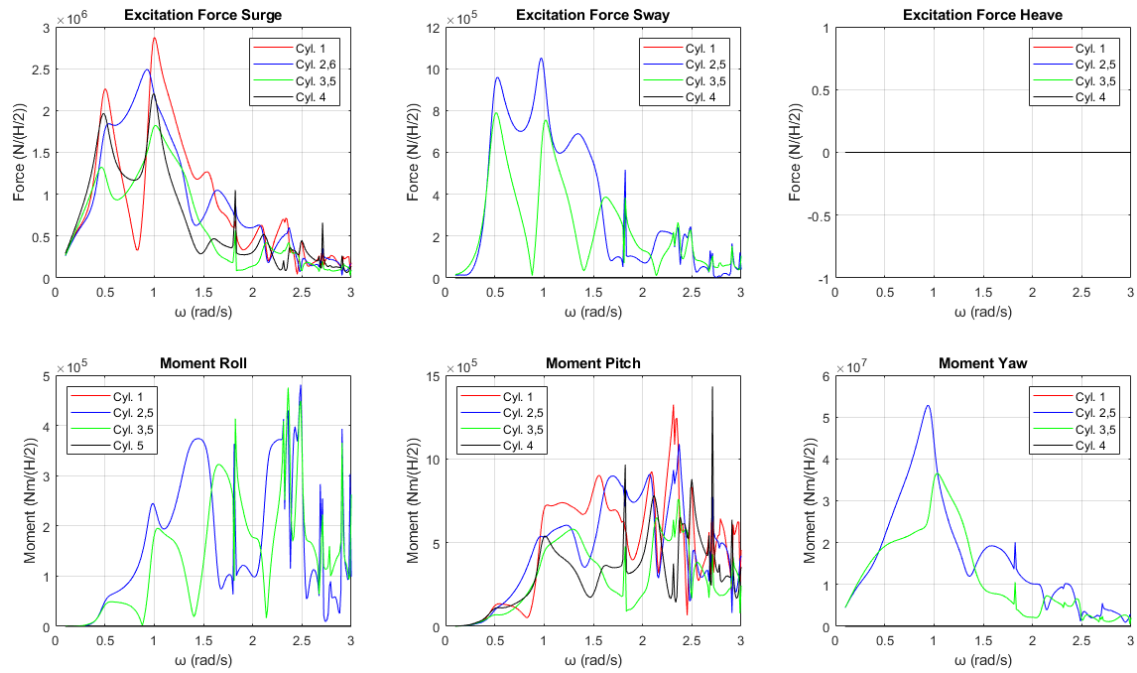


Εικόνα 449: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης

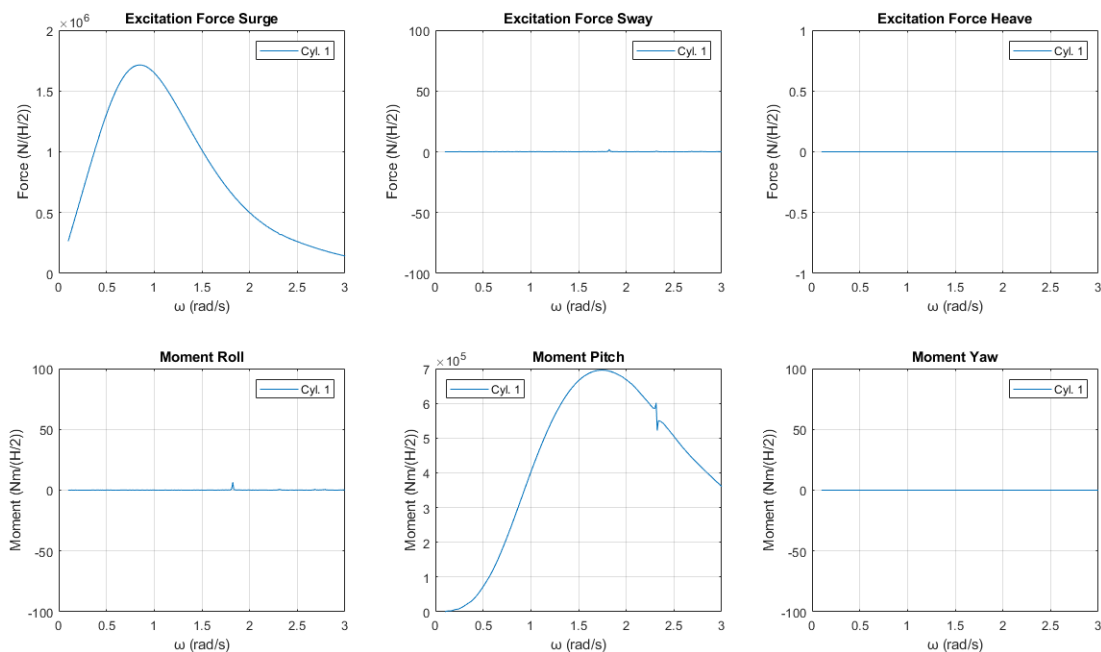


Εικόνα 450: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 6 της διάταξης

Από τις Εικόνες 445-450 συμπεραίνουμε πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα 500 και 700 στοιχεία δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 451 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 452 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κατακόρυφο πακτωμένο κύλινδρο.



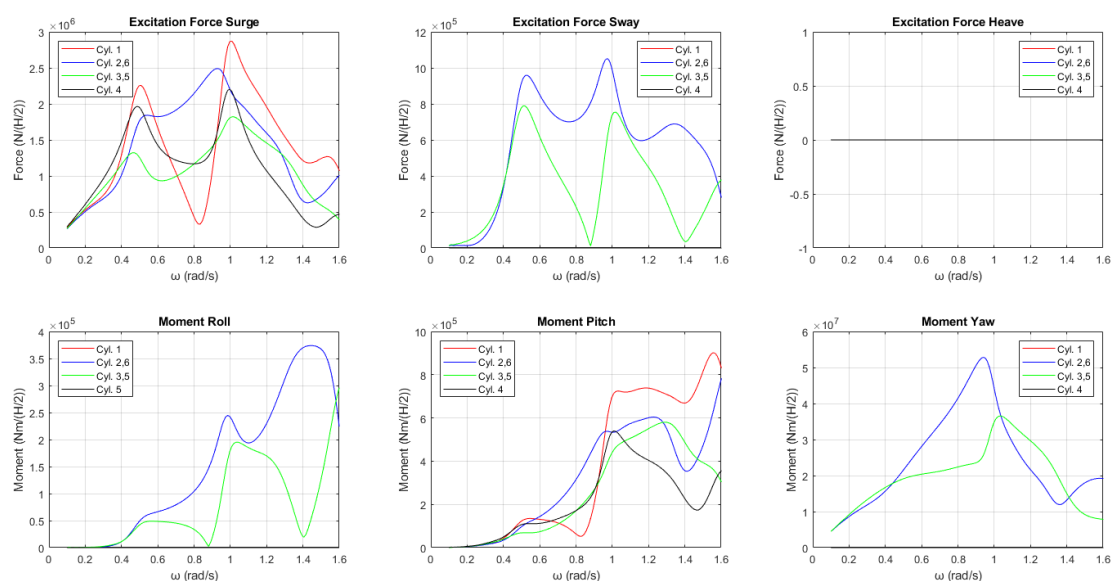
Εικόνα 451: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης



Εικόνα 452: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον έναν κατακόρυφο πακτωμένο κύλινδρο

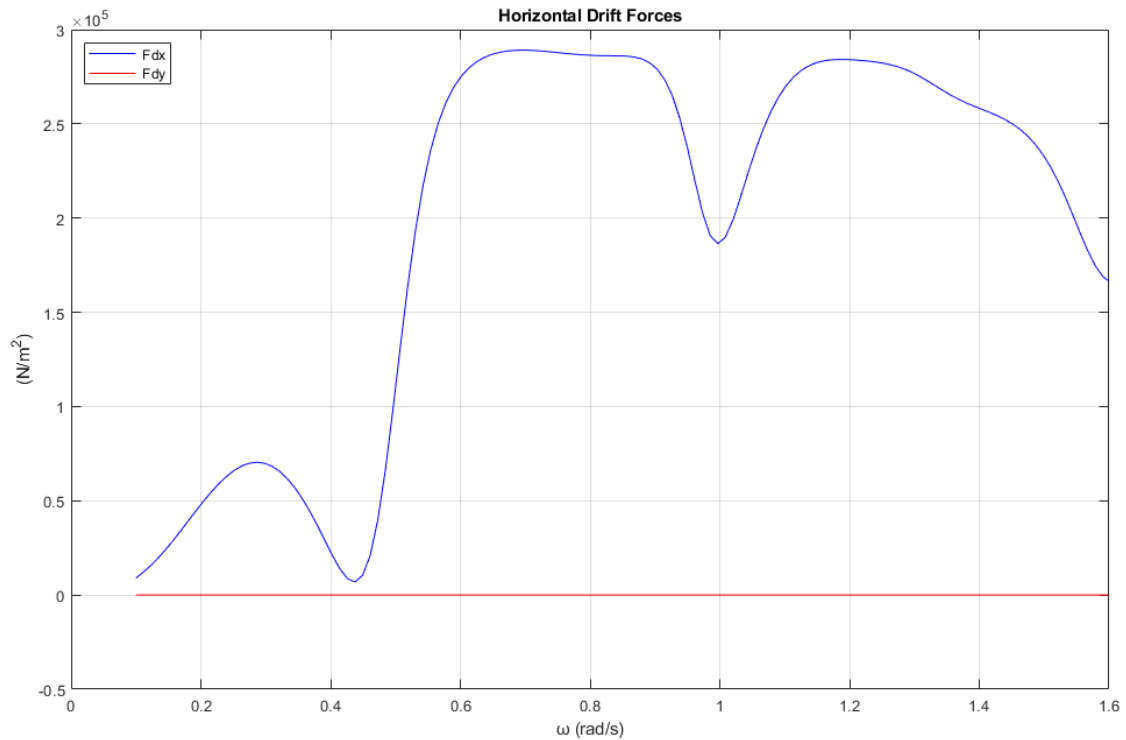
Συγκρίνοντας τις Εικόνες 451 και 452 επιβεβαιώνουμε πως ο λόγος των δυνάμεων δεν είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για να ελέγξουμε πότε εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών, διότι μετά την συχνότητα $\omega \cong 1.6 \text{ r/s}$ παρατηρούνται πολλές ακανόνιστες συχνότητες στους κυλίνδρους της διάταξης. Επομένως, προκειμένου να μελετήσουμε την διάταξη και να ελέγξουμε πότε εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών, θα την μελετήσουμε για ένα νέο εύρος

συχνοτήτων. Στην Εικόνα 453 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων.



Εικόνα 453: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων

Από την Εικόνα 453 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται εντονότερα στους κυλίνδρους 1 και 4, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Στους κυλίνδρους αυτούς ικανοποιείται η συνθήκη Neumann στη συχνότητα $\omega \cong 1.00 \text{ r/s}$, όπου στον κύλινδρο 1 ασκούνται και οι μεγαλύτερες φορτίσεις. Αντίστοιχα ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y , το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στους υπόλοιπους κυλίνδρους της διάταξης. Όμως, βασική διαφορά μεταξύ των κυλίνδρων 2, 6 με τους 3, 5 είναι πως σε αυτούς ικανοποιείται μόνο η συνθήκη Neumann, ενώ στους 3 και 5 ικανοποιείται και η συνθήκη Dirichlet. Η συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 2 και 6 ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.97 \text{ r/s}$. Ομοίως, για τους κυλίνδρους 3 και 5 της διάταξης η συνθήκη Neumann ικανοποιείται για τη συχνότητα $\omega \cong 0.51 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στην $\omega = 1.01 \text{ r/s}$. Στην Εικόνα 454 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη (diffraction problem).

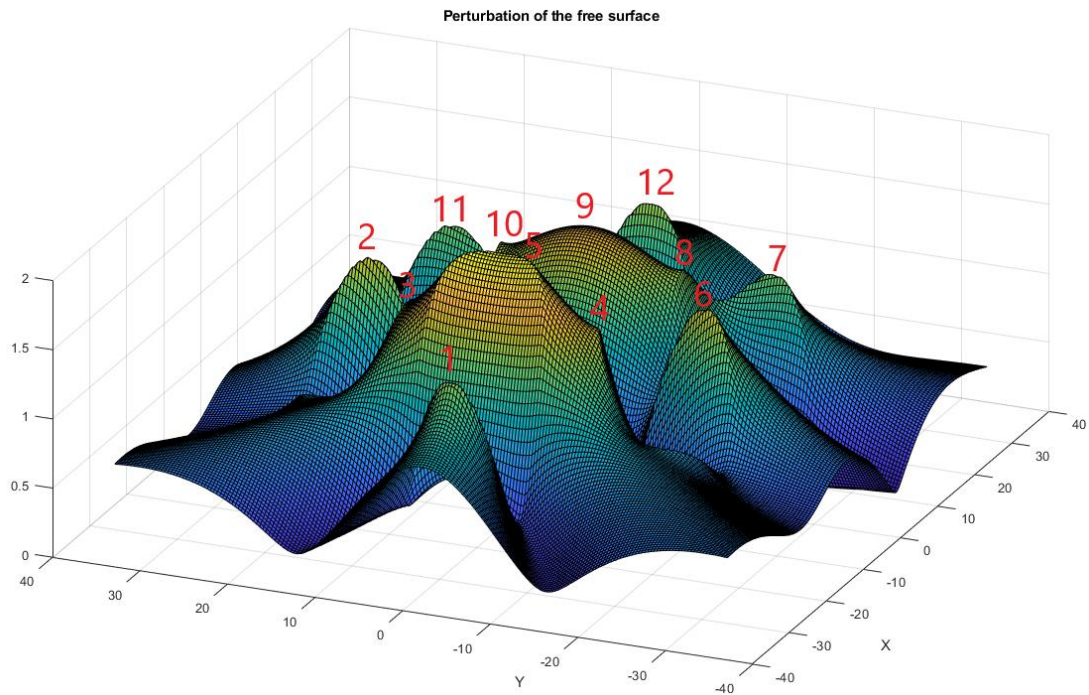


Εικόνα 454: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη

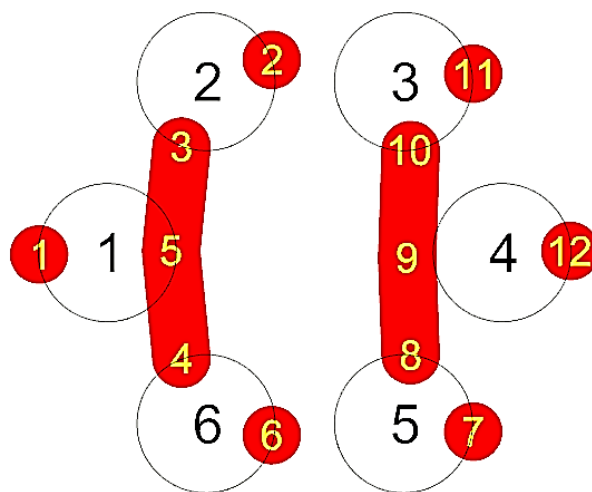
Στην Εικόνα 455 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ στη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 117 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 456 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 117: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.35 m
2	1.53 m
3	1.52 m
4	1.52 m
5	1.96 m
6	1.53 m
7	1.30 m
8	1.40 m
9	1.62 m
10	1.40 m
11	1.30 m
12	1.41 m

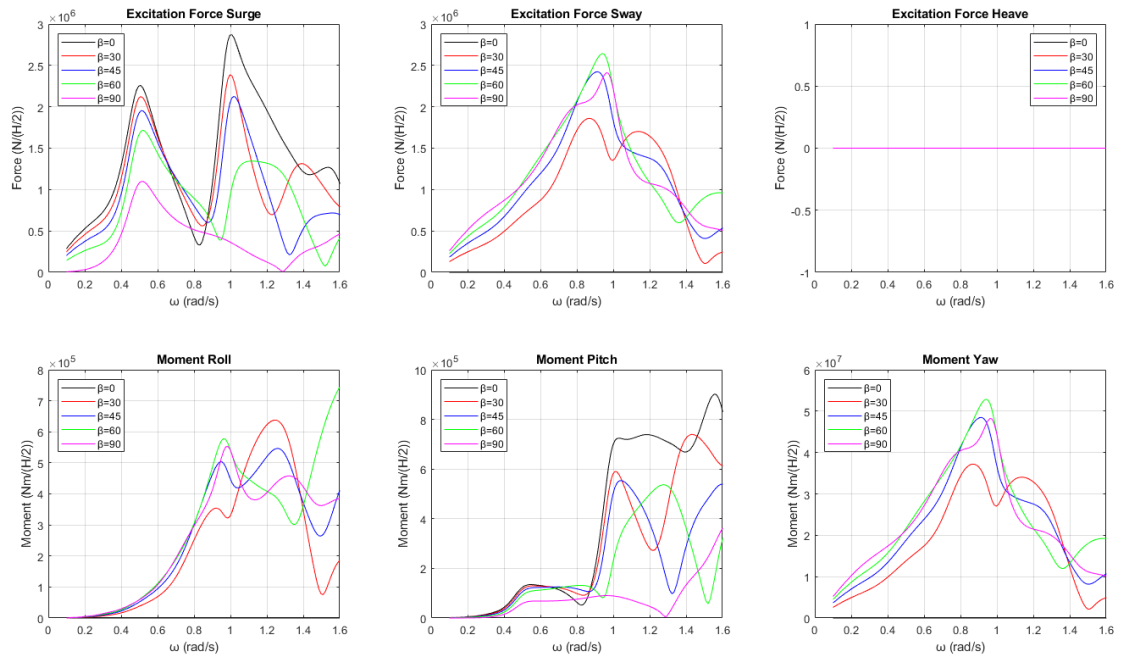


Εικόνα 455: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

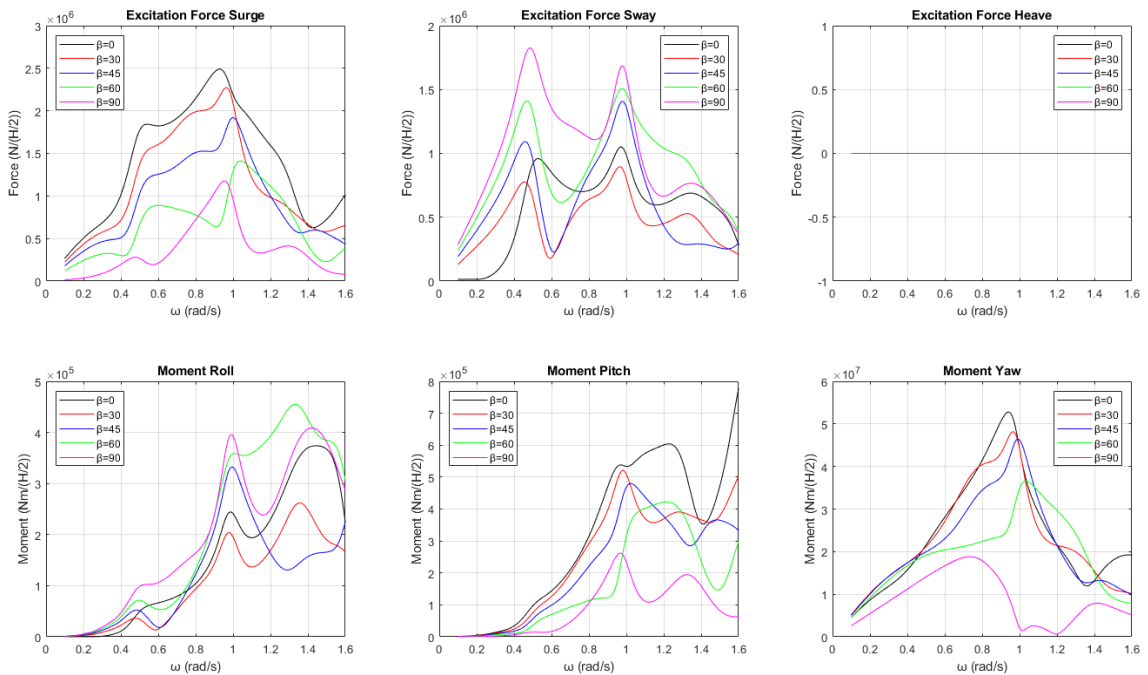


Εικόνα 456: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

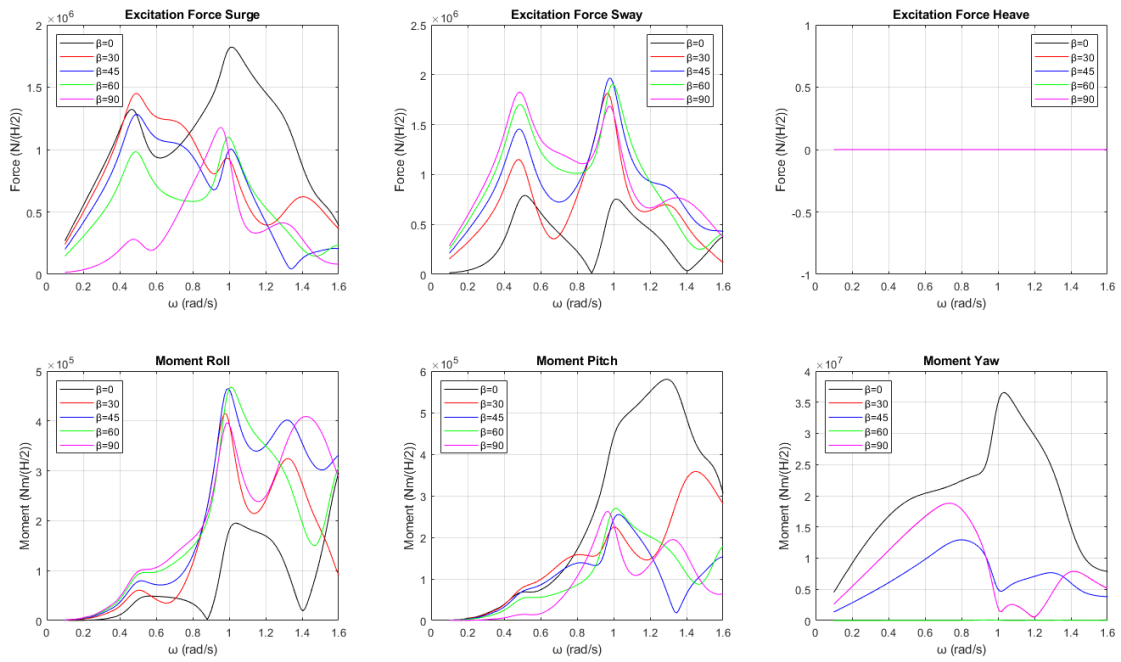
Προκειμένου να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν οι δυνάμεις και ροπές στη διάταξη, το παραπάνω πρόβλημα θα μελετηθεί και για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 457-462 παρουσιάζονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



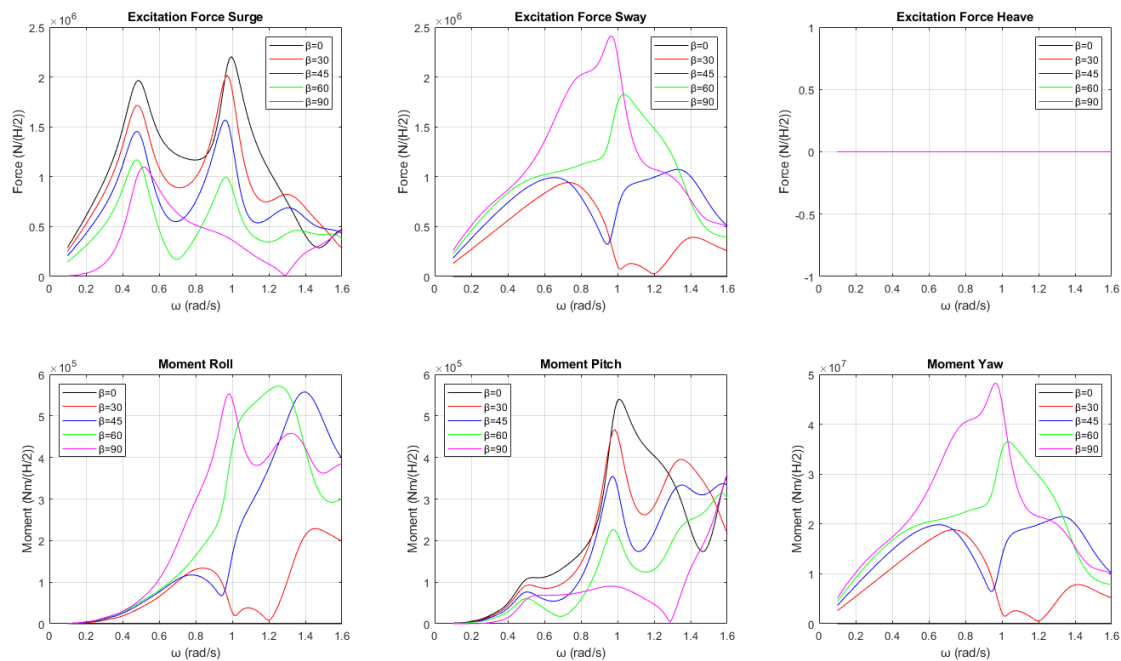
Εικόνα 457: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



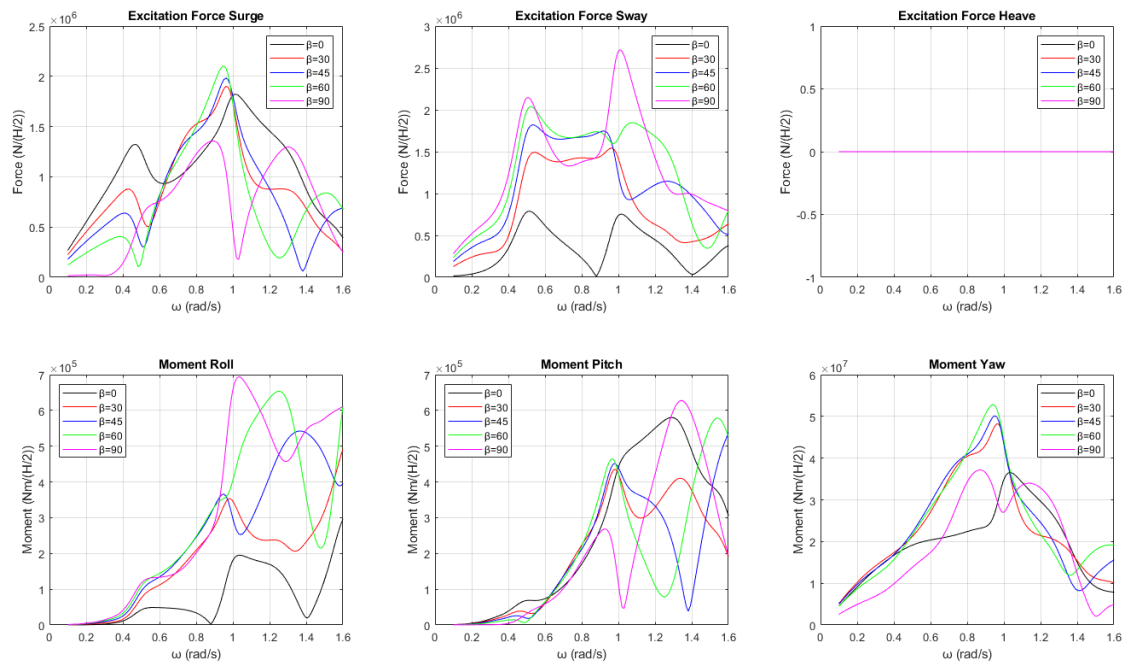
Εικόνα 458: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



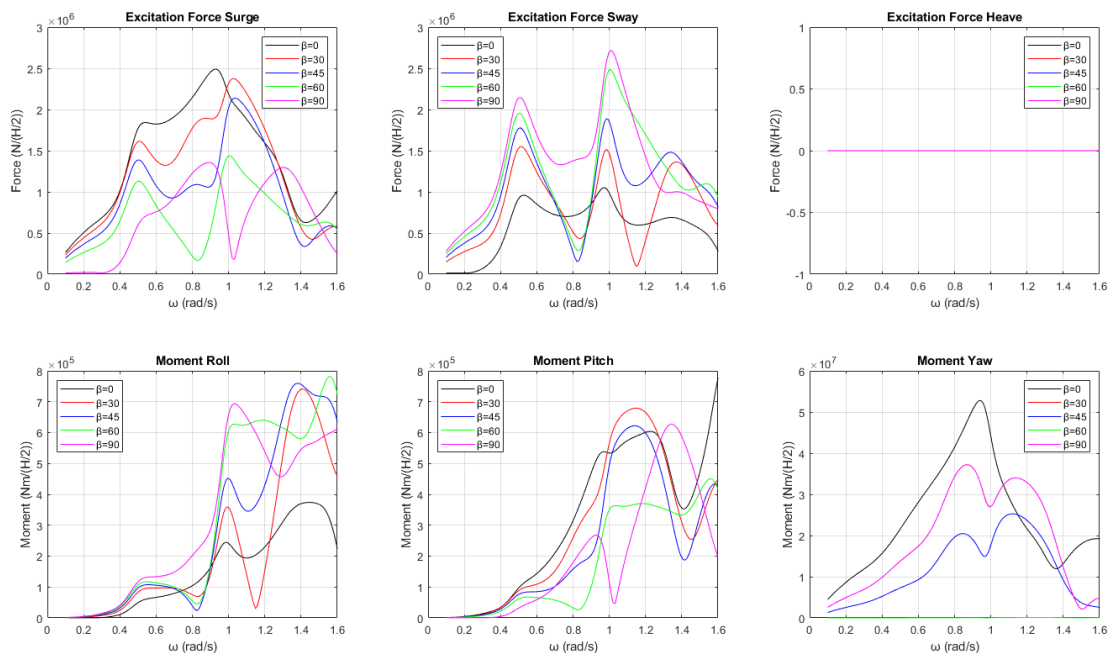
Εικόνα 459: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 460: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 461: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 462: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν

Από τις Εικόνες 457-462 παρατηρούμε πως αλλάζοντας τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού τότε όχι μόνο αλλάζει η κατανομή των δυνάμεων και ροπών διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο, αλλά αλλάζουν και οι συχνότητες όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες φορτίσεις. Όσον αφορά το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών στις συχνότητες και στο που εμφανίζεται θα πρέπει να γίνει μελέτη

των οριζόντιων δυνάμεων ξεχωριστά. Δηλαδή, θα πρέπει να γίνει έλεγχος των διαγραμμάτων των οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης και να βρεθούν, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, ποιες συχνότητες ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet αντίστοιχα. Στον Πίνακα 118 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

Πίνακας 118: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.00$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.00$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.02$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.52$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.52$	—
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.95$	—
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.95$	—
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.00$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.96$	—

$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.47$	$\cong 0.96$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.51$	—
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.96$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.96$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.95$	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Κύλινδρος 6		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.00$	—
$\beta = 90^\circ$	—	—

Από τον Πίνακα 118 παρατηρούμε πως μόνο στον κύλινδρο 4 της διάταξης και για γωνία πρόσπτωσης, $\beta = 60^\circ$, ικανοποιείται η συνθήκη Dirichlet. Ακόμα, παρατηρούμε πως η συνθήκη Neumann ικανοποιείται για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης μόνο στους ακραίους κυλίνδρους της διάταξης, δηλαδή μόνο στον κύλινδρο 1 και 4. Επομένως, οι δύο κύλινδροι είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Στον Πίνακα 119 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

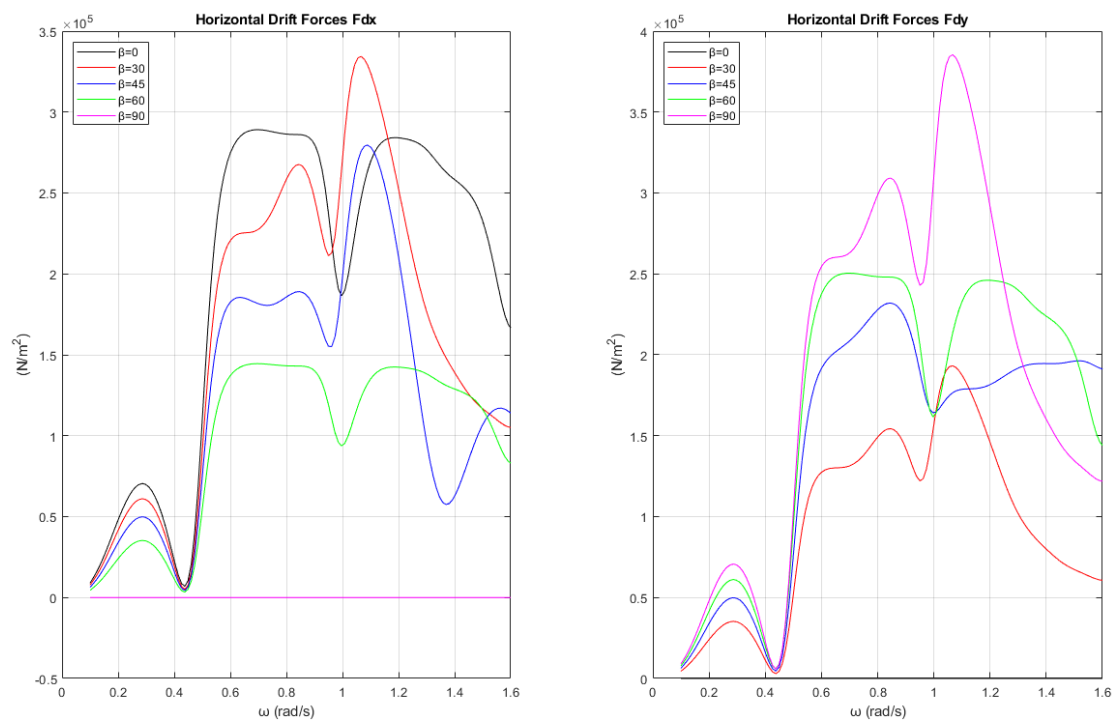
Πίνακας 119: Συχνότητες που ικανοποιούν την συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.86$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.92$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.94$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.96$	—

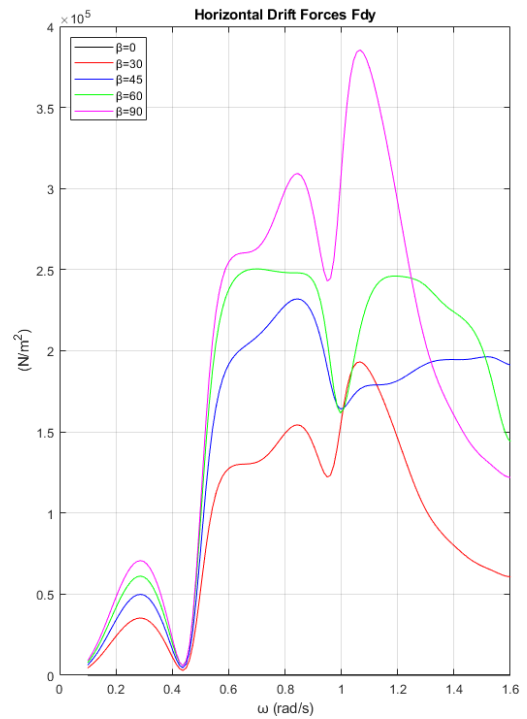
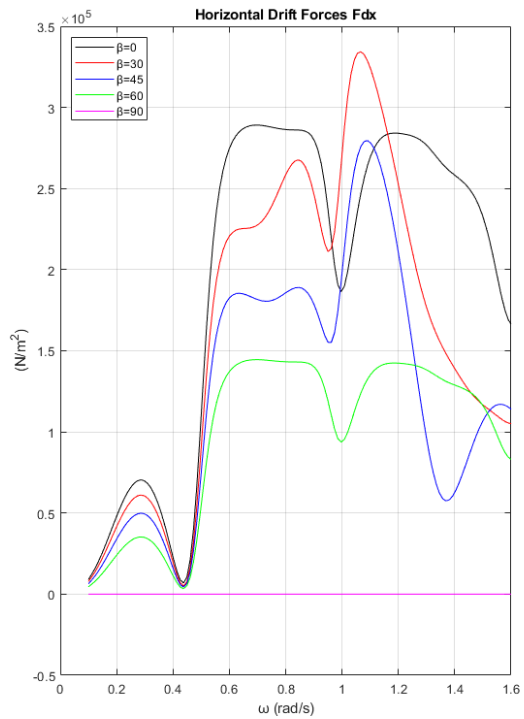
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.48$	$\cong 0.97$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.51$	$\cong 1.01$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.96$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.99$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.48$	$\cong 0.97$
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.00$	—
Κύλινδρος 6		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.97$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.98$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.98$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.00$	—

$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.01$	—
--------------------	--------------	---

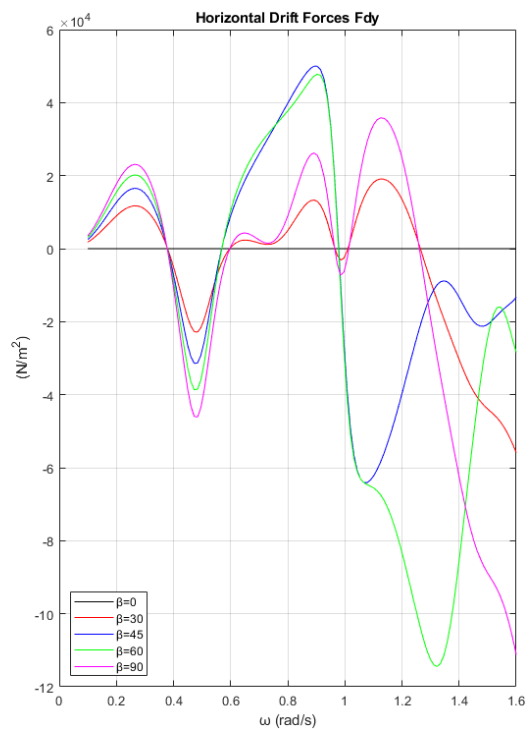
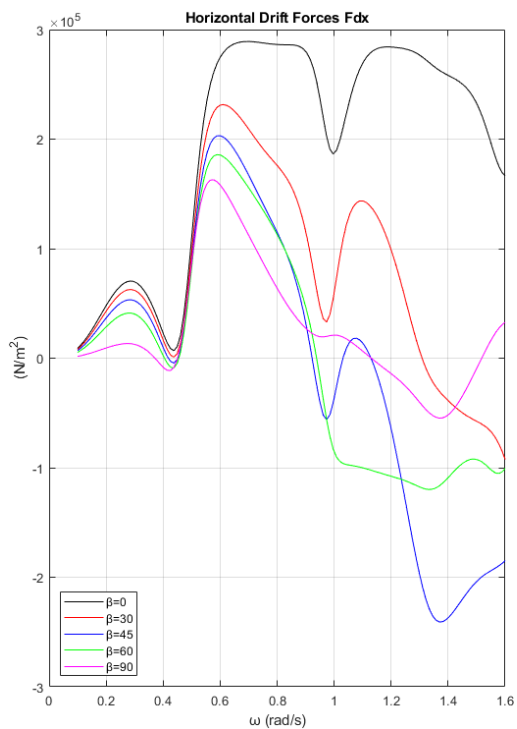
Από τον Πίνακα 119 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών, ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y , εμφανίζεται για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού μόνο στους κύλινδρους 2, 3 και 6 της διάταξης. Όμως, παρατηρούμε πως εμφανίζεται και στους κύλινδρους 1 και 5 της διάταξης υπό κάποιες προϋποθέσεις. Δηλαδή, στον κύλινδρο 1 της διάταξης δεν εμφανίζεται μόνο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$ και αντίστοιχα στον κύλινδρο 5 εμφανίζεται όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι $\beta = 90^\circ$. Όπως είδαμε και από τον Πίνακα 118, έτσι και εδώ, η συνθήκη που ικανοποιείται είναι του Neumann. Συγκρίνοντας τον Πίνακα 118 με τον Πίνακα 119 συμπεραίνουμε πως ο κύλινδρος 1 της διάταξης είναι ίσως και ο καταλληλότερος κύλινδρος για να γίνει εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Στην Εικόνα 463 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 464-469 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



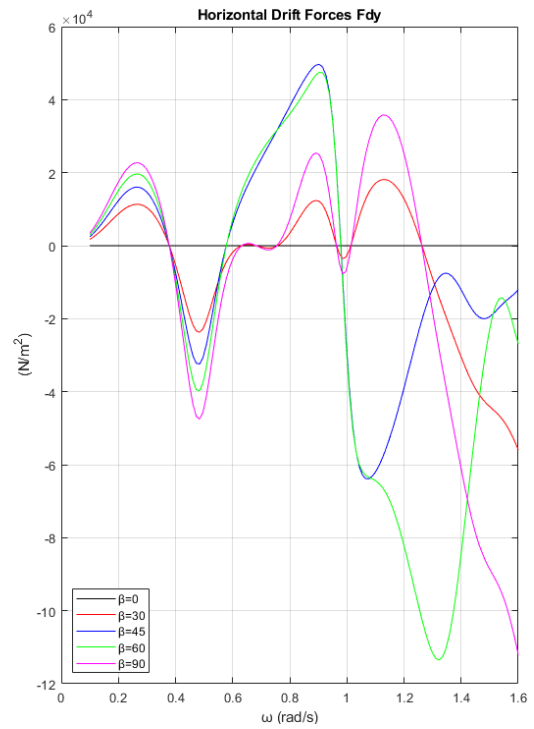
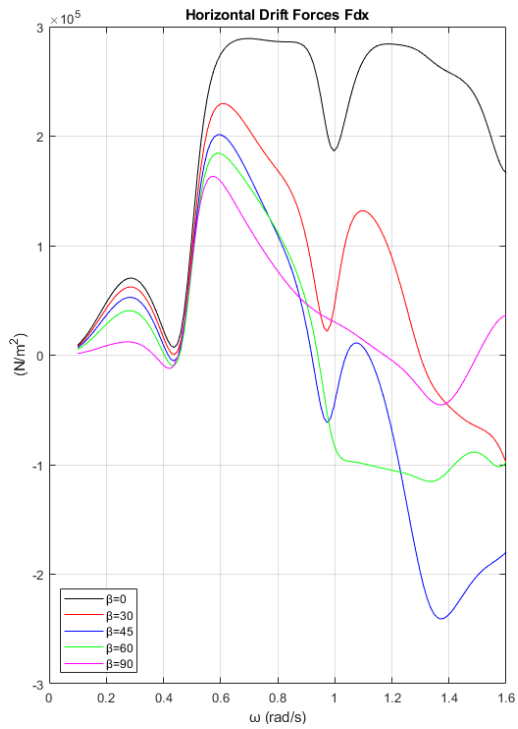
Εικόνα 463: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



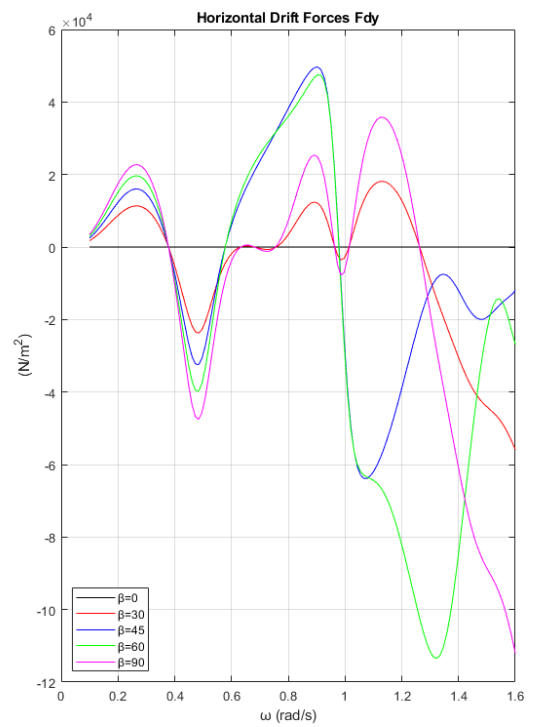
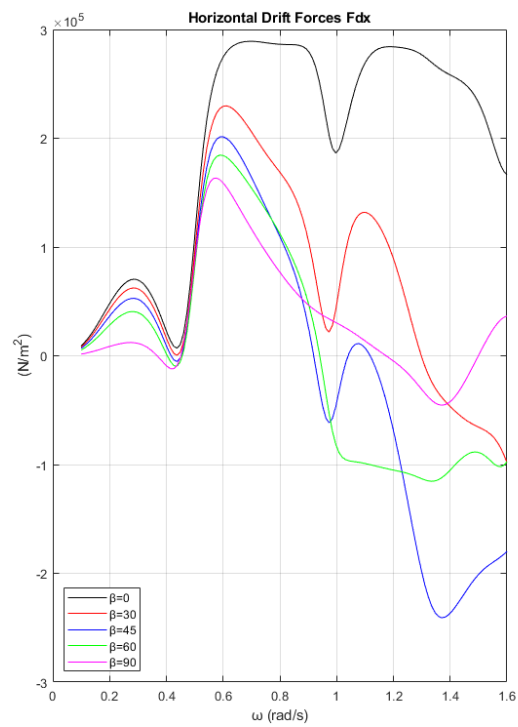
Εικόνα 464: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



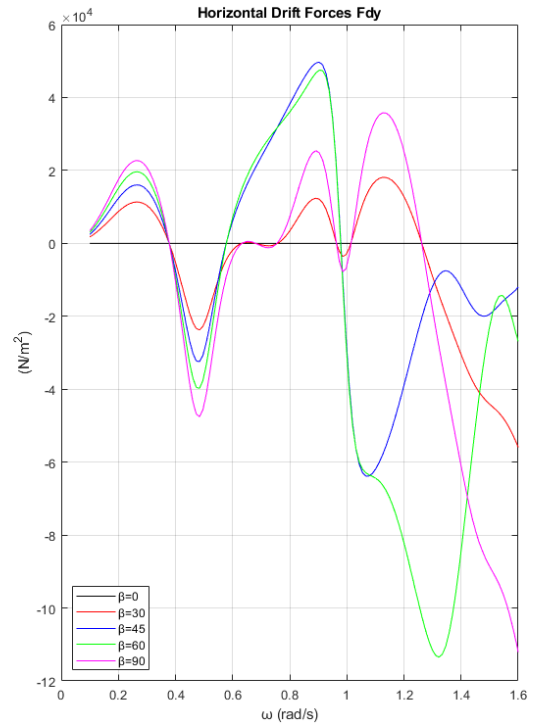
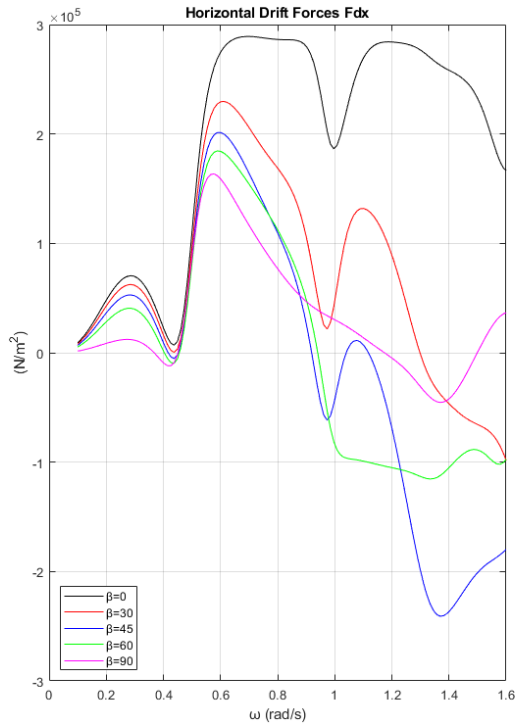
Εικόνα 465: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



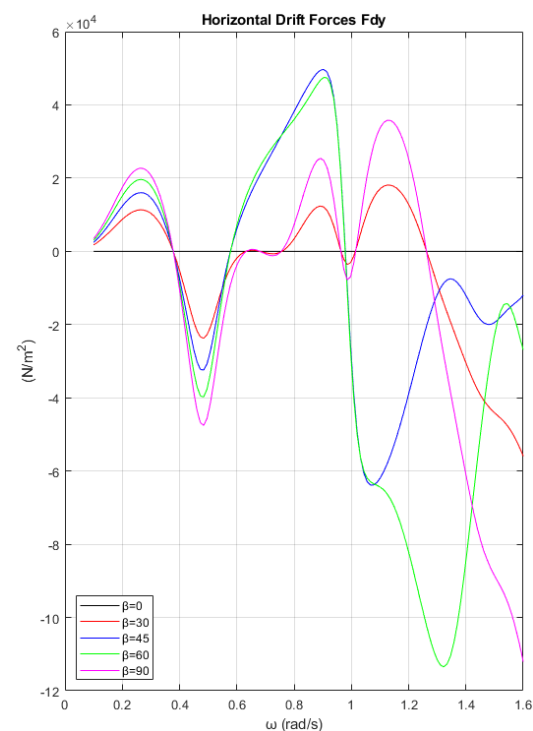
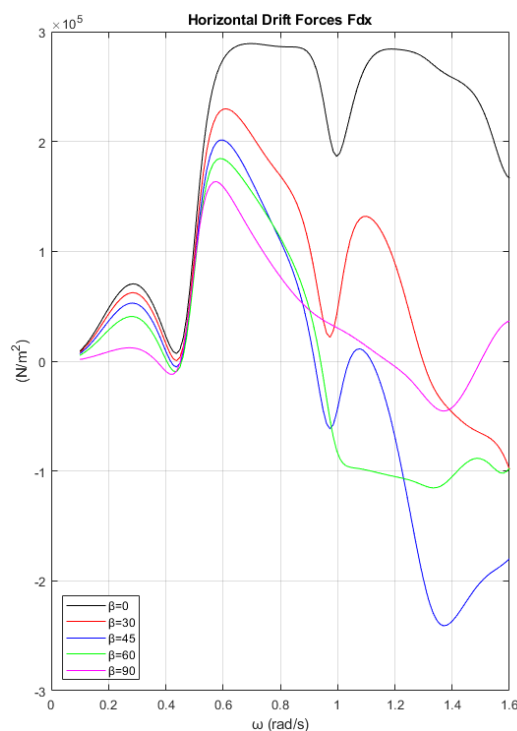
Εικόνα 466: Οριζόντιες μέσες έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 467: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 468: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 469: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν

Προηγουμένως έγινε αναφορά πως ο κύλινδρος 1 είναι ο καταλληλότερος κύλινδρος για να γίνει εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Ο μόνος τρόπος με τον οποίον μπορούμε να ελέγξουμε αν όντως είναι ο κατάλληλος κύλινδρος, είναι να μελετήσουμε πως συμπεριφέρεται ο κυματισμός όταν έρθει σε επαφή με τους κυλίνδρους της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Σε πρώτη εκτίμηση υποθέτουμε πως μάλλον στον κύλινδρο 1 της διάταξης θα παρατηρήσουμε και τη μεγαλύτερη ανύψωση. Στον Πίνακα 120 φαίνονται ο κύλινδρος και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

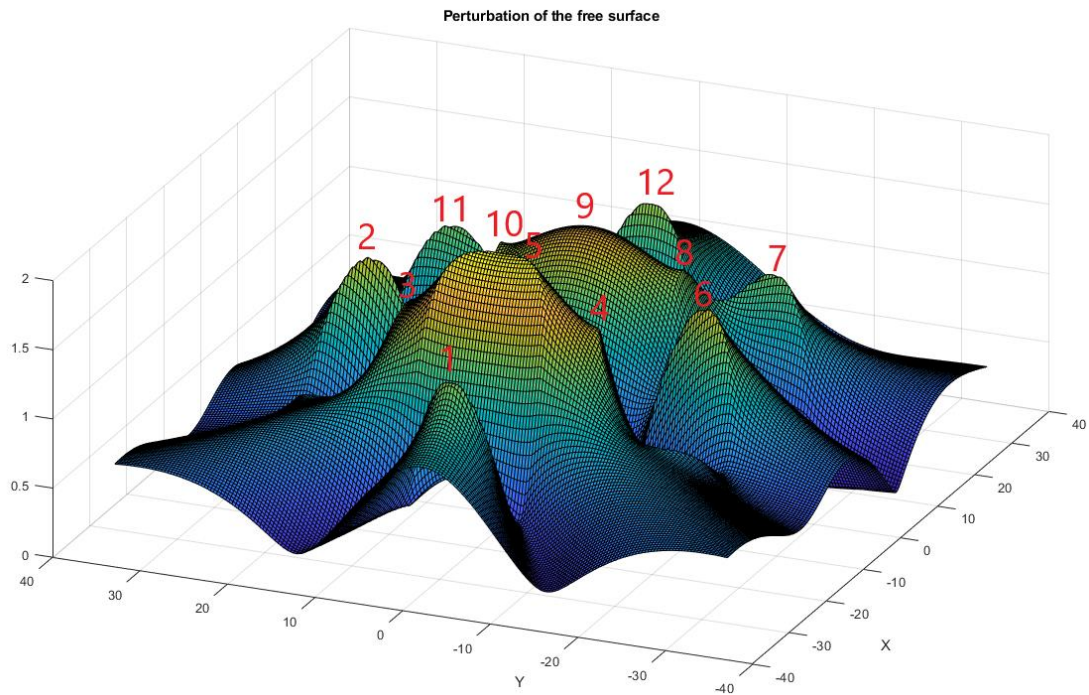
Πίνακας 120: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.92$	Κύλινδρος 1	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.94$	Κύλινδρος 1	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 6	F_y	ΝΑΙ

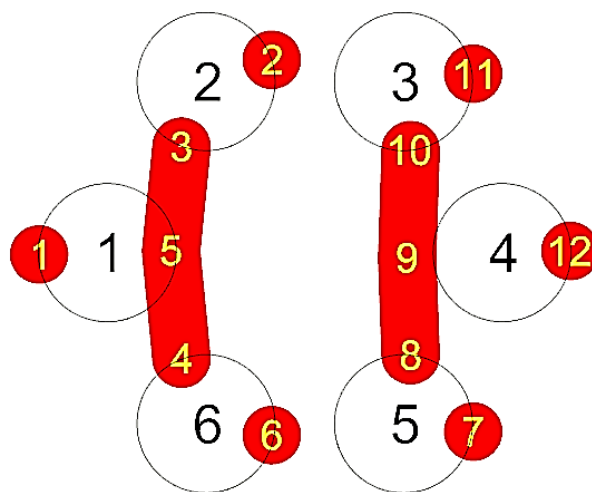
Στην Εικόνα 470 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Στον Πίνακα 121 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 471 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 121: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.35 m
2	1.53 m
3	1.52 m
4	1.52 m
5	1.96 m
6	1.53 m
7	1.30 m
8	1.40 m
9	1.62 m
10	1.40 m
11	1.30 m
12	1.41 m



Εικόνα 470: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

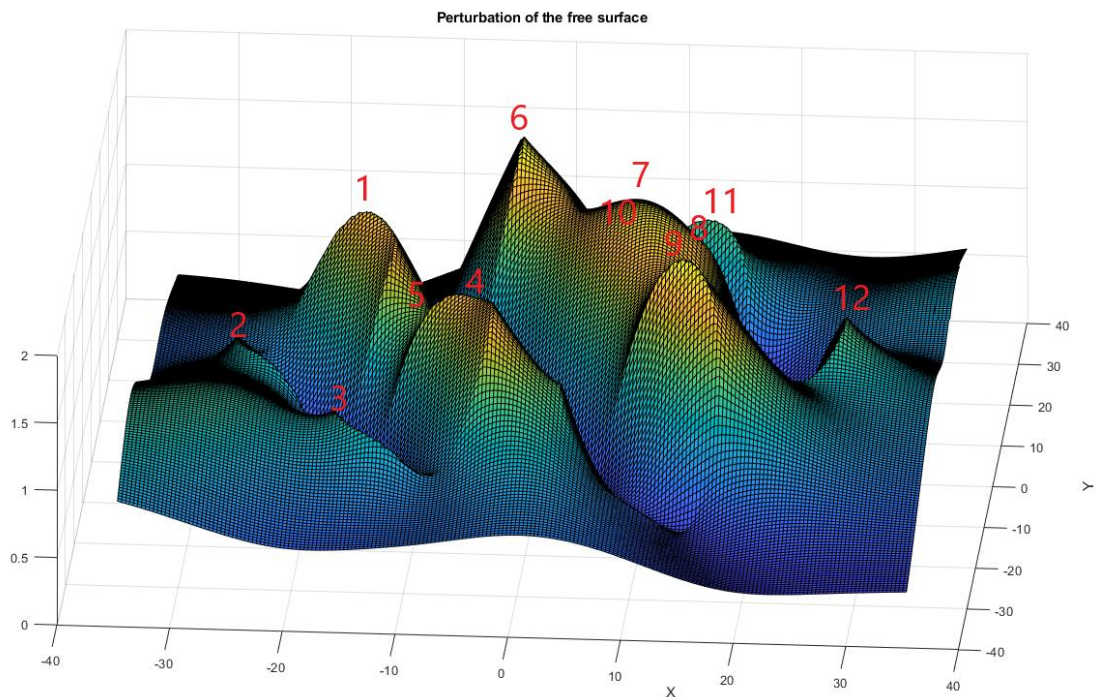


Εικόνα 471: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

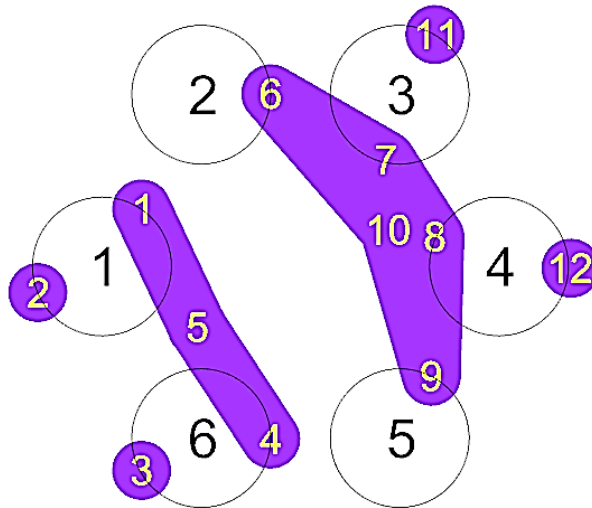
Στην Εικόνα 472 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 122 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 473 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 122: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.74 m
2	0.99 m
3	0.98 m
4	1.72 m
5	1.30 m
6	1.96 m
7	1.63 m
8	1.67 m
9	1.96 m
10	1.86 m
11	1.20 m
12	1.19 m



Εικόνα 472: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

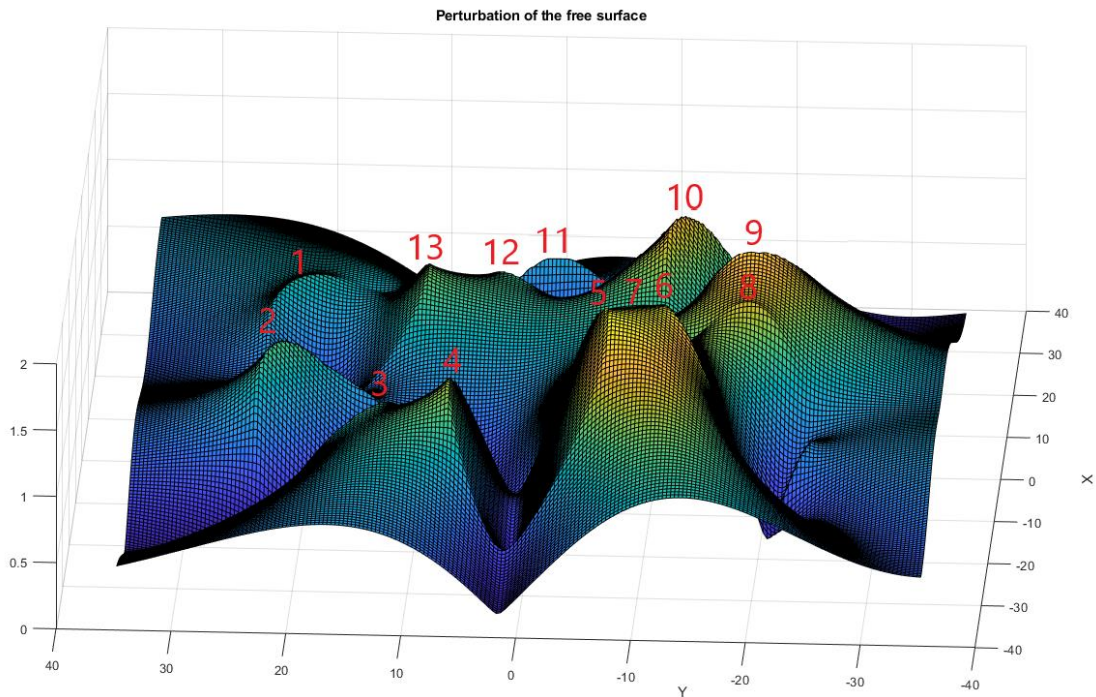


Εικόνα 473: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

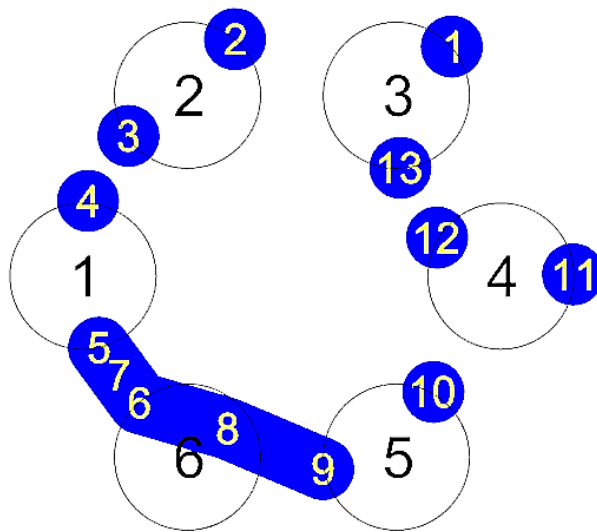
Στην Εικόνα 474 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Στον Πίνακα 123 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 475 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 123: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.93 m
2	1.10 m
3	0.95 m
4	1.27 m
5	1.78 m
6	1.70 m
7	1.75 m
8	1.22 m
9	1.59 m
10	1.49 m
11	0.74 m
12	1.04 m
13	1.19 m



Εικόνα 474: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

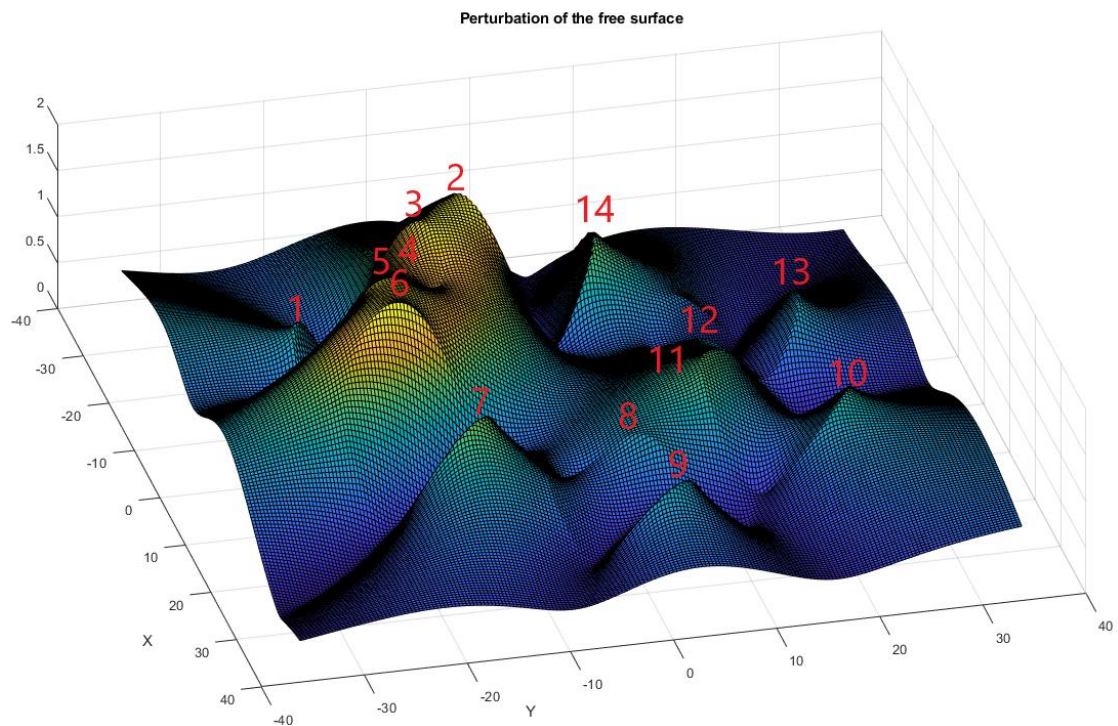


Εικόνα 475: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

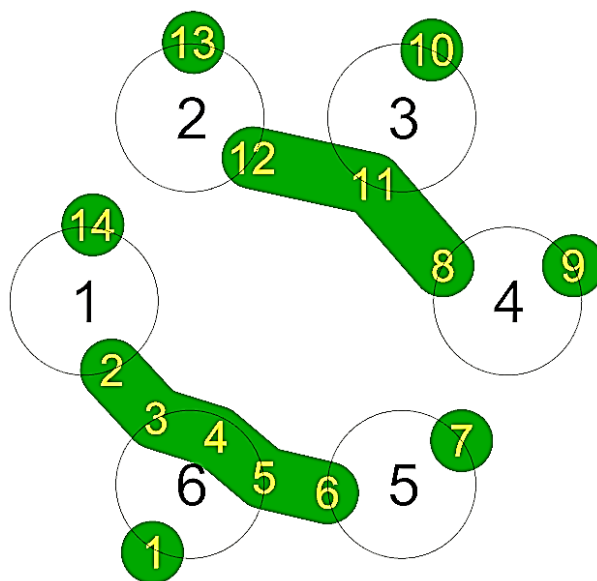
Στην Εικόνα 476 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Στον Πίνακα 124 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 477 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 124: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.96 m
2	1.98 m
3	1.94 m
4	1.70 m
5	1.93 m
6	1.99 m
7	1.30 m
8	0.85 m
9	0.90 m
10	1.04 m
11	1.22 m
12	0.84 m
13	0.90 m
14	1.27 m



Εικόνα 476: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

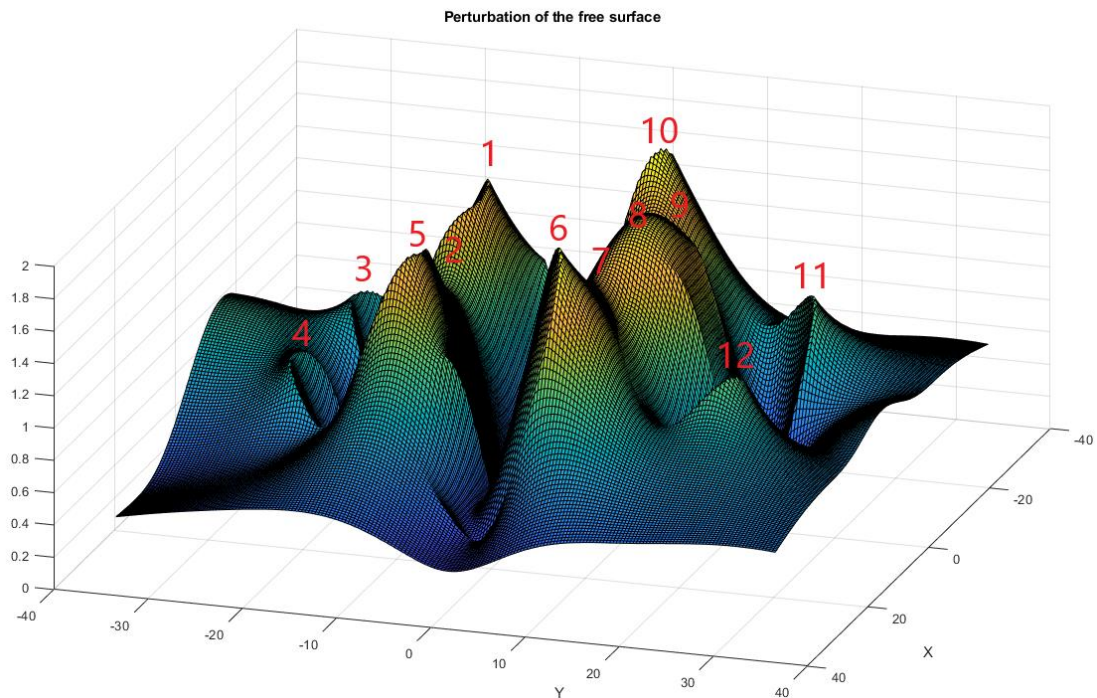


Εικόνα 477: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

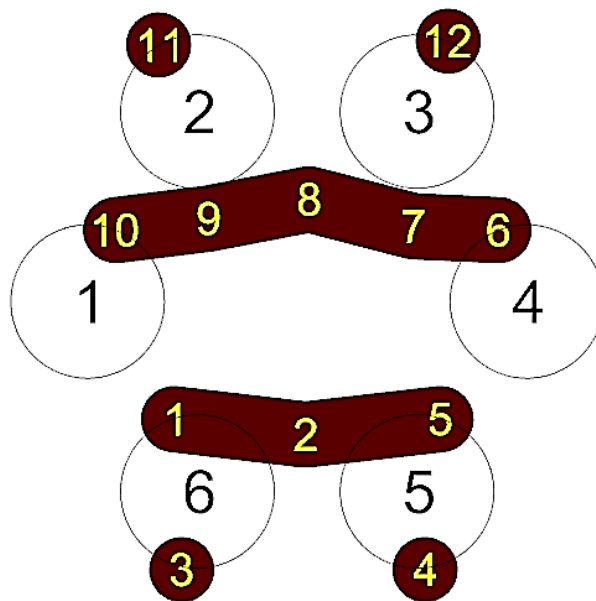
Στην Εικόνα 478 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 125 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 479 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 125: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.74 m
2	1.30 m
3	0.98 m
4	0.98 m
5	1.74 m
6	1.95 m
7	1.62 m
8	1.87 m
9	1.63 m
10	1.95 m
11	1.21 m
12	1.21 m



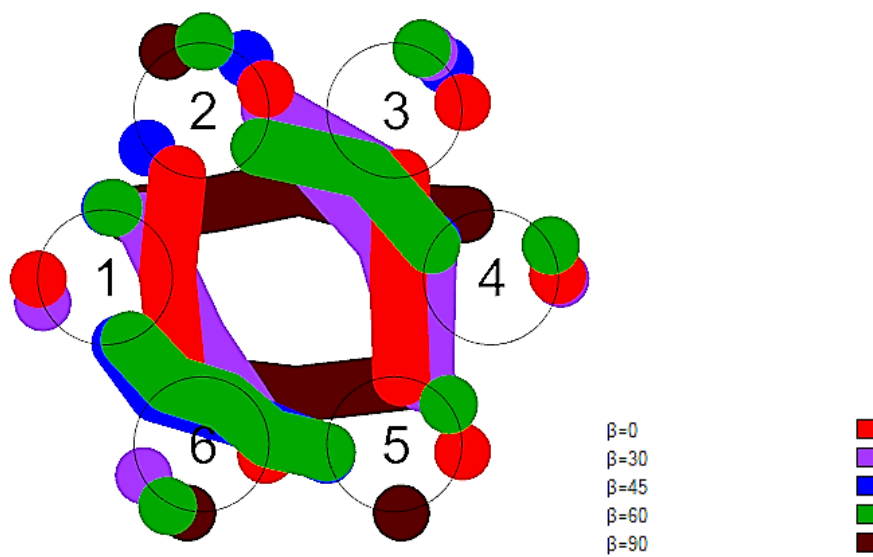
Εικόνα 478: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann του κυλίνδρου δ της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



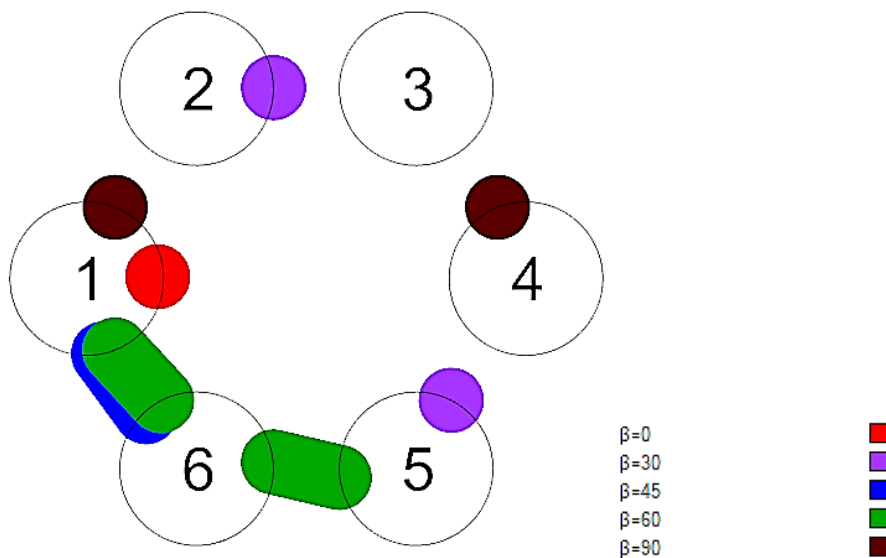
Εικόνα 479: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 480 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 481 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα

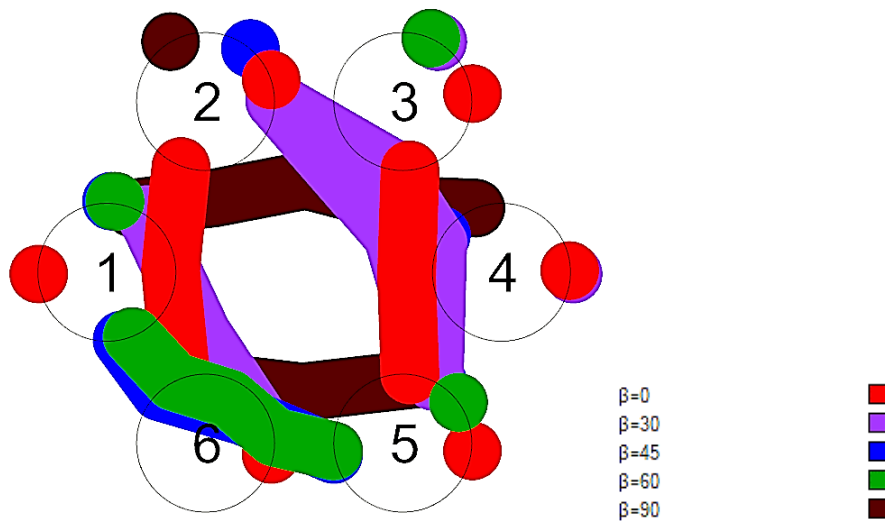
481 παρατηρούμε πως στη διάταξη μπορεί να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας στον κύλινδρο 1, όπως ακριβώς είχαμε υποθέσει. Όμως επειδή η Εικόνα 481, αποτελεί έναν οδηγό για τις θέσεις των μεγίστων κορυφών, τότε προκύπτει η Εικόνα 482, όπου φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 482 συμπεραίνουμε πως μπορούμε να εγκαταστήσουμε έξι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι. Παρατηρούμε το «μοοηροο1» εντός της διάταξης, αλλά, λόγω της απόστασης των κυλίνδρων δεν δημιουργήθηκε κάποια έντονη κορυφή. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η διάταξη φέρνοντας τους κυλίνδρους πιο κοντά και να ελεγχθεί αν θα εμφανιστεί το «μοοηροο1».



Εικόνα 480: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



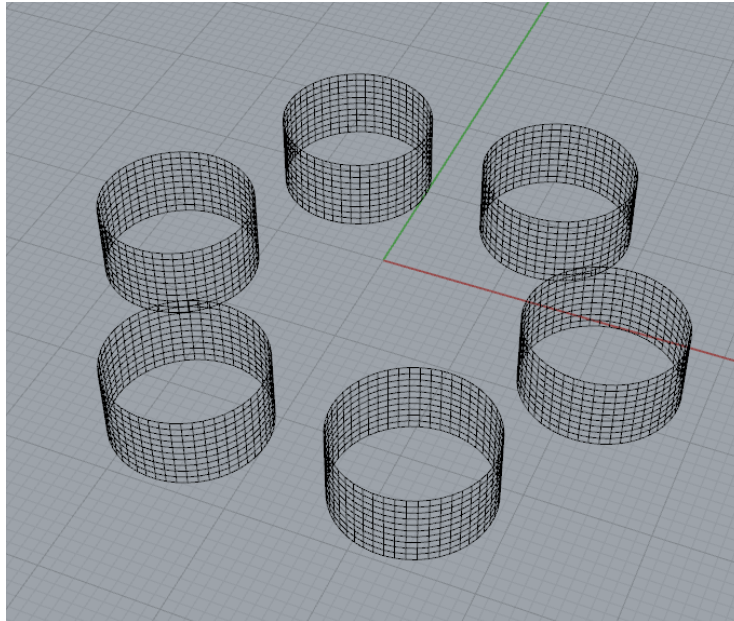
Εικόνα 481: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 482: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

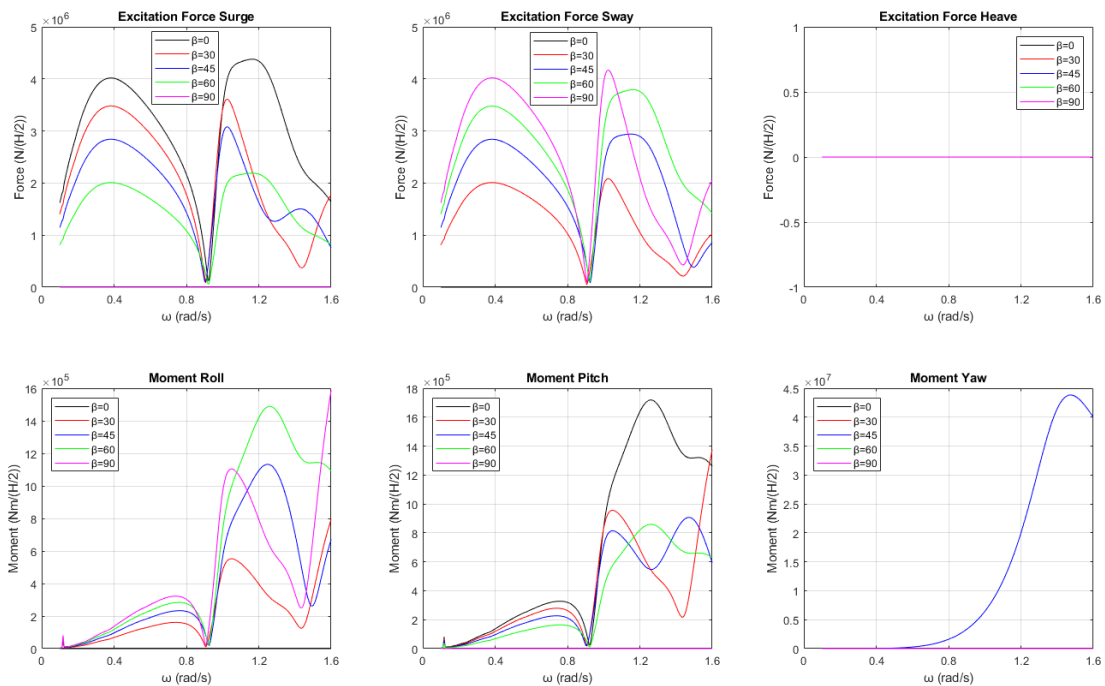
3.7.2 Μελέτη της διάταξης σαν ένα σώμα

Στην παράγραφο αυτή, θα μελετήσουμε τους έξι κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους σαν ένα σώμα. Μελετώντας τη διάταξη σαν ένα σώμα θα ελέγξουμε αν εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών στη διάταξη και πως μεταβάλλεται η κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 483 φαίνεται η διακριτοποίηση της διάταξης των έξι κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα που αποτελείται από 3300 σημεία και 3000 στοιχεία.



Εικόνα 483: Παράδειγμα διακριτοποίησης της διάταξης των έξι κατακόρυφων κυλίνδρων σαν ένα σώμα που αποτελείται από 3300 σημεία και 3000 στοιχεία

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στην Εικόνα 484. Στον Πίνακα 126 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 126 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών δεν εμφανίζεται σε καμία από τις συχνότητες των μεμονωμένων κυλίνδρων, οι οποίες φαίνονται στους Πίνακες 118 και 119.

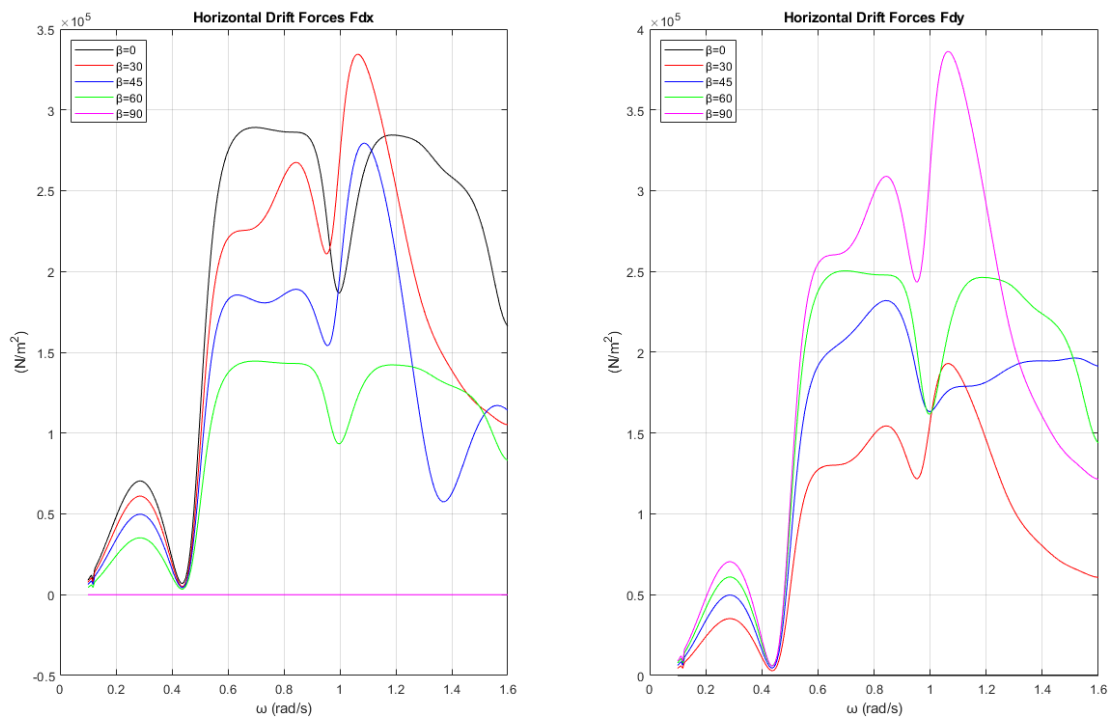


Εικόνα 484: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται συνολικά στην διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Πίνακας 126: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.03$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.03$	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.02$	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	—

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη, από το πρόβλημα περιθλασης, φαίνονται στην Εικόνα 485.



Εικόνα 485: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη από τον κυματισμό

Όπως και προηγουμένως, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 127 φαίνονται οι συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν οι συχνότητες αυτές ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 127: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

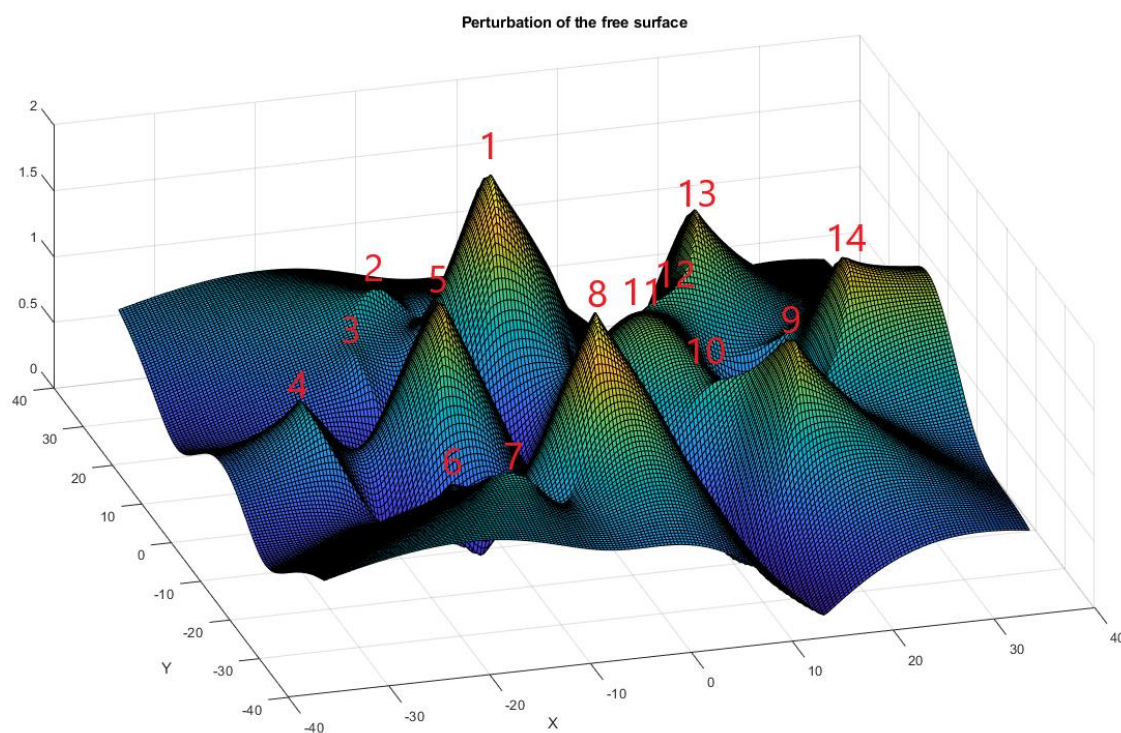
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.16$	F_x	OXI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.03$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.03$	F_x	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.18$	F_y	OXI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	F_y	NAI

Στην Εικόνα 486 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 128 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 487 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών

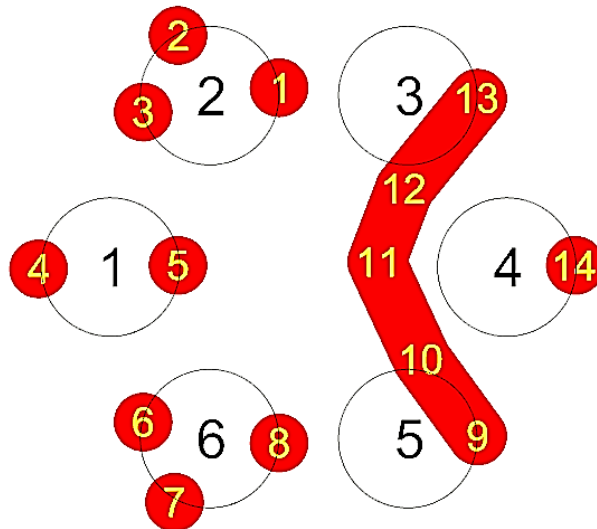
που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 128: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.95 m
2	0.98 m
3	0.70 m
4	0.93 m
5	1.58 m
6	0.70 m
7	0.99 m
8	1.95 m
9	1.54 m
10	1.08 m
11	1.30 m
12	1.08 m
13	1.54 m
14	1.58 m



Εικόνα 486: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

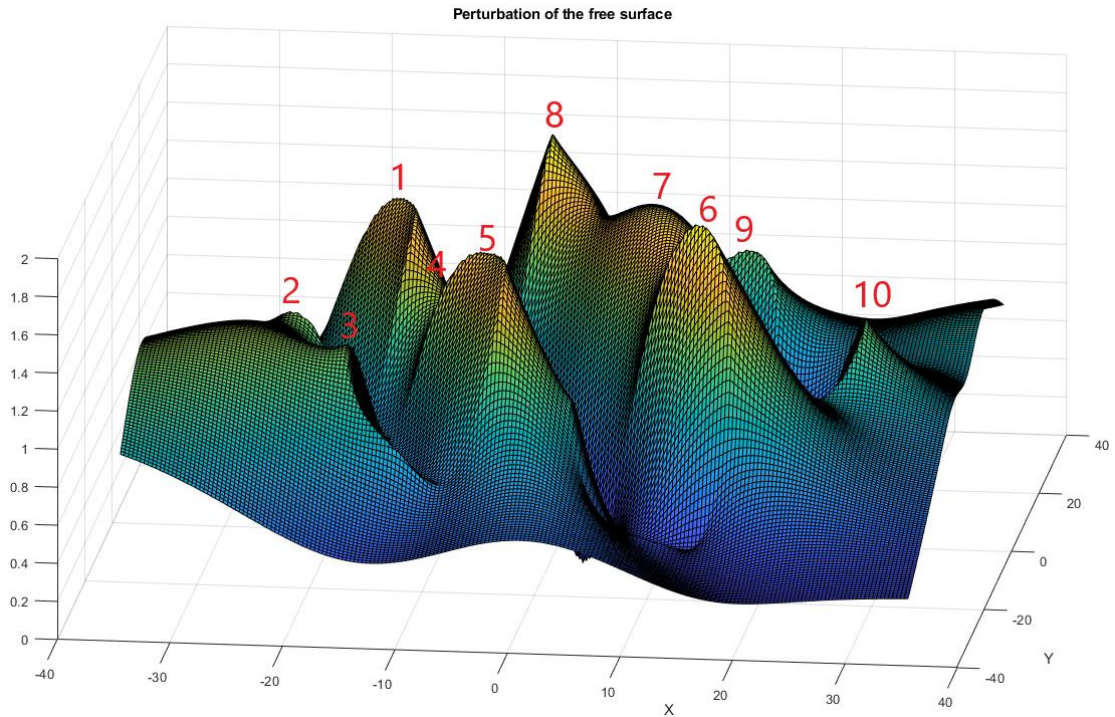


Εικόνα 487: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

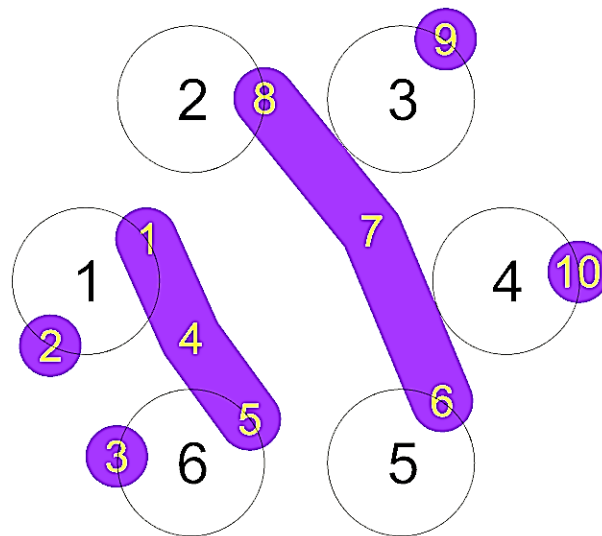
Στην Εικόνα 488 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 129 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 489 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 129: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.68 m
2	1.24 m
3	1.24 m
4	1.29 m
5	1.68 m
6	1.84 m
7	1.67 m
8	1.84 m
9	1.18 m
10	1.18 m



Εικόνα 488: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

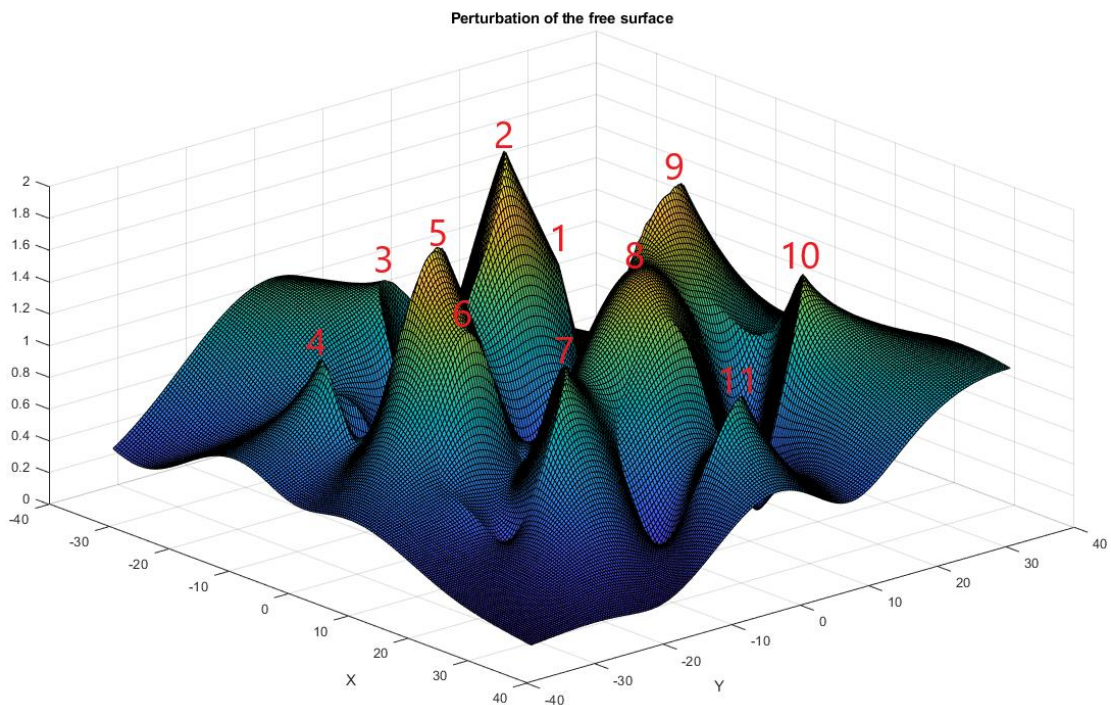


Εικόνα 489: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

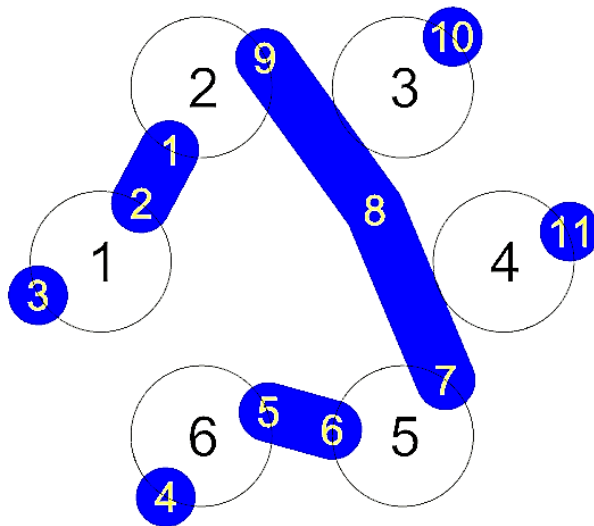
Στην Εικόνα 490 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 130 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 491 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 130: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.26 m
2	1.99 m
3	1.15 m
4	1.08 m
5	1.82 m
6	1.40 m
7	1.28 m
8	1.60 m
9	1.79 m
10	1.42 m
11	1.06 m



Εικόνα 490: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

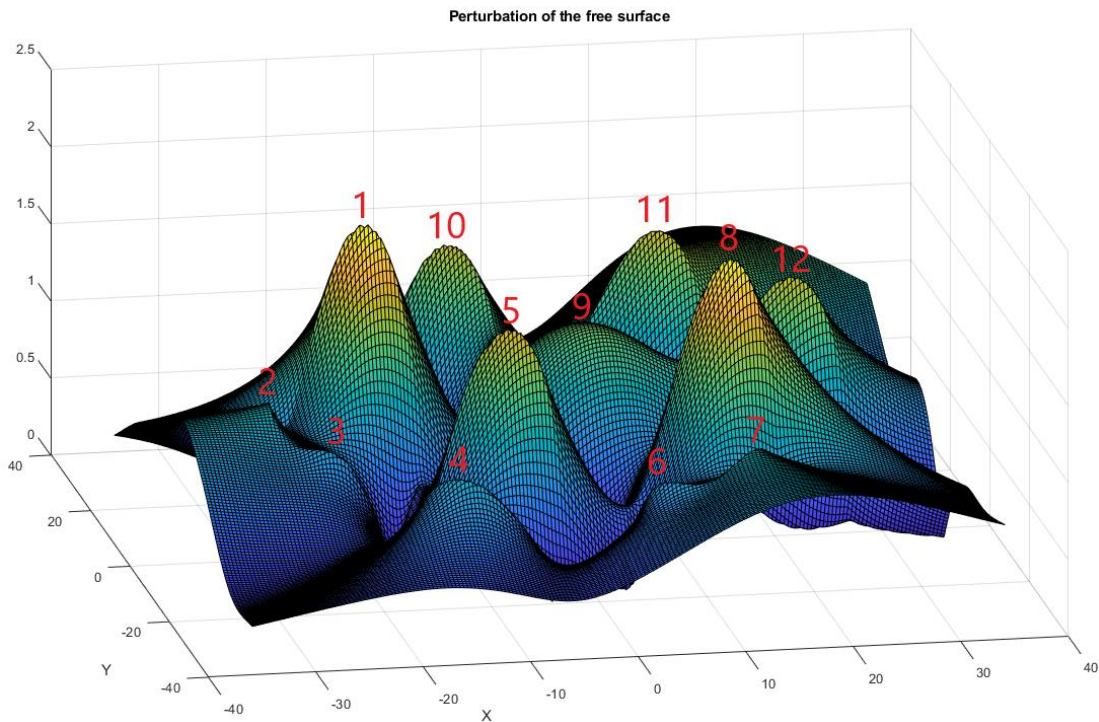


Εικόνα 491: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

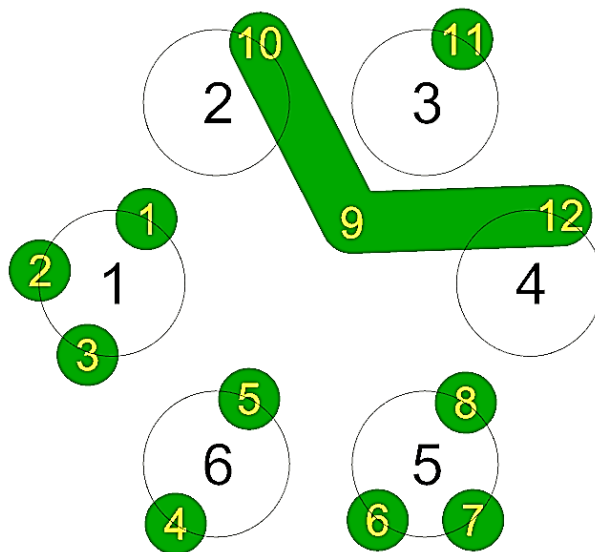
Στην Εικόνα 492 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 131 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 493 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 131: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.02 m
2	0.99 m
3	0.77 m
4	0.89 m
5	1.63 m
6	0.79 m
7	0.99 m
8	2.02 m
9	1.30 m
10	1.55 m
11	1.58 m
12	1.54 m



Εικόνα 492: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

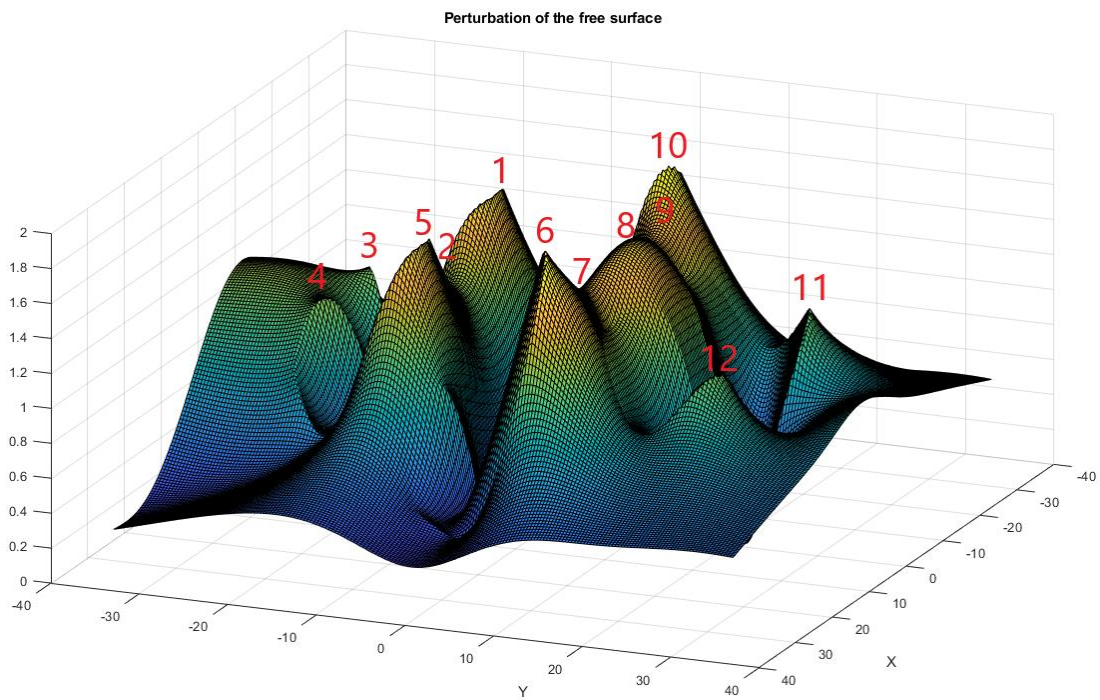


Εικόνα 493: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

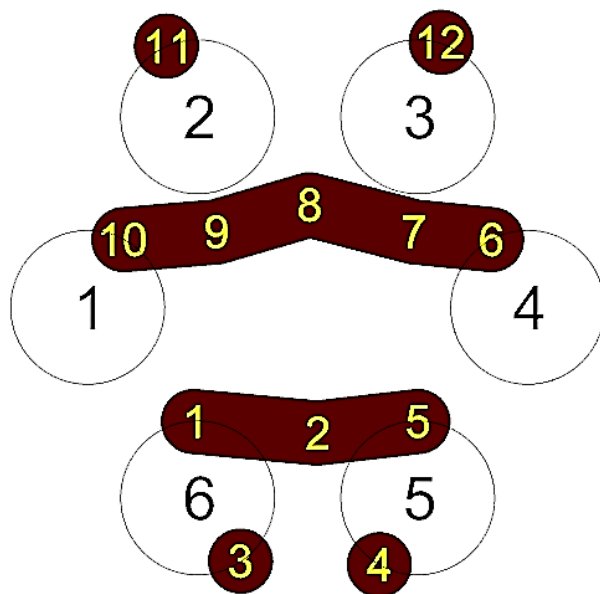
Στην Εικόνα 494 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Στον Πίνακα 132 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 495 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 132: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.69 m
2	1.29 m
3	1.23 m
4	1.23 m
5	1.69 m
6	1.84 m
7	1.53 m
8	1.68 m
9	1.53 m
10	1.84m
11	1.19 m
12	1.19 m

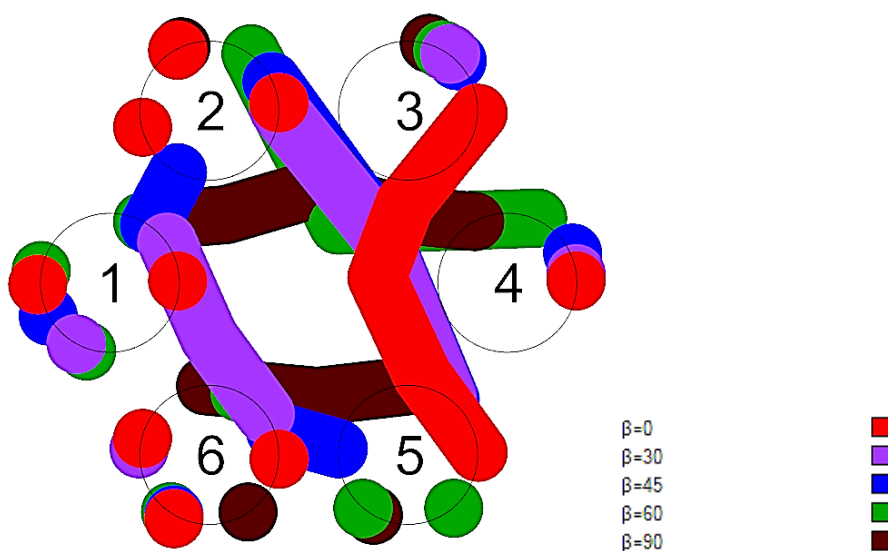


Εικόνα 494: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

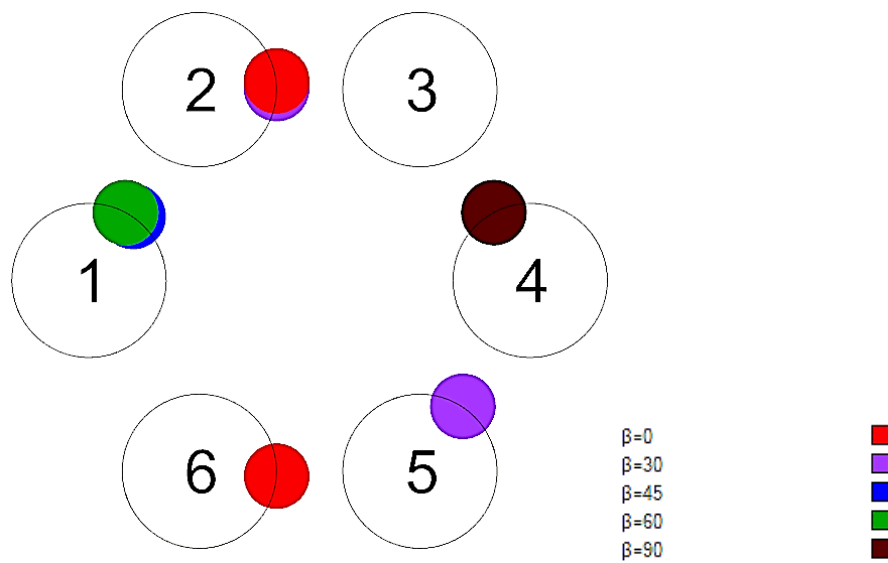


Εικόνα 495: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

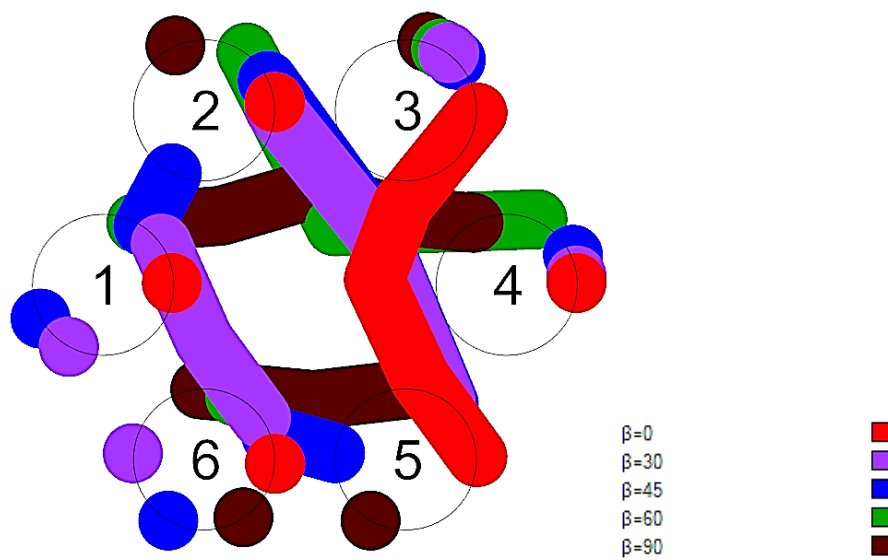
Στην Εικόνα 496 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 497 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην Εικόνα 498 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 498 συμπεραίνουμε πως μπορούμε να εγκαταστήσουμε έξι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι. Όπως και προηγουμένως, έτσι και εδώ αναμέναμε να συναντήσουμε το «moonpool» εντός της διάταξης, όπου λόγω της απόστασης των κυλίνδρων δεν δημιουργήθηκε κάποια έντονη κορυφή.



Εικόνα 496: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 497: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 498: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι κύλινδροι είναι τοποθετημένοι σε κυκλική μορφή με τα κέντρα τους να απέχουν από την αρχή των αξόνων απόσταση $5R$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 500. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων εκφράζονται από τους ακόλουθους λόγους:

$$\frac{d}{R} = 4 \quad \text{και} \quad \frac{h}{R} = 2$$

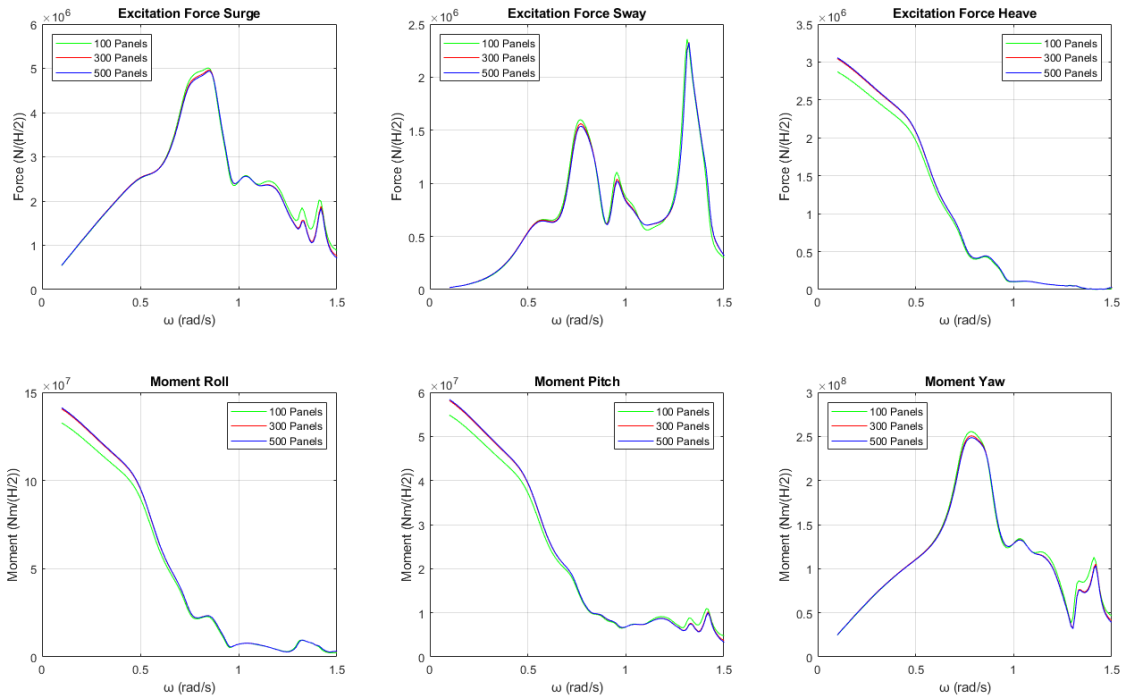
Από την Εικόνα 500, έχουμε ότι η γενική μορφή των συντεταγμένων των κυλίνδρων, ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 2 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 3 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 4 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 5 (x_1, y_1)
- Κύλινδρος 6 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 7 (x_2, y_2)
- Κύλινδρος 8 (x_1, y_1)

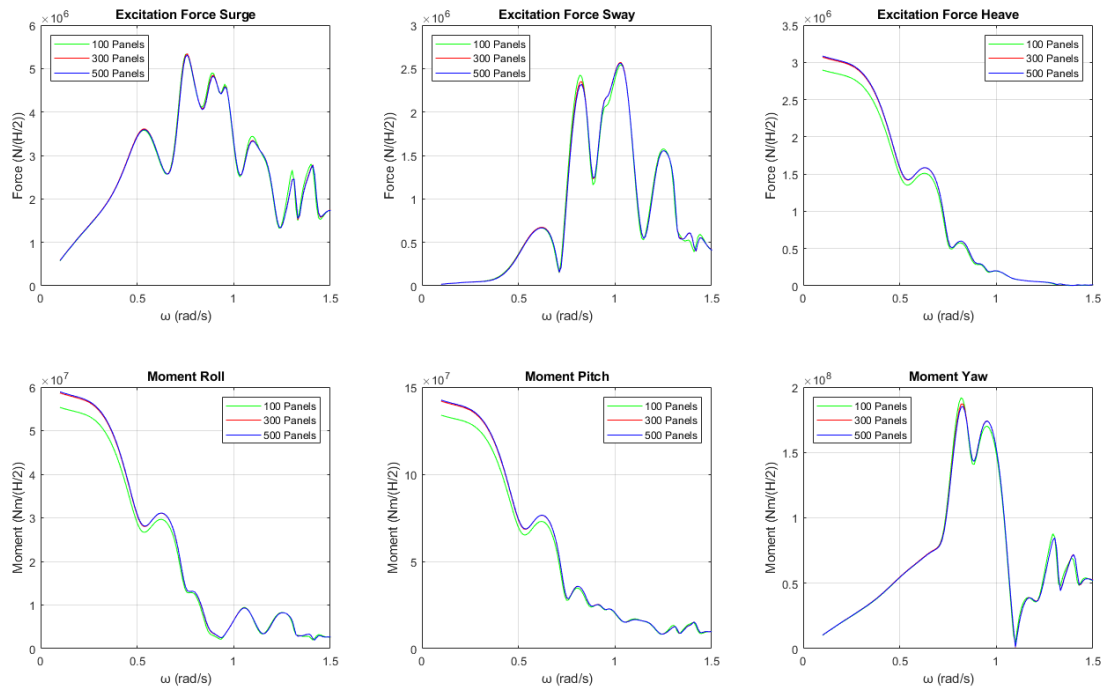
Η διακριτοποίηση που θα κάνουμε είναι ίδια με αυτήν που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.2. Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 10m$, βρίσκονται σε βάθος $d = 40m$ και ο πυθμένας τους απέχει από τον πυθμένα της θάλασσας $h = 20m$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 (46.2,19.1)
- Κύλινδρος 2 (19.1,46.2)
- Κύλινδρος 3 (-19.1,46.2)
- Κύλινδρος 4 (-46.2,19.1)
- Κύλινδρος 5 (-46.2, -19.1)
- Κύλινδρος 6 (-19.1, -46.2)
- Κύλινδρος 7 (19.1, -46.2)
- Κύλινδρος 8 (46.2, -19.1)

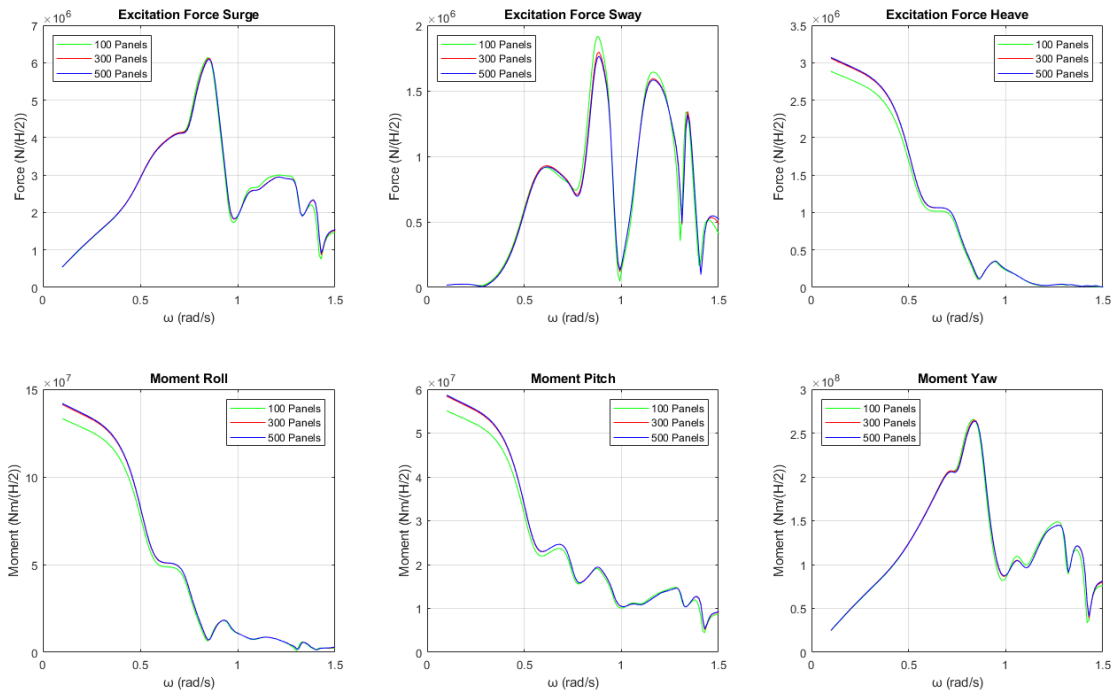
Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αλλάζουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε την κυκλική διάταξη των οχτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων για 100, 300 και 500 στοιχεία. Από τις προηγούμενες διατάξεις έχουμε παρατηρήσει πως όταν η διακριτοποίηση του ενός κυλίνδρου αποτελείται από 700 στοιχεία τότε τα αποτελέσματα που παράγει το πρόγραμμα BEM NEMOH έχουν πολύ μικρές διαφορές με τη διακριτοποίηση των 500 στοιχείων. Στις Εικόνες 501-504 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους 2, 4, 6 και 8 της διάταξης.



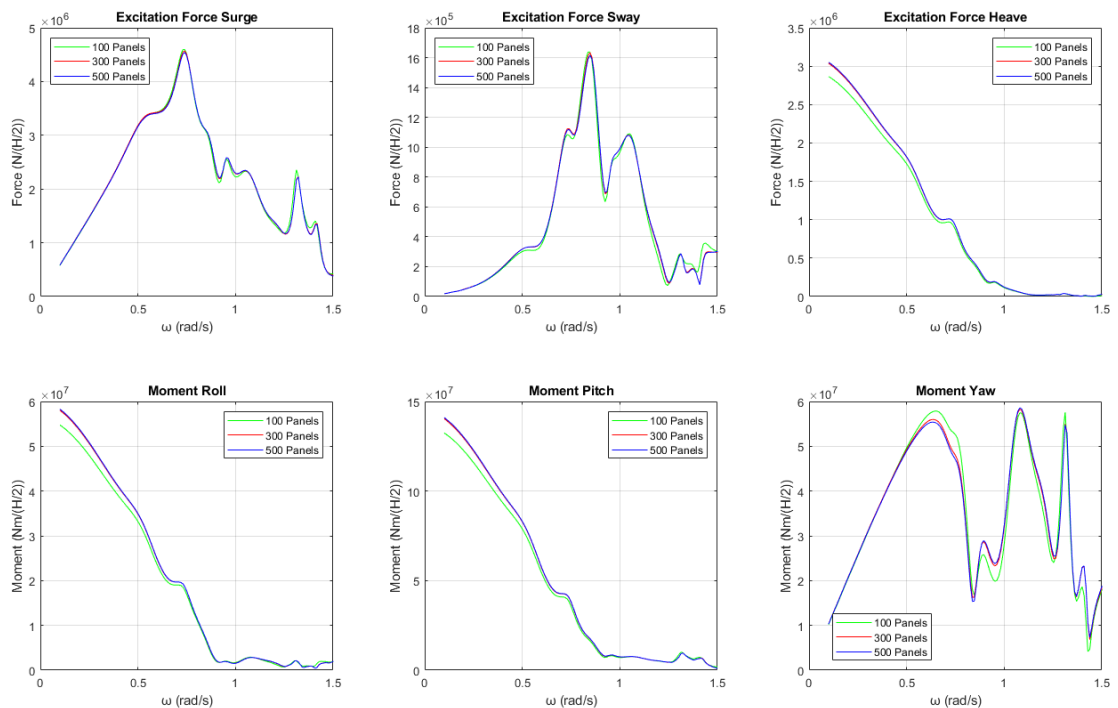
Εικόνα 501: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης



Εικόνα 502: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης



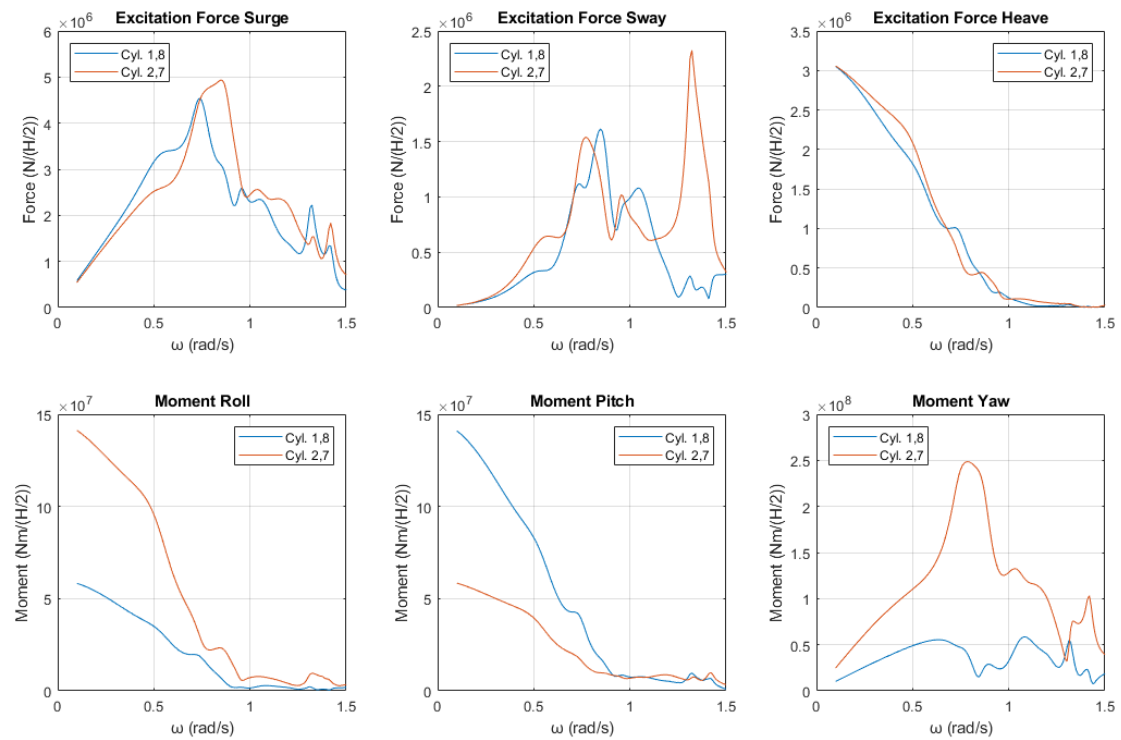
Εικόνα 503: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης



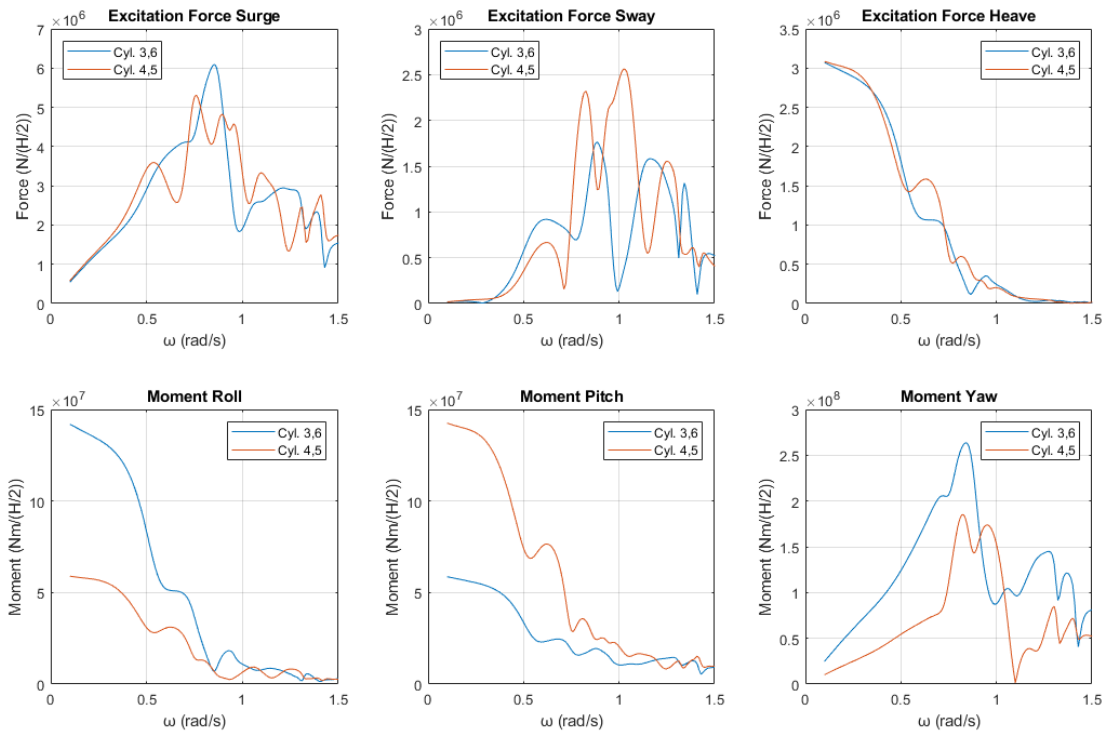
Εικόνα 504: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 8 της διάταξης

Από τις Εικόνες 501-504 παρατηρούμε πως δεν αποκλίνουν τα αποτελέσματα μεταξύ τους ακόμα και όταν η διακριτοποίηση ενός κυλίνδρου αποτελείται από 100 στοιχεία. Όμως, επειδή τα αποτελέσματα πρέπει να είναι αξιόπιστα θα προχωρήσουμε στην μελέτη της διάταξης με την διακριτοποίηση των 500 στοιχείων. Στην Εικόνα 505

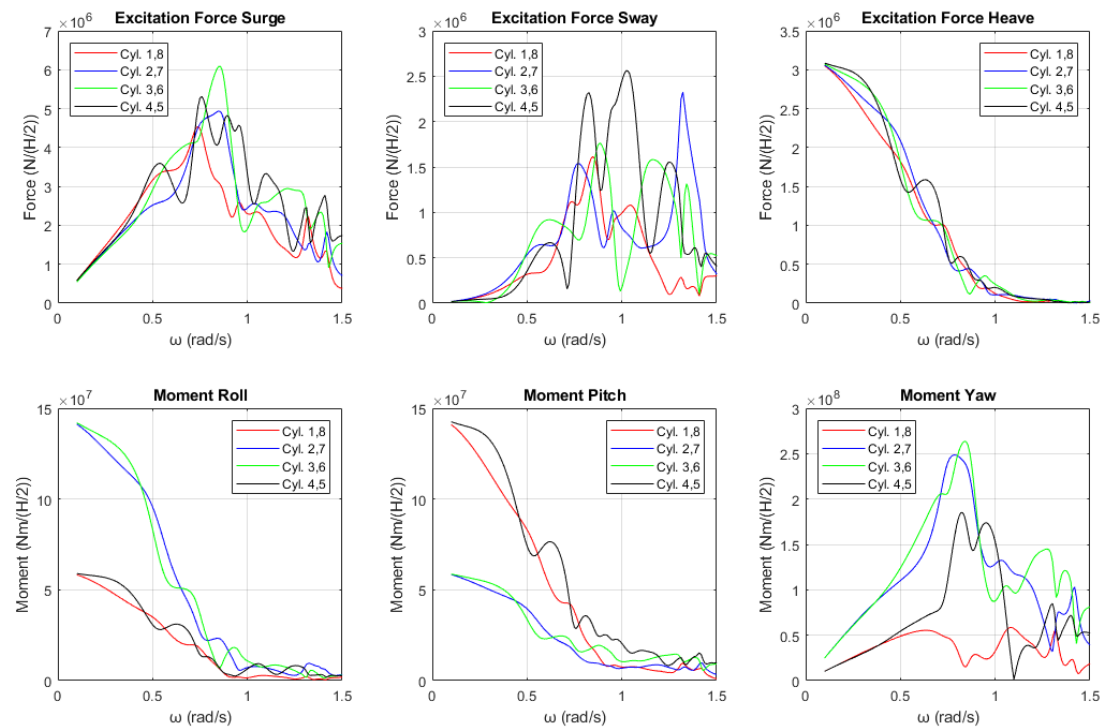
φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους 1, 2, 7 και 8 της διάταξης. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 506 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους 3, 4, 5 και 6 της διάταξης. Στην Εικόνα 507 φαίνονται οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης.



Εικόνα 505: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους 1,2,7 και 8 της διάταξης



Εικόνα 506: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους 3,4,5 και 6 της διάταξης



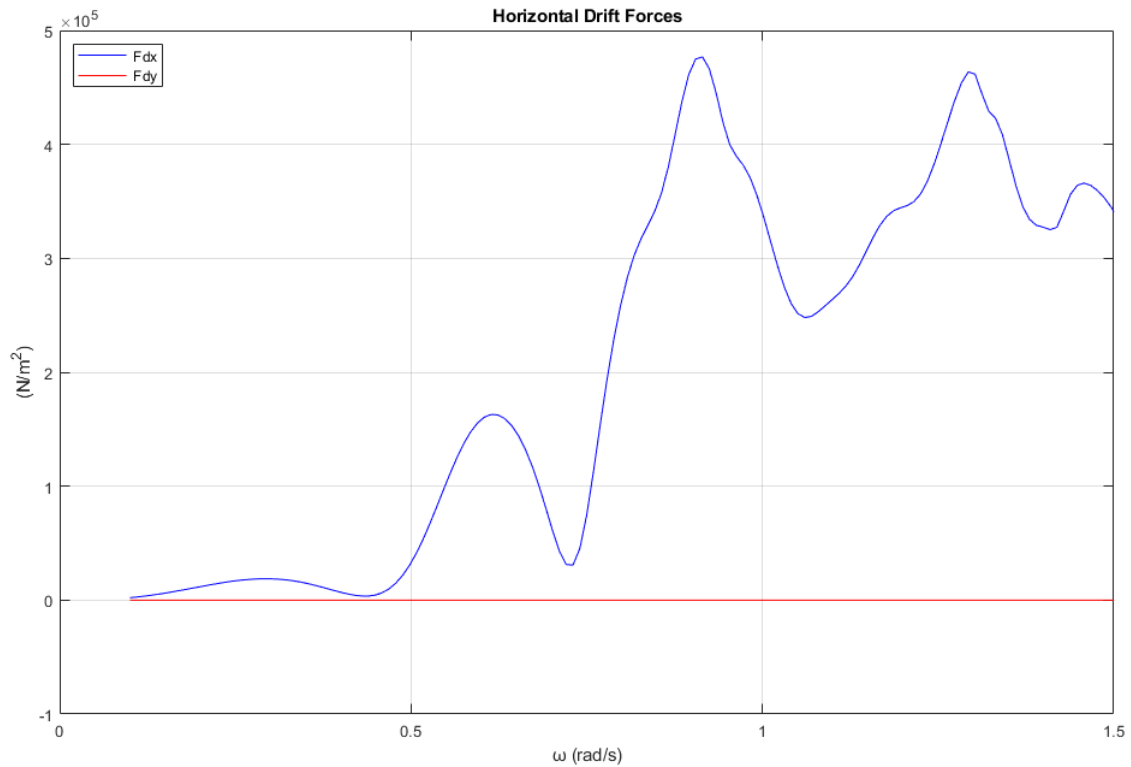
Εικόνα 507: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης

Από την Εικόνα 507 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στους κυλίνδρους της διάταξης όχι μόνο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις

διέγερσης F_x , αλλά και ως προς τις F_y . Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για τους κυλίνδρους 1 και 8 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.74 r/s$ και η συνθήκη Dirichlet στην $\omega \cong 1.32 r/s$. Για τους κυλίνδρους 3 και 6 ικανοποιείται μόνο η συνθήκη Neumann στη συχνότητα $\omega \cong 0.85 r/s$. Τέλος, για τους κυλίνδρους 4 και 5 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.76 r/s$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 0.89 r/s$. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για τους κυλίνδρους 1 και 8 ικανοποιείται μόνο η συνθήκη Neumann στη συχνότητα $\omega \cong 0.85 r/s$. Αντίστοιχα για τους κυλίνδρους 2 και 7 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.32 r/s$. Για τους κυλίνδρους 3 και 6 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 0.89 r/s$ και αντίστοιχα η Dirichlet στην $\omega \cong 1.17 r/s$. Τέλος, για τους κυλίνδρους 4 και 5 η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.03 r/s$ και η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.25 r/s$. Όπως και στην περίπτωση των τεσσάρων και πέντε κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων στις παραγράφους 3.3 και 3.6 αντίστοιχα, θα διαχωρίσουμε τη μελέτη της διάταξης σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θα θεωρήσουμε πως οι κύλινδροι είναι ακίνητοι (diffraction problem), ενώ στο δεύτερο θα εκτελούν ελεύθερη ταλάντωση (radiation problem).

3.8.1 Ακίνητοι κύλινδροι – diffraction problem

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται στη διάταξη, όταν οι κύλινδροι είναι ακίνητοι, φαίνονται στην Εικόνα 508.



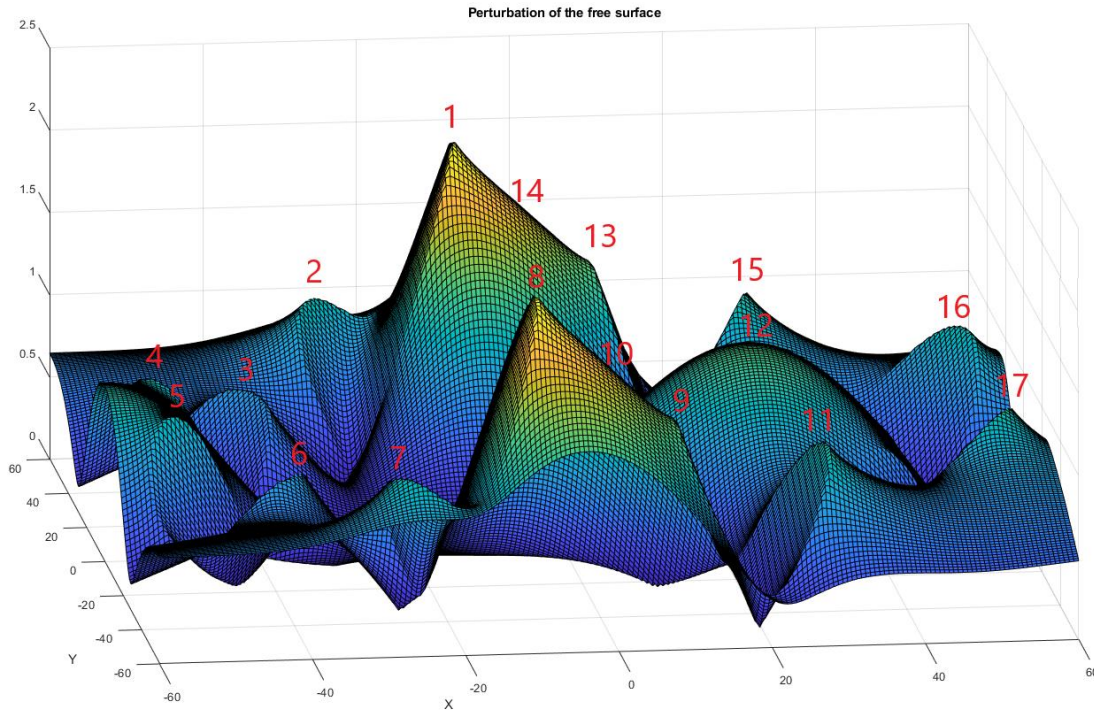
Εικόνα 508: Συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη

Στην Εικόνα 509 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 133 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 510 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

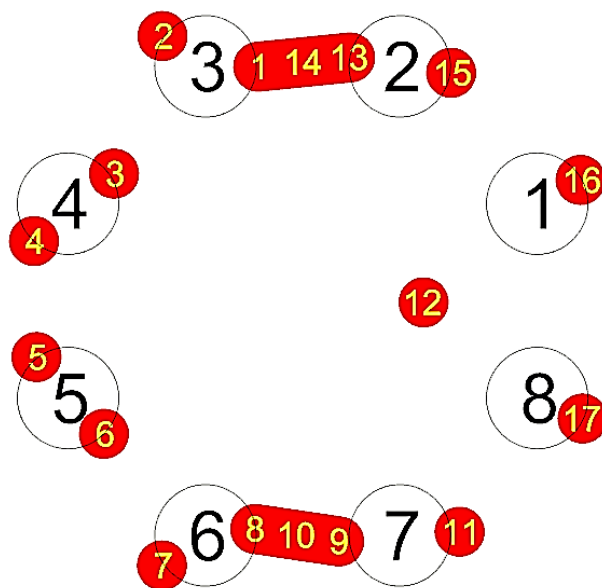
Πίνακας 133: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.01 m
2	1.00 m
3	0.75 m
4	0.98 m
5	0.98 m
6	0.75 m
7	1.00 m
8	2.01 m
9	1.22 m
10	1.62 m
11	1.06 m
12	1.21 m

13	1.22 m
14	1.62 m
15	1.06 m
16	1.03 m
17	1.03 m

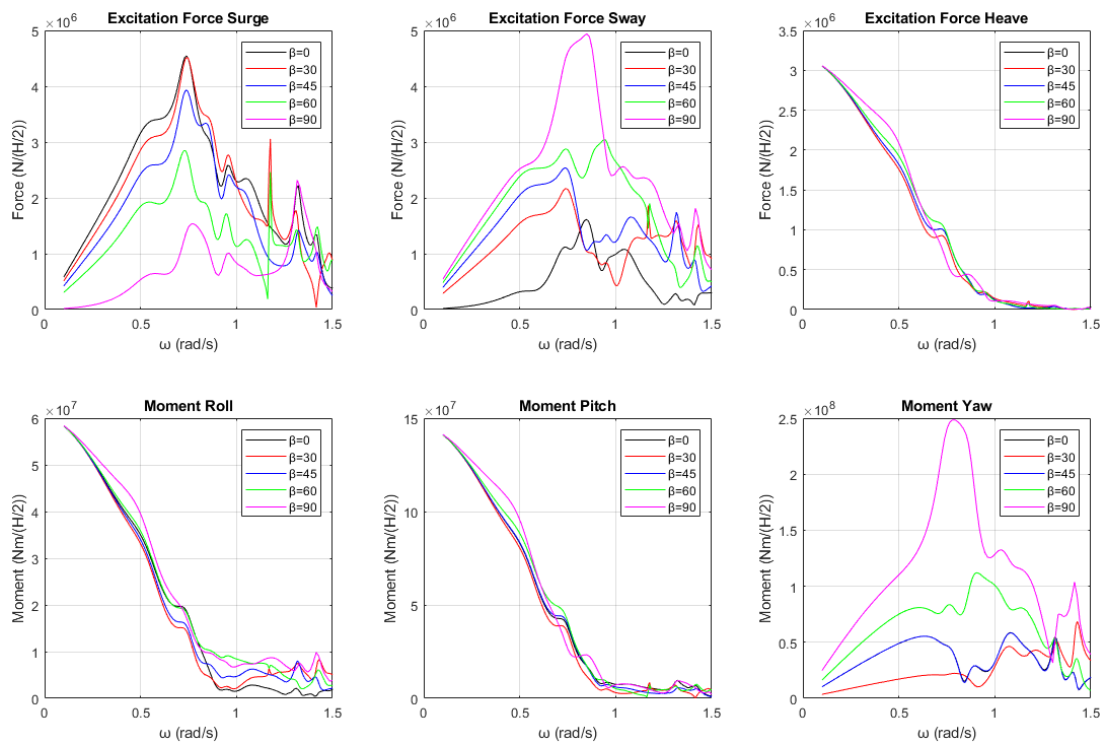


Εικόνα 509: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

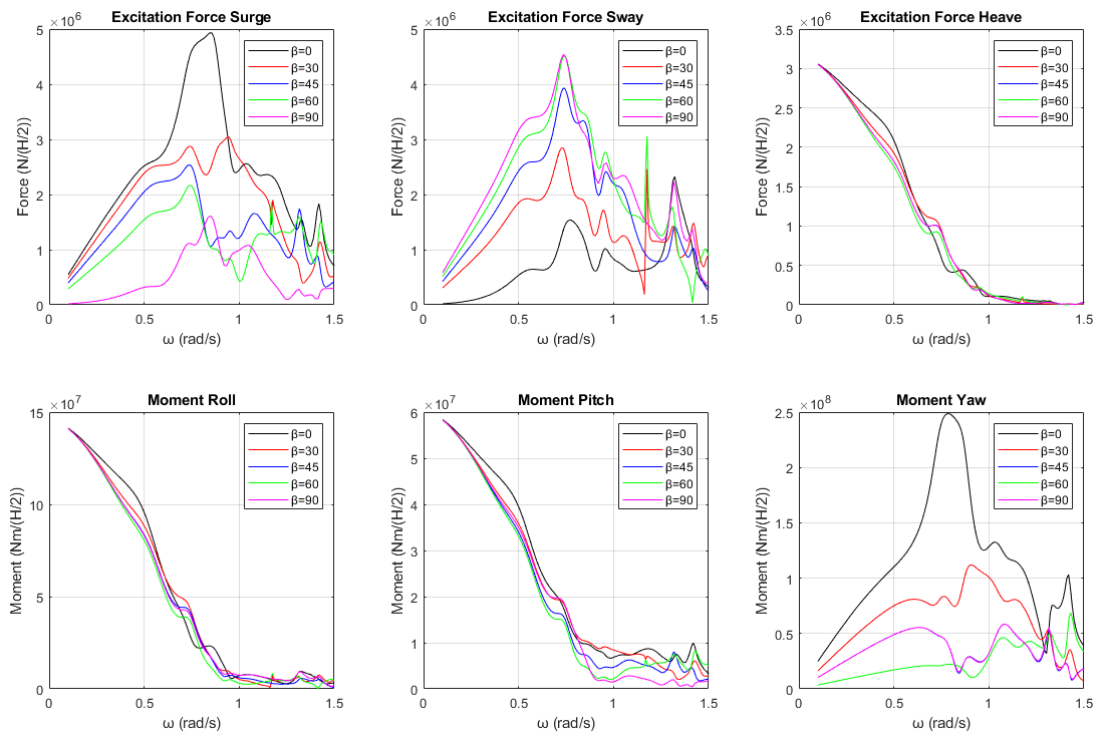


Εικόνα 510: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

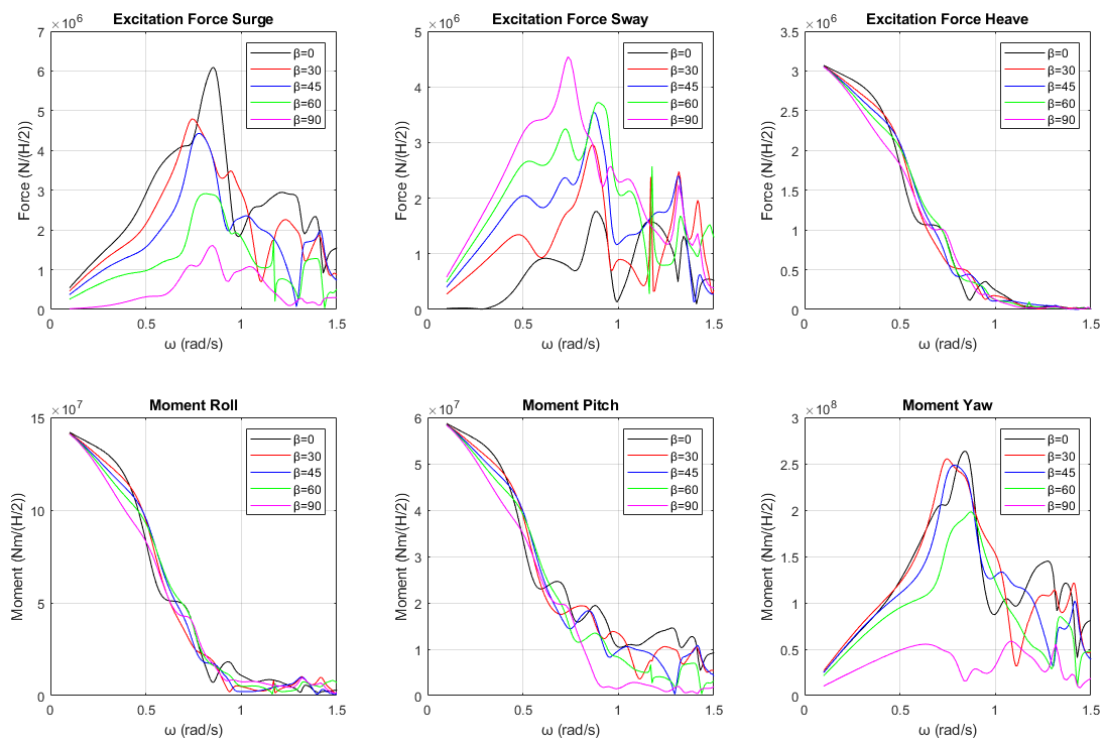
Προκειμένου να ελέγξουμε πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, μελετάμε τη διάταξη για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 511-518 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



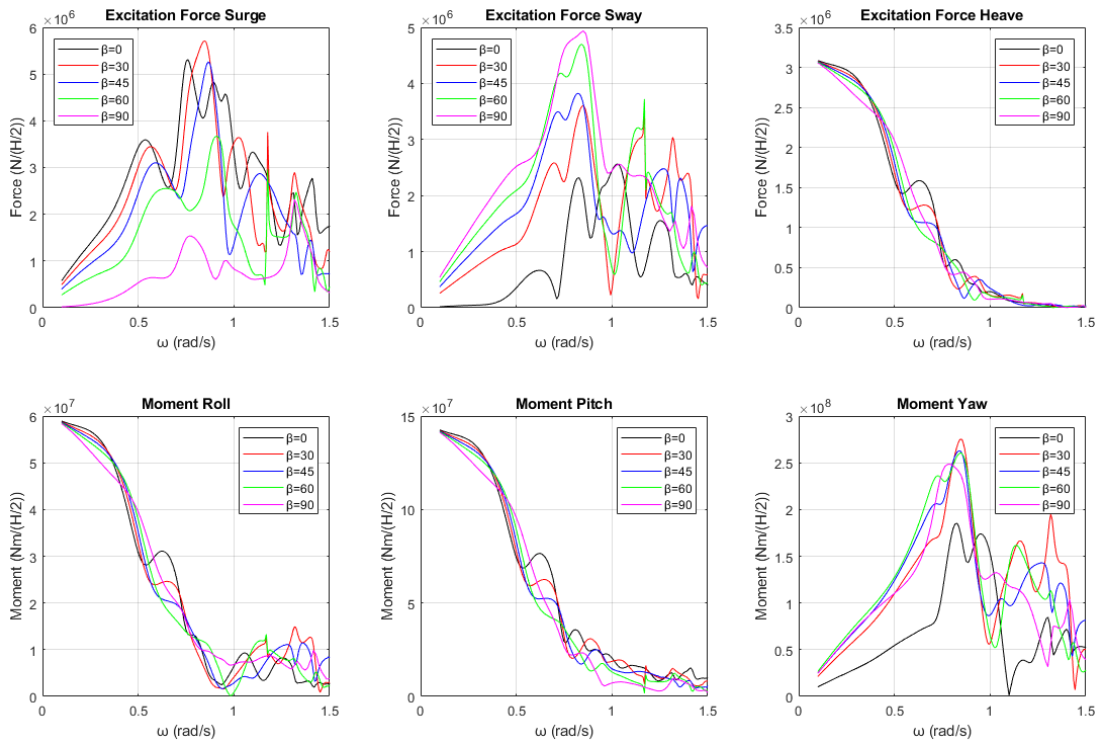
Εικόνα 511: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



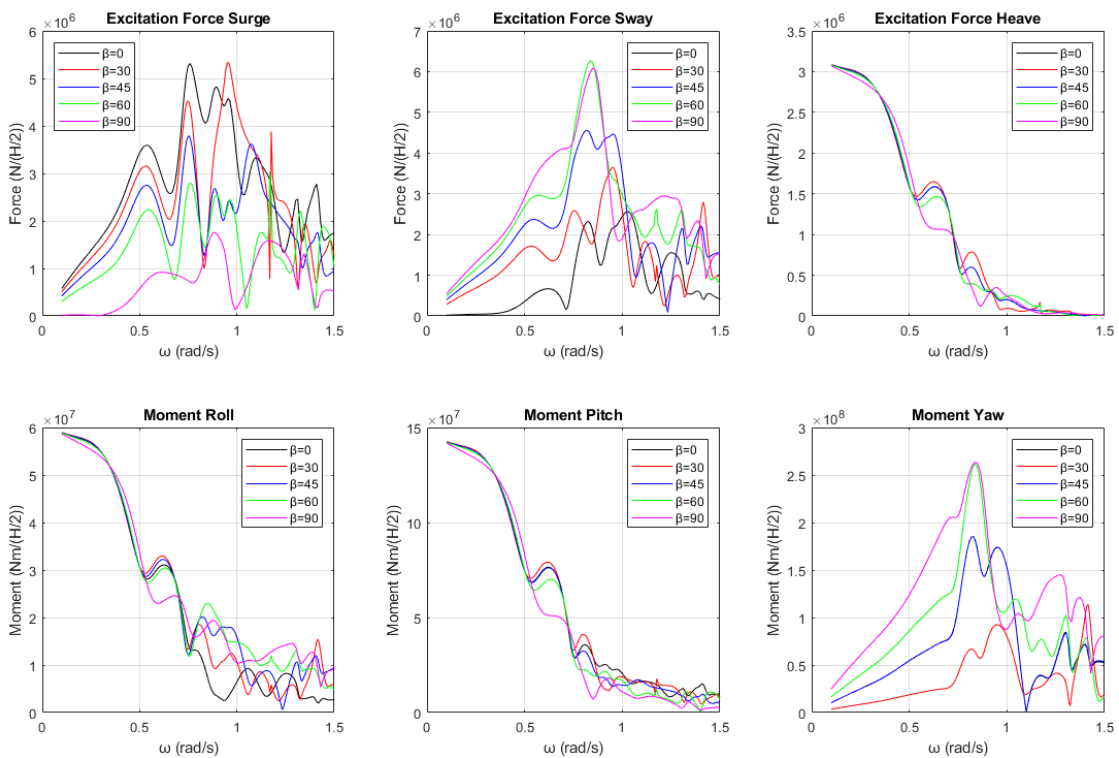
Εικόνα 512: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



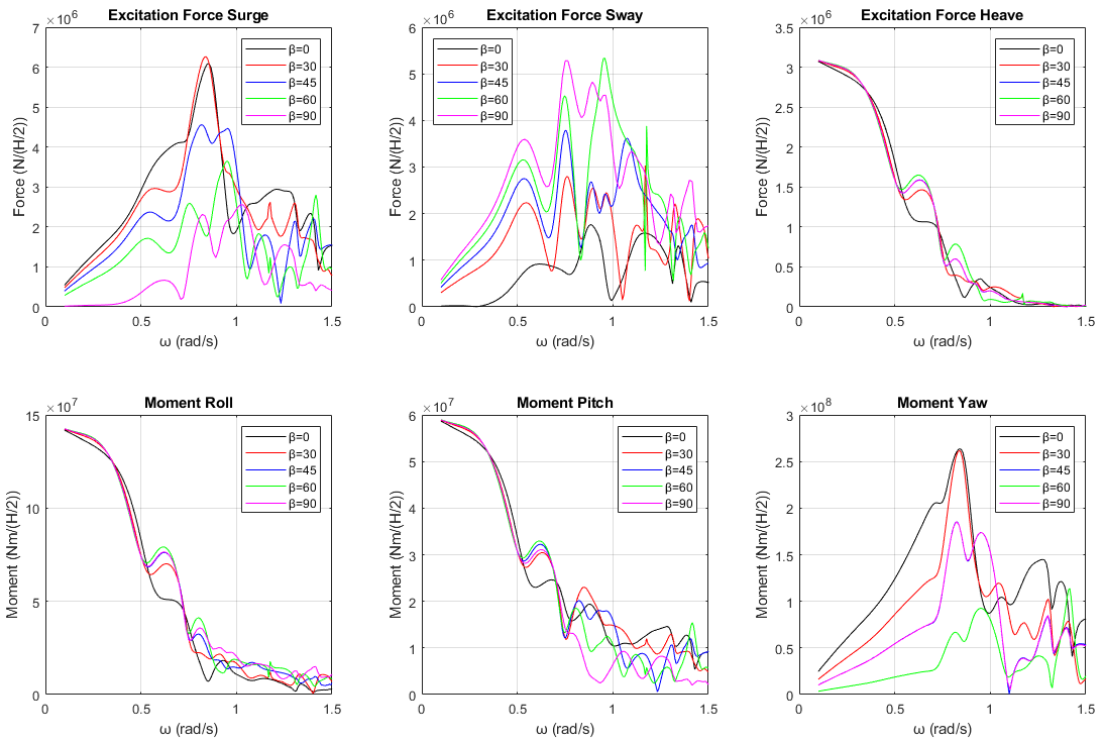
Εικόνα 513: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



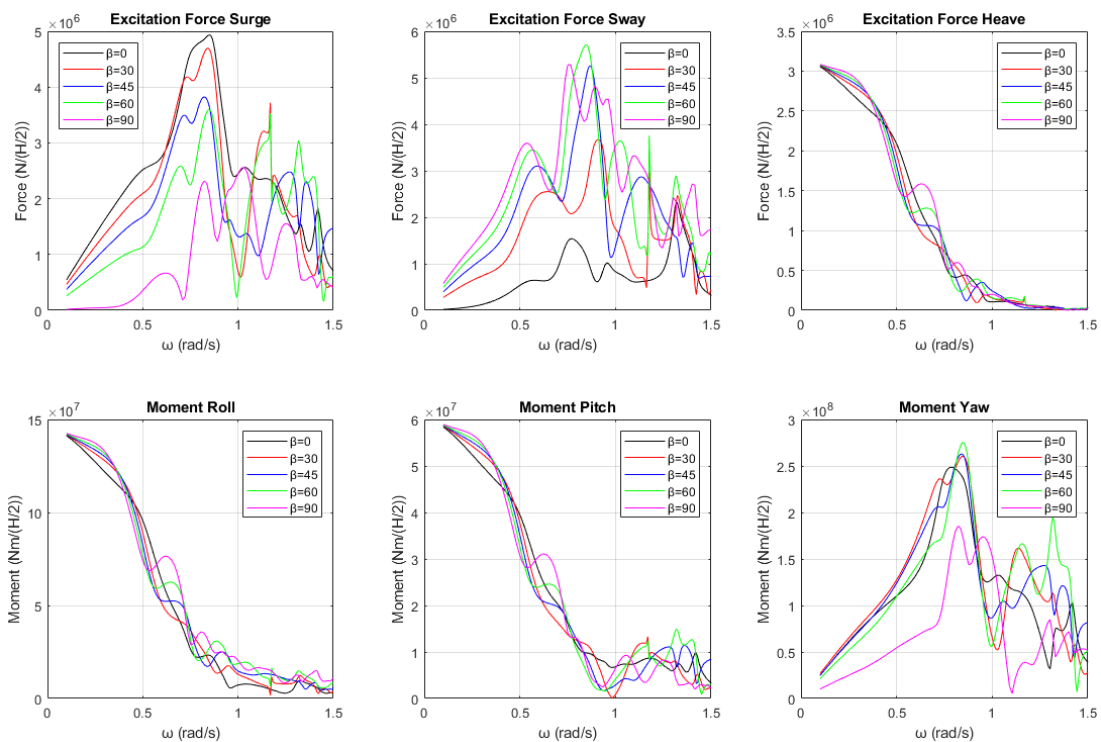
Εικόνα 514: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



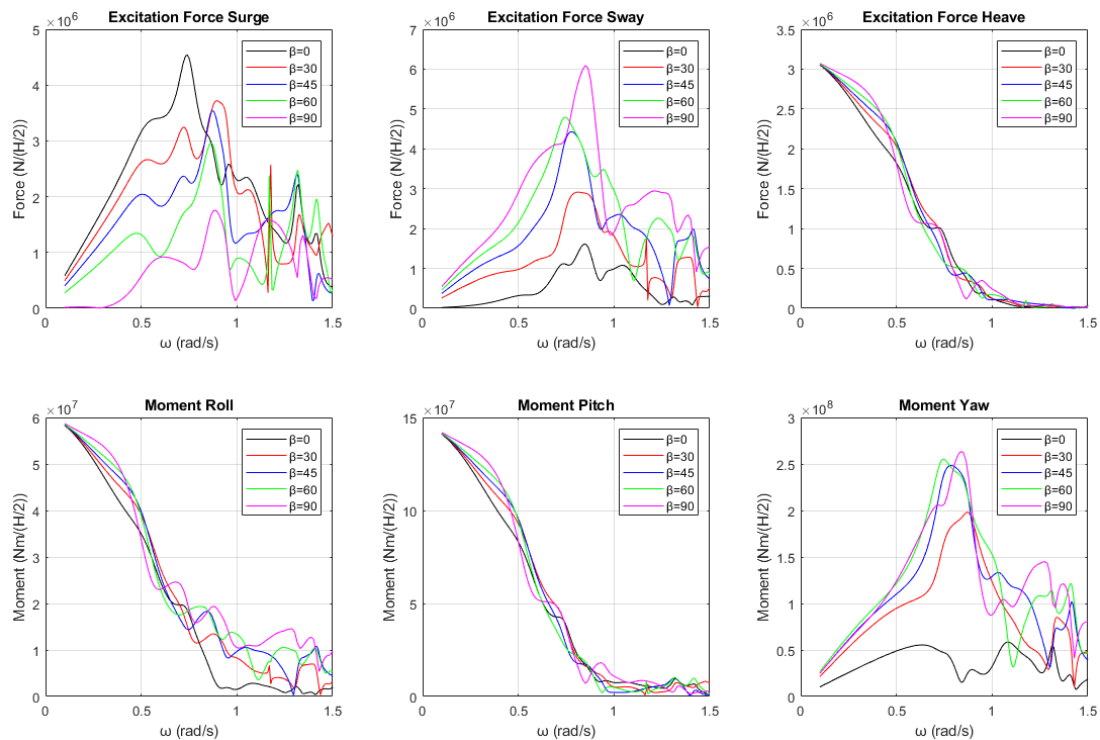
Εικόνα 515: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 516: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 517: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 7 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 518: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στον κύλινδρο 8 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 511-518 παρατηρούμε πως παρόλο που αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται στη διάταξη. Όμως, οι συνθήκες Neumann και Dirichlet μεταβάλλονται όχι μόνο ως προς τις συχνότητες που τις ικανοποιούν αλλά και ως προς την κατεύθυνση των δυνάμεων διέγερσης. Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Στον Πίνακα 134 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και τις γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.

Πίνακας 134: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.32$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.96$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.96$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.73$	$\cong 0.96$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.95$

Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.94$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.73$	$\cong 1.08$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.74$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	$\cong 1.05$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.75$	$\cong 0.94$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	–
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.89$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.85$	$\cong 1.03$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.13$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.91$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.95$
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 0.89$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.95$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.75$	$\cong 1.07$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.89$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.88$	–
Κύλινδρος 6		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	$\cong 1.17$

$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.82$	$\cong 0.95$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.95$	$\cong 1.42$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	$\cong 1.25$
Κύλινδρος 7		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	–	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.82$	$\cong 1.27$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.03$	$\cong 1.25$
Κύλινδρος 8		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 1.32$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.89$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.31$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.87$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.88$	–

Από τον Πίνακα 134 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης για όλες σχεδόν τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 0^\circ$, τότε το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στους κυλίνδρους 2 και 7. Ομοίως ισχύει και για τον κύλινδρο 3 όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι ίση με $\beta = 60^\circ$. Στον Πίνακα 135 εμφανίζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y .

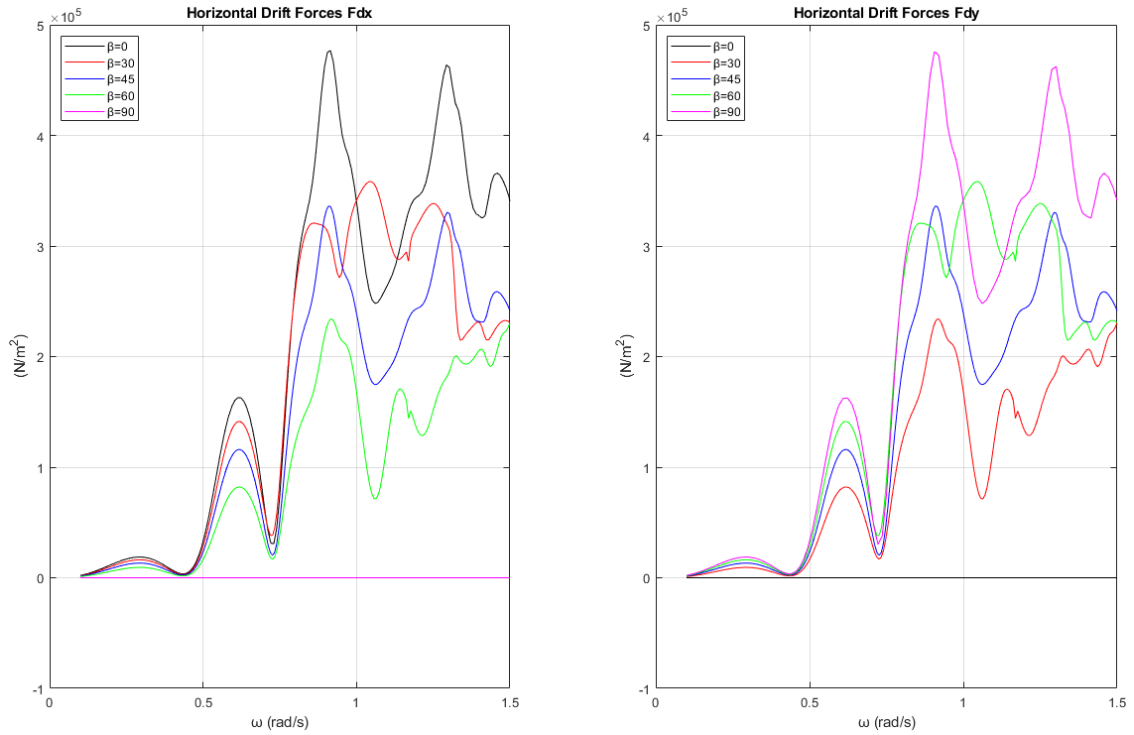
Πίνακας 135: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.73$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.73$	$\cong 1.32$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.94$	$\cong 1.43$
$\beta = 90^\circ$	–	–

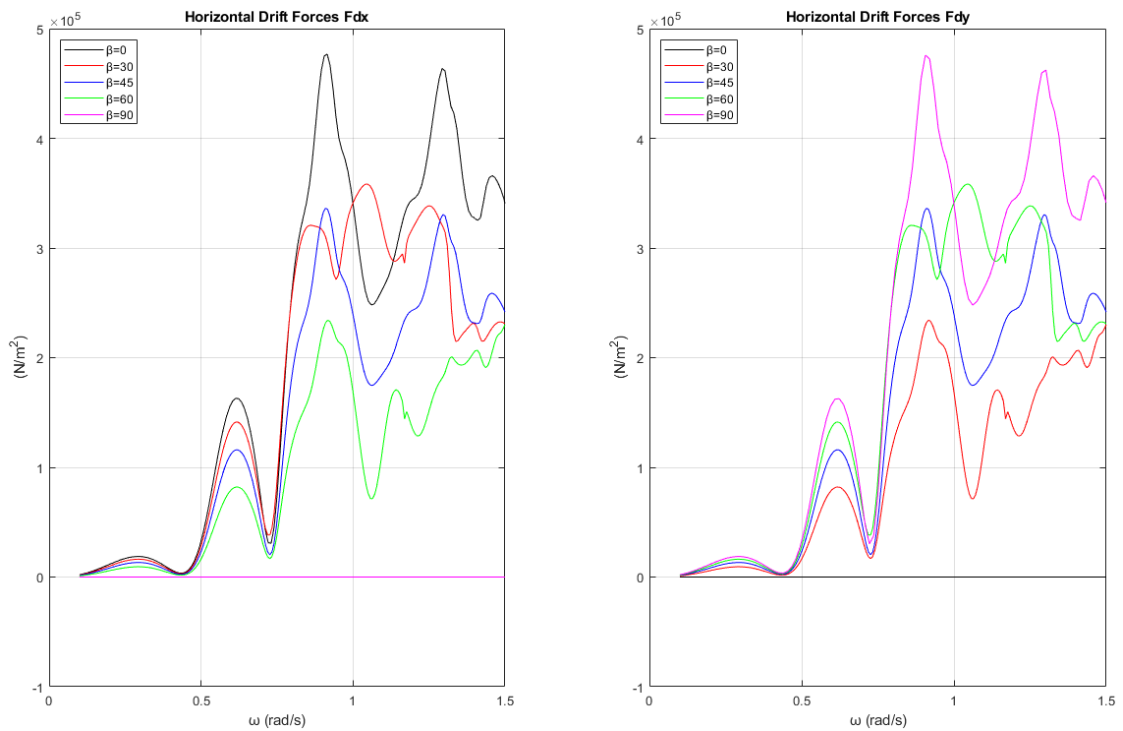
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.32$	–
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.73$	$\cong 1.32$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.96$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.96$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.96$
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.17$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.86$	$\cong 1.32$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.31$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.89$	–
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.97$
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.03$	$\cong 1.25$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.85$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.82$	$\cong 1.27$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.84$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.03$	$\cong 1.25$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.95$	$\cong 1.12$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.82$	$\cong 0.95$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.84$	$\cong 1.18$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	–
Κύλινδρος 6		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.89$	$\cong 1.17$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.76$	–

$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.75$	$\cong 1.08$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.96$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.89$
Κύλινδρος 7		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.32$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.91$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	$\cong 1.13$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.85$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.76$	$\cong 0.89$
Κύλινδρος 8		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	—
$\beta = 30^\circ$	—	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.74$	$\cong 0.94$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	—

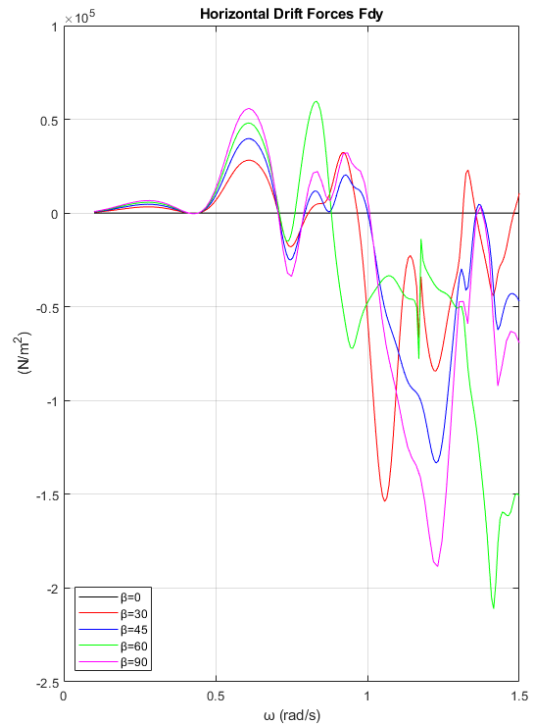
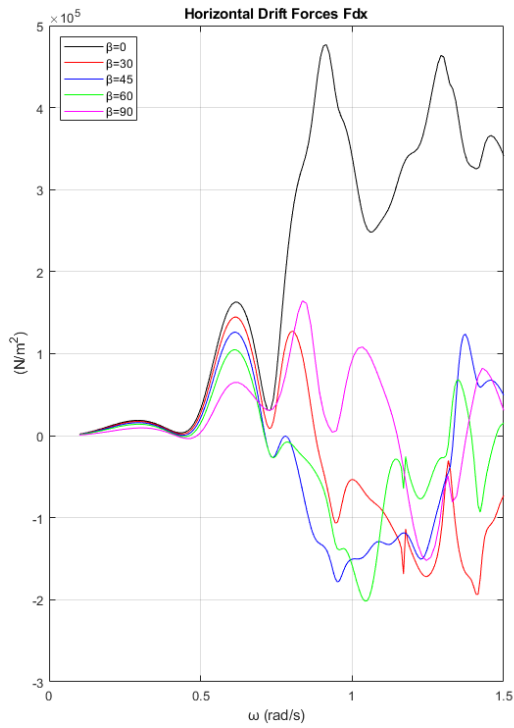
Από τον Πίνακα 135 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κύλινδρους για όλες σχεδόν τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Εξάιρεση αποτελούν ο κύλινδρος 8 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ και οι κύλινδροι 1 και 4 για την γωνία $\beta = 90^\circ$, αντίστοιχα. Σε πρώτη εκτίμηση συγκρίνοντας τον Πίνακα 134 με τον Πίνακα 135, μπορούμε να υποθέσουμε πως οι κύλινδροι 5 και 6 της διάταξης είναι δυνητικοί υποψήφιοι για την εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς παρατηρούνται σε αυτούς οι μεγαλύτερες δυνάμεις στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Όμως και οι κύλινδροι 3, 4, 7 και 8 είναι υποψήφιοι καθώς σε αυτούς ασκούνται μεγάλες φορτίσεις για τρεις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στην Εικόνα 519 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη. Αντίστοιχα στις Εικόνες 520-527 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



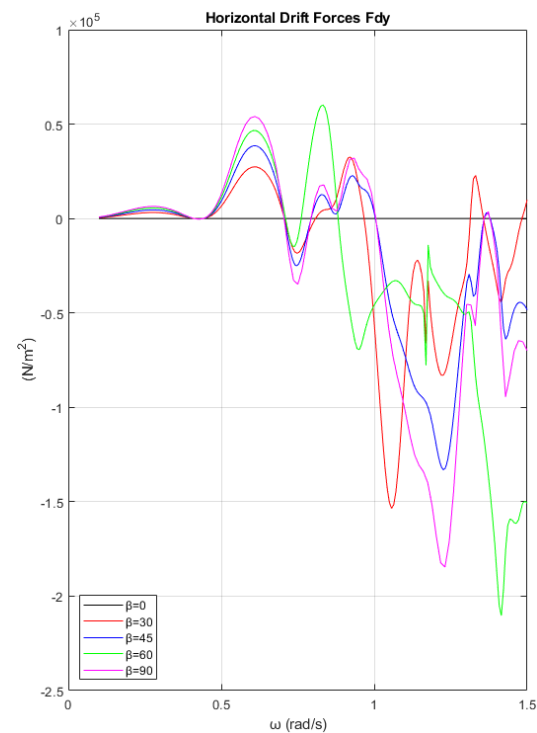
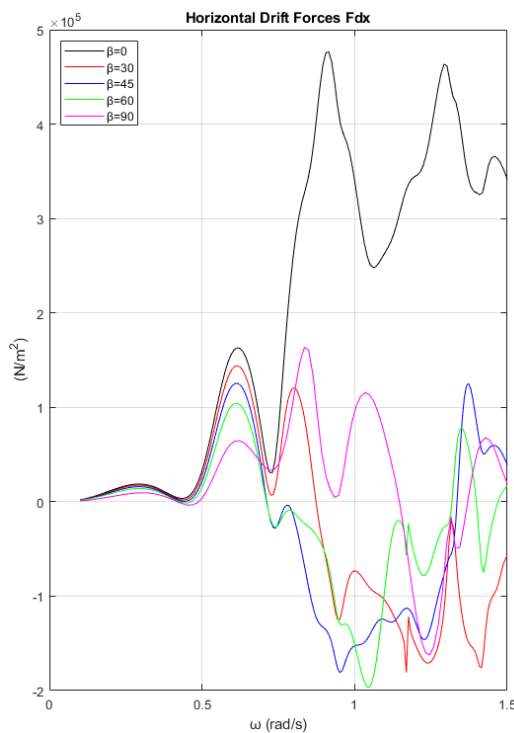
Εικόνα 519: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



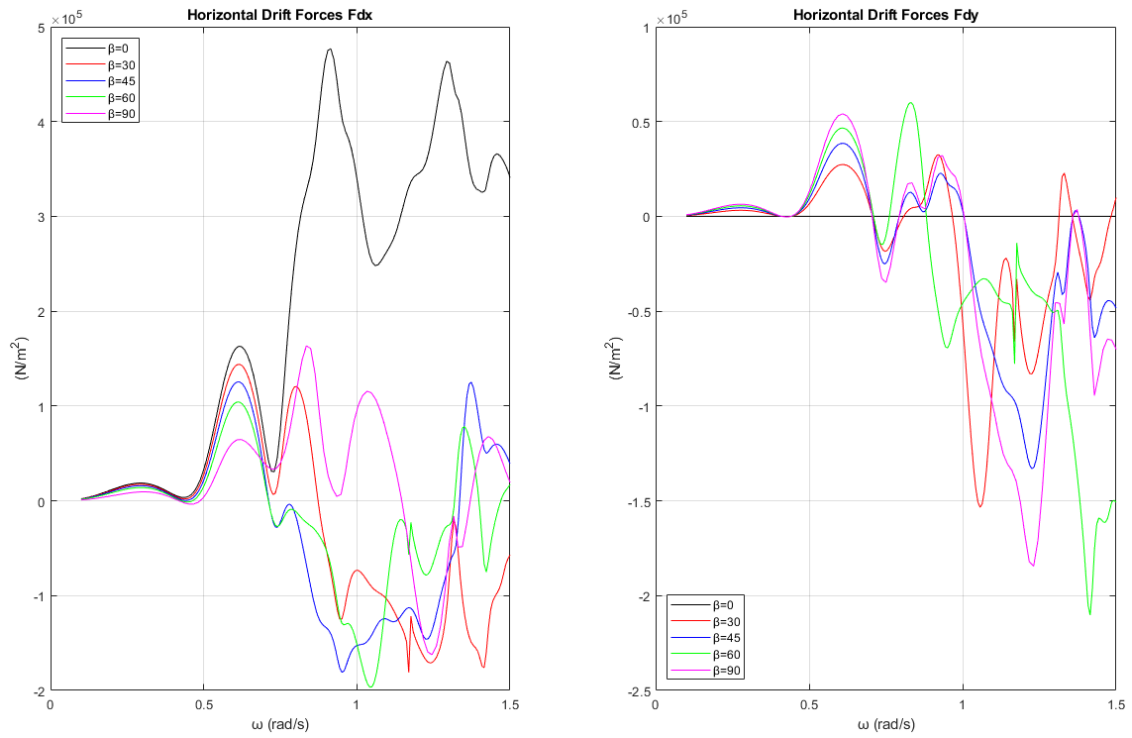
Εικόνα 520: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



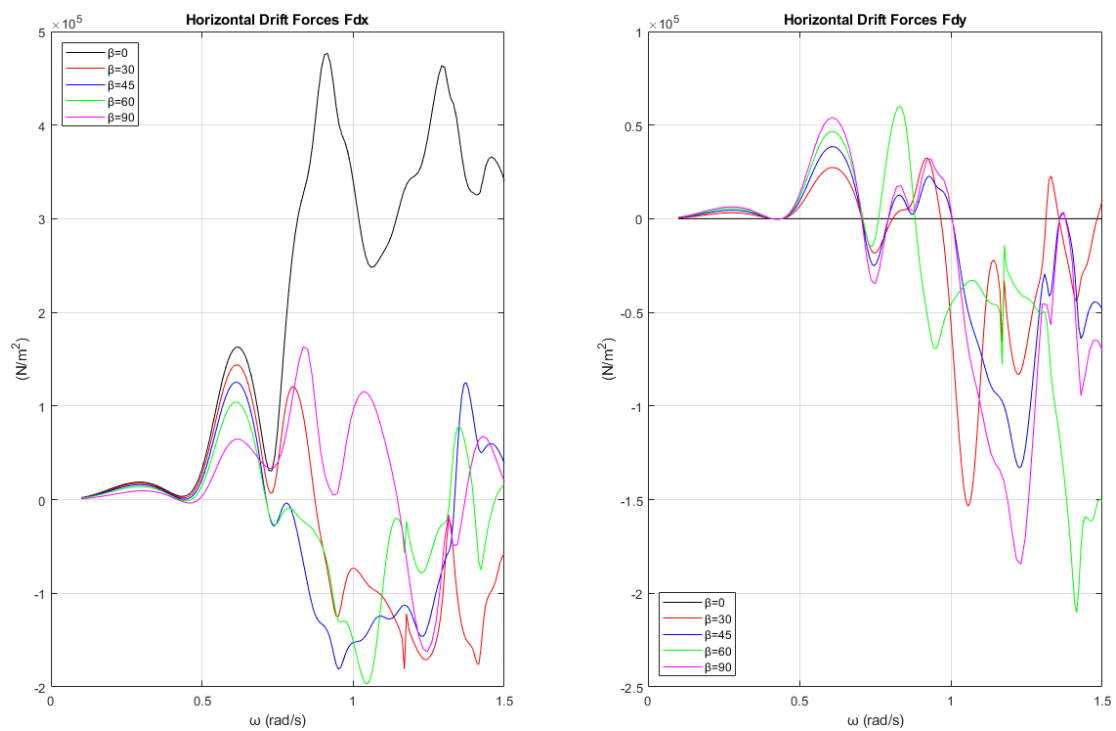
Εικόνα 521: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



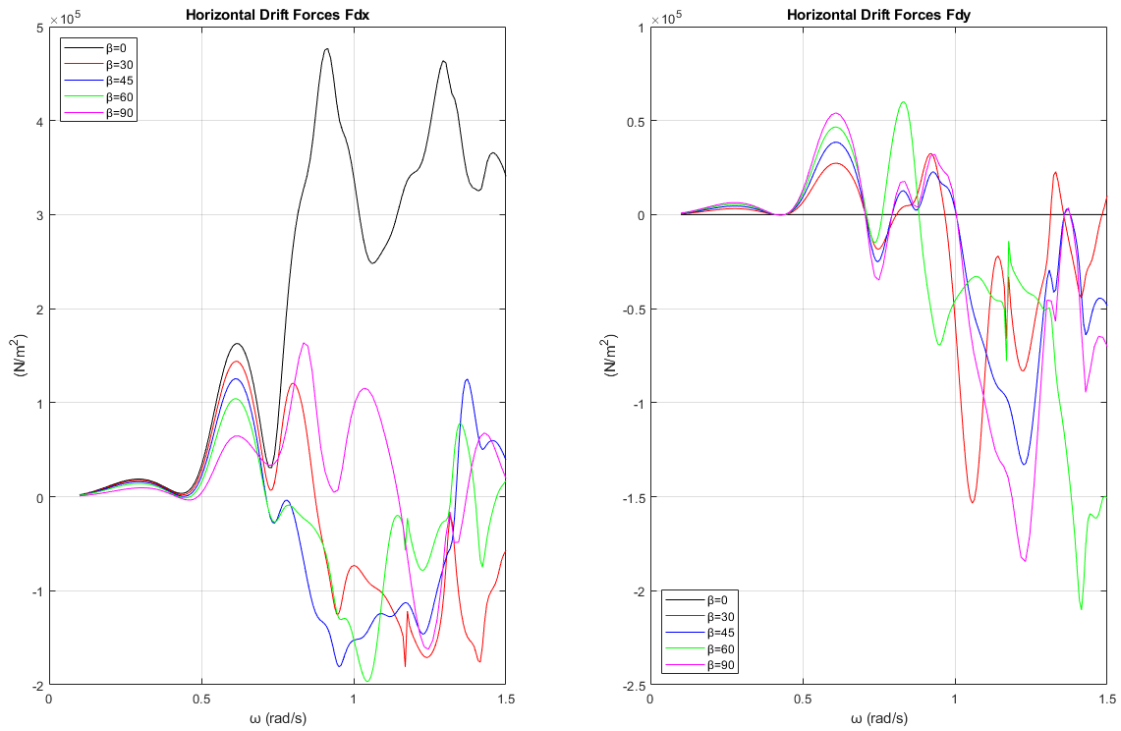
Εικόνα 522: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



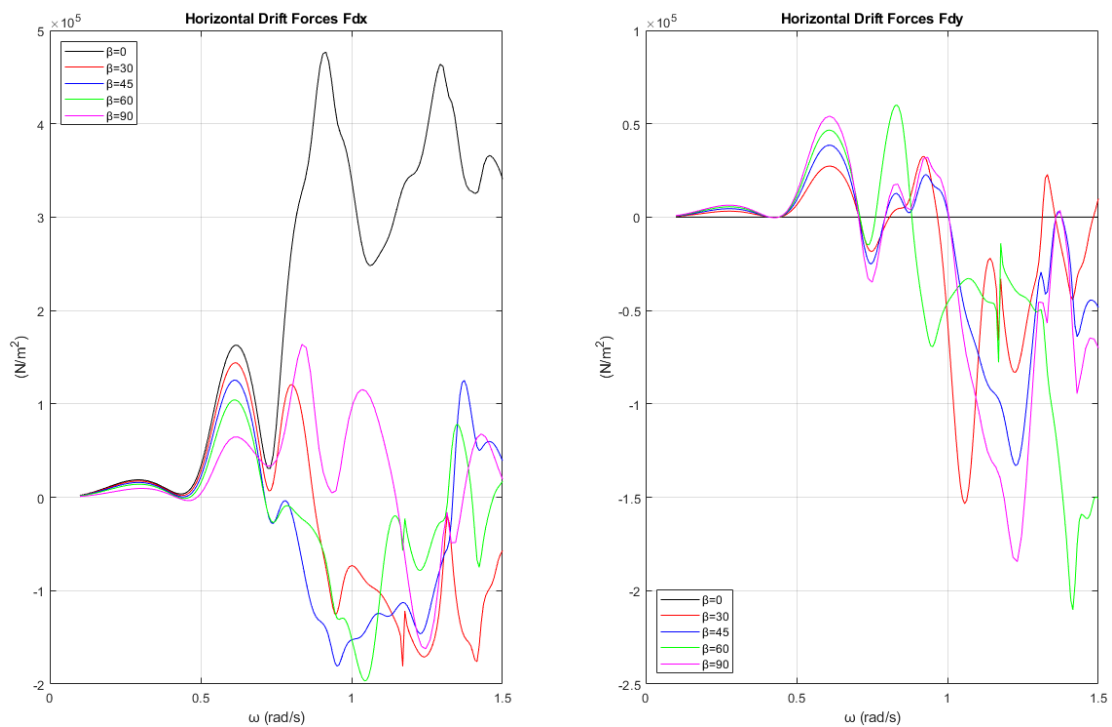
Εικόνα 523: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



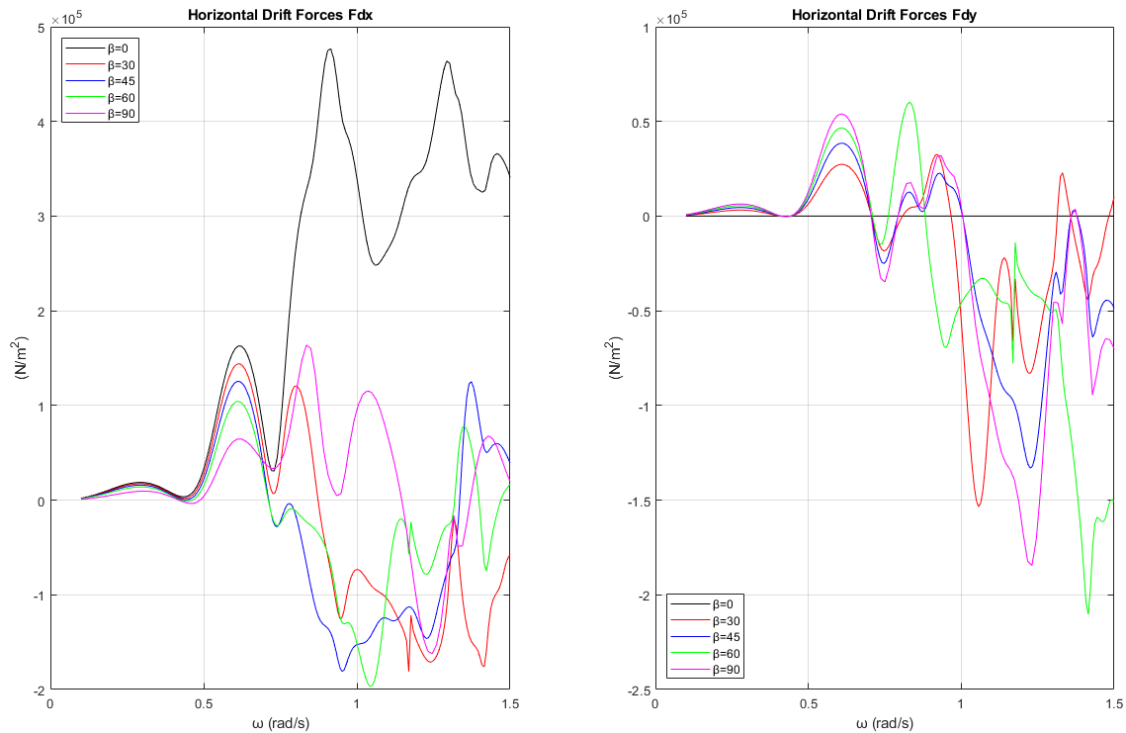
Εικόνα 524: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 525: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 526: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 7 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 527: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 8 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών συνοδεύεται όχι μόνο από τις κορυφές στις εξισώσεις κίνησης του σώματος αλλά και από μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο. Στη συγκεκριμένη διάταξη, όμως, λόγω του ότι δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης σε όλους τους κύλινδρους θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες που εντοπίζονται οι μεγαλύτερες δυνάμεις. Στον Πίνακα 136 φαίνονται οι κύλινδροι και η συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 136: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

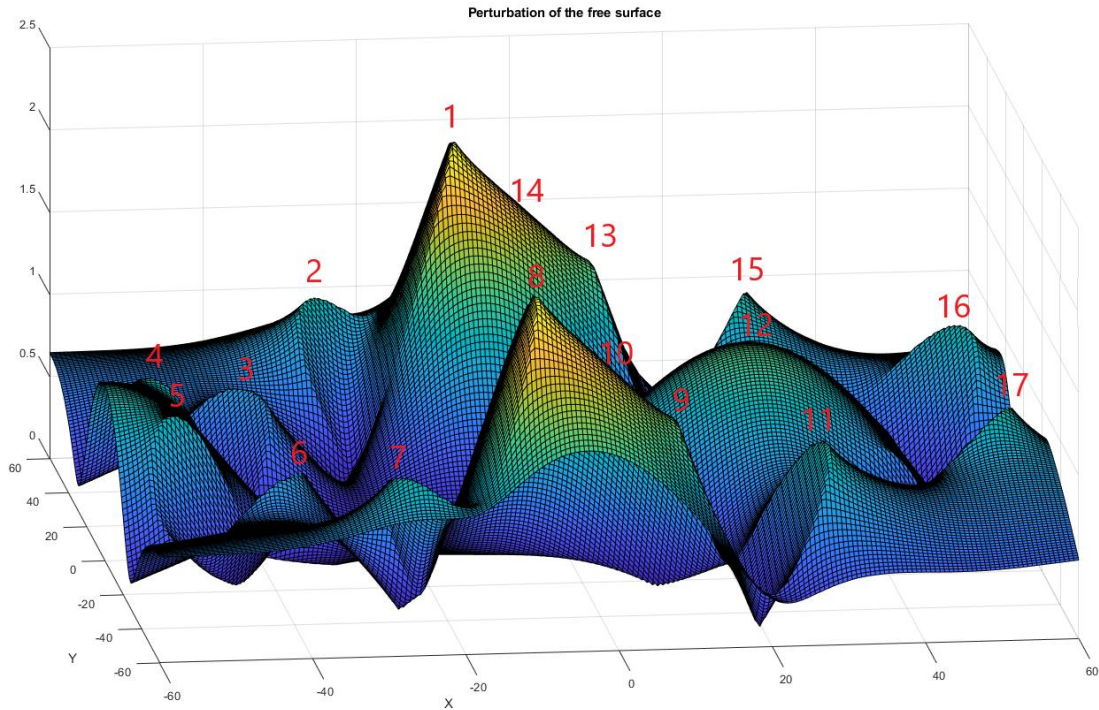
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	Κύλινδροι 3,6	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδρος 6	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	Κύλινδροι 4,7	F_x/F_y	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδρος 5	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	Κύλινδροι 5,8	F_y	ΝΑΙ

Στην Εικόνα 528 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κύλινδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις

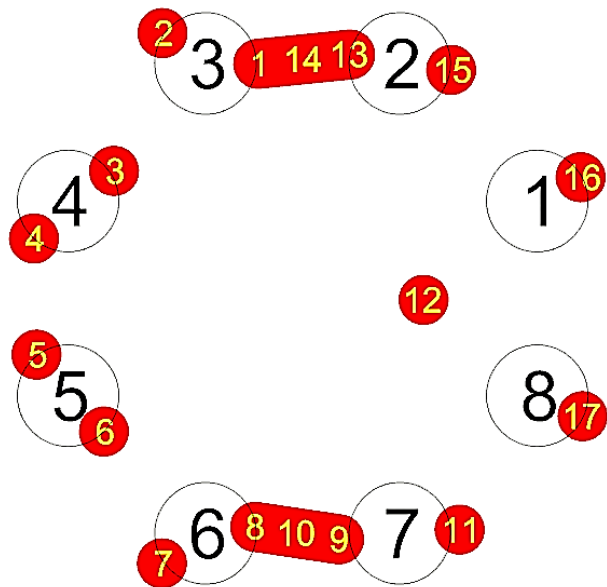
διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 137 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 529 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 137: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.01 <i>m</i>
2	1.00 <i>m</i>
3	0.75 <i>m</i>
4	0.98 <i>m</i>
5	0.98 <i>m</i>
6	0.75 <i>m</i>
7	1.00 <i>m</i>
8	2.01 <i>m</i>
9	1.22 <i>m</i>
10	1.62 <i>m</i>
11	1.06 <i>m</i>
12	1.21 <i>m</i>
13	1.22 <i>m</i>
14	1.62 <i>m</i>
15	1.06 <i>m</i>
16	1.03 <i>m</i>
17	1.03 <i>m</i>



Εικόνα 528: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



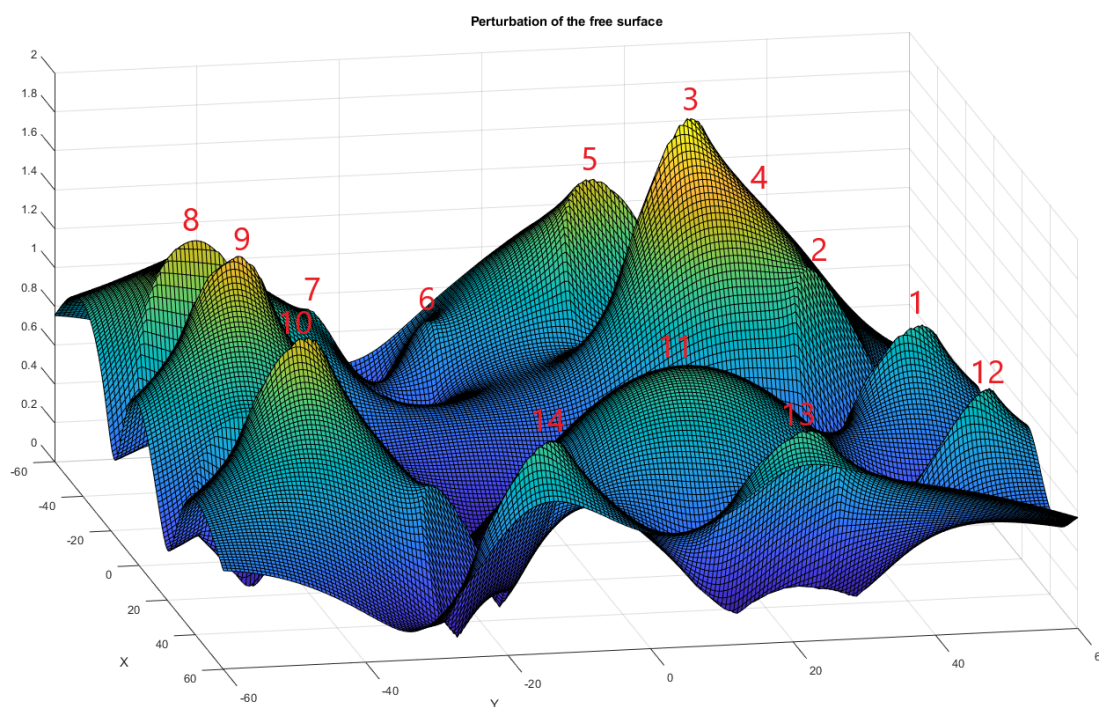
Εικόνα 529: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 530 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 138 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 531

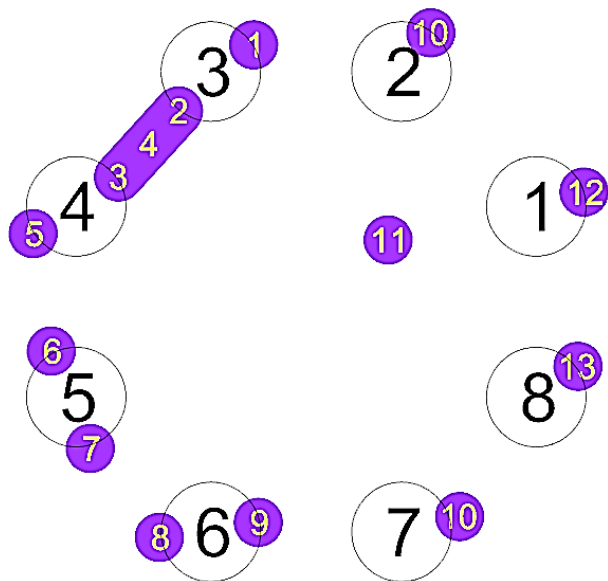
φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 138: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.94 m
2	1.12 m
3	1.80 m
4	1.46 m
5	1.37 m
6	0.71 m
7	0.87 m
8	1.38 m
9	1.48 m
10	1.39 m
11	1.03 m
12	0.93 m
13	1.02 m
14	1.02 m



Εικόνα 530: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

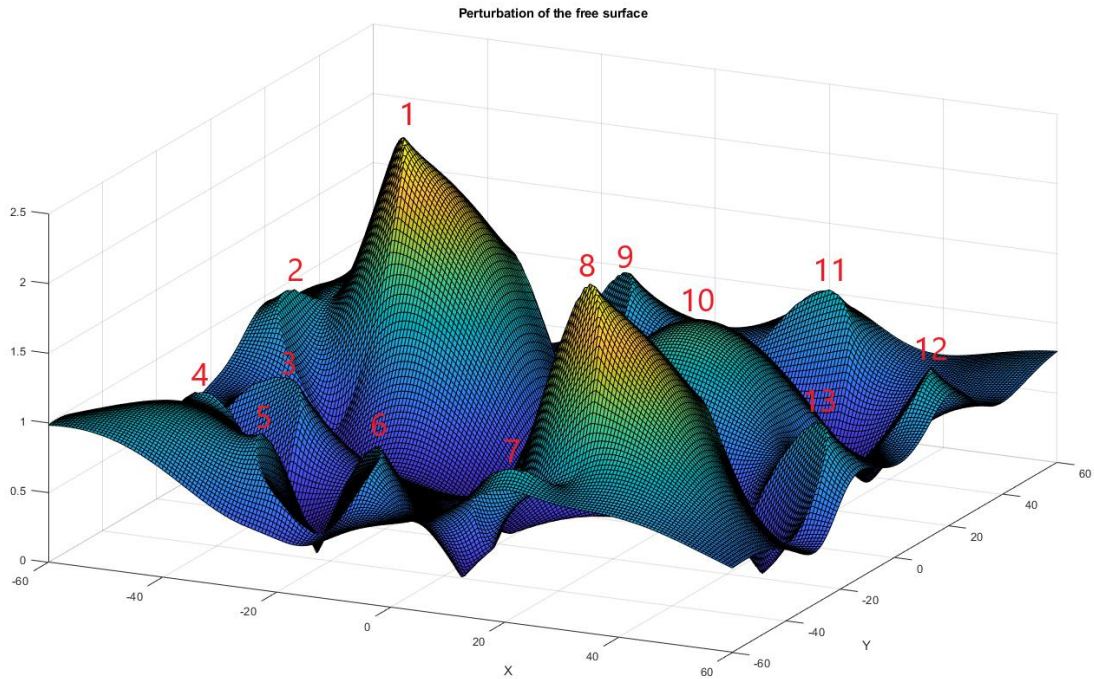


Εικόνα 531: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

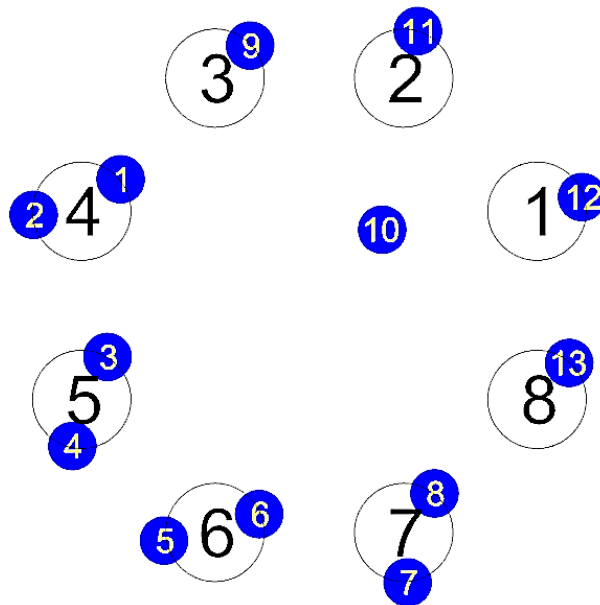
Στην Εικόνα 532 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 4 και 7 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 139 φαίνονται οι τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 533 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 139: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.19 m
2	1.05 m
3	0.85 m
4	0.93 m
5	0.93 m
6	0.85 m
7	1.05 m
8	2.19 m
9	1.04 m
10	1.24 m
11	1.08 m
12	1.08 m
13	1.05 m



Εικόνα 532: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 4 και 7 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y



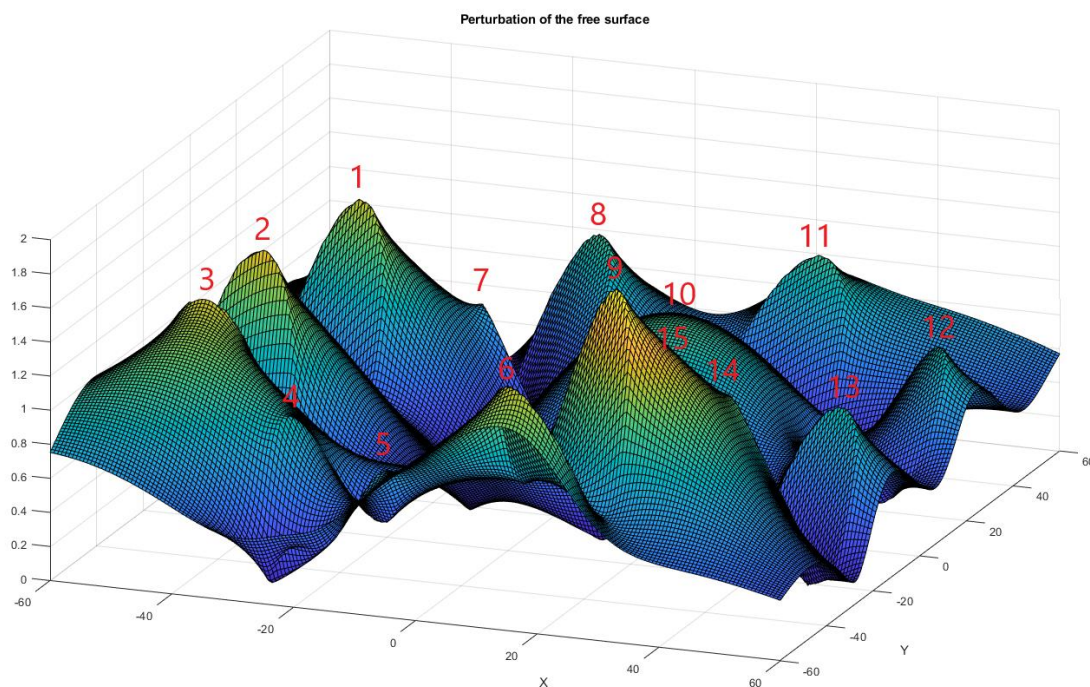
Εικόνα 533: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 534 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 140 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

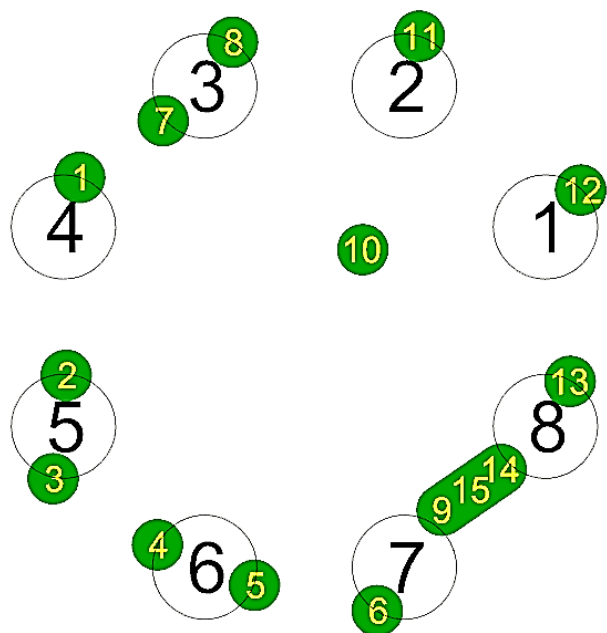
Εικόνα 535 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 140: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.39 m
2	1.46 m
3	1.37 m
4	0.89 m
5	0.73 m
6	1.35 m
7	0.71 m
8	1.04 m
9	1.82 m
10	1.03 m
11	1.04 m
12	0.93 m
13	0.93 m
14	1.16 m
15	1.49 m



Εικόνα 534: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



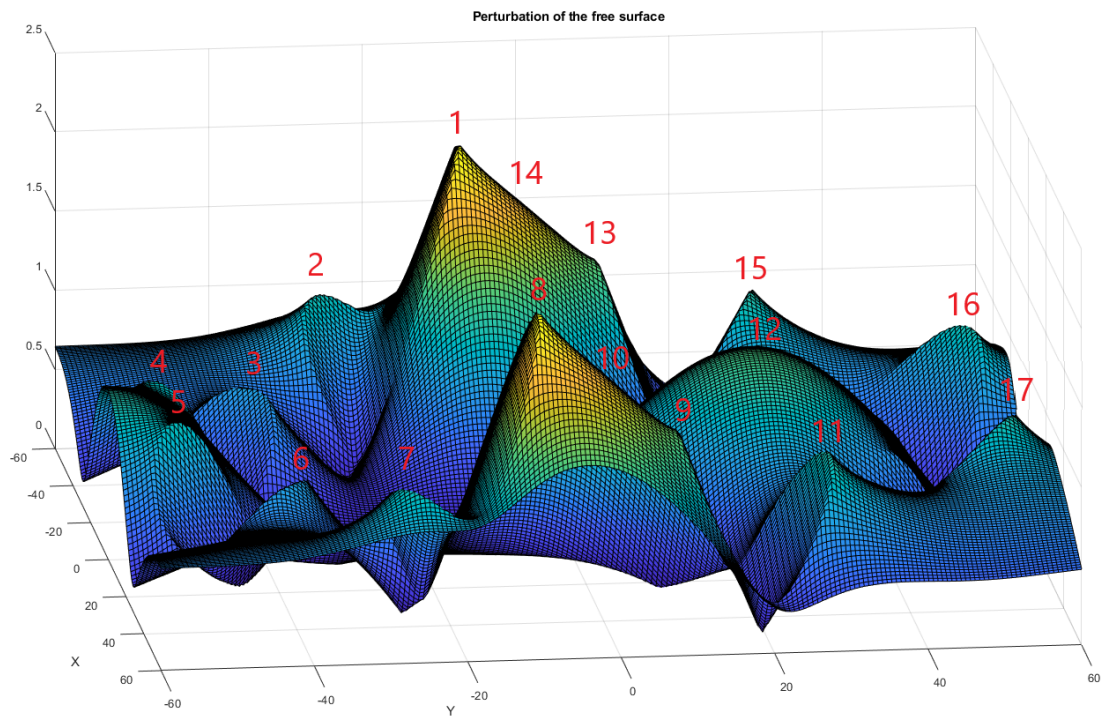
Εικόνα 535: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 536 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 5 και 8 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 141 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 537 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

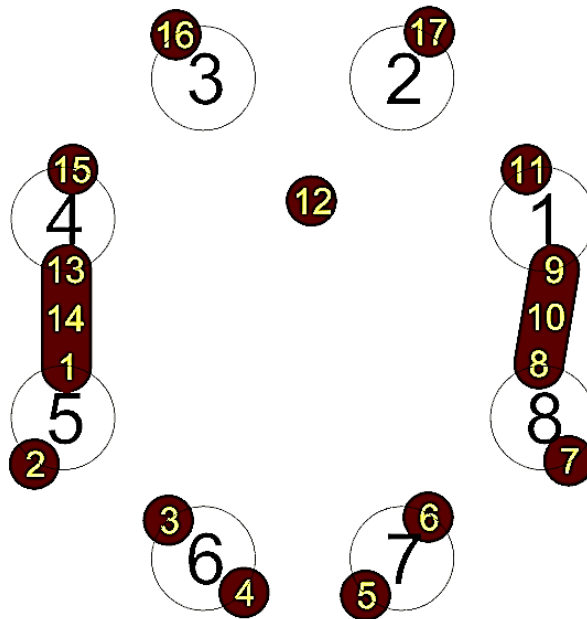
Πίνακας 141: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.01 m
2	1.00 m
3	0.75 m
4	0.98 m
5	0.98 m
6	0.75 m
7	1.00 m
8	2.01 m
9	1.22 m
10	1.62 m
11	1.06 m
12	1.21 m
13	1.22 m
14	1.62 m
15	1.06 m

16	1.03 m
17	1.03 m

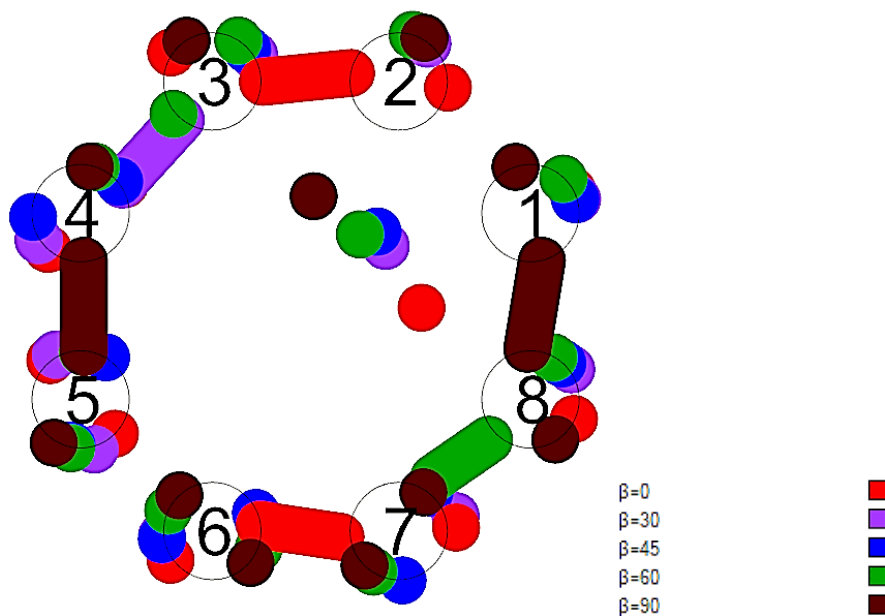


Εικόνα 536: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 5 και 8 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

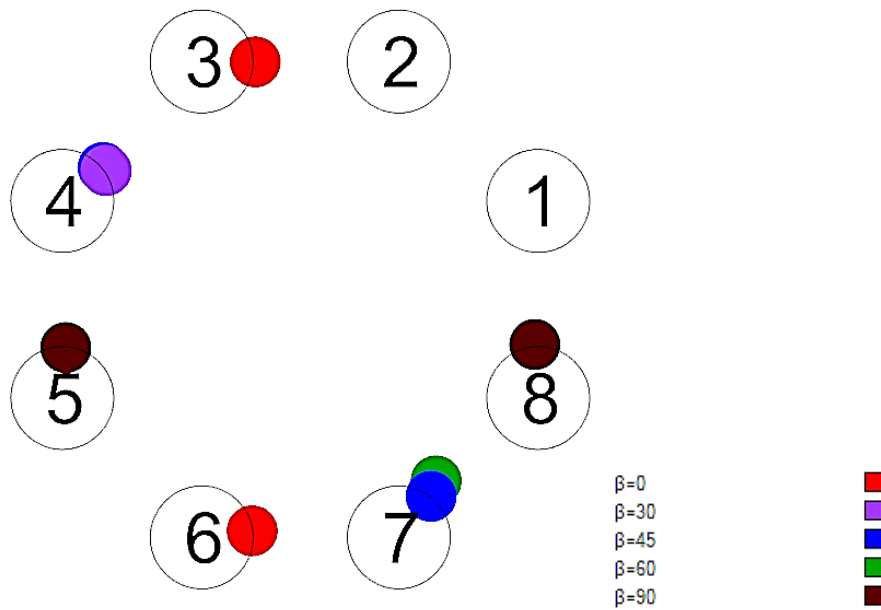


Εικόνα 537: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

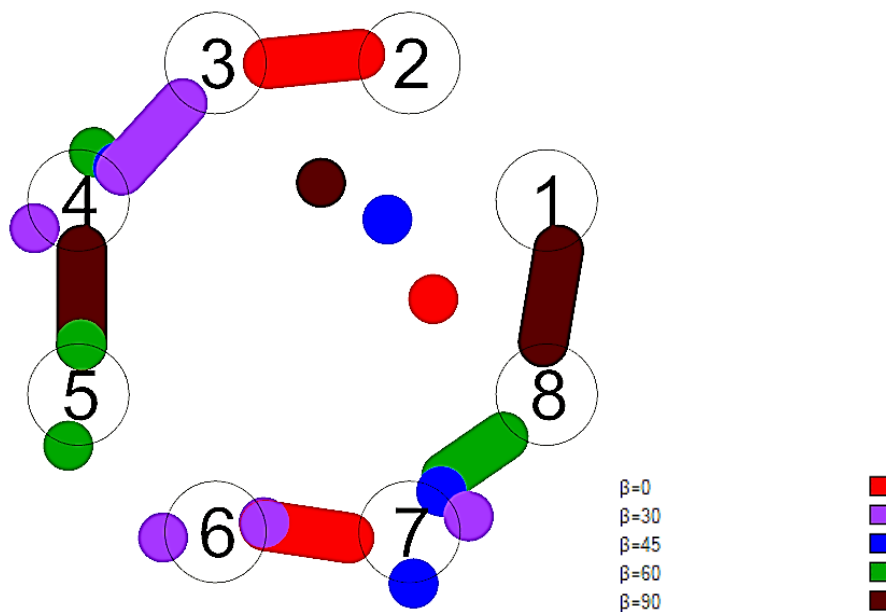
Στην Εικόνα 538 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην Εικόνα 539 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 539, παρατηρούμε πως μπορούν να εγκατασταθούν έξι συσκευές ανάκτηση κυματικής ενέργειας στους κύλινδρους. Για την ακρίβεια, η Εικόνα 539 δίνει έναν οδηγό ως προς ποια γωνία πρόσπτωσης κυματισμού και ποιος κύλινδρος έχει την μέγιστη απόδοση. Είναι εμφανές πως για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$, οι κύλινδροι 3 και 6 έχουν τη μέγιστη απόδοση. Αντίστοιχα, οι κύλινδροι 4 και 7 για την γωνία $\beta = 45^\circ$ και οι κύλινδροι 5 και 8 για την γωνία $\beta = 90^\circ$. Τέλος, για γωνία $\beta = 30^\circ$ ο κύλινδρος 4 παράγει τη μέγιστη ενέργεια και αντίστοιχα ο κύλινδρος 7 για γωνία $\beta = 60^\circ$. Στην Εικόνα 540 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 538: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 539: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

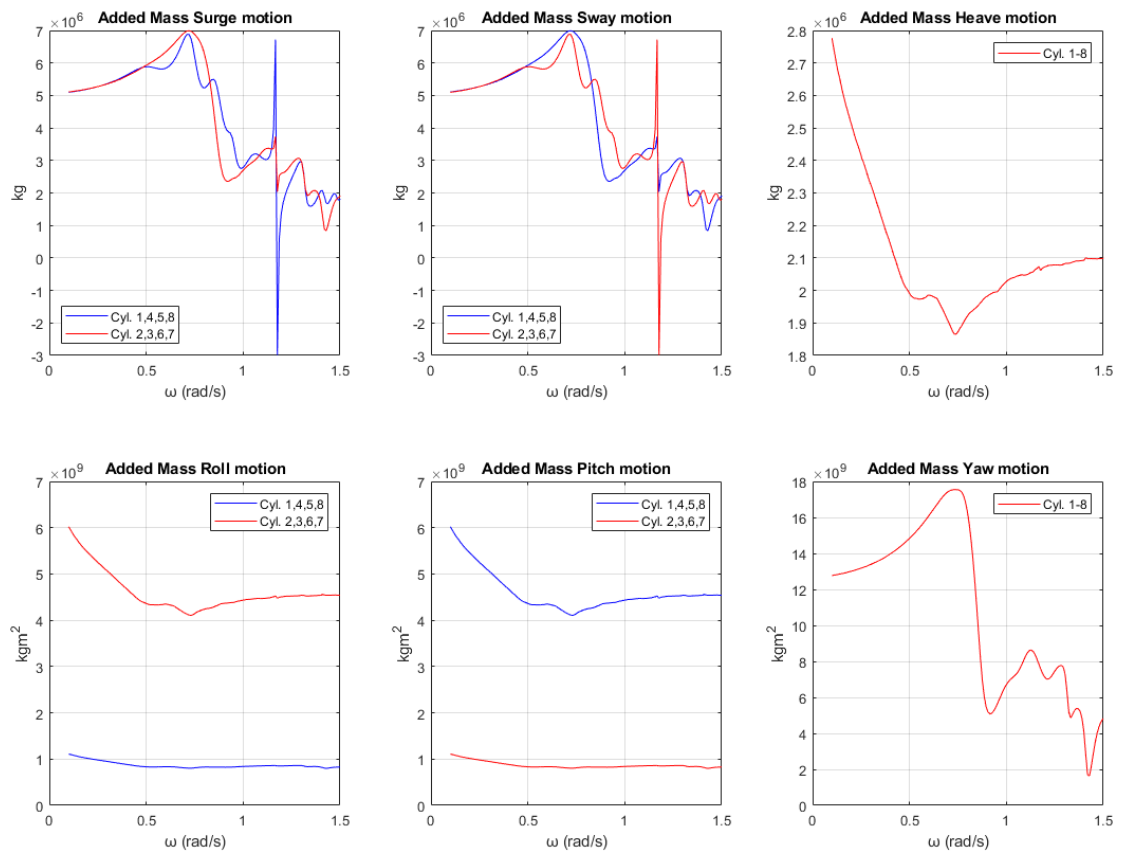


Εικόνα 540: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

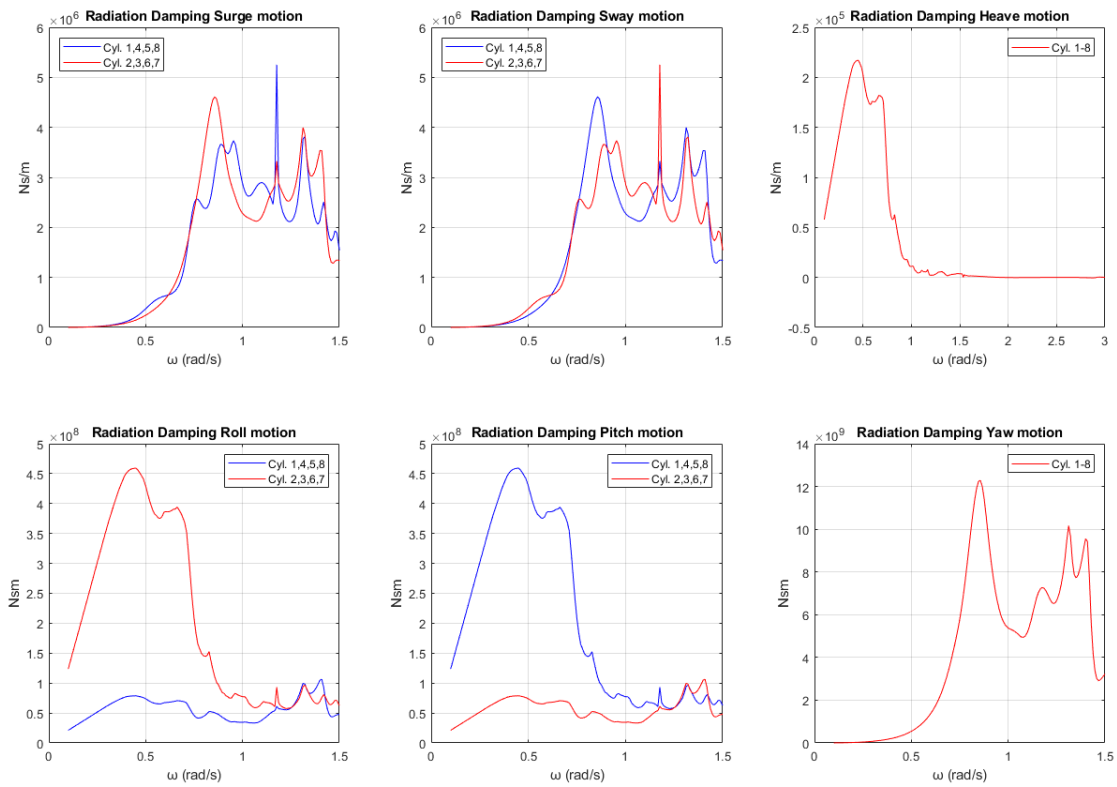
3.8.2 Οι κύλινδροι ταλαντώνονται ελεύθερα – radiation problem

Είναι εξίσου σημαντικό να μελετήσουμε τη διάταξη των οκτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων όταν αυτοί ταλαντώνονται ελεύθερα. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης δεν εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού παρά μόνο από την γεωμετρία του σώματος. Στην Εικόνα 541 φαίνονται οι συντελεστές

πρόσθετης μάζας των κυλίνδρων της διάταξης και αντίστοιχα στην Εικόνα 542 φαίνονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

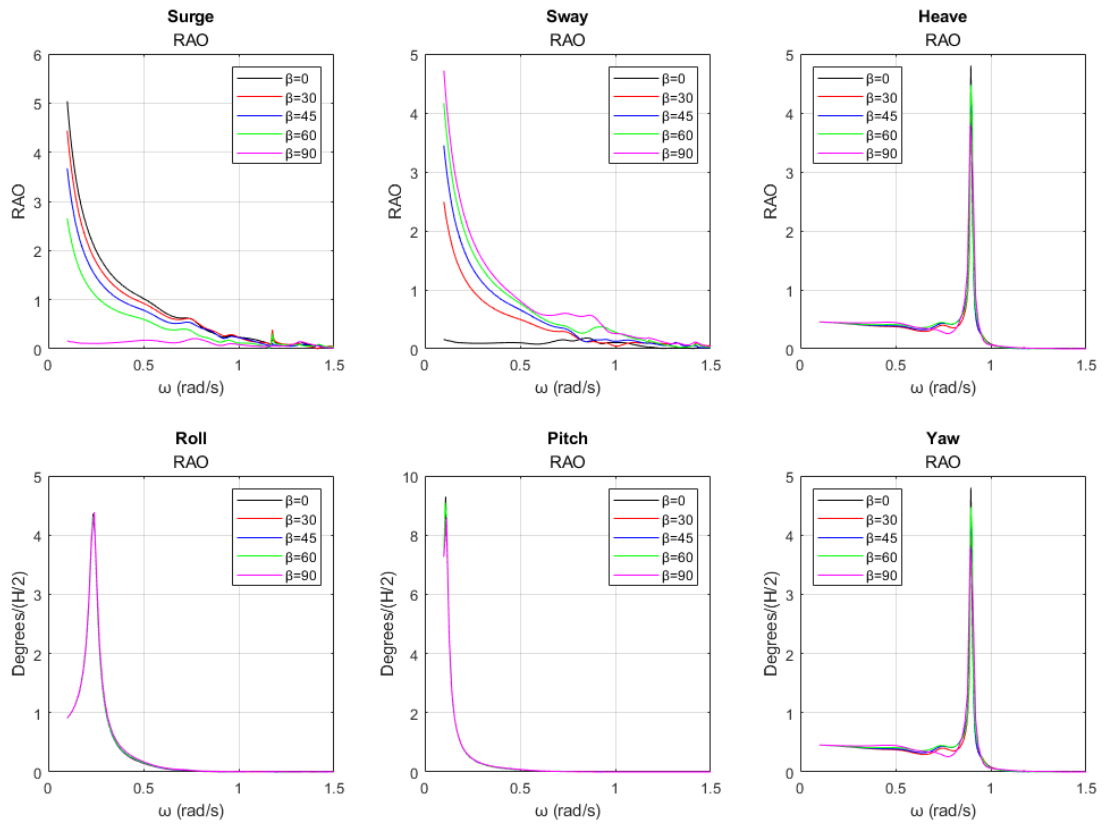


Εικόνα 541: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

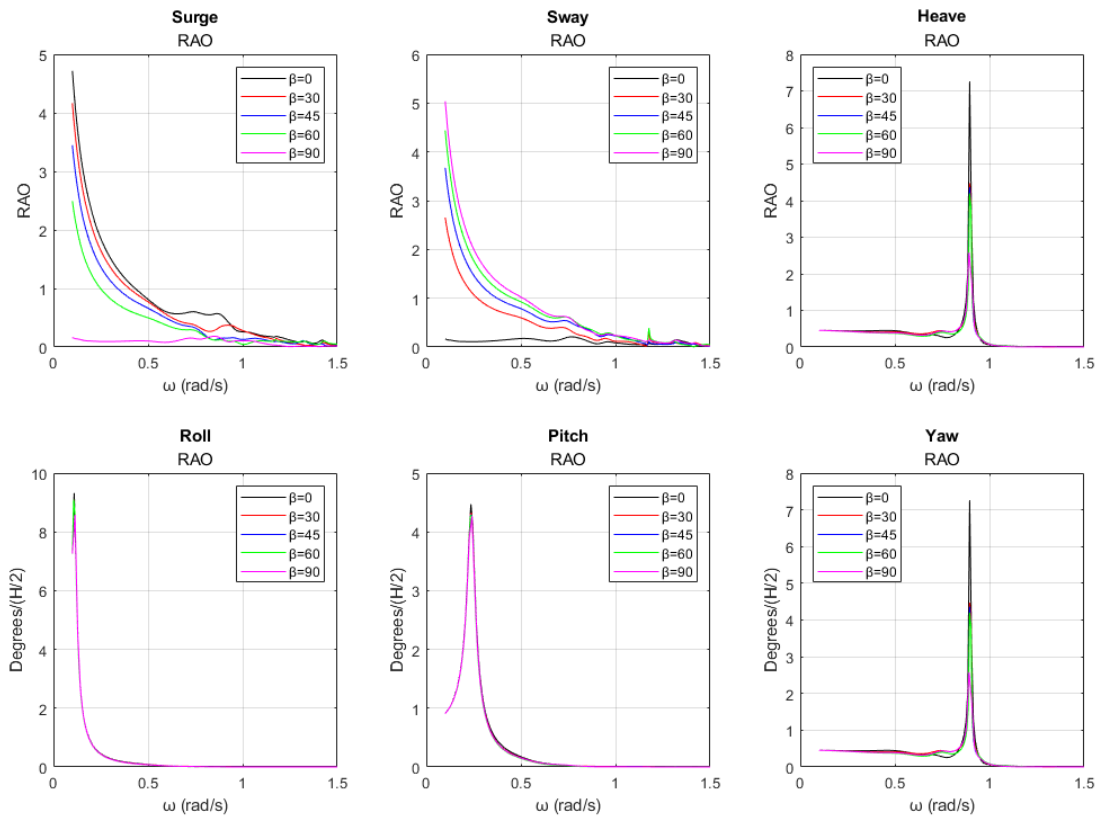


Εικόνα 542: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ των κυλίνδρων της διάταξης

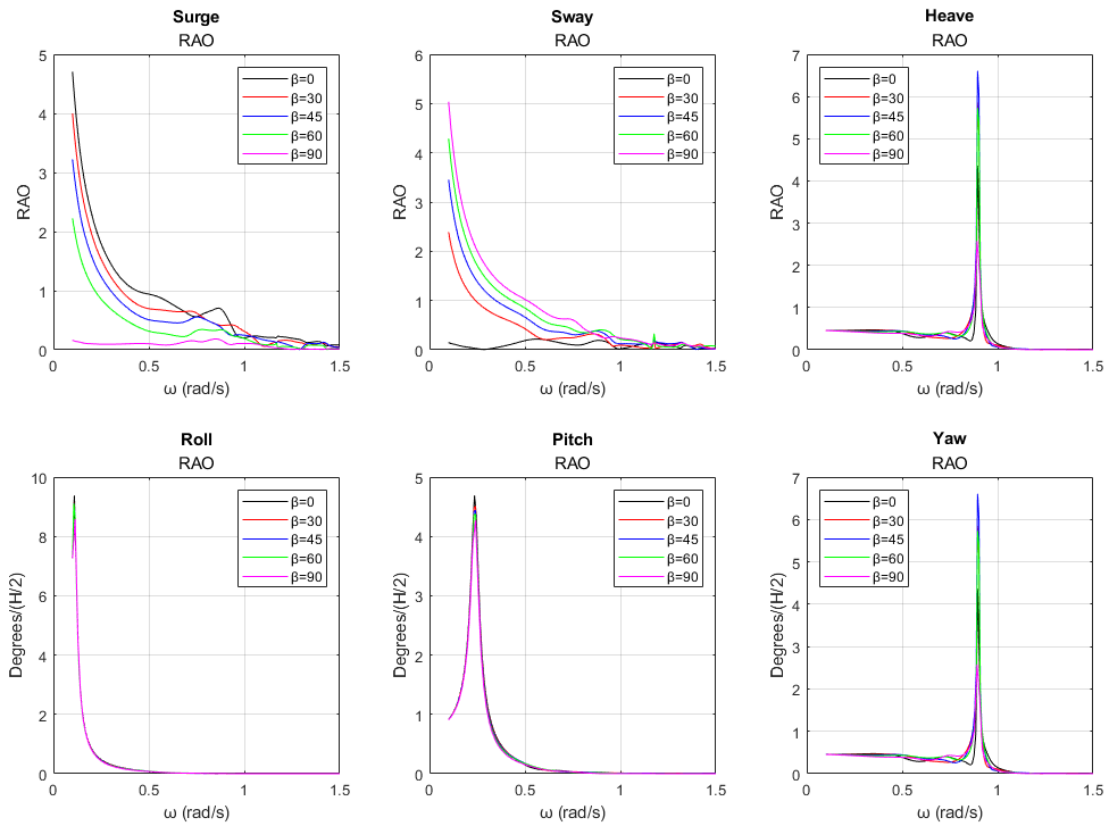
Οι κινήσεις των κυλίνδρων ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στις Εικόνες 543-550.



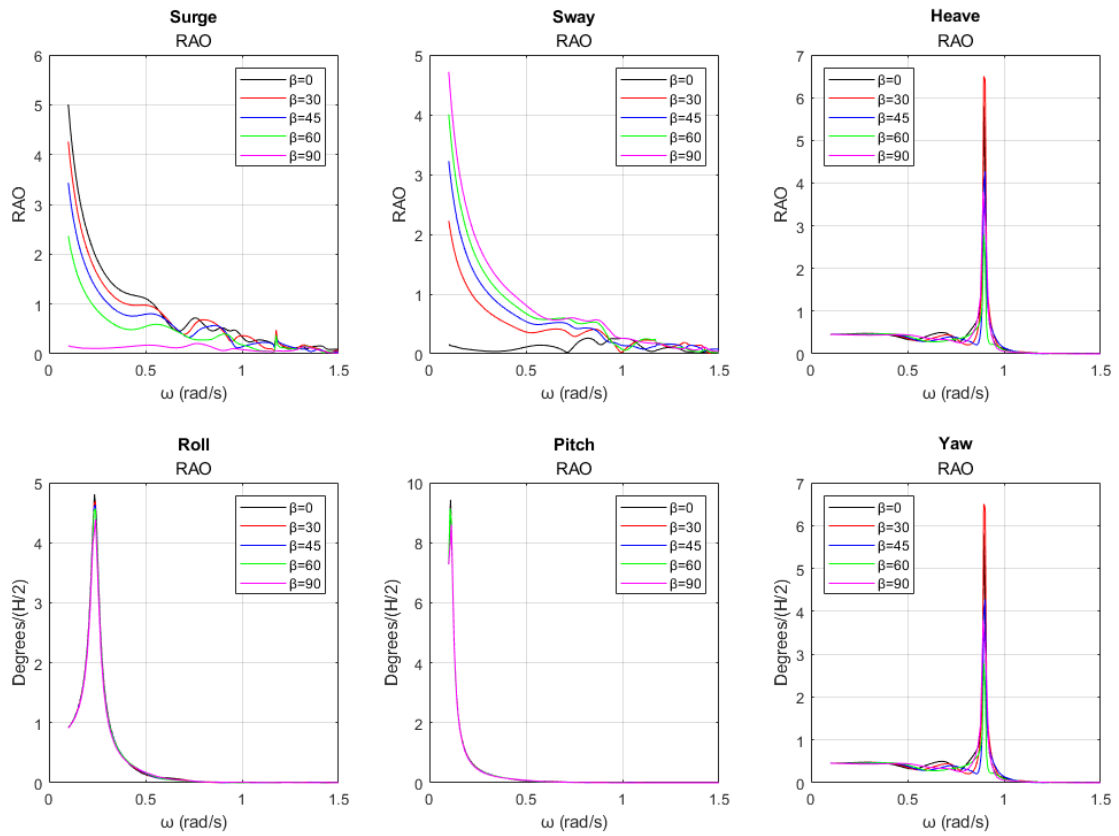
Εικόνα 543: Κινήσεις κυλίνδρου 1 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



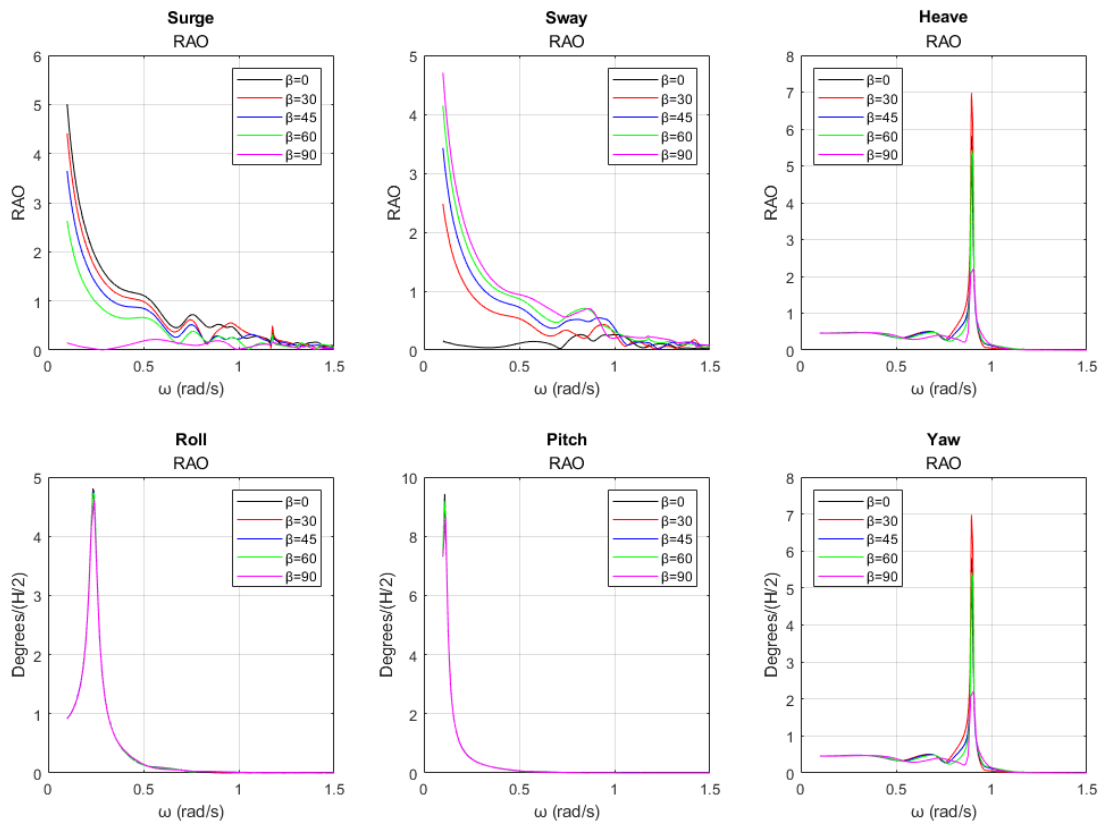
Εικόνα 544: Κινήσεις κυλίνδρου 2 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



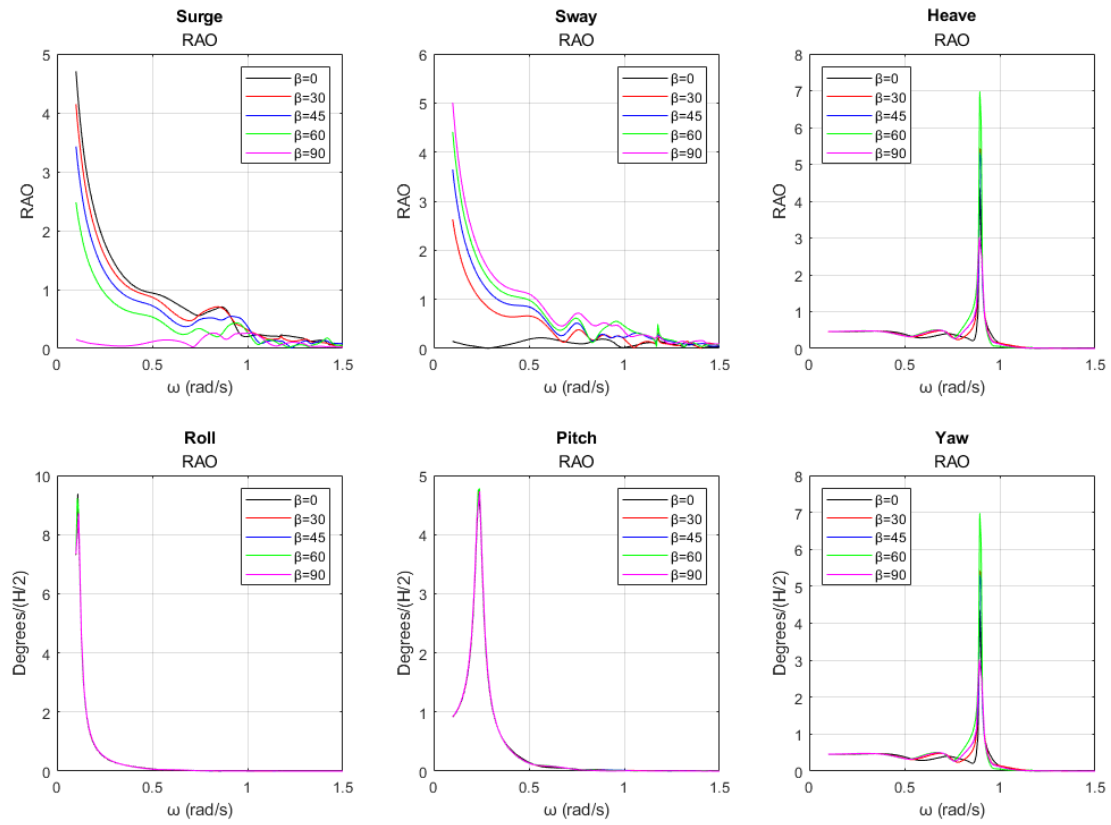
Εικόνα 545: Κινήσεις κυλίνδρου 3 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



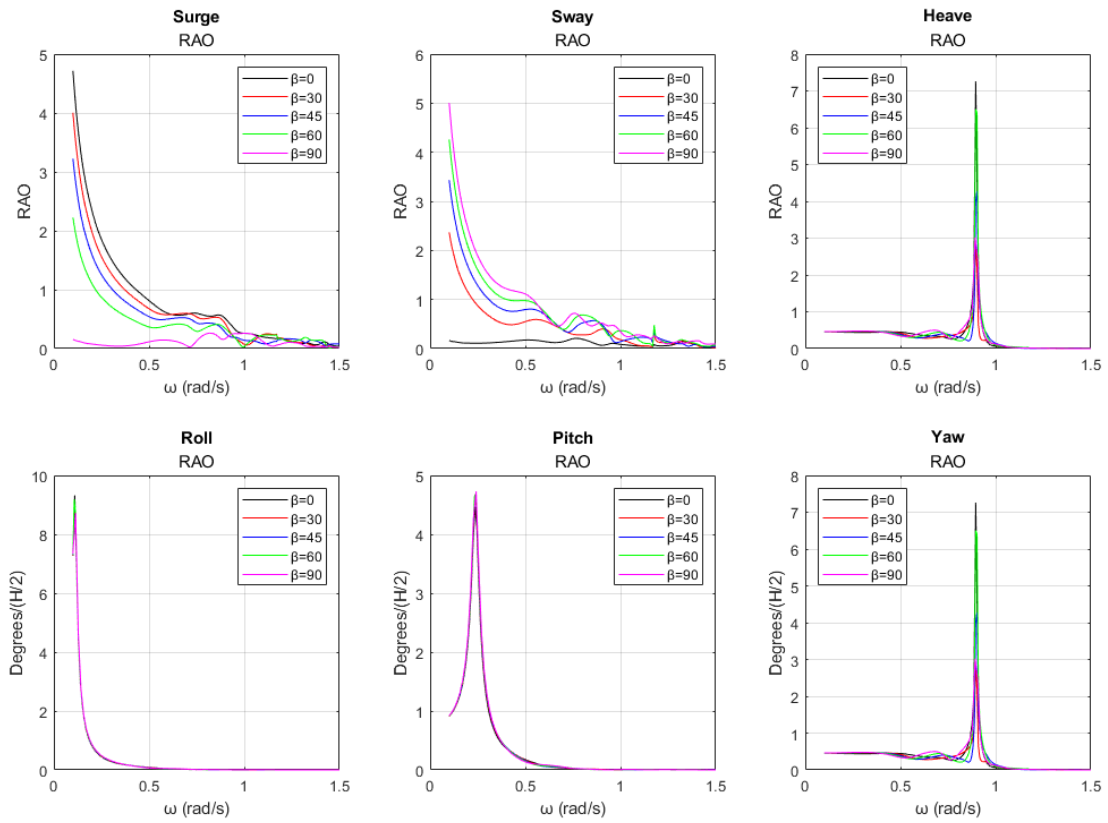
Εικόνα 546: Κινήσεις κυλίνδρου 4 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



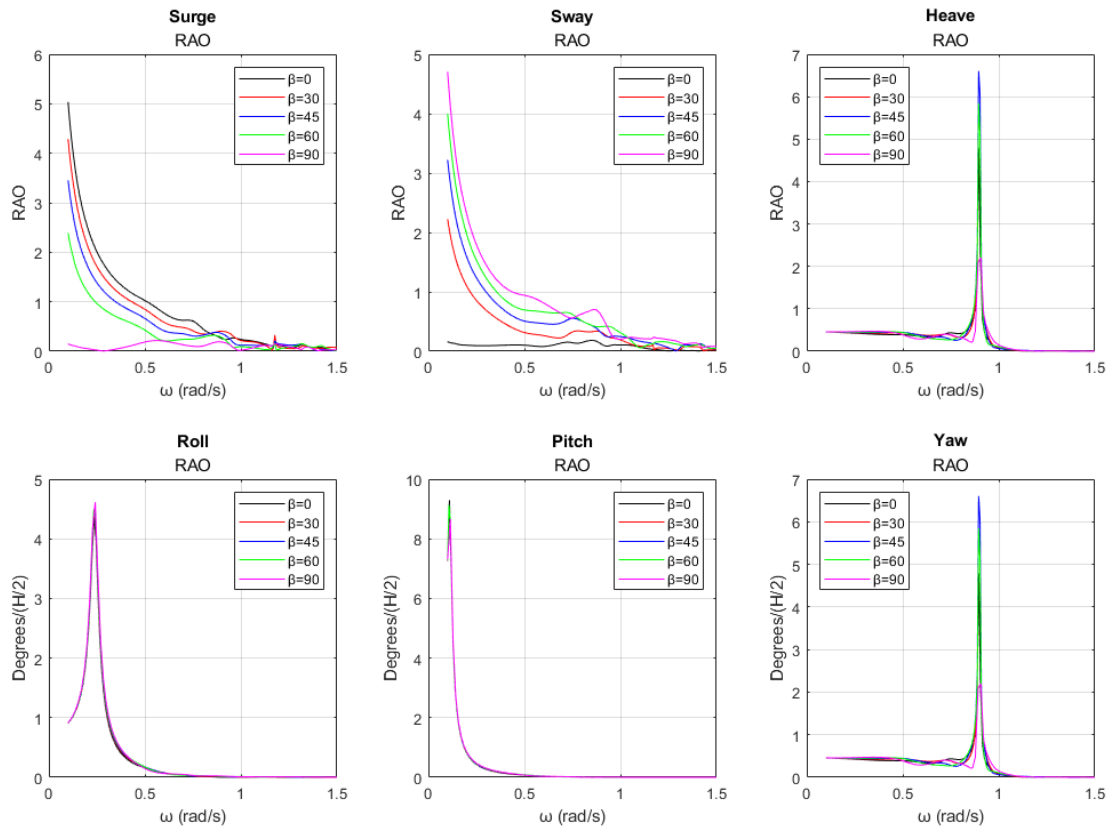
Εικόνα 547: Κινήσεις κυλίνδρου 5 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 548: Κινήσεις κυλίνδρου δ ως προς τους δ βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

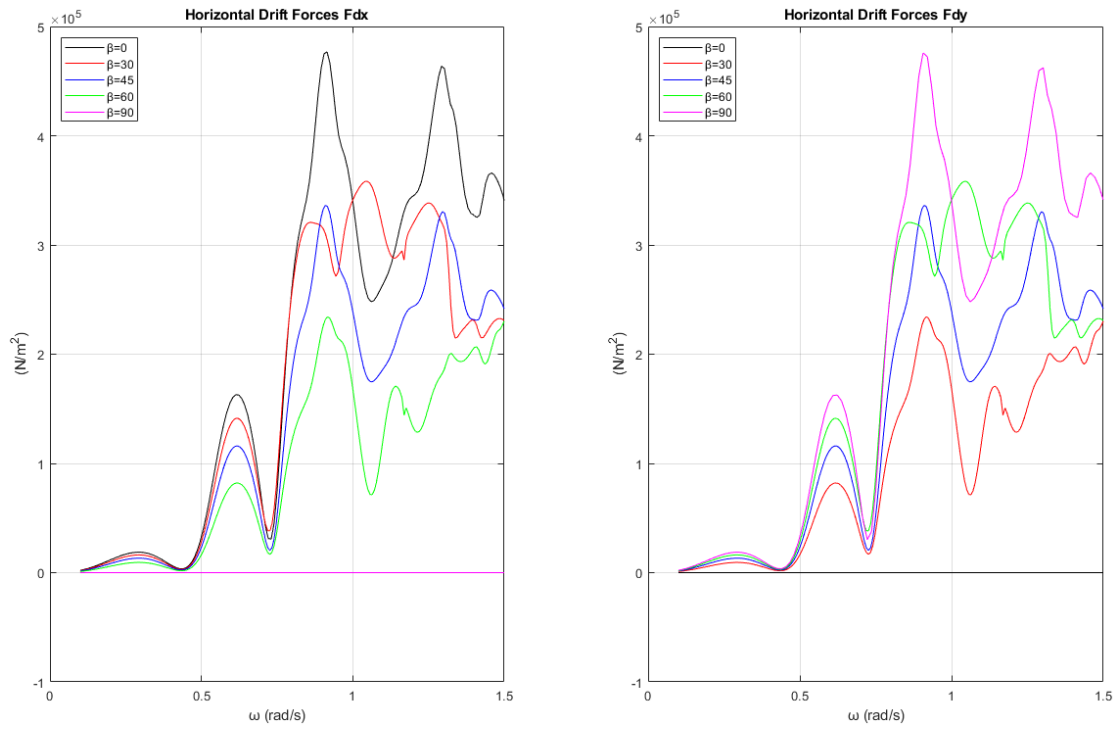


Εικόνα 549: Κινήσεις κυλίνδρου 7 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

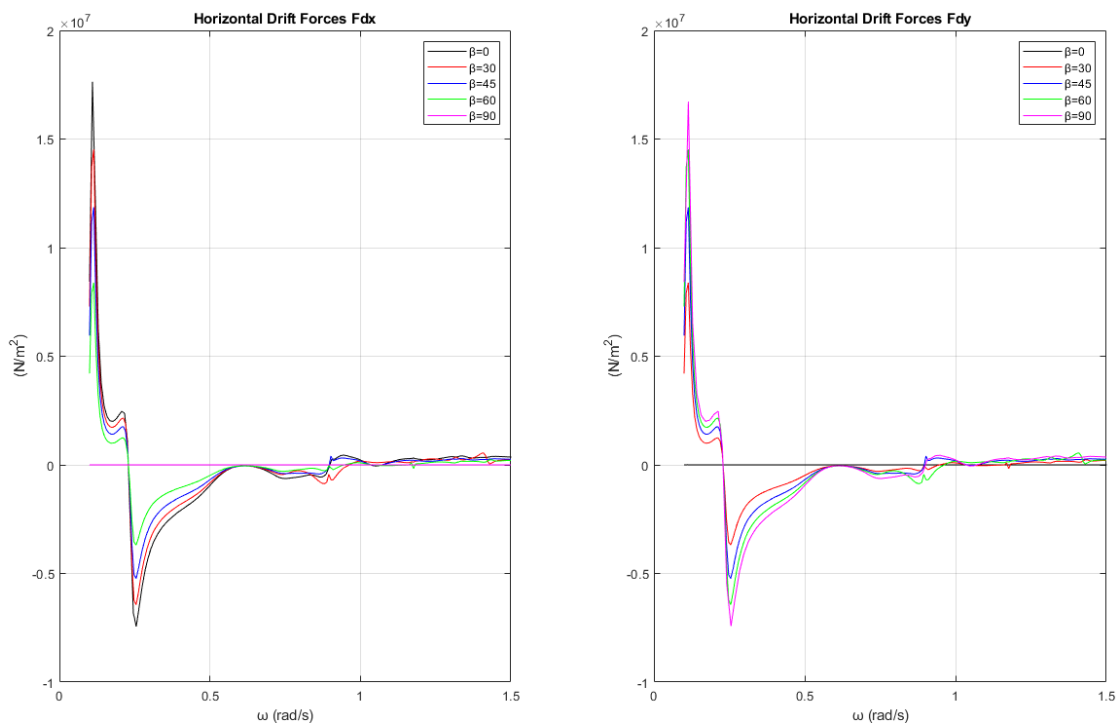


Εικόνα 550: Κινήσεις κυλίνδρου 8 ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

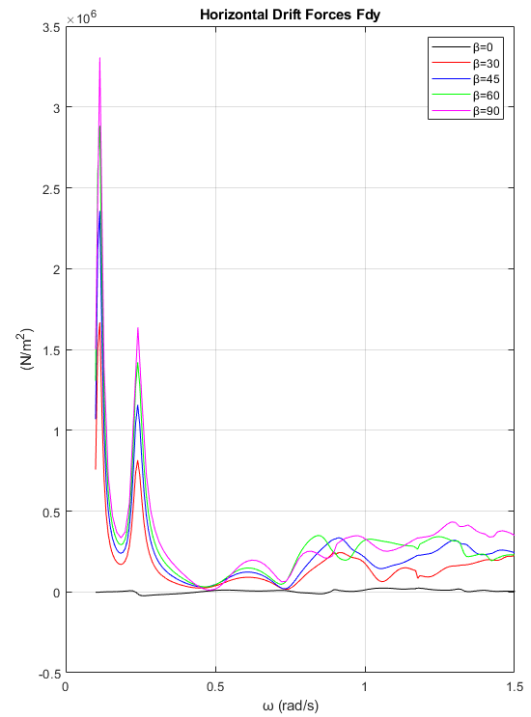
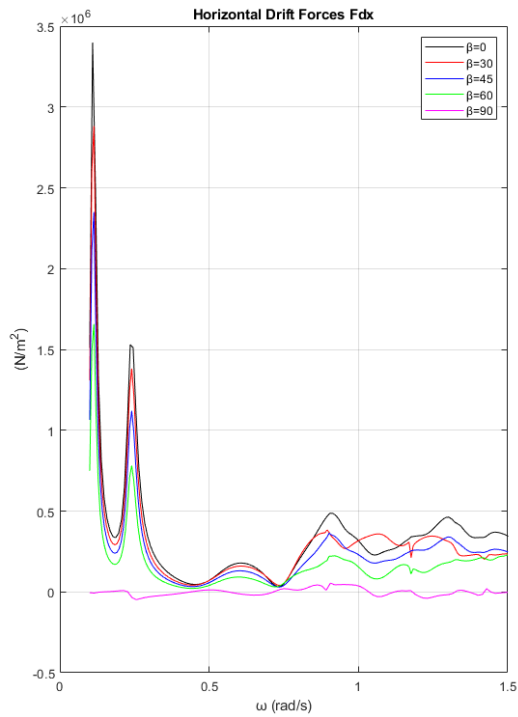
Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους δεν αλλάζουν επειδή αυτοί κινούνται, όμως αλλάζουν οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε αυτούς. Στην Εικόνα 551 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης όταν η διάταξη είναι ακίνητη. Αντίστοιχα στην Εικόνα 552 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη λόγω των κινήσεων των κυλίνδρων, για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Στις Εικόνες 553-560 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



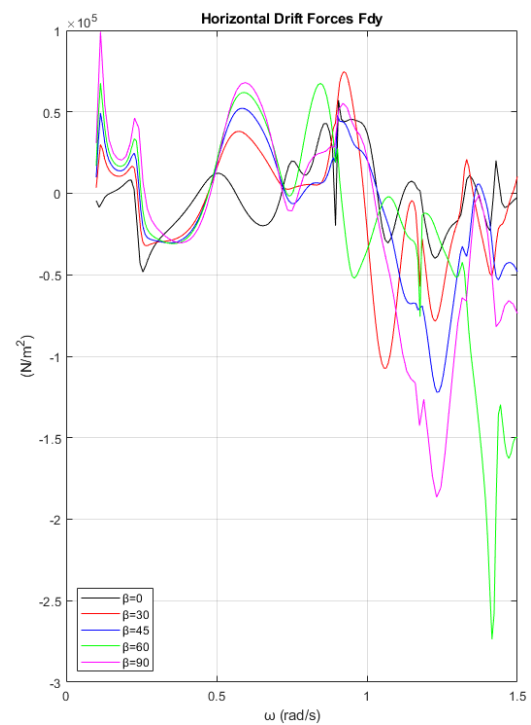
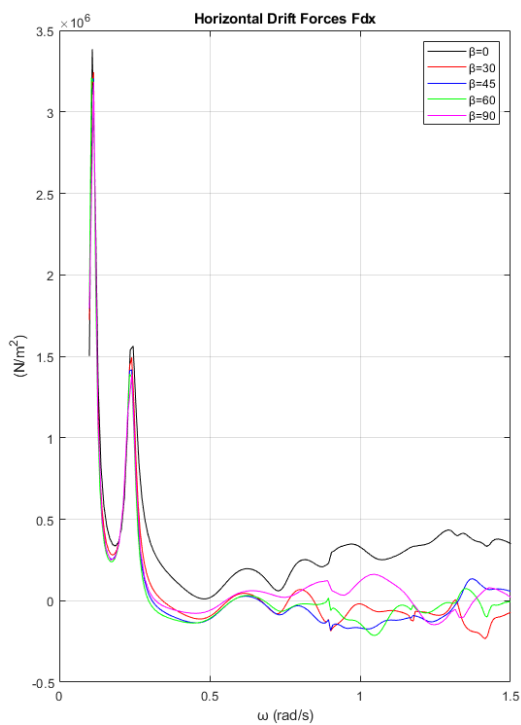
Εικόνα 551: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκεί ο κυματισμός στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (diffraction problem)



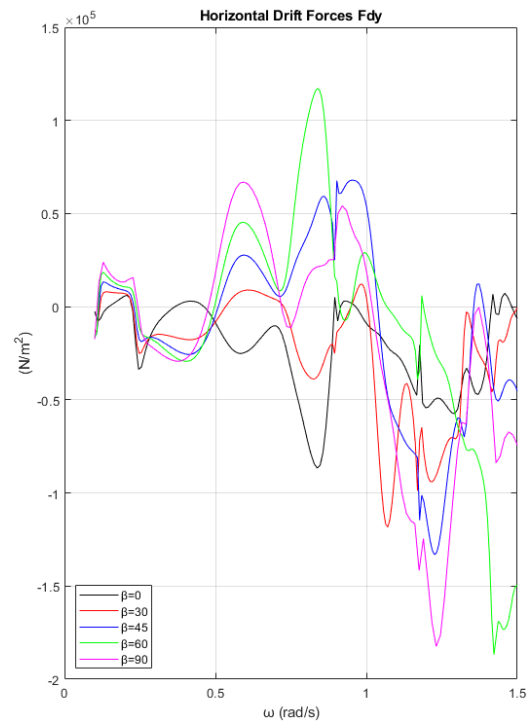
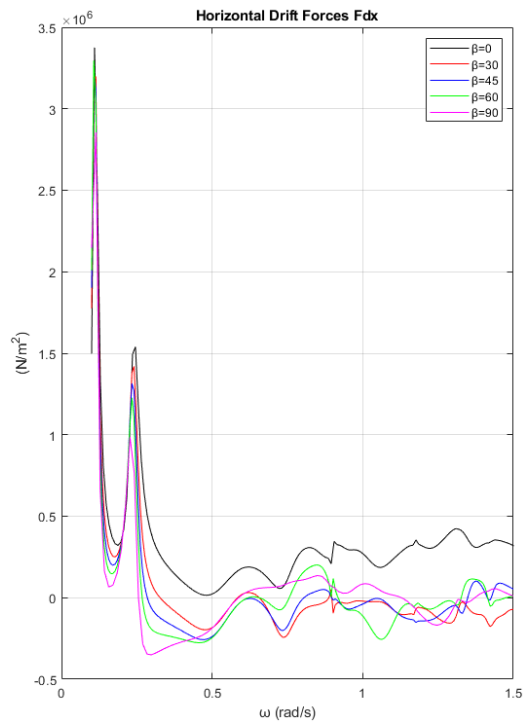
Εικόνα 552: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



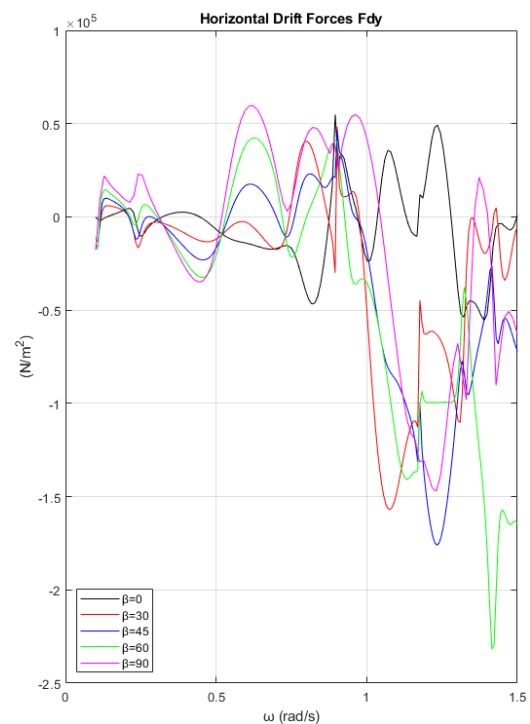
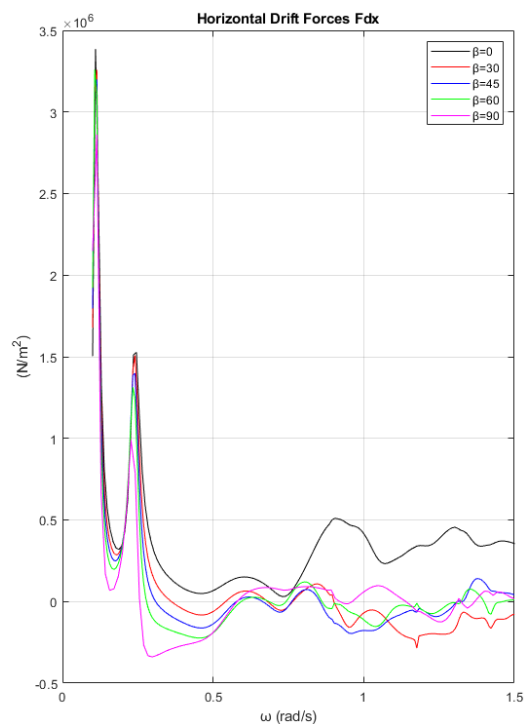
Εικόνα 553: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



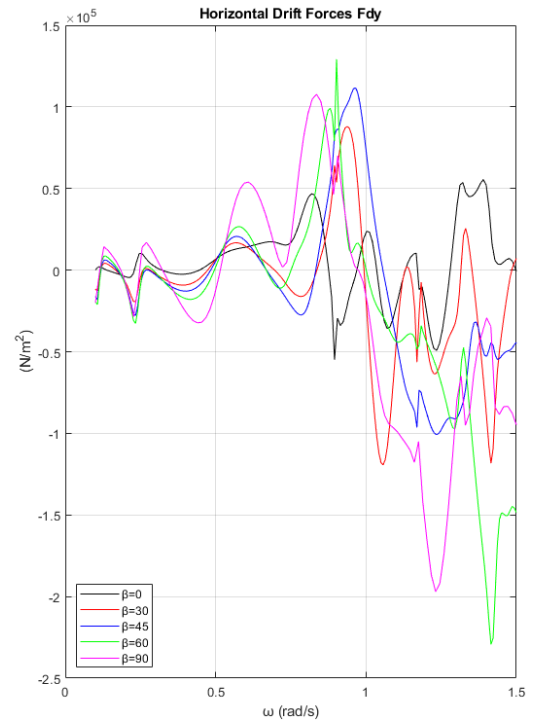
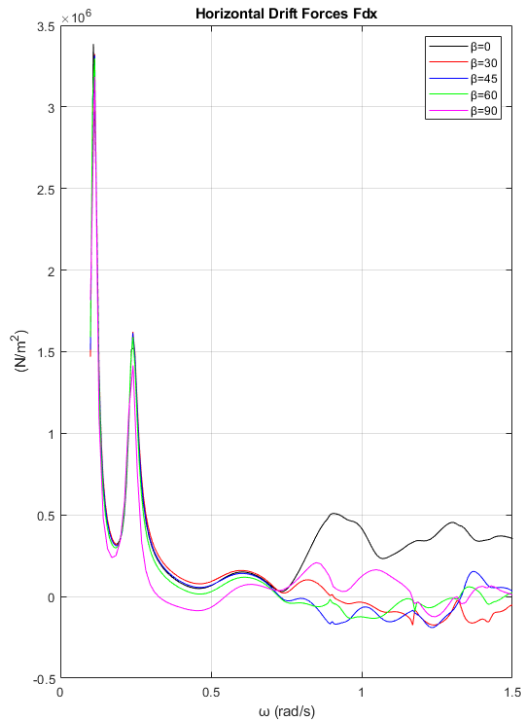
Εικόνα 554: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



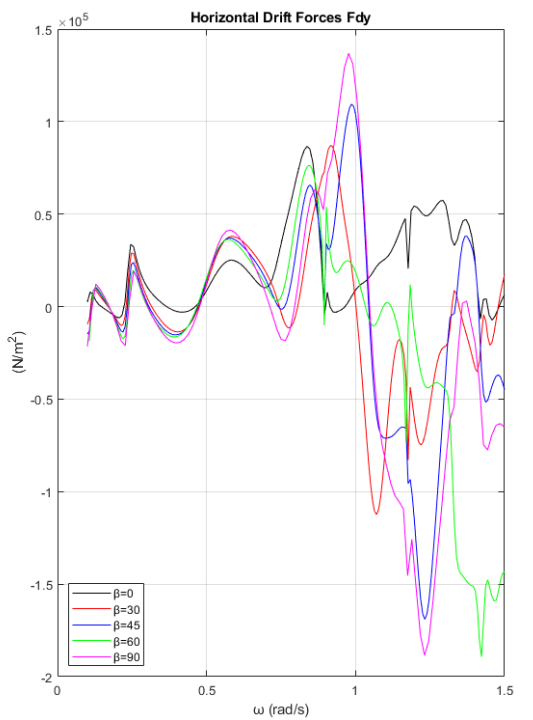
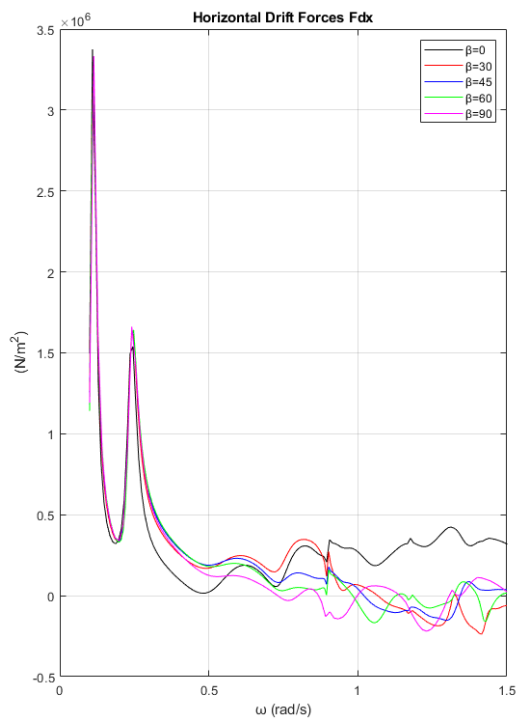
Εικόνα 555: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



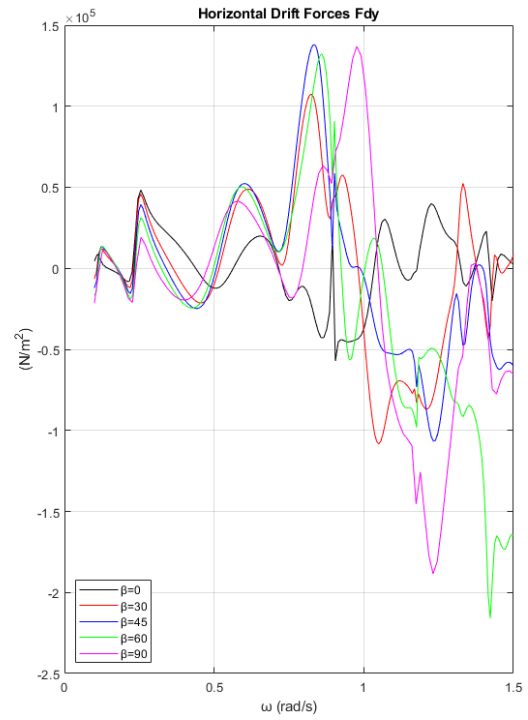
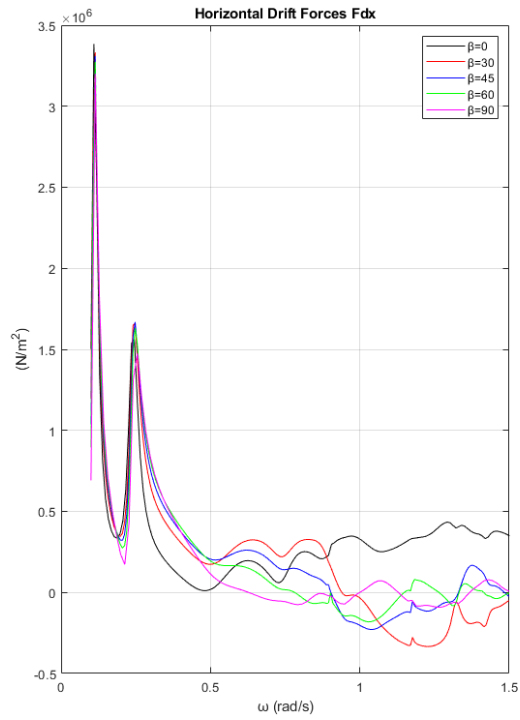
Εικόνα 556: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



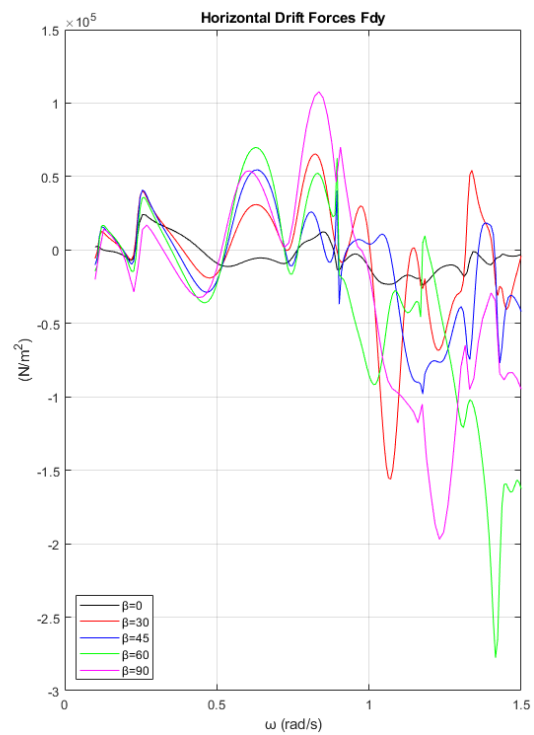
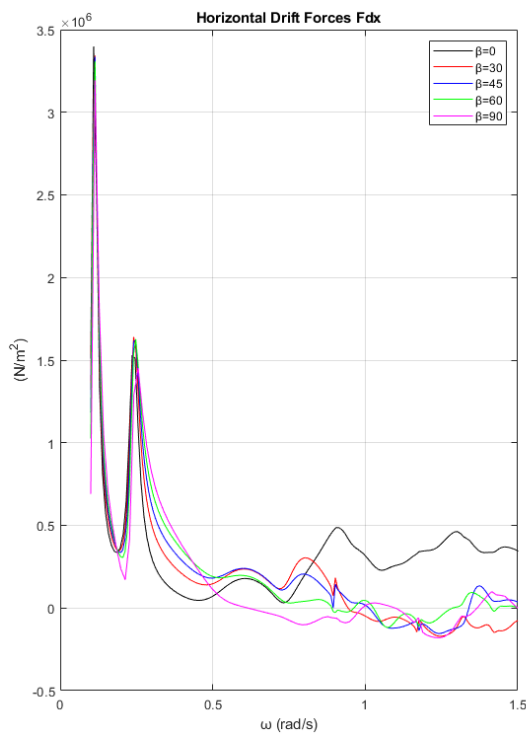
Εικόνα 557: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 558: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)



Εικόνα 559: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 7 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

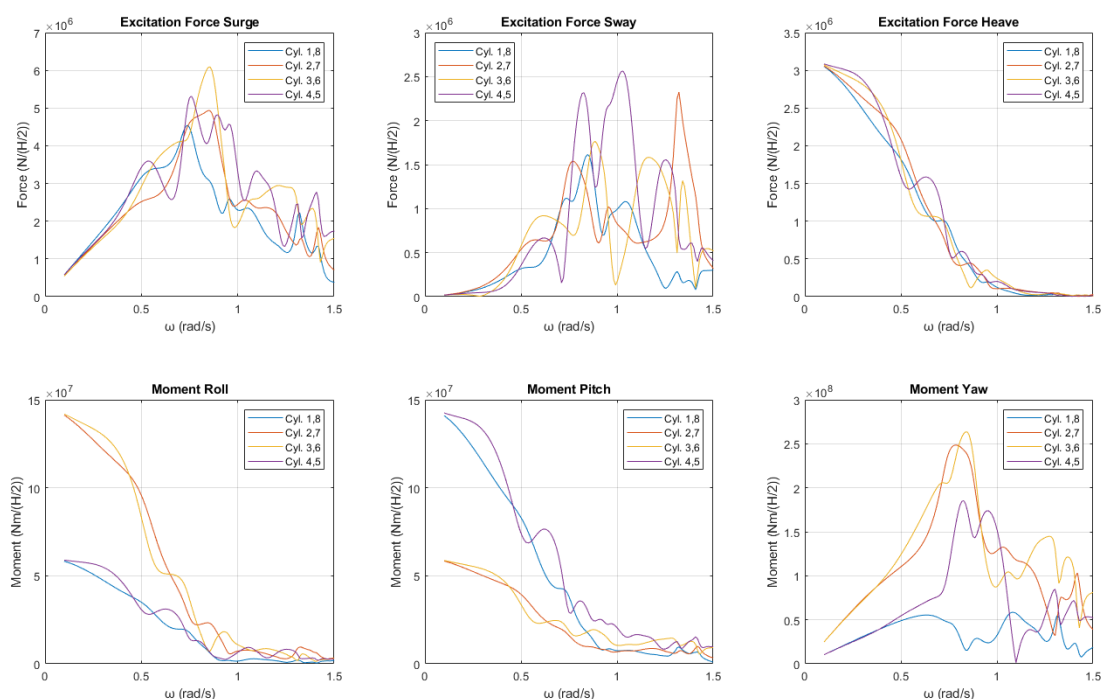


Εικόνα 560: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 8 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (radiation problem)

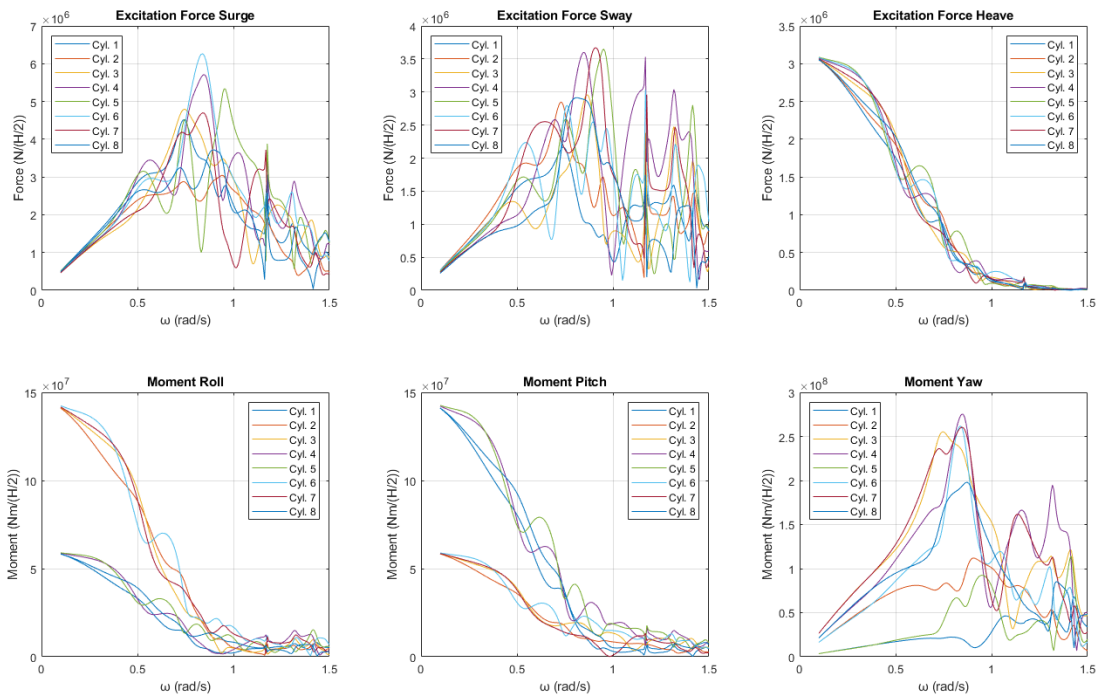
Προκειμένου να δούμε πως αλλάζει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω των κινήσεων των σωμάτων, θα το αναπαραστήσουμε στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παρίδευσης των κυματισμών. Επειδή το φαινόμενο εμφανίζεται σχεδόν σε όλους τους κυλίνδρους για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και προκειμένου να δούμε μια ουσιαστική αλλαγή του μέτρου, τότε θα το αναπαραστήσουμε μόνο για τις συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann, καθώς ασκούνται και οι μεγαλύτερες φορτίσεις στη συνθήκη αυτή. Στις Εικόνες 561-565 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης ανά γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Στον Πίνακα 142 φαίνονται ως προς ποιον κύλινδρο και ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 142: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

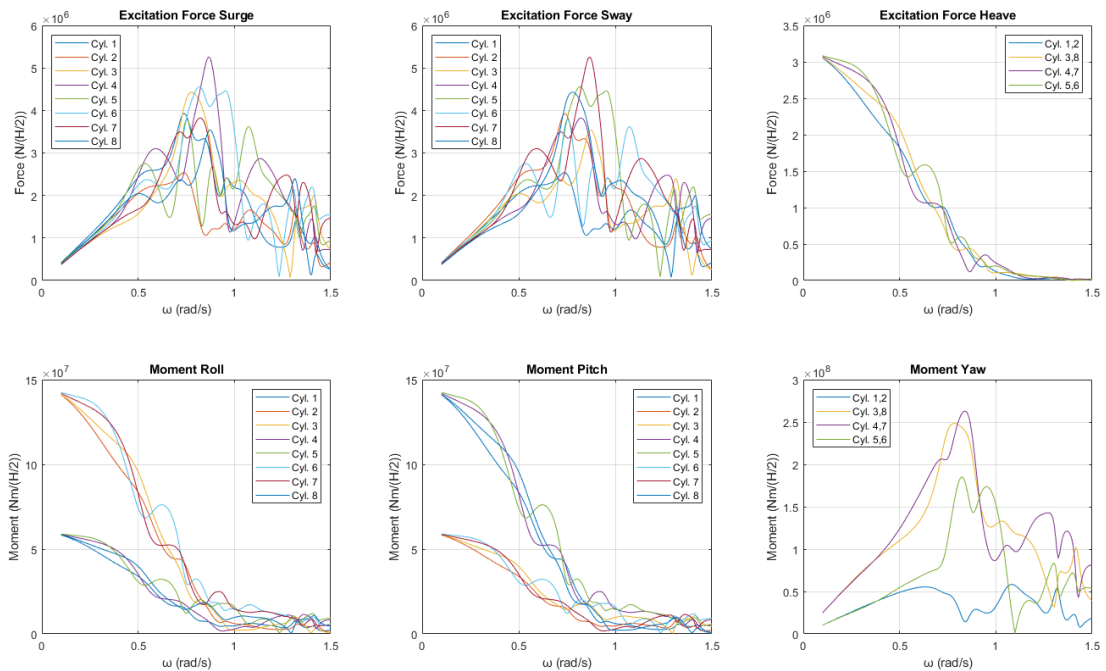
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.85$	Κύλινδροι 3,6	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδρος 6	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.87$	Κύλινδροι 4,7	F_x/F_y	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.84$	Κύλινδρος 5	F_y	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.85$	Κύλινδροι 5,8	F_y	ΝΑΙ



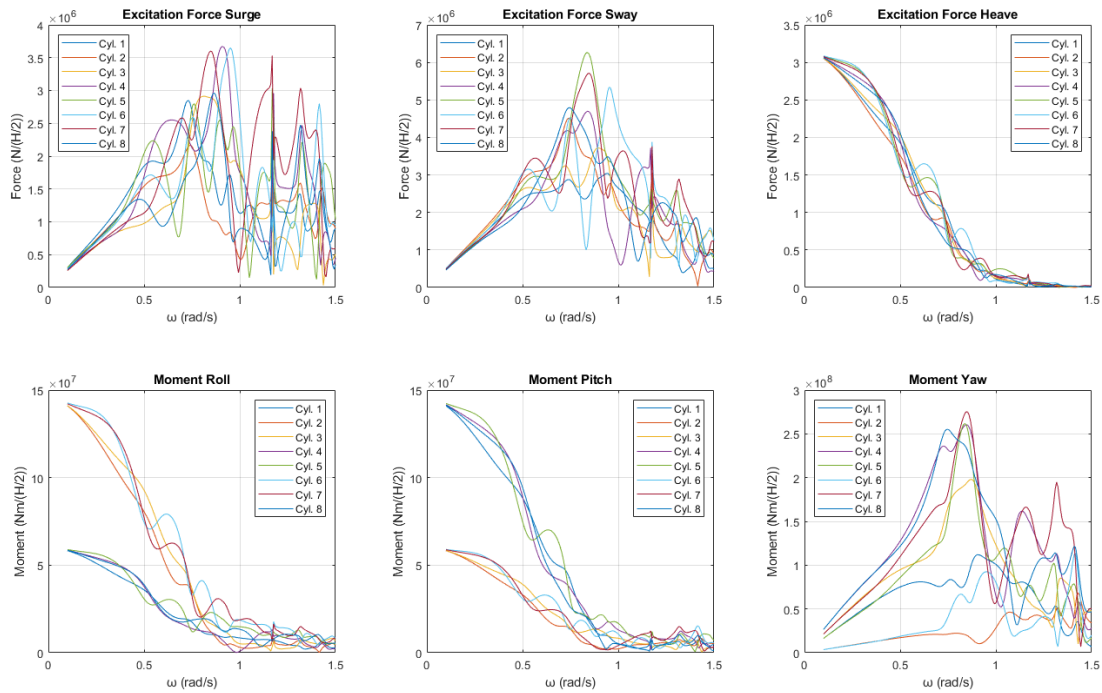
Εικόνα 561: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$



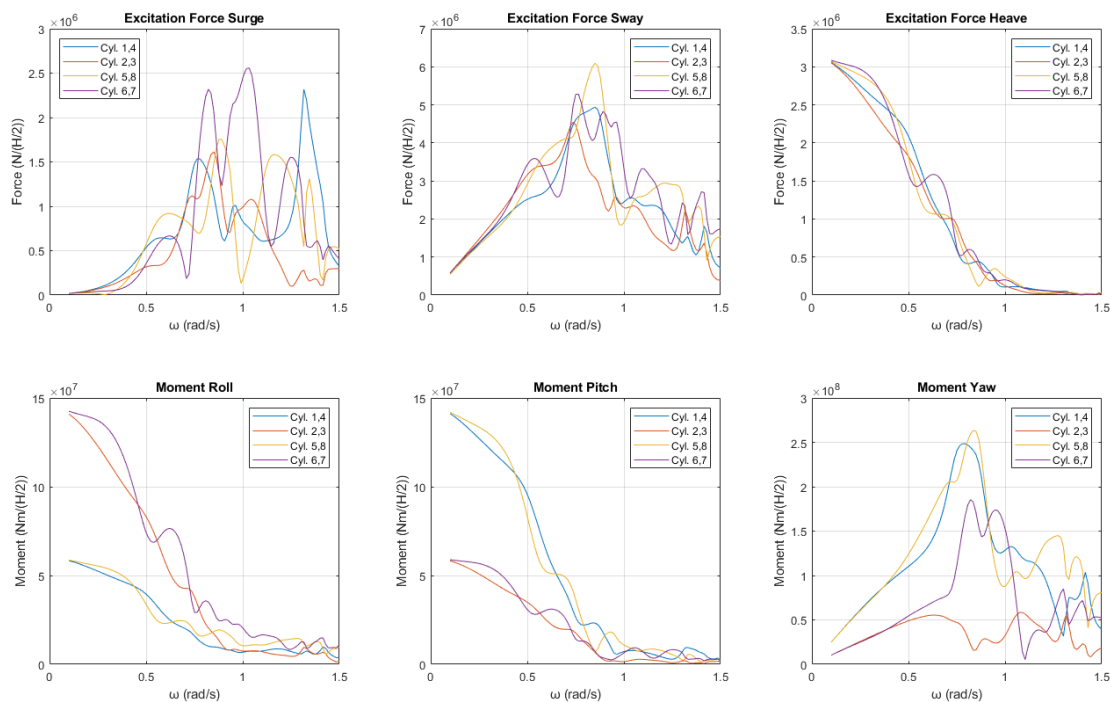
Εικόνα 562: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$



Εικόνα 563: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$



Εικόνα 564: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$



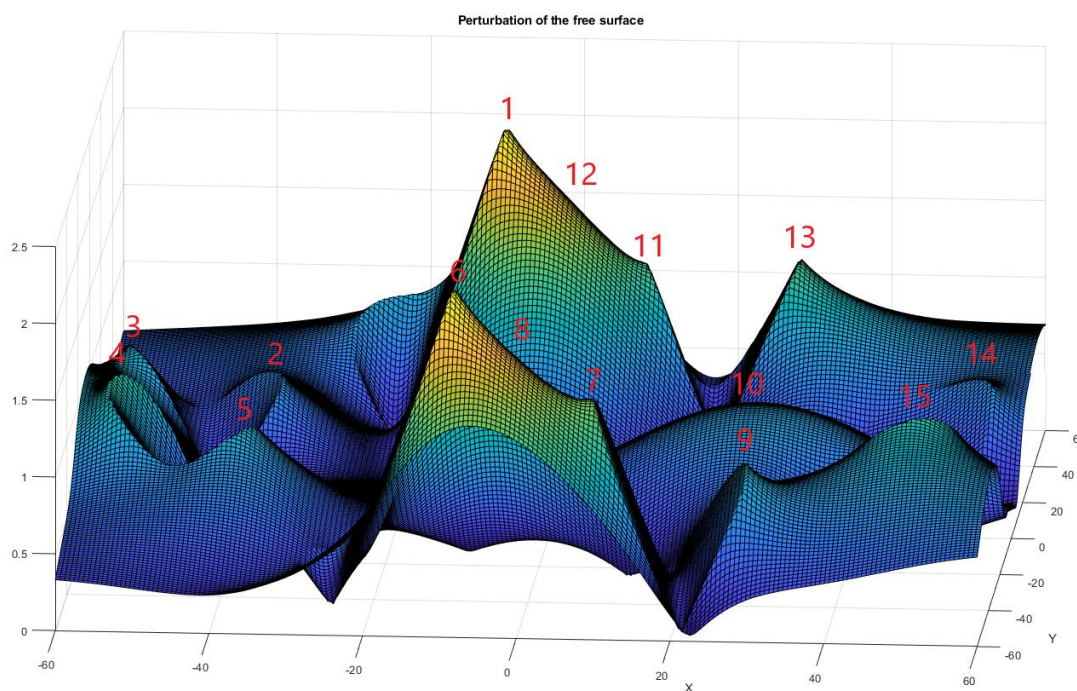
Εικόνα 565: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 566 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη

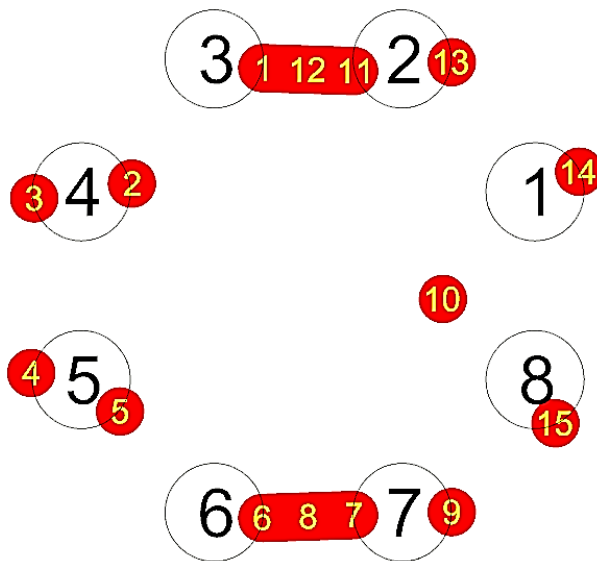
Neumann για τους κυλίνδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 143 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 567 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 143: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.10 m
2	0.70 m
3	0.94 m
4	1.11 m
5	0.90 m
6	2.10 m
7	1.39 m
8	1.75 m
9	0.94 m
10	0.85 m
11	1.23 m
12	1.65 m
13	1.25 m
14	0.74 m
15	1.01 m



Εικόνα 566: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 3 και 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

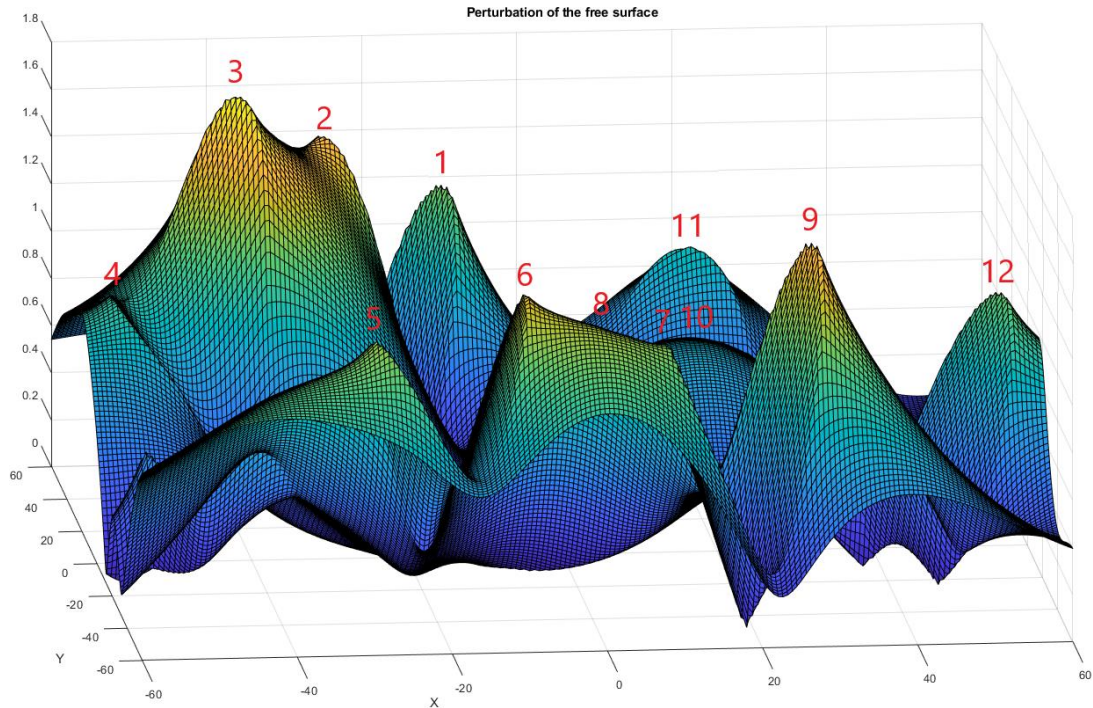


Εικόνα 567: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

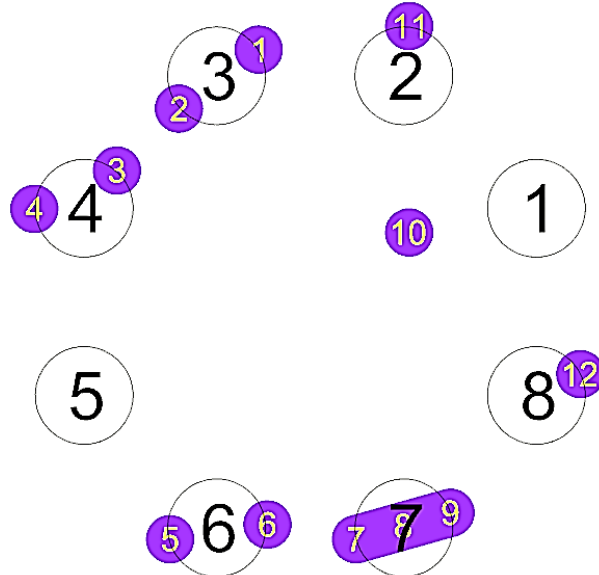
Στην Εικόνα 568 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 144 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 569 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 144: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.22 m
2	1.52 m
3	1.78 m
4	1.00 m
5	1.24 m
6	1.40 m
7	1.19 m
8	1.30 m
9	1.58 m
10	0.78 m
11	0.89 m
12	1.17 m



Εικόνα 568: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 6 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



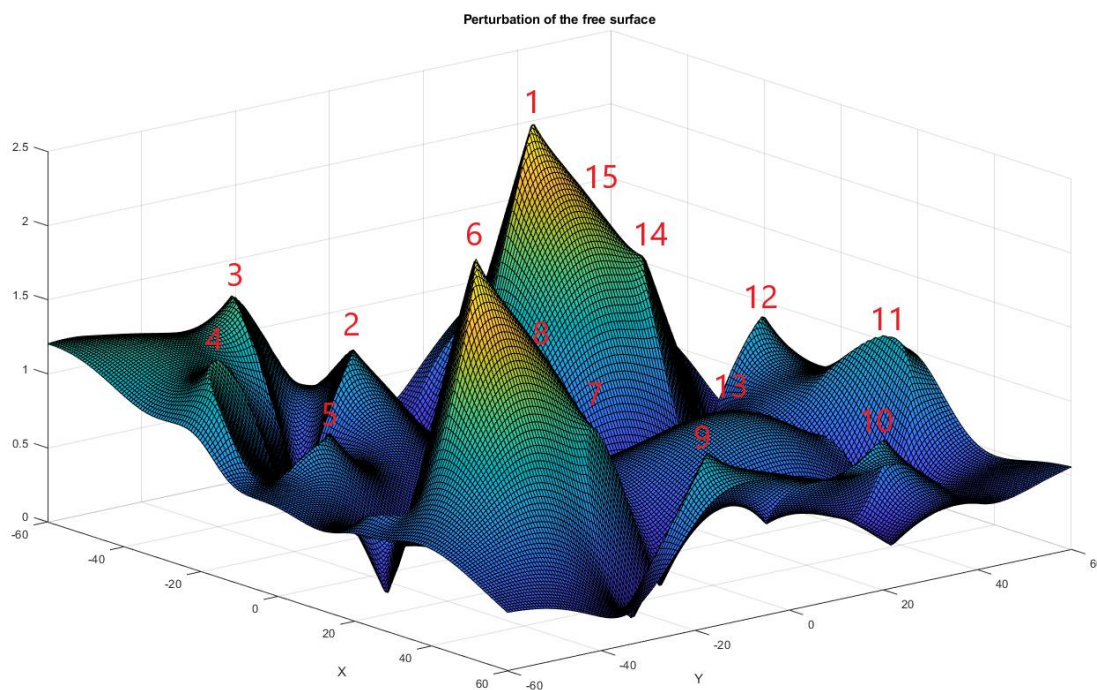
Εικόνα 569: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 570 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 4 και 7 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 145 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του

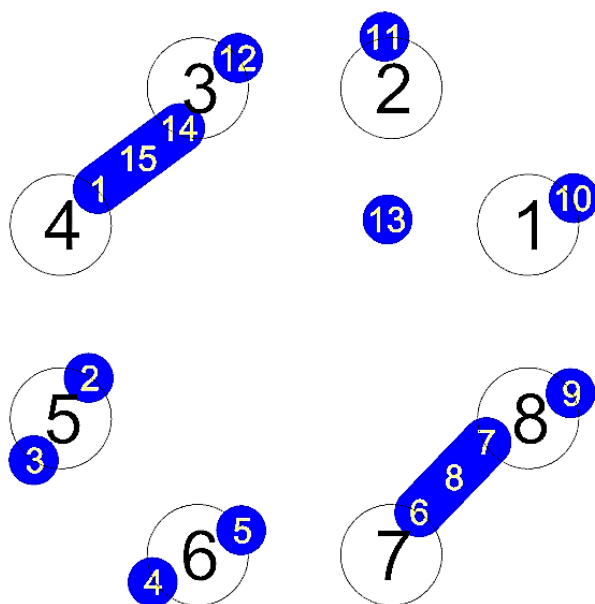
μέτρου και στην Εικόνα 571 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 145: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.27 m
2	0.97 m
3	1.37 m
4	1.27 m
5	0.84 m
6	2.33 m
7	1.17 m
8	1.75 m
9	1.05 m
10	0.92 m
11	1.10 m
12	1.03 m
13	0.84 m
14	1.38 m
15	1.83 m



Εικόνα 570: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 4 και 7 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

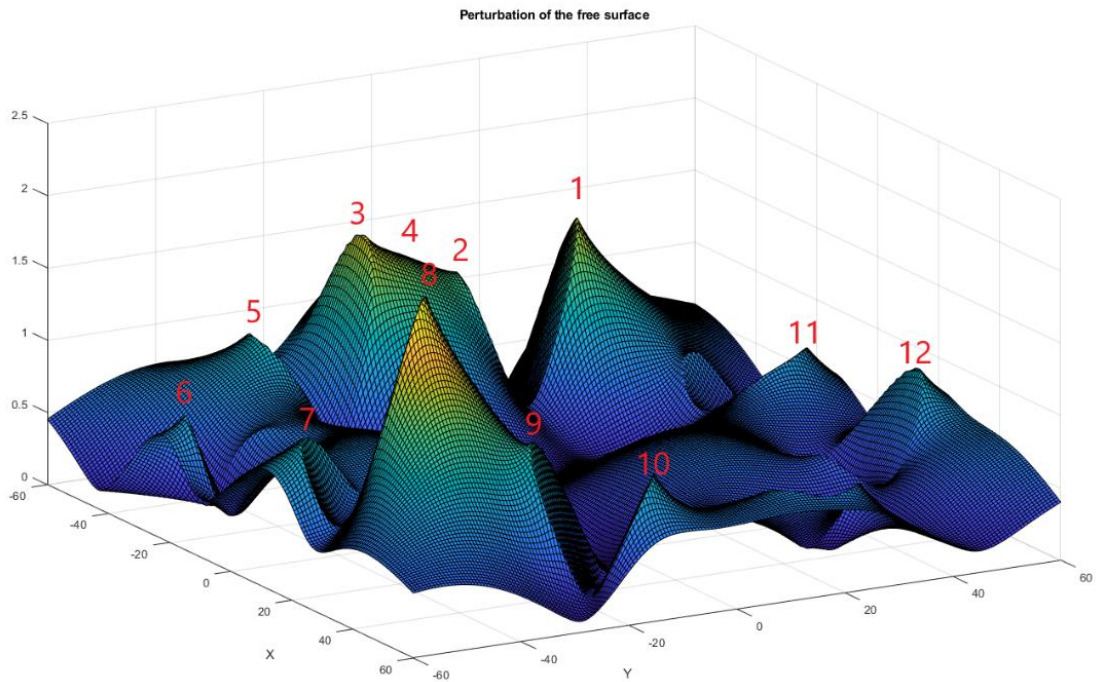


Εικόνα 571: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

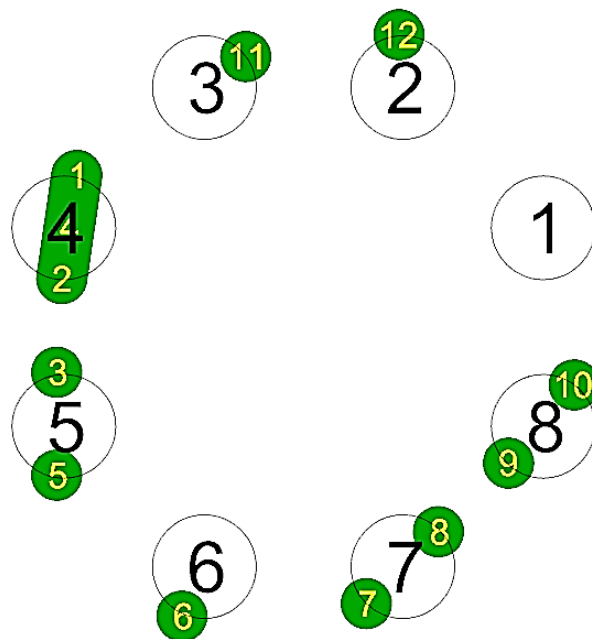
Στην Εικόνα 572 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 146 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 573 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 146: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.48 m
2	1.17 m
3	1.56 m
4	1.37 m
5	0.96 m
6	0.81 m
7	0.98 m
8	2.01 m
9	1.08 m
10	0.90 m
11	0.78 m
12	0.93 m



Εικόνα 572: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



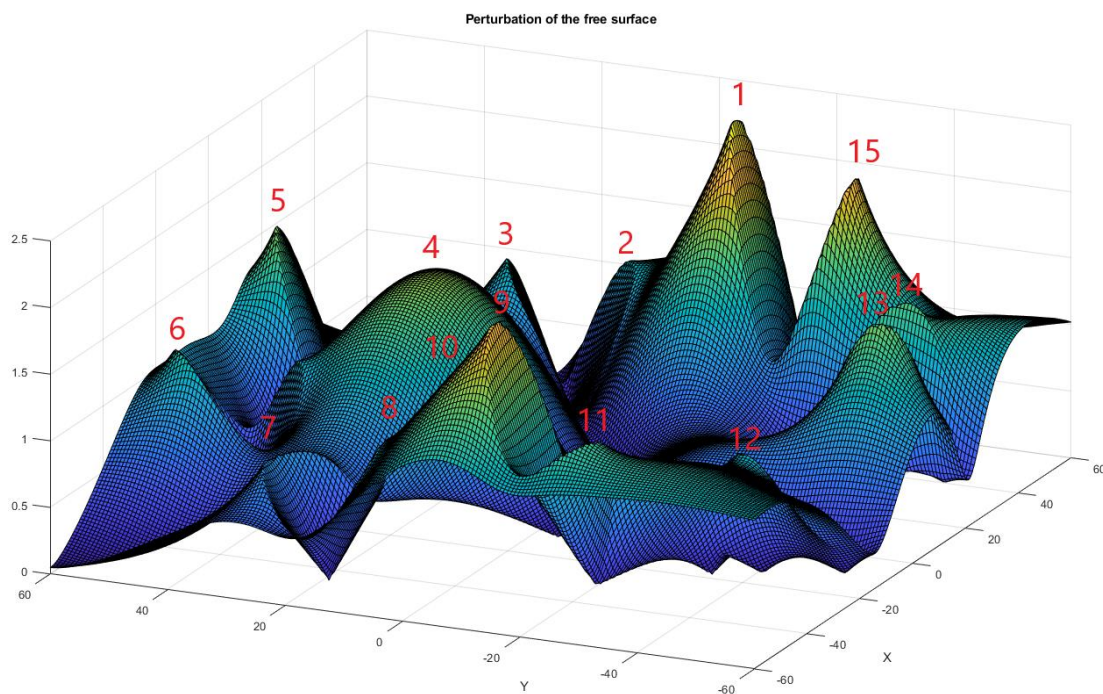
Εικόνα 573: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 574 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 5 και 8 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 147 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου

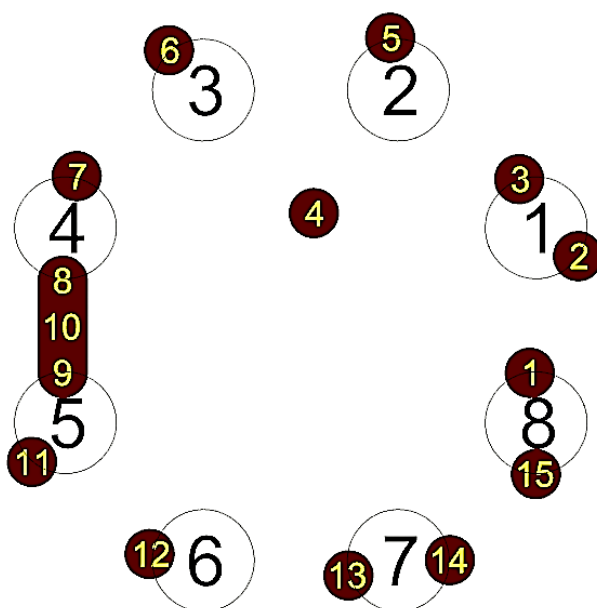
και στην Εικόνα 575 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 147: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.43 m
2	1.14 m
3	1.19 m
4	1.67 m
5	1.59 m
6	1.26 m
7	0.83 m
8	1.13 m
9	2.07 m
10	1.60 m
11	1.38 m
12	1.11 m
13	1.59 m
14	1.48 m
15	2.09 m

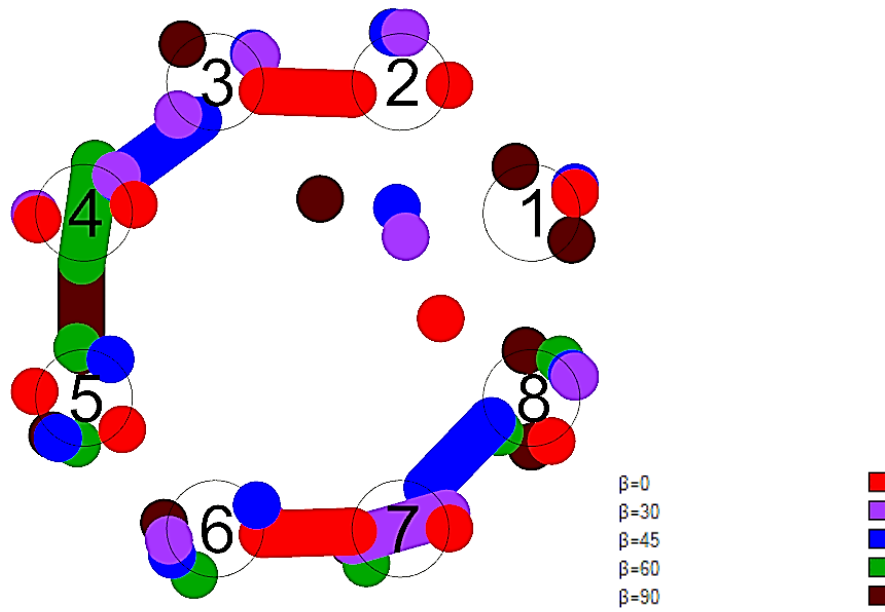


Εικόνα 574: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τους κυλίνδρους 5 και 8 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

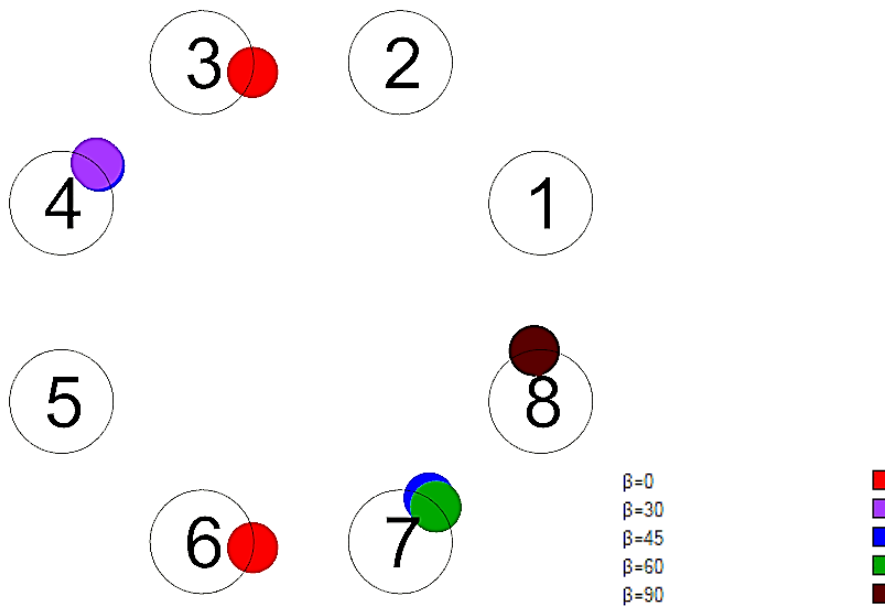


Εικόνα 575: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

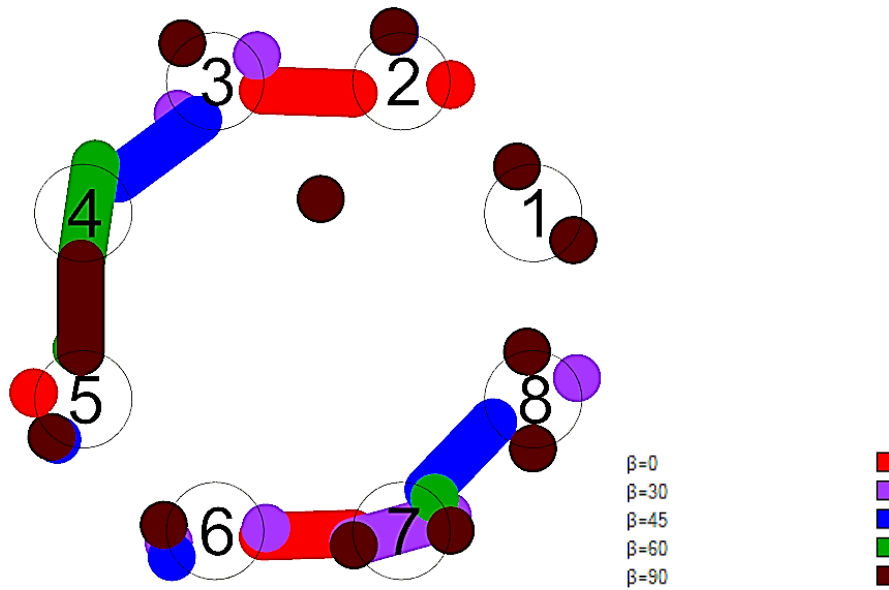
Στην Εικόνα 576 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 577 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο η Εικόνα 577 αποτελεί έναν οδηγό ως προς ποια γωνία πρόσπτωσης κυματισμού και ως προς ποιον κύλινδρο παρατηρείται η μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Στην Εικόνα 578 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 578 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν έξι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους που είχαμε υποθέσει. Οι κινήσεις των κυλίνδρων επηρεάζουν θετικά το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας καθώς παρατηρούμε μεγαλύτερες κορυφές.



Εικόνα 576: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



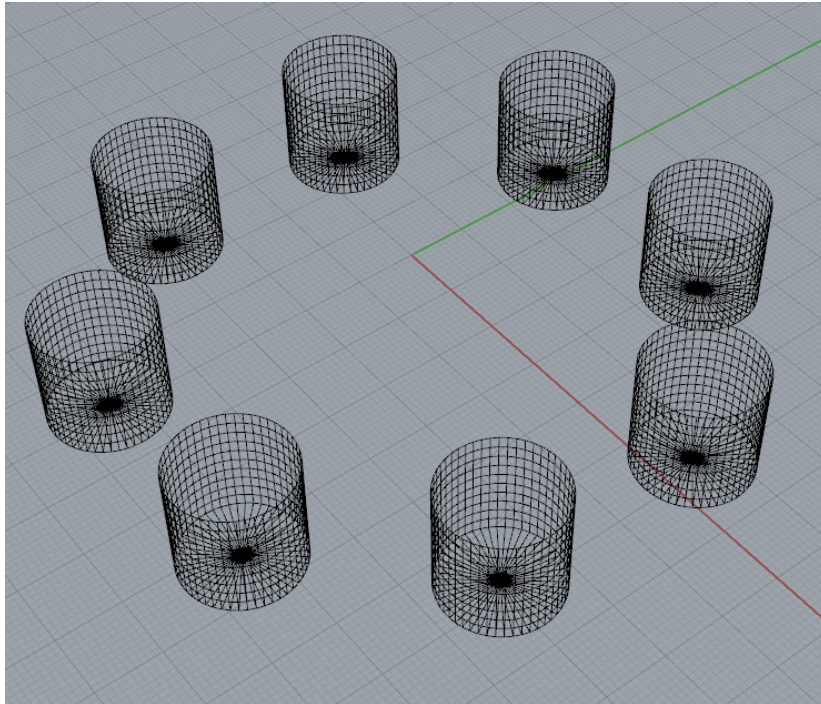
Εικόνα 577: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 578: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.8.3 Μελέτη της διάταξης σαν ένα σώμα

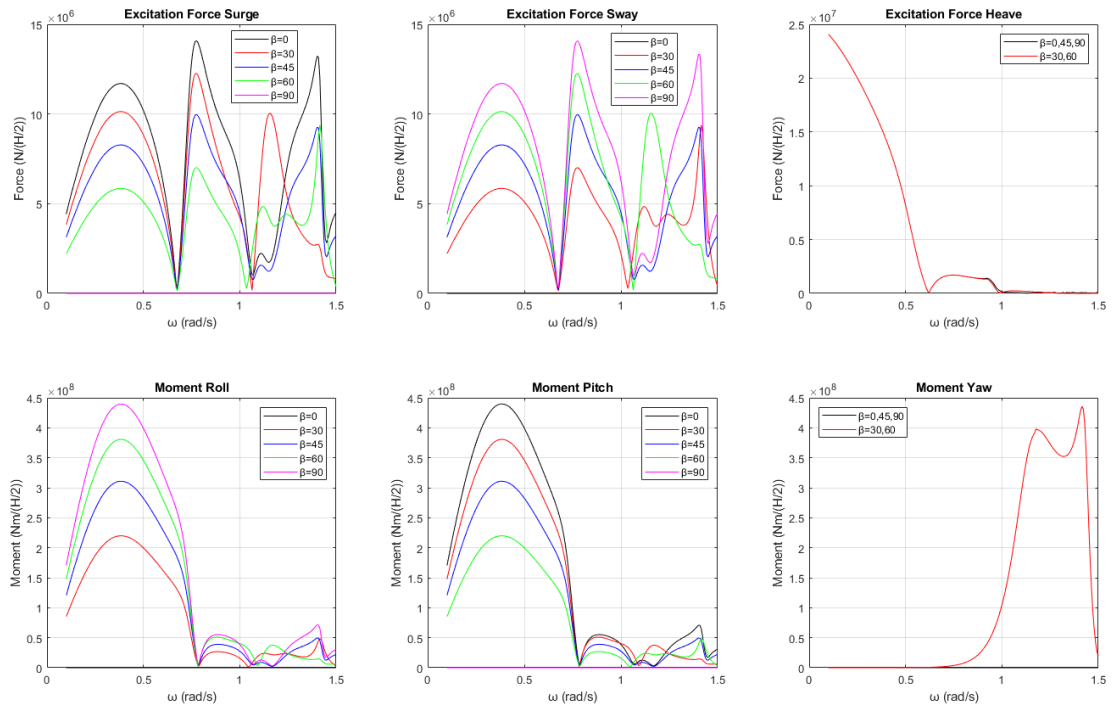
Όπως και στις προηγούμενες διατάξεις, θα μελετήσουμε την παραπάνω διάταξη θεωρώντας ότι οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν να είναι ένα σώμα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσουμε να διαπιστώσουμε αν εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών σε όλη τη διάταξη και όχι μόνο σε μεμονωμένους κυλίνδρους, καθώς και πως μεταβάλλεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Όπως είδαμε και σε προηγούμενες διατάξεις, όταν η διακριτοποίηση ενός κυλίνδρου αποτελείται από 500 στοιχεία, τότε τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από το ανοιχτό κώδικα BEM NEMOH είναι ικανοποιητικά. Στην Εικόνα 579 φαίνεται η διακριτοποίηση της διάταξης των οκτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, η οποία αποτελείται από 4408 σημεία και 4400 στοιχεία.



Εικόνα 579: Διακριτοποίηση διάταξης οχτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, η οποία αποτελείται από 4408 σημεία και 4400 στοιχεία

3.8.3.1 Ακίνητη διάταξη – diffraction problem

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στην Εικόνα 580. Στον Πίνακα 148 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y αντίστοιχα. Από τον Πίνακα 148 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών δεν εμφανίζεται σε καμία από τις συχνότητες των μεμονωμένων κυλίνδρων, οι οποίες φαίνονται στους Πίνακες 134 και 135.

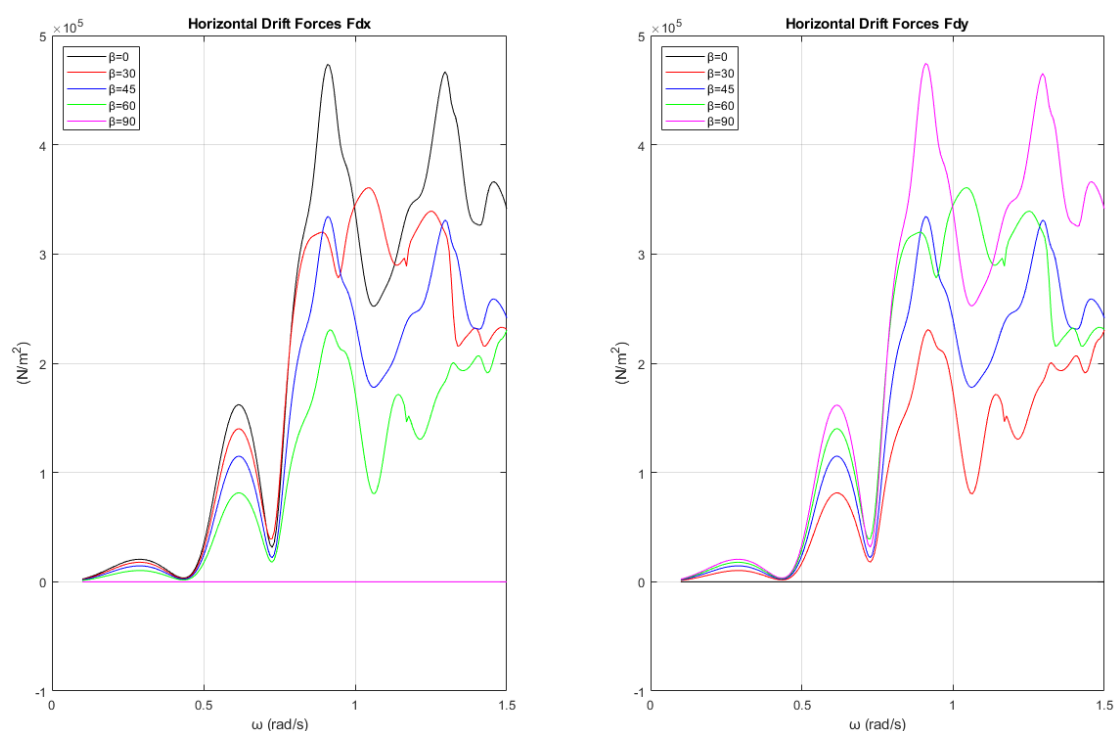


Εικόνα 580: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται συνολικά στη διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Πίνακας 148: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.40$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.16$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.40$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.42$
$\beta = 90^\circ$	—	—
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.42$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.40$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.16$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.78$	$\cong 1.40$

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη φαίνονται στην Εικόνα 581.



Εικόνα 581: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη από τον κυματισμό

Για την αναπαράσταση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας θα χρησιμοποιήσουμε τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 149 φαίνονται ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 149: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

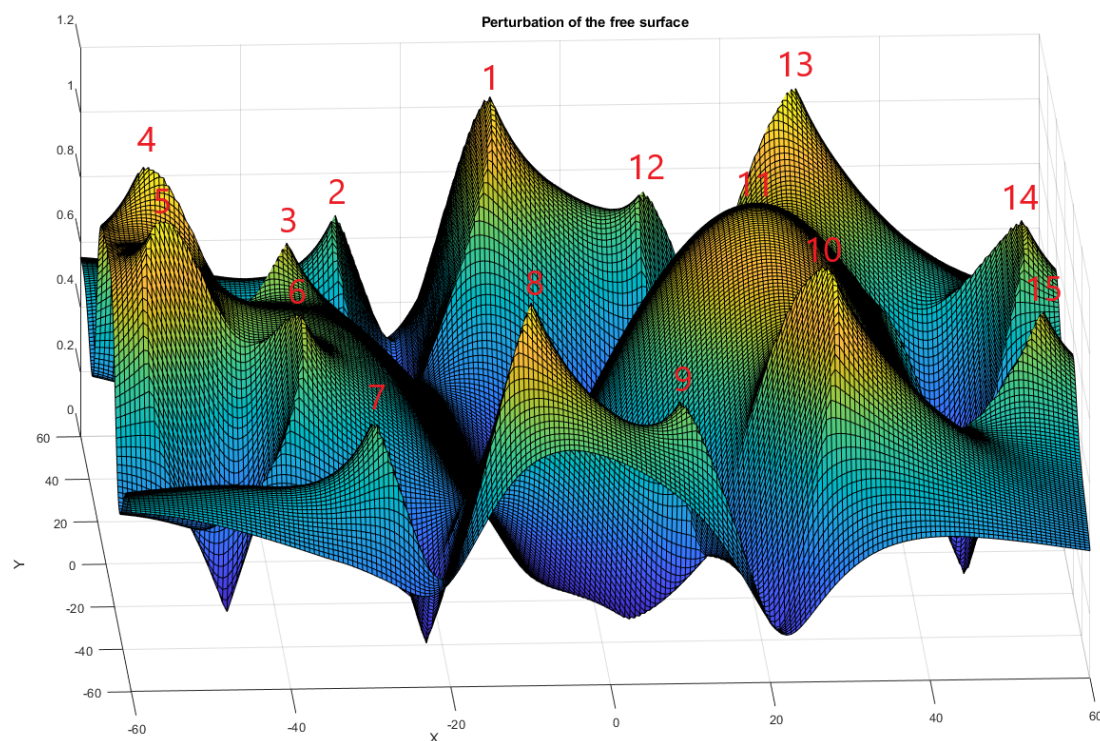
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.78$	F_x	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.78$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	F_x/F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.78$	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.78$	F_y	NAI

Στην Εικόνα 582 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 150 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 583 φαίνονται οι θέσεις

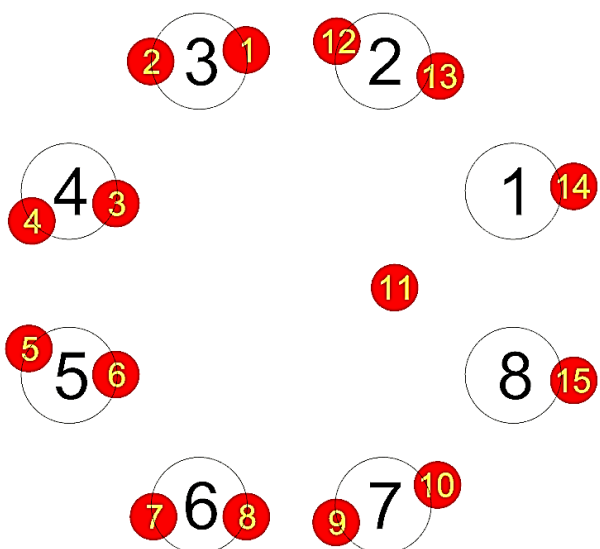
των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 150: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.10 m
2	0.73 m
3	0.87 m
4	1.14 m
5	1.14 m
6	0.87 m
7	0.73 m
8	1.10 m
9	0.79 m
10	1.16 m
11	1.06 m
12	0.79 m
13	1.16 m
14	0.87 m
15	0.87 m



Εικόνα 582: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

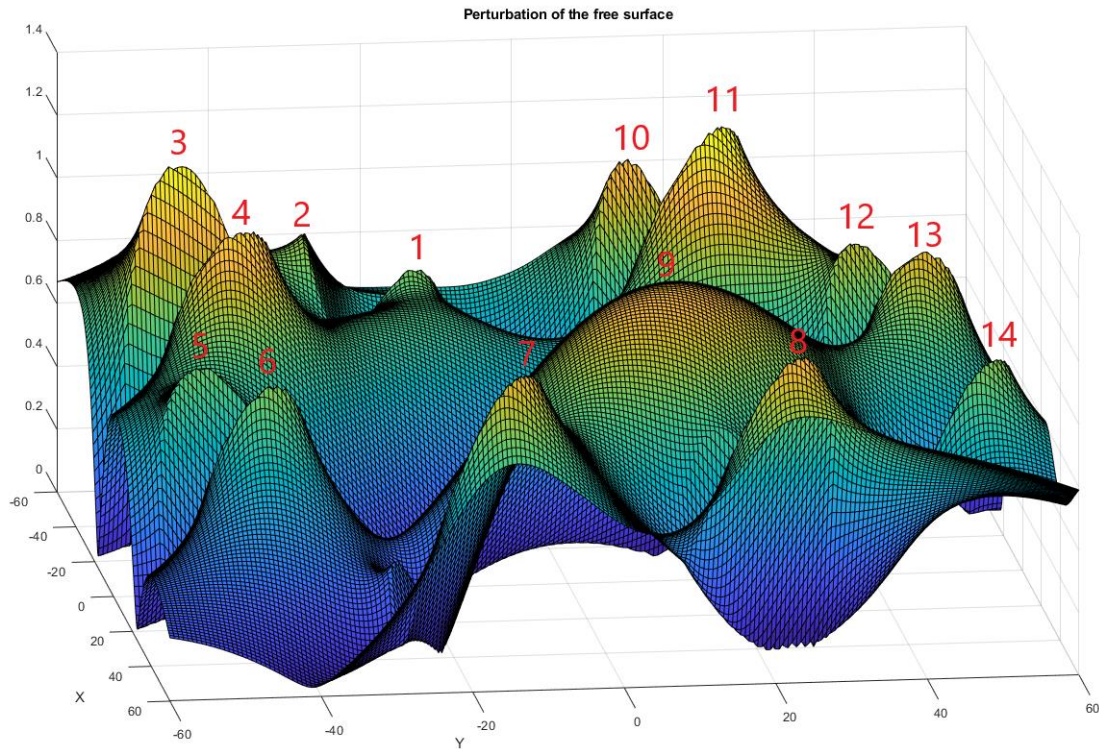


Εικόνα 583: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

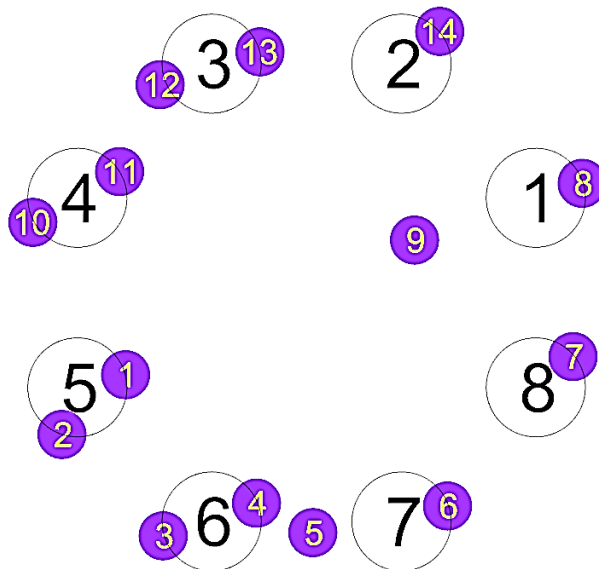
Στην Εικόνα 584 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 151 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 585 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 151: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.81 m
2	0.86 m
3	1.20 m
4	1.09 m
5	0.73 m
6	0.82 m
7	0.97 m
8	0.99 m
9	1.03 m
10	1.02 m
11	1.23 m
12	0.90 m
13	0.97 m
14	0.82 m



Εικόνα 584: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



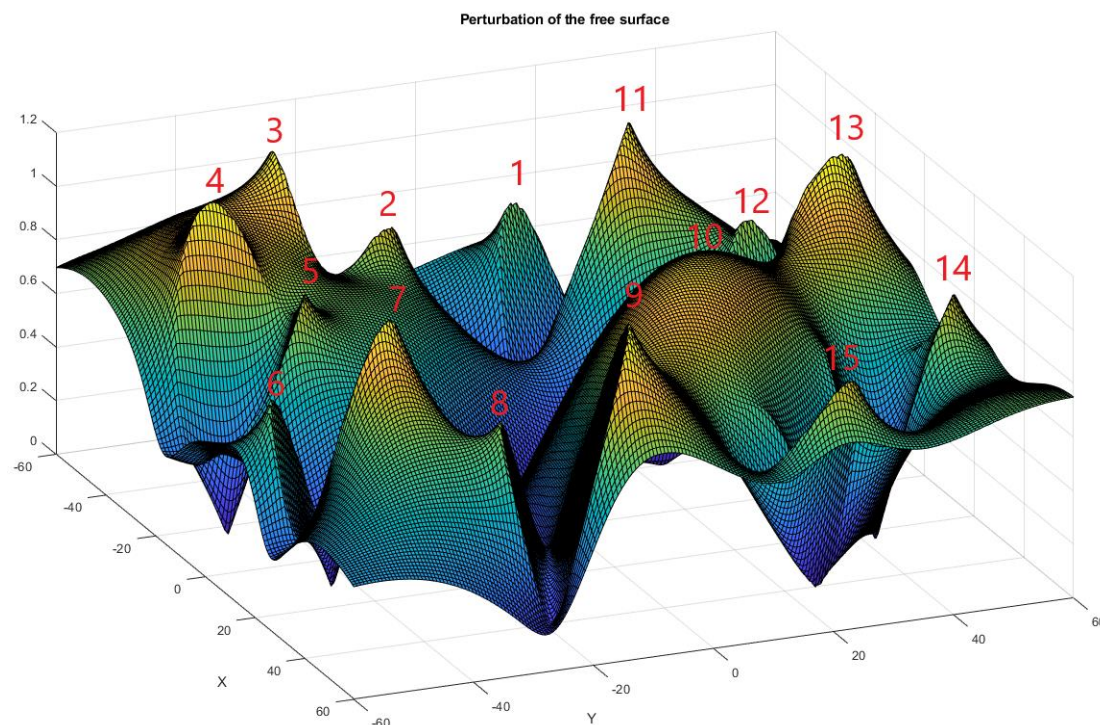
Εικόνα 585: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 586 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 152 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 587 φαίνονται οι

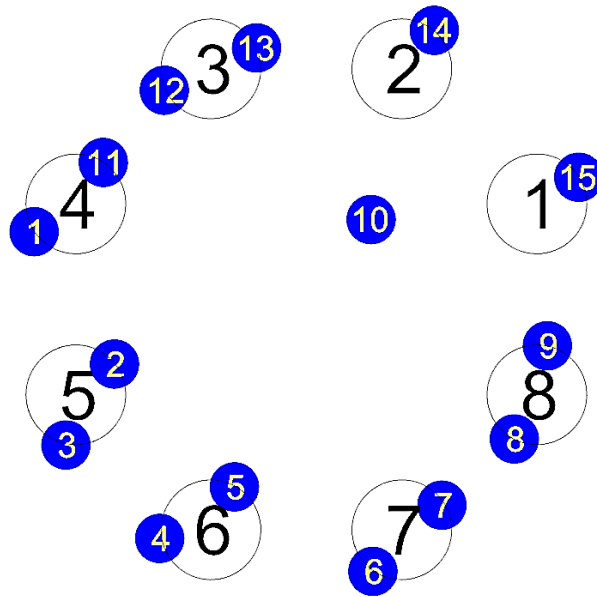
θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 152: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.75 m
2	0.86 m
3	1.12 m
4	1.12 m
5	0.86 m
6	0.75 m
7	1.09 m
8	0.79 m
9	1.15 m
10	1.06 m
11	1.11 m
12	0.79 m
13	1.15 m
14	0.87 m
15	0.88 m



Εικόνα 586: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

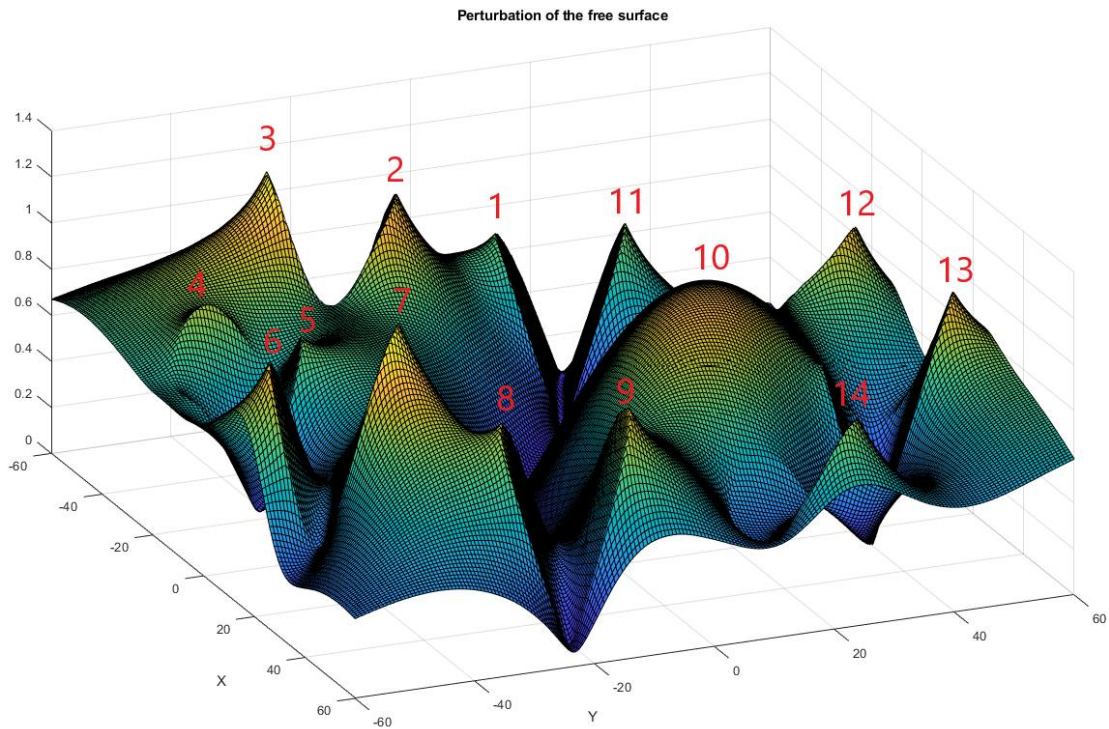


Εικόνα 587: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

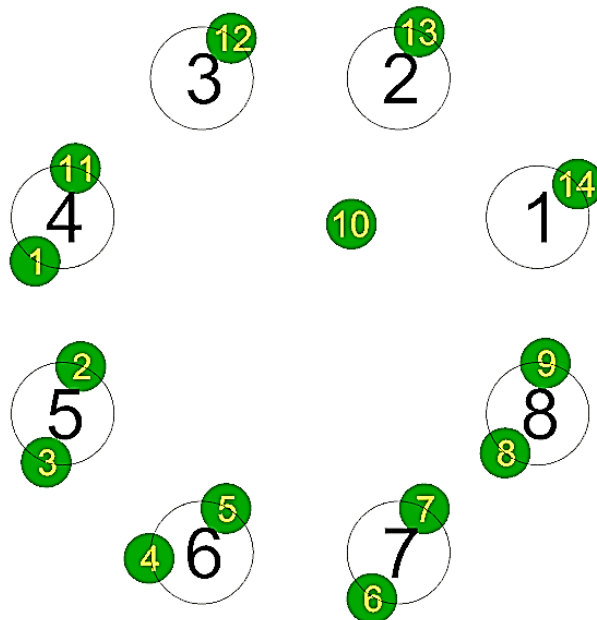
Στην Εικόνα 588 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 153 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 589 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 153: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.77 m
2	1.09 m
3	1.20 m
4	0.87 m
5	0.78 m
6	1.02 m
7	1.23 m
8	0.88 m
9	0.97 m
10	1.05 m
11	0.81 m
12	0.78 m
13	1.00 m
14	0.82 m



Εικόνα 588: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



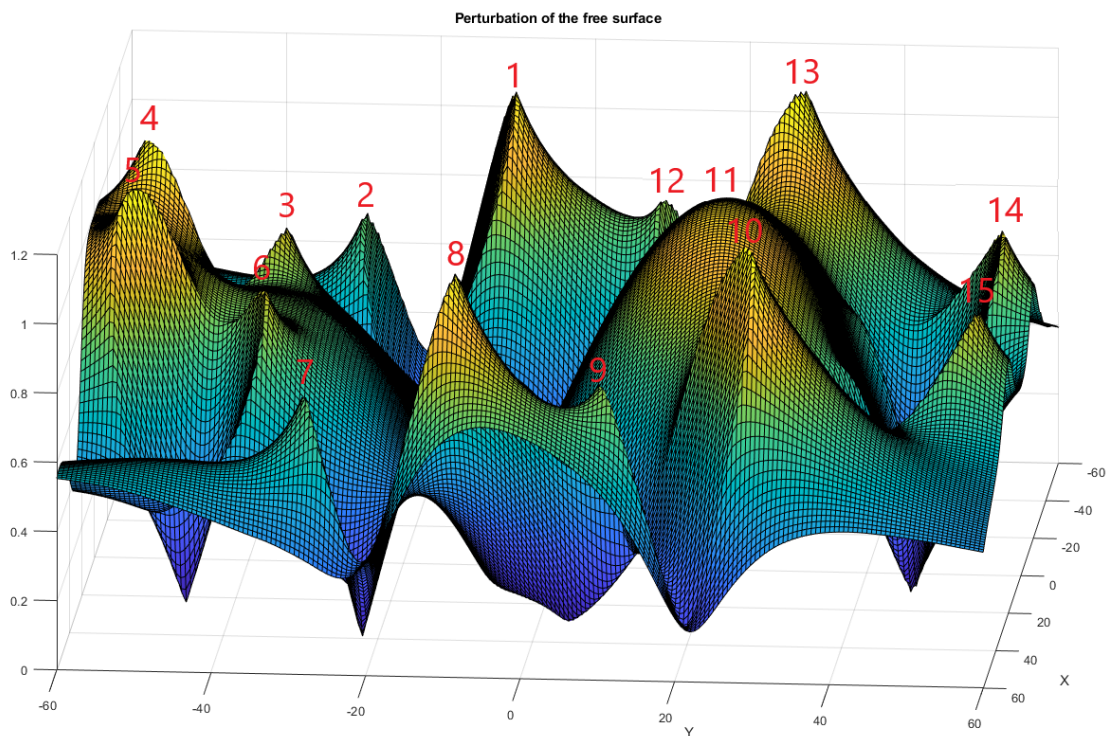
Εικόνα 589: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 590 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 154

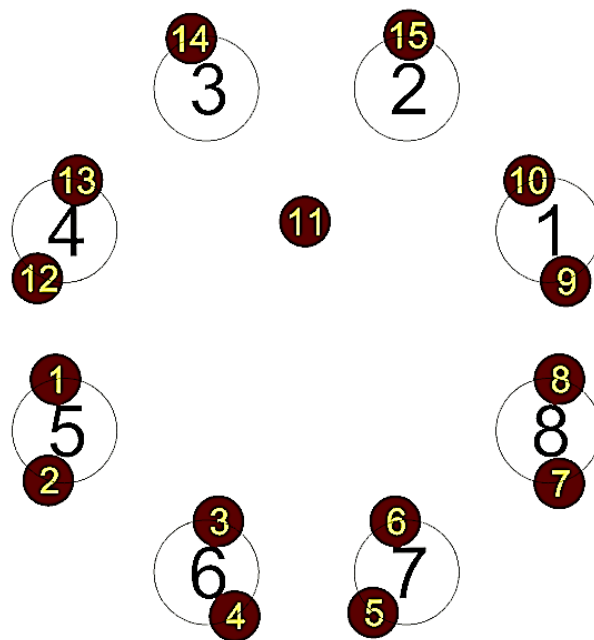
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 591 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 154: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.01 m
2	0.74 m
3	0.87 m
4	1.14 m
5	1.14 m
6	0.87 m
7	0.74 m
8	1.10 m
9	0.79 m
10	1.15 m
11	1.06 m
12	0.79 m
13	1.15 m
14	0.87 m
15	0.87 m

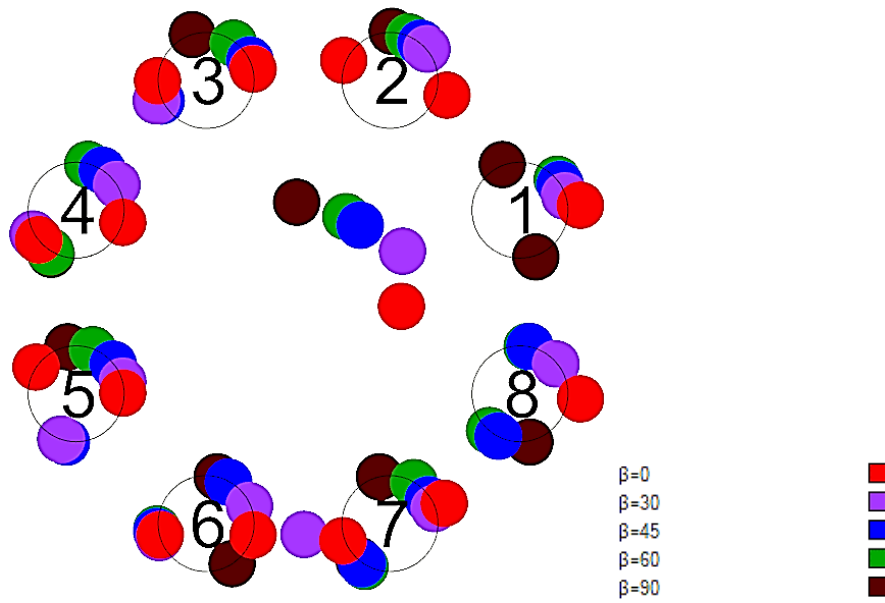


Εικόνα 590: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

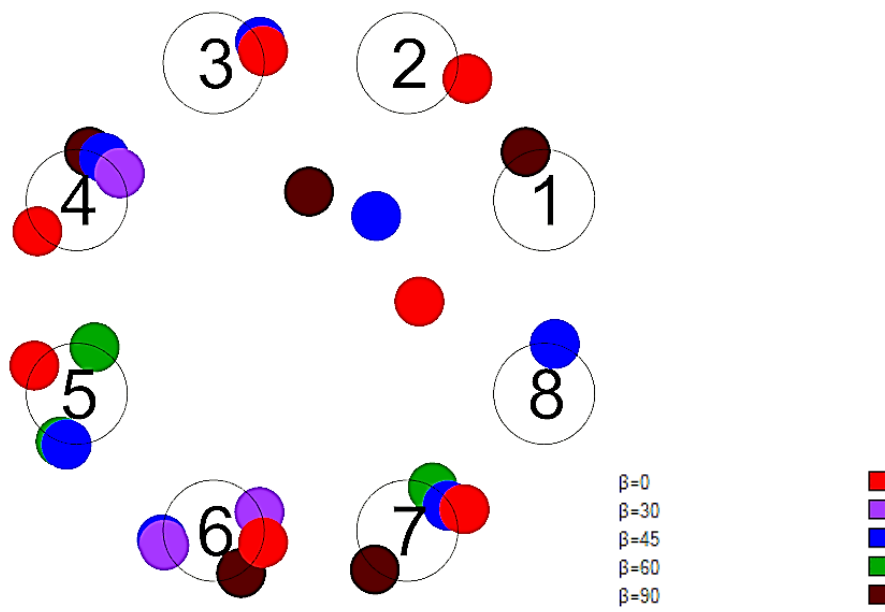


Εικόνα 591: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

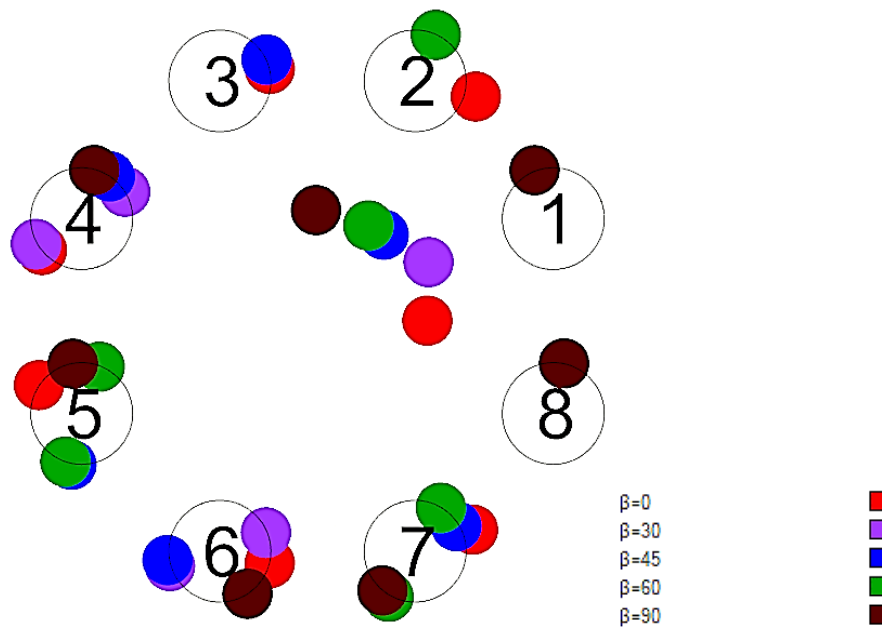
Στην Εικόνα 592 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 593 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 593 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 4, 5, 6 και 7. Ενώ, παρατηρούνται μεγάλες κορυφές και στους υπόλοιπους κυλίνδρους της διάταξης, αυτοί περιορίζονται ως προς τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Καθώς, η Εικόνα 593 αποτελεί έναν οδηγό, στην Εικόνα 594 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 594 είναι εμφανές για ποιον λόγο μπορούν να εγκατασταθούν μόνο τέσσερις συσκευές.



Εικόνα 592: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



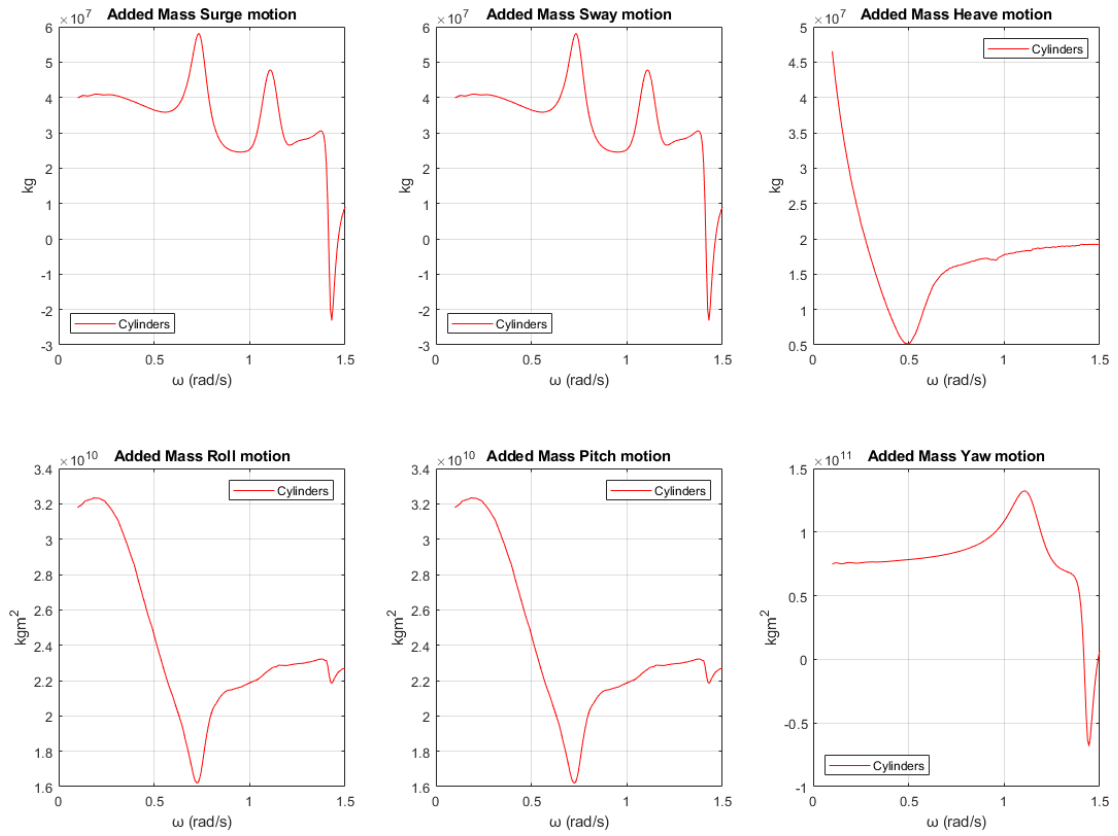
Εικόνα 593: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



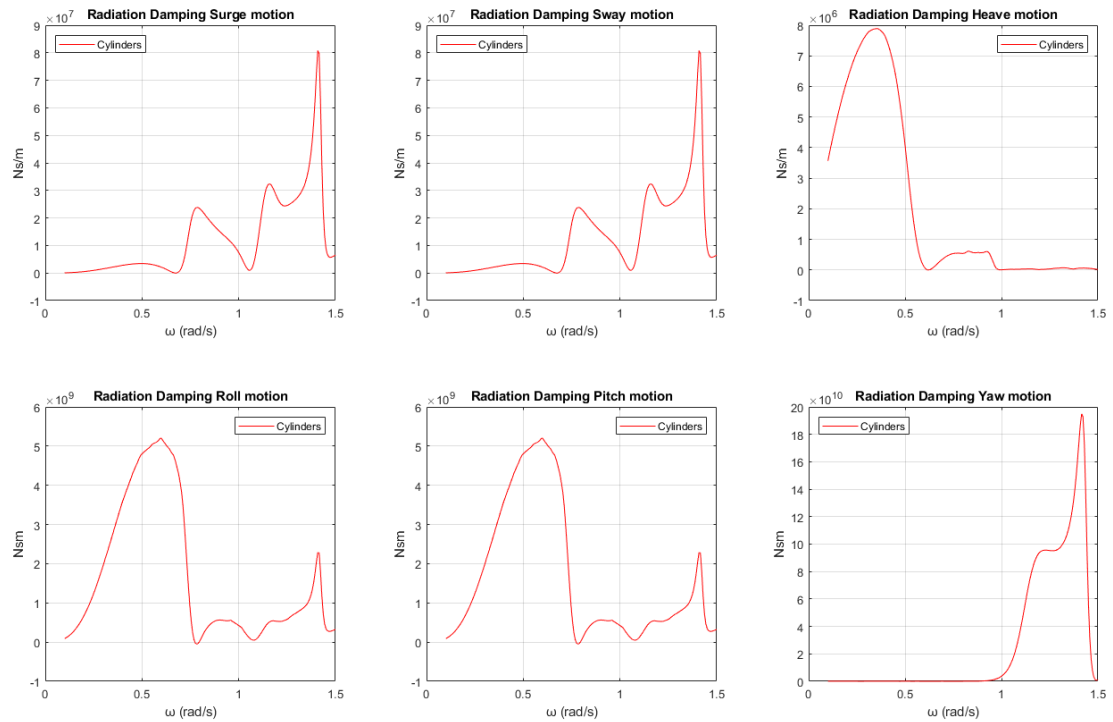
Εικόνα 594: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.8.3.2 Η διάταξη ταλαντώνεται ελεύθερα – radiation problem

Όπως και προηγουμένως, θα μελετήσουμε τη διάταξη των οκτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων θεωρώντας ότι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.8.1, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 580, δεν μεταβάλλονται λόγω των κινήσεων του σώματος. Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας της διάταξης φαίνονται στην Εικόνα 595 και αντίστοιχα στην Εικόνα 596 παρουσιάζονται οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης.

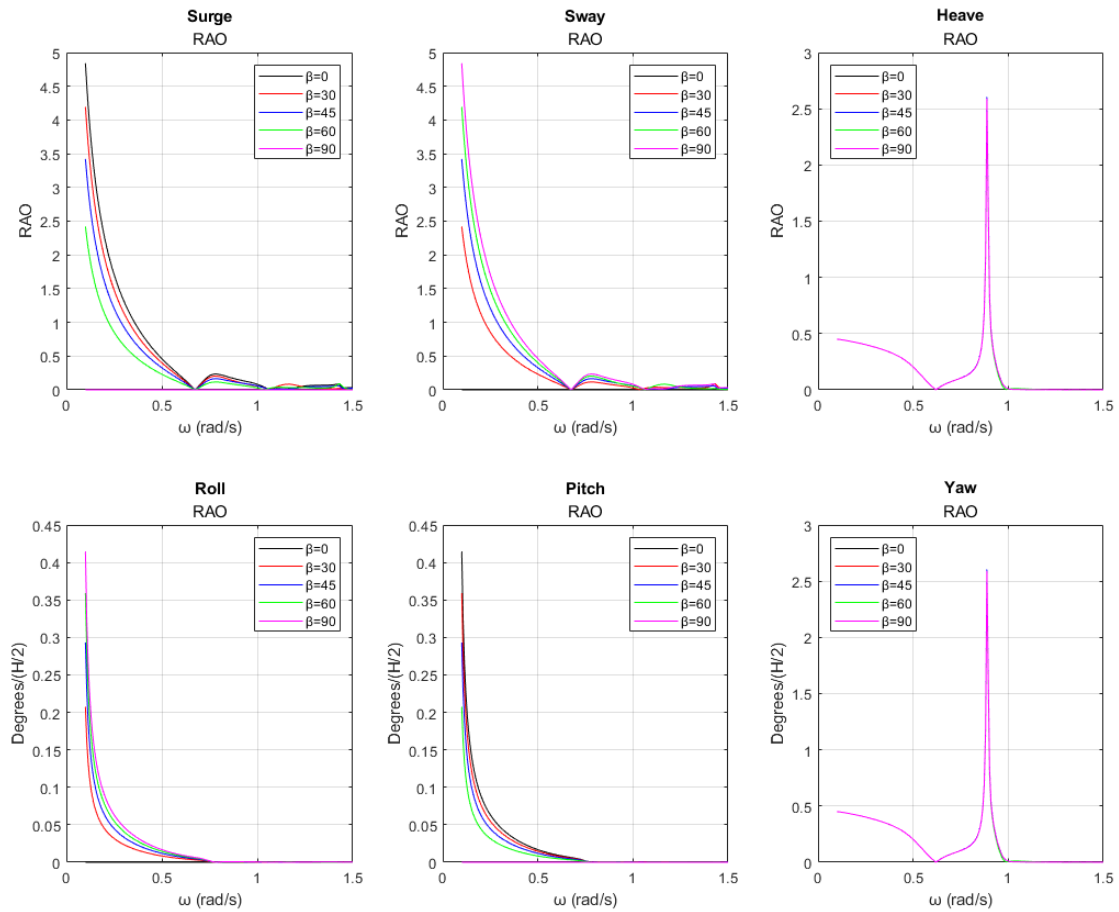


Εικόνα 595: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ της διάταξης

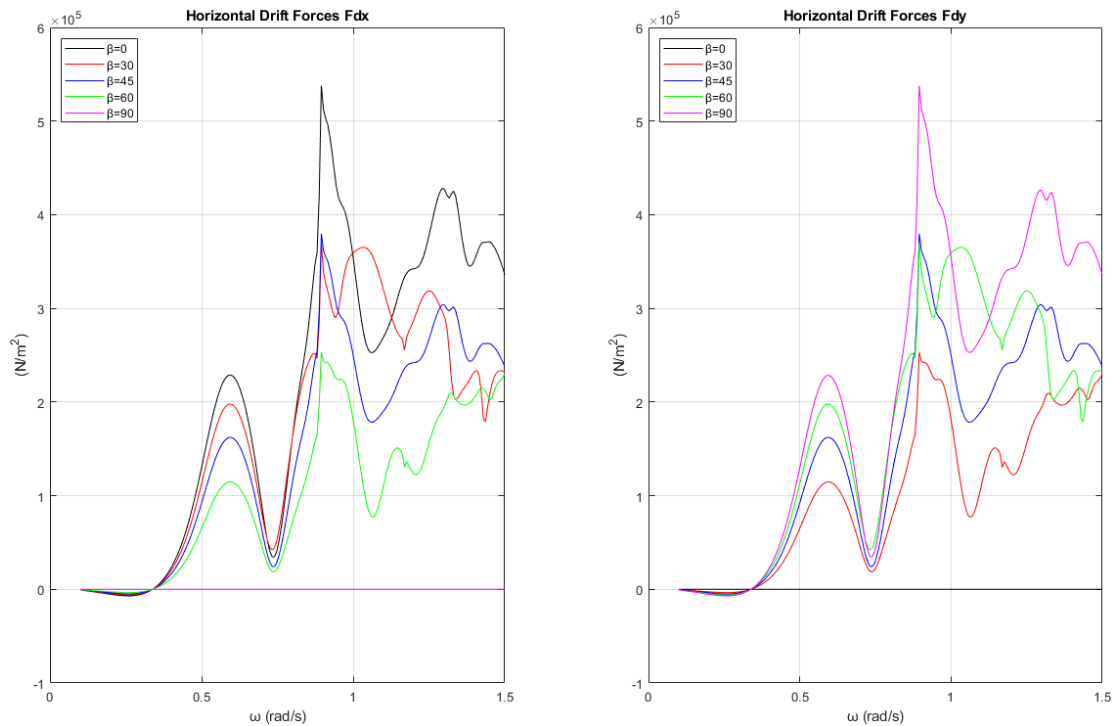


Εικόνα 596: Συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ της διάταξης

Οι κινήσεις της διάταξης των οκτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα ως προς του 6 βαθμούς ελευθερίας φαίνονται στην Εικόνα 597. Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη, λόγω των κινήσεων της, φαίνονται στην Εικόνα 598.



Εικόνα 597: Κινήσεις της διάταξης ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης



Εικόνα 598: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Όταν η διάταξη των οχτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα κινείται τότε μεταβάλλεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Επομένως προκειμένου να ελέγξουμε με ποιον τρόπο αυτό μεταβάλλεται θα το αναπαραστήσουμε για κάθε γωνία πρόσπτωσης στη συχνότητα που ικανοποιείται η συνθήκη Neumann και ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις. Στον Πίνακα 155 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιείται η συνθήκη και σε ποια δύναμη διέγερσης παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις.

Πίνακας 155: Συχνότητες που ικανοποιούν τη συνθήκη Neumann και ως προς ποια δύναμη διέγερσης παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις

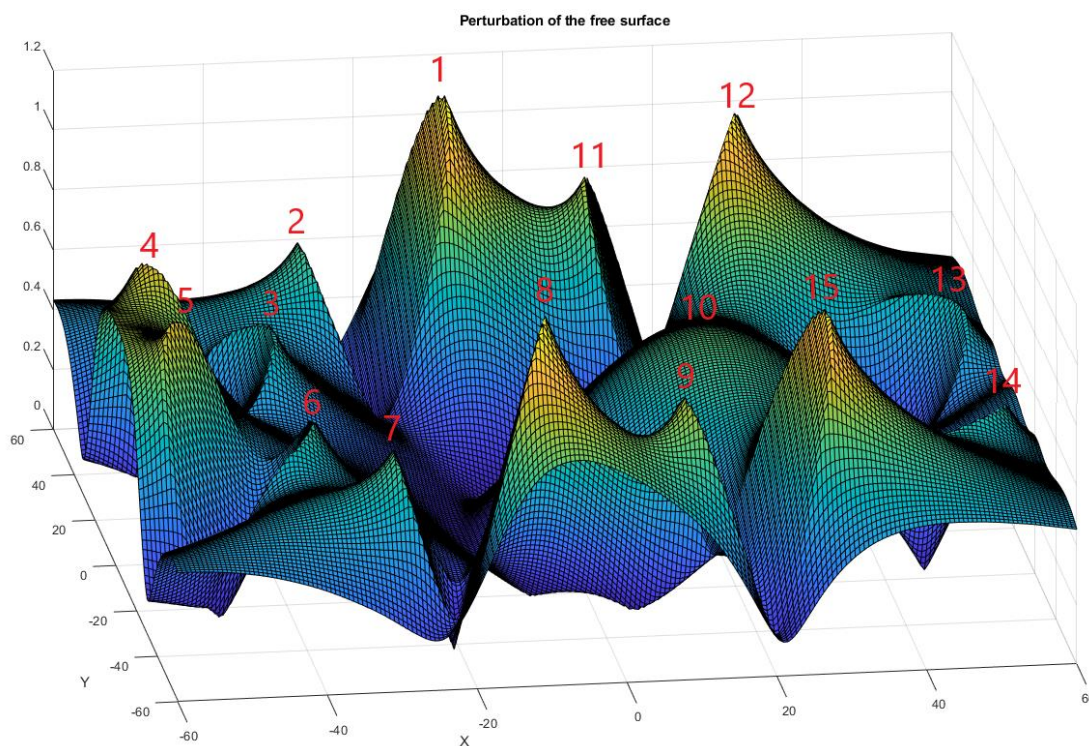
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 0.78$	F_x	NAI
$\beta = 30^\circ$	$\cong 0.78$	F_x	NAI
$\beta = 45^\circ$	$\cong 0.78$	F_x και F_y	NAI
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.78$	F_y	NAI
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.78$	F_y	NAI

Στην Εικόνα 599 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 156

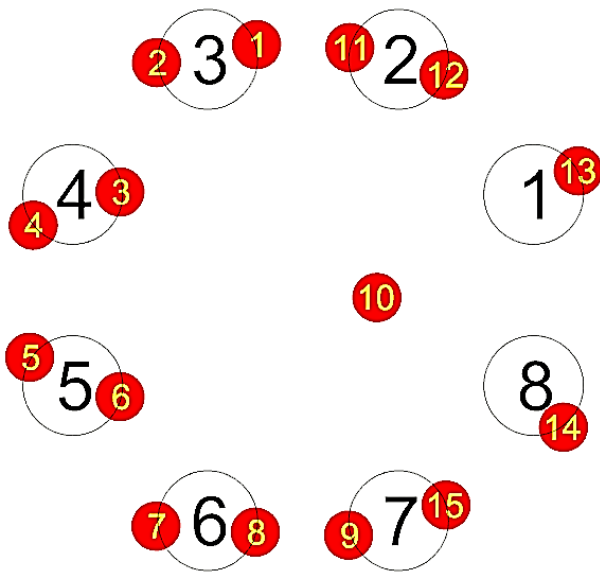
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 600 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 156: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.15 m
2	0.70 m
3	0.62 m
4	0.90 m
5	0.90 m
6	0.62 m
7	0.70 m
8	1.15 m
9	0.86 m
10	0.68 m
11	0.86 m
12	1.09 m
13	0.59 m
14	0.59 m
15	1.09 m



Εικόνα 599: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

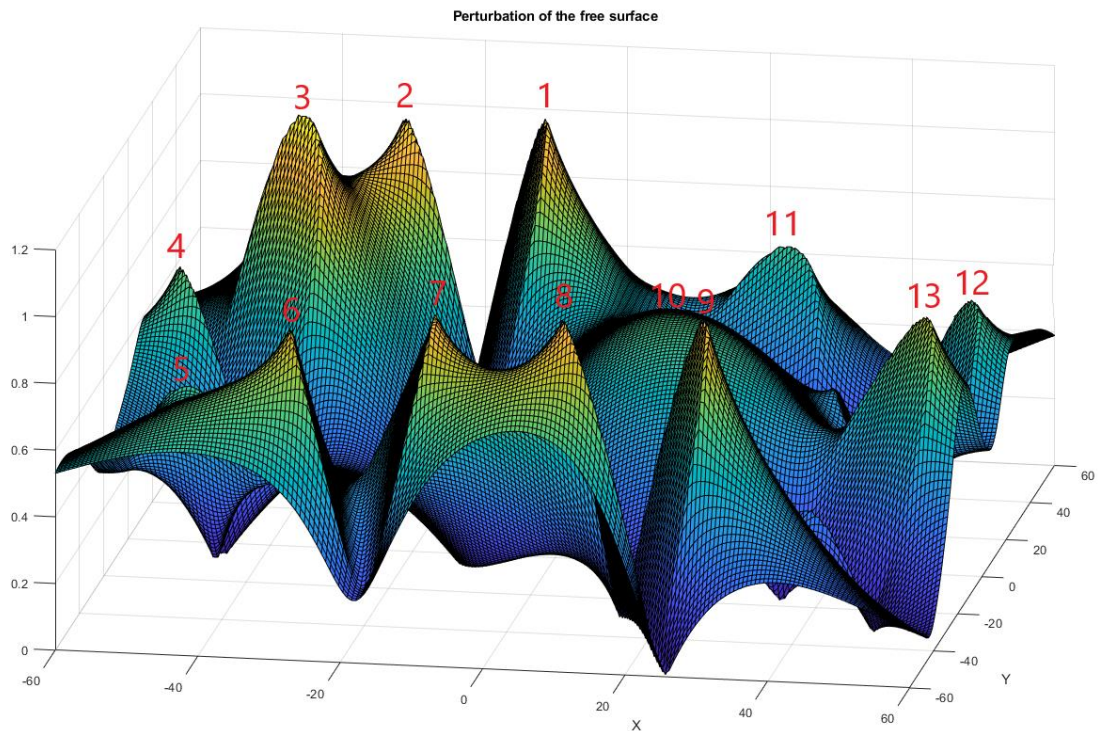


Εικόνα 600: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

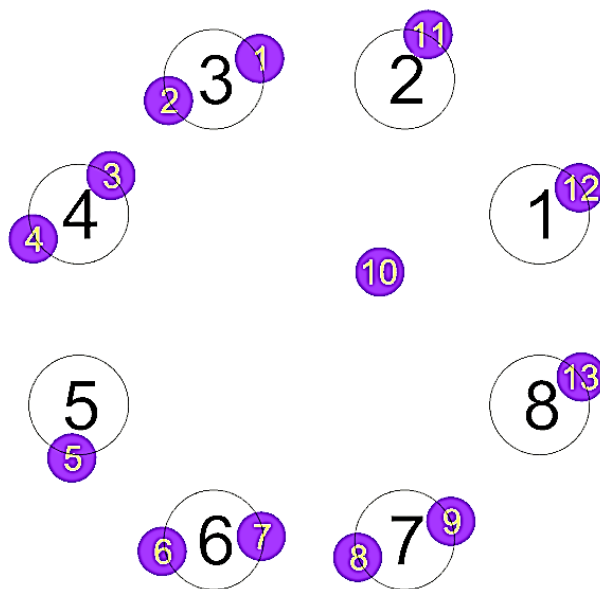
Στην Εικόνα 601 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 157 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 602 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 157: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.03 m
2	1.06 m
3	1.14 m
4	0.73 m
5	0.62 m
6	0.91 m
7	0.96 m
8	0.99 m
9	0.96 m
10	0.68 m
11	0.65 m
12	0.69 m
13	0.85 m



Εικόνα 601: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



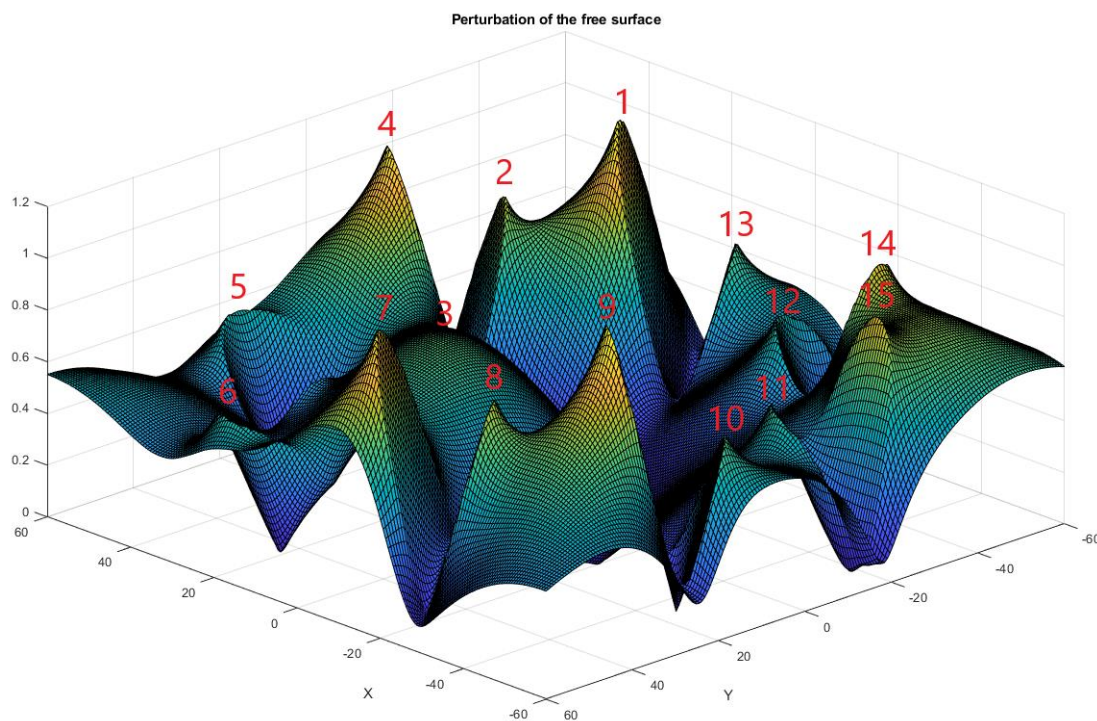
Εικόνα 602: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 603 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 158 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 604 φαίνονται οι

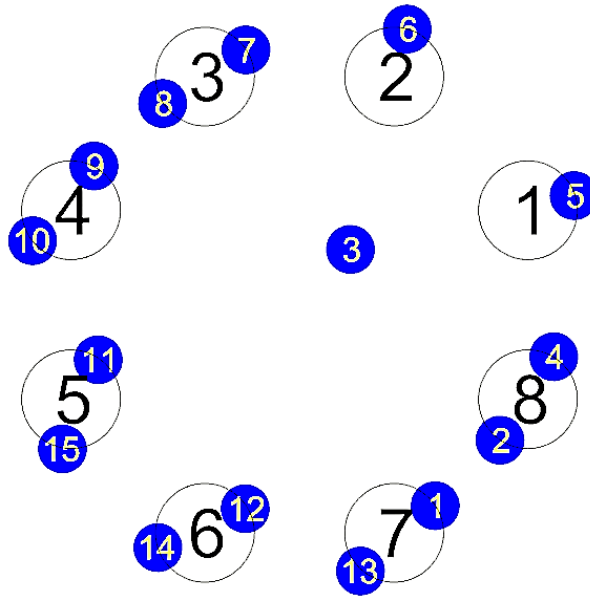
θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 158: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.15 m
2	0.86 m
3	0.69 m
4	1.08 m
5	0.59 m
6	0.59 m
7	1.08 m
8	0.86 m
9	1.15 m
10	0.69 m
11	0.61 m
12	0.61 m
13	0.69 m
14	0.89 m
15	0.89 m



Εικόνα 603: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

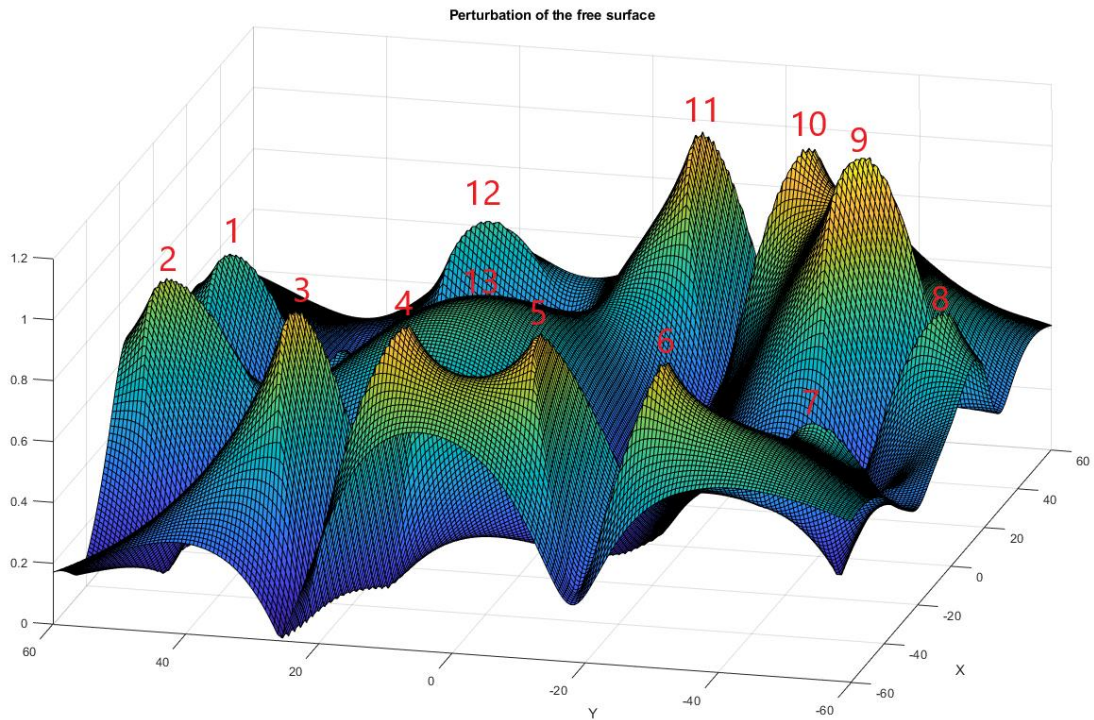


Εικόνα 604: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

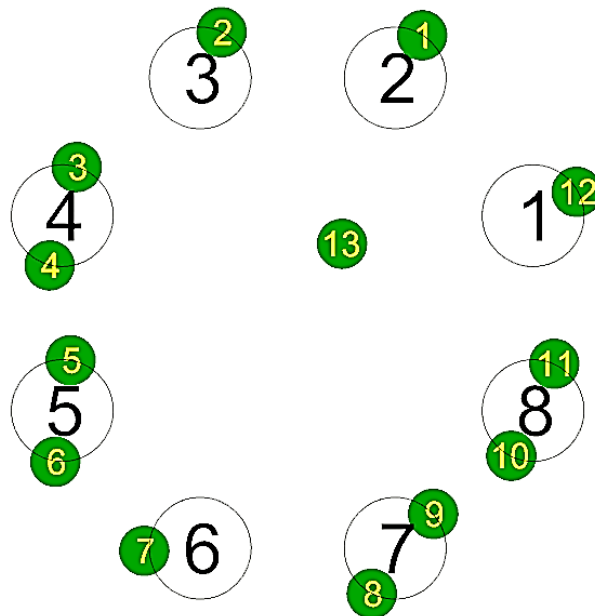
Στην Εικόνα 605 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 159 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 606 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στην διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 159: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.69 m
2	0.85 m
3	0.97 m
4	0.99 m
5	0.96 m
6	0.92 m
7	0.62 m
8	0.74 m
9	1.14 m
10	1.06 m
11	1.03 m
12	0.65 m
13	0.68 m



Εικόνα 605: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



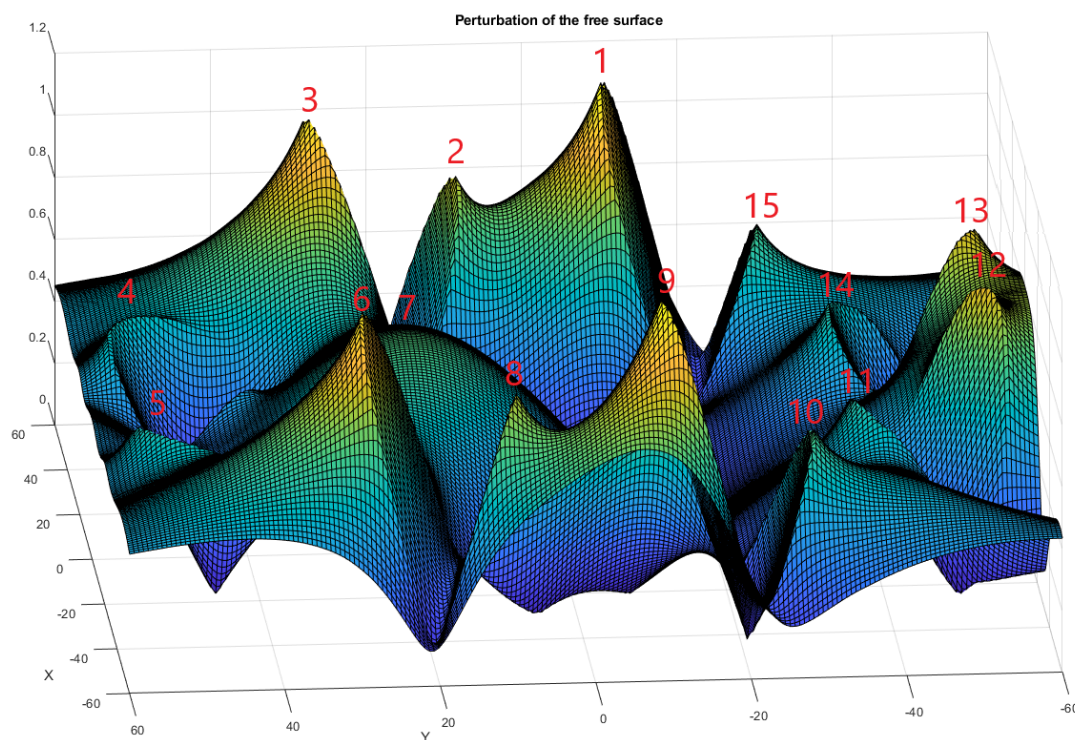
Εικόνα 606: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 607 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 160

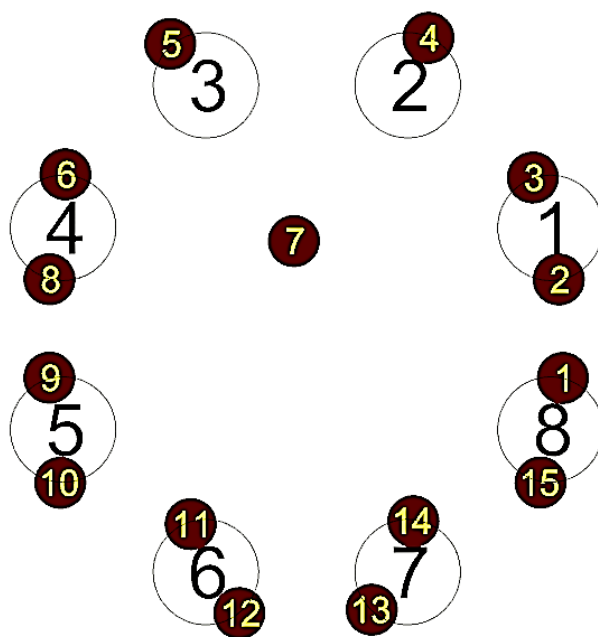
φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 608 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 160: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.15 m
2	0.86 m
3	1.10 m
4	0.59 m
5	0.59 m
6	1.10 m
7	0.69 m
8	0.86 m
9	1.15 m
10	0.69 m
11	0.60 m
12	0.90 m
13	0.90 m
14	0.60 m
15	0.69 m

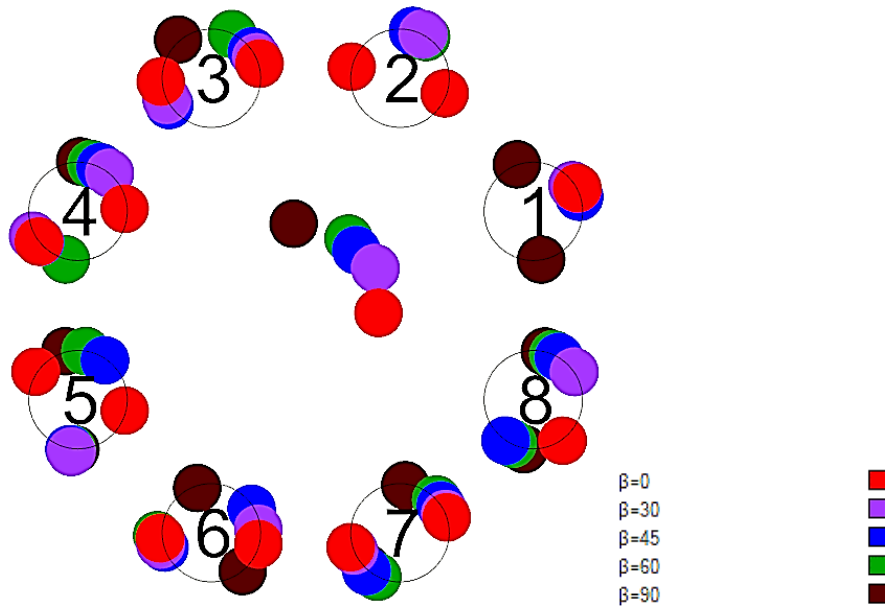


Εικόνα 607: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

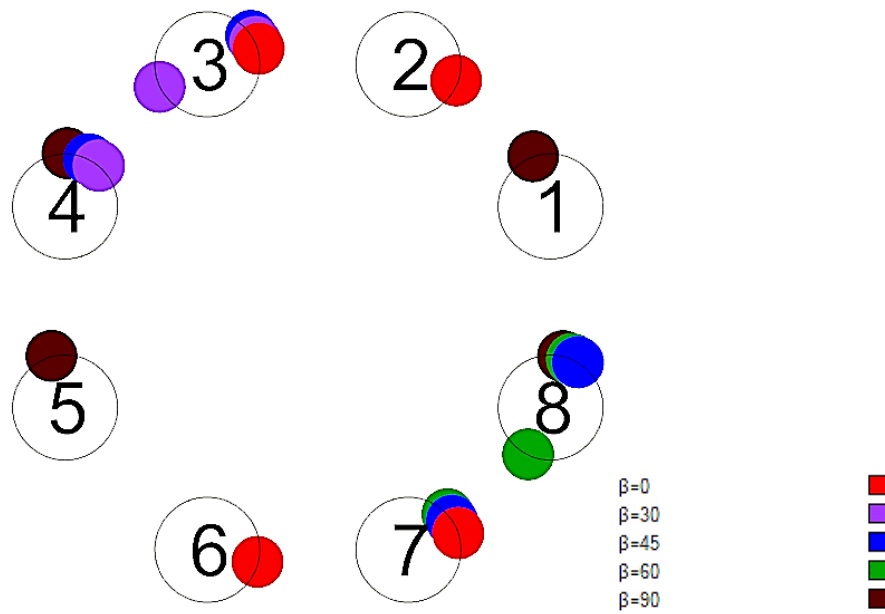


Εικόνα 608: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

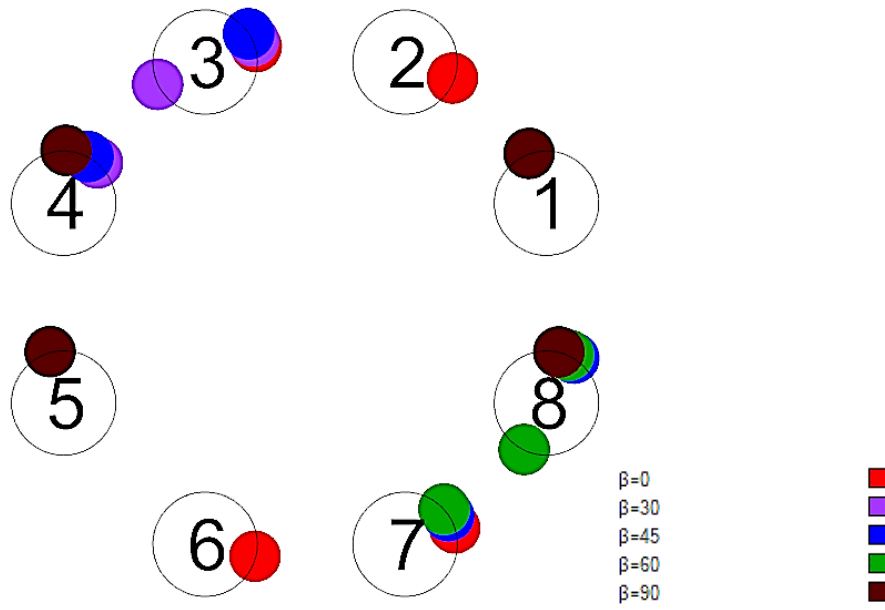
Στην Εικόνα 609 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 610 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Στην Εικόνα 611 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 611 παρατηρούμε πως μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 3, 4, 7 και 8 καθώς όχι μόνο παρατηρούνται μεγάλες κορυφές αλλά προσφέρουν και ευελιξία ως προς τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.



Εικόνα 609: Θέσεις όλων των κορυφών στη διάταξη για τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν

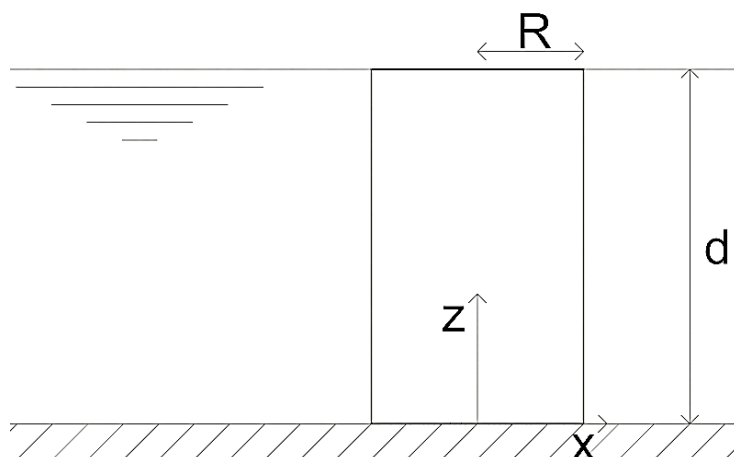


Εικόνα 610: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



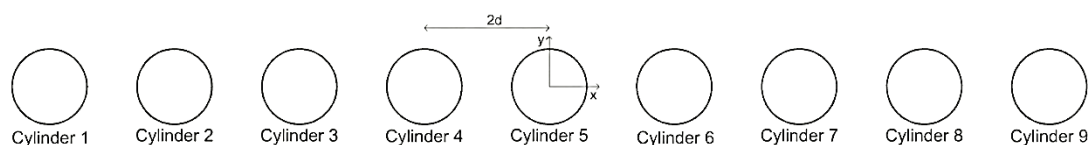
Εικόνα 611: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

3.9 Εννιά κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι



Εικόνα 612: Σκαρίφημα πακτωμένου μεσαίου κυλίνδρου

Θεωρούμε εννέα σε σειρά κατακόρυφους πακτωμένους κυλίνδρους ακτίνας R σε βάθος περιοχής εγκατάστασης d , όπως φαίνεται στην Εικόνα 612 για τον μεσαίο κύλινδρο.



Εικόνα 613: Κάτοψη της διάταξης

Οι κύλινδροι ισαπέχουν μεταξύ τους κατά $2d$ ως προς το επίπεδο xy , όπως φαίνεται στην Εικόνα 613. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων εκφράζονται σύμφωνα με τον ακόλουθο λόγο:

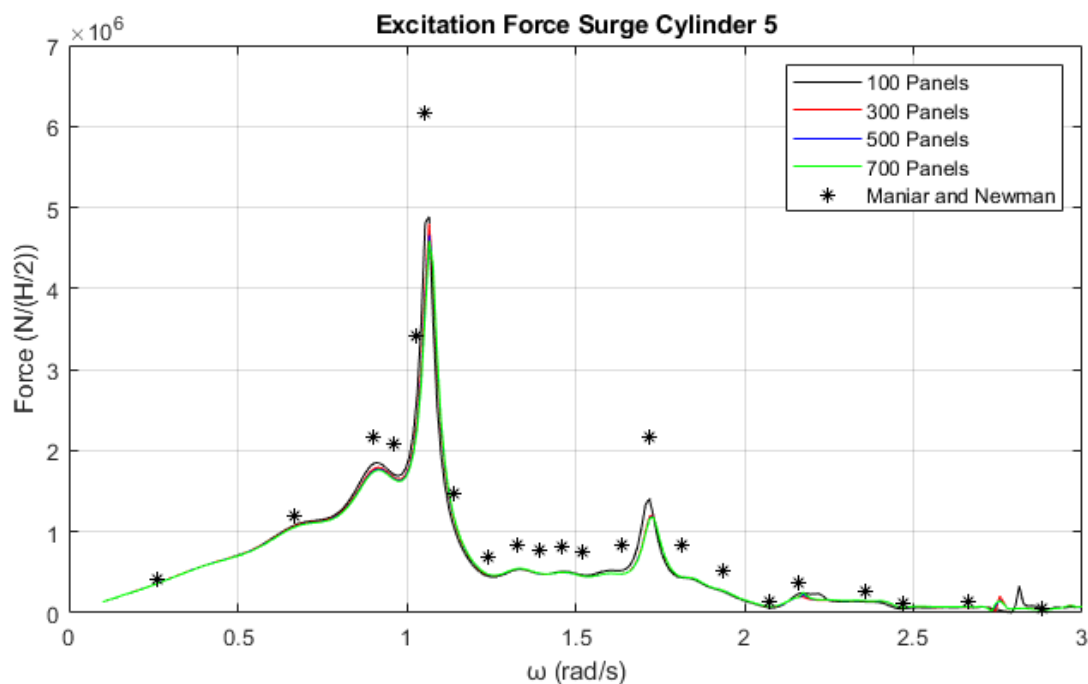
$$\frac{d}{R} = 2$$

Η διακριτοποίηση που θα κάνουμε είναι ίδια με αυτή που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.1. Οι κύλινδροι έχουν ακτίνα ίση με $R = 5m$ σε βάθος περιοχής εγκατάστασης $d = 10m$ και τα κέντρα τους ισαπέχουν $2d = 20m$. Οι συντεταγμένες που έχει το κέντρο του κάθε κυλίνδρου ως προς το επίπεδο xy είναι:

- Κύλινδρος 1 $(-80,0)$
- Κύλινδρος 2 $(-60,0)$
- Κύλινδρος 3 $(-40,0)$
- Κύλινδρος 4 $(-20,0)$
- Κύλινδρος 5 $(0,0)$
- Κύλινδρος 6 $(20,0)$

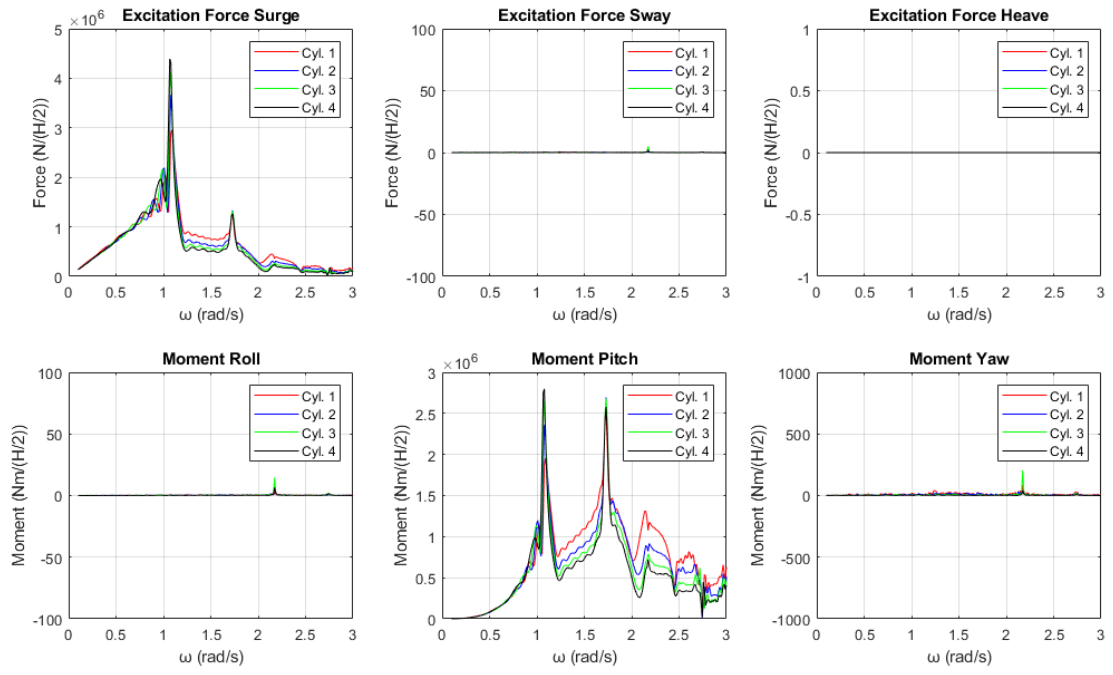
- Κύλινδρος 7 (40,0)
- Κύλινδρος 8 (60,0)
- Κύλινδρος 9 (80,0)

Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον αλλάζουν τα αποτελέσματα όταν αυξάνουμε τον αριθμό των στοιχείων, θα μελετήσουμε τη διάταξη των εννιά σε σειρά κυλίνδρων για 100, 300, 500 και 700 στοιχεία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα συγκριθούν με αυτά των Maniar και Newman (1997), που κάνουν χρήση αναλυτικών λύσεων. Στην Εικόνα 614 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στον μεσαίο κύλινδρο της διάταξης, δηλαδή τον κύλινδρο 5.

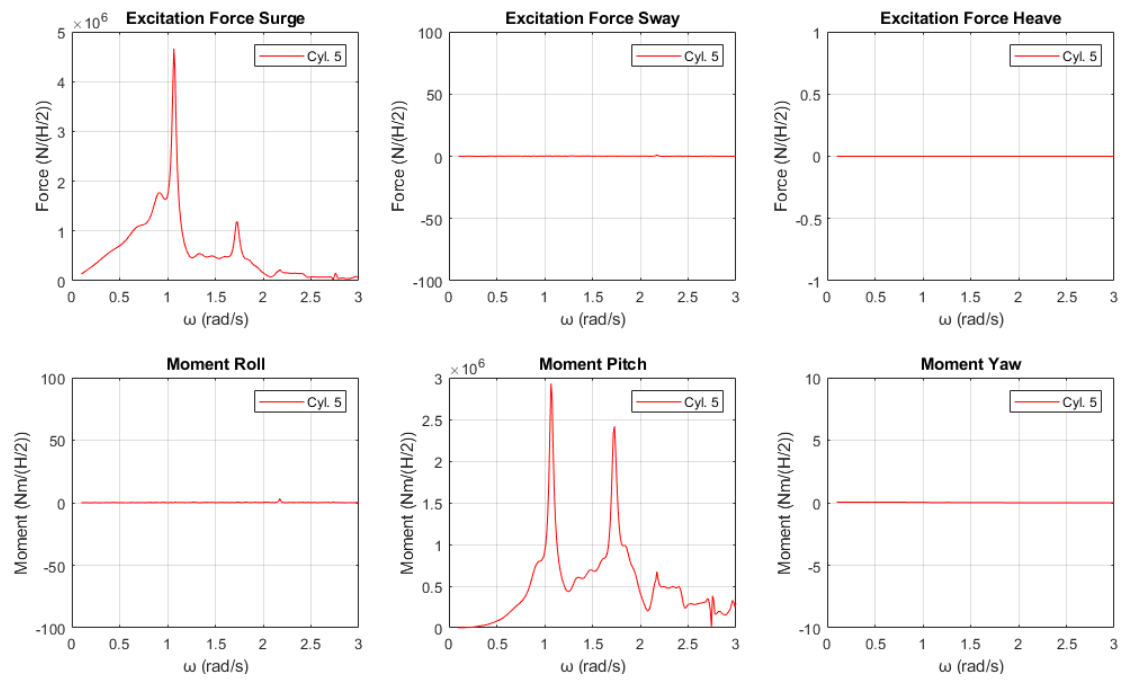


Εικόνα 614: Οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στον ενδιάμεσο κύλινδρο της διάταξης

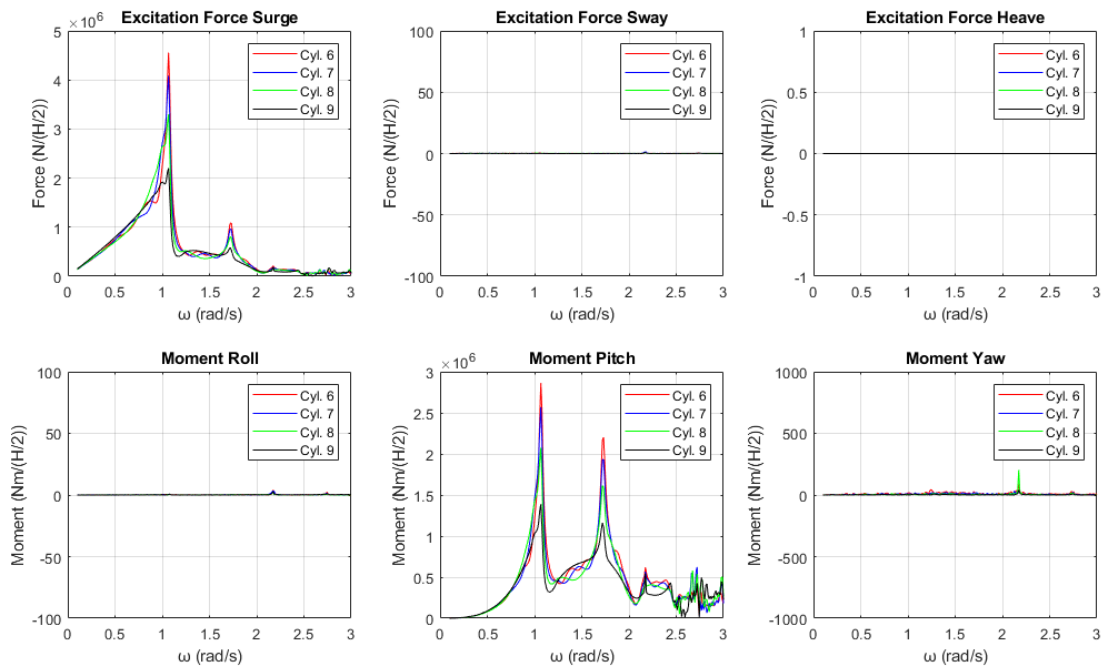
Από την Εικόνα 614 παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα του BEM NEMOH πλησιάζουν αυτά των Maniar και Newman. Όμως, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν αποκλίσεις που οφείλονται στο πλήθος των στοιχείων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη διακριτοποίησή μας, παρατηρούμε πως συγκλίνουν οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet. Όπως είδαμε στις προηγούμενες διατάξεις που μελετήθηκαν, έτσι και εδώ η διακριτοποίηση του κάθε κυλίνδρου με 500 στοιχεία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, με αυτά των 700 να έχουν ελάχιστες διαφορές. Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο φαίνονται στις Εικόνες 615-618.



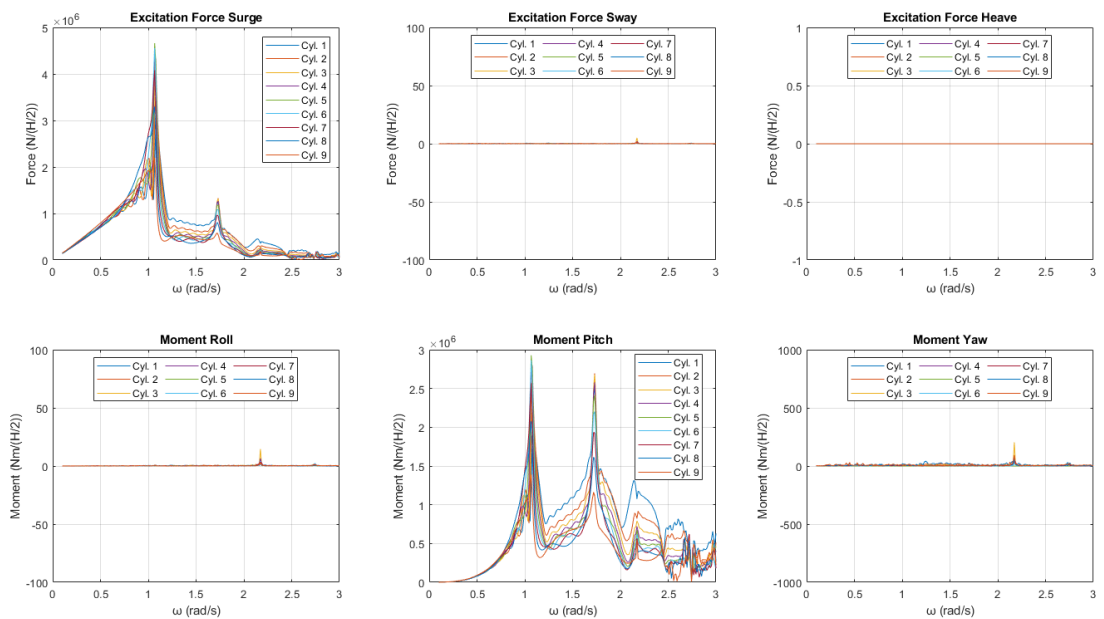
Εικόνα 615: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τους κυλίνδρους 1,2,3 και 4 της διάταξης



Εικόνα 616: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης



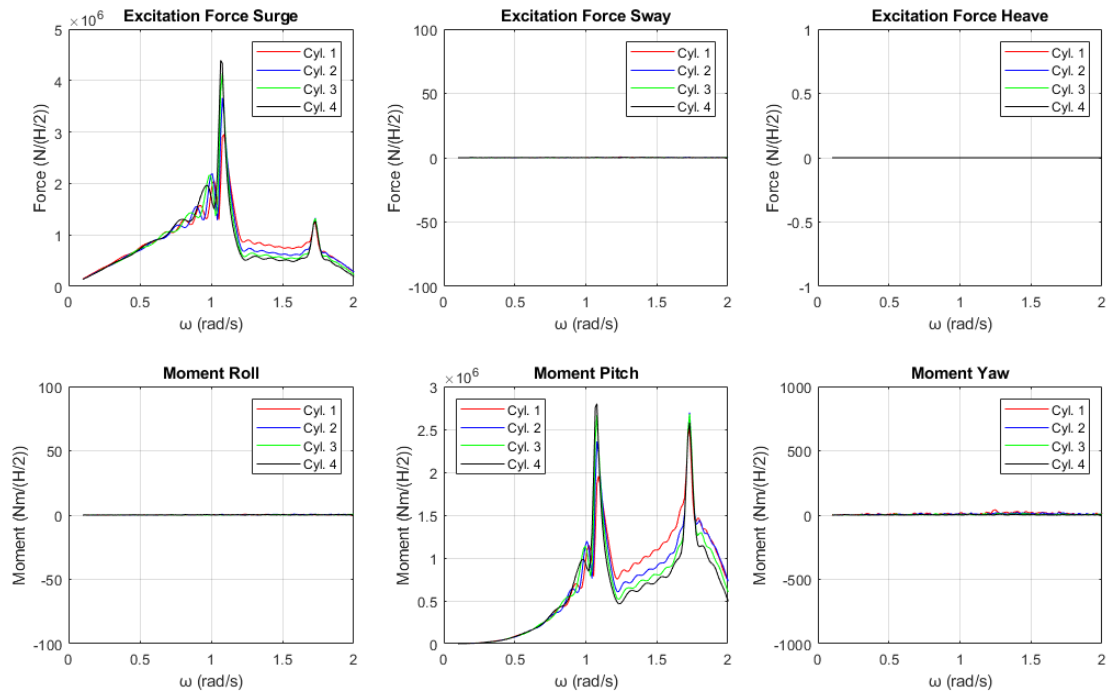
Εικόνα 617: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τους κυλίνδρους 7,8,9 και 9 της διάταξης



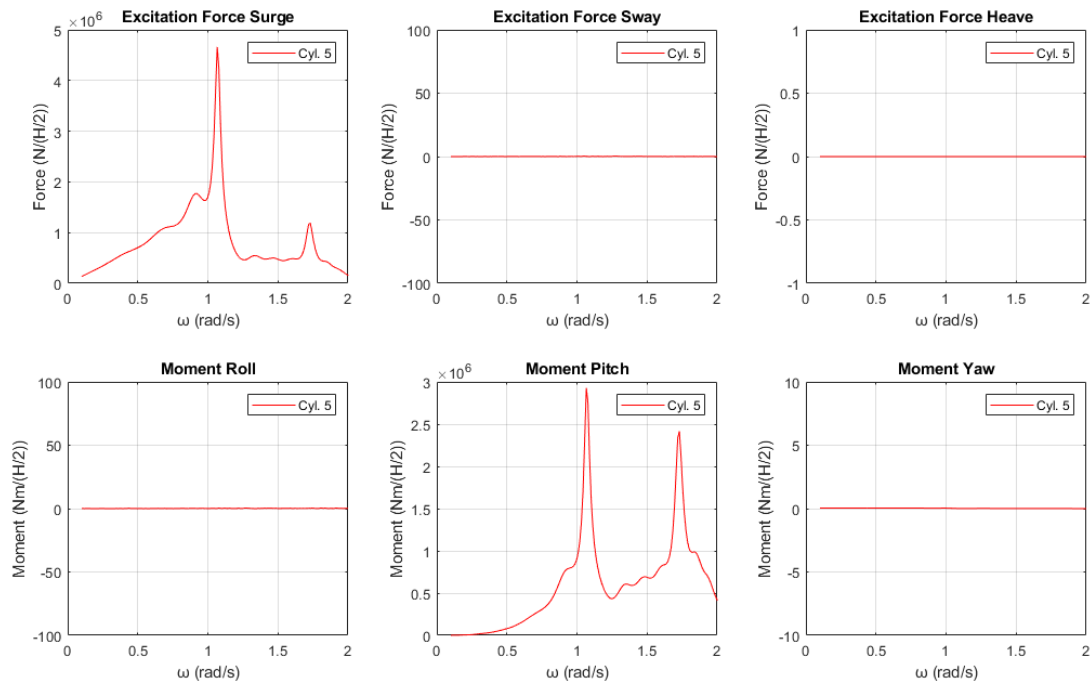
Εικόνα 618: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για όλους τους κυλίνδρους της διάταξης

Από τις Εικόνες 615-618 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Η συνθήκη Neumann ικανοποιείται στη συχνότητα $\omega \cong 1.07 \text{ r/s}$ και αντίστοιχα η συνθήκη Dirichlet στη συχνότητα $\omega \cong 1.73 \text{ r/s}$. Επιπρόσθετα από τις Εικόνες 615-618 παρατηρούμε πως μετά τη συχνότητα $\omega \cong 2.00 \text{ r/s}$ εμφανίζονται irregular frequencies, οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Για τον λόγο αυτό

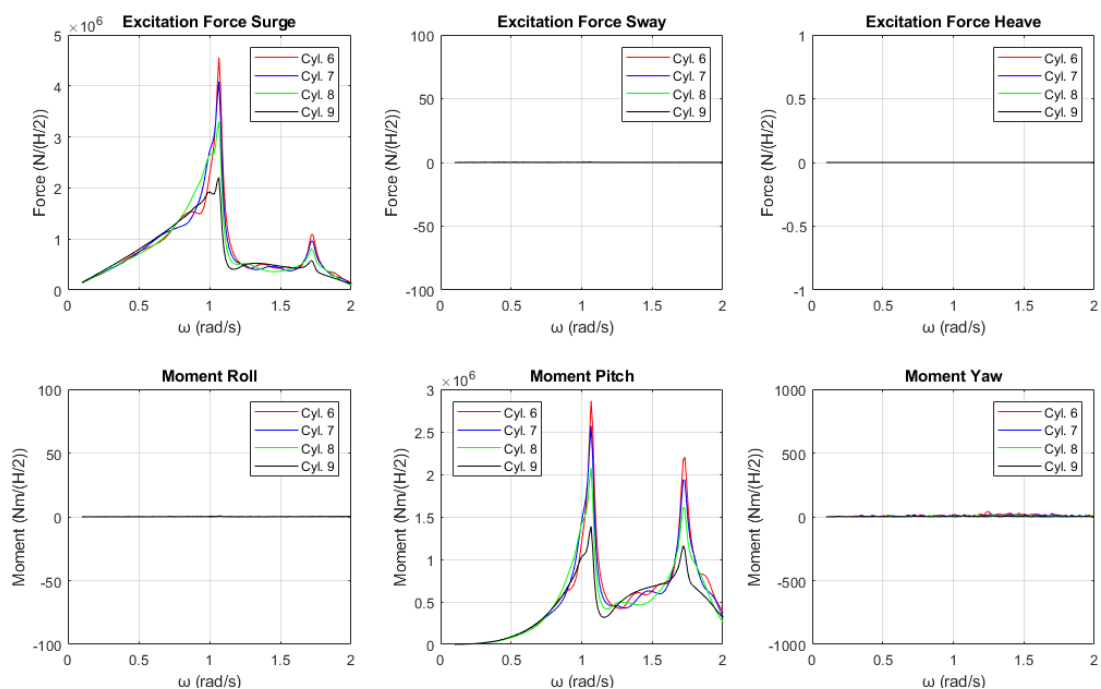
μελετάμε την διάταξη των εννιά κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων μέχρι τη συχνότητα $\omega = 2.00 \text{ r/s}$. Στις Εικόνες 619-622 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων.



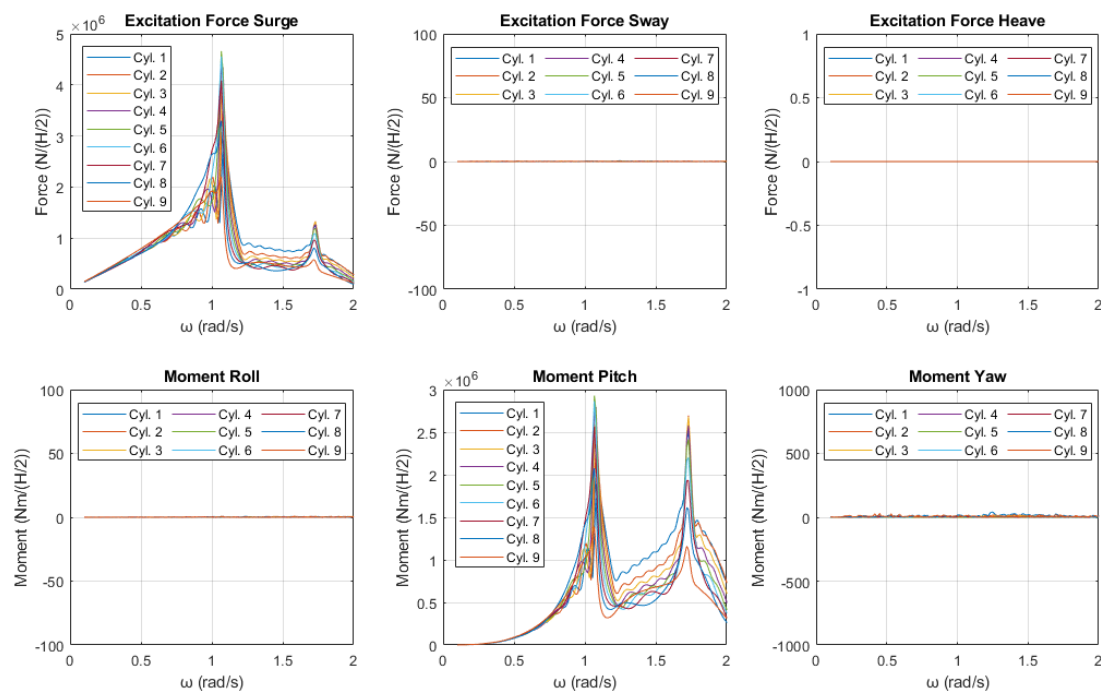
Εικόνα 619: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τους κυλίνδρους 1,2,3 και 4 της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων



Εικόνα 620: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων



Εικόνα 621: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τους κυλίνδρους 6,7,8 και 9 της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων



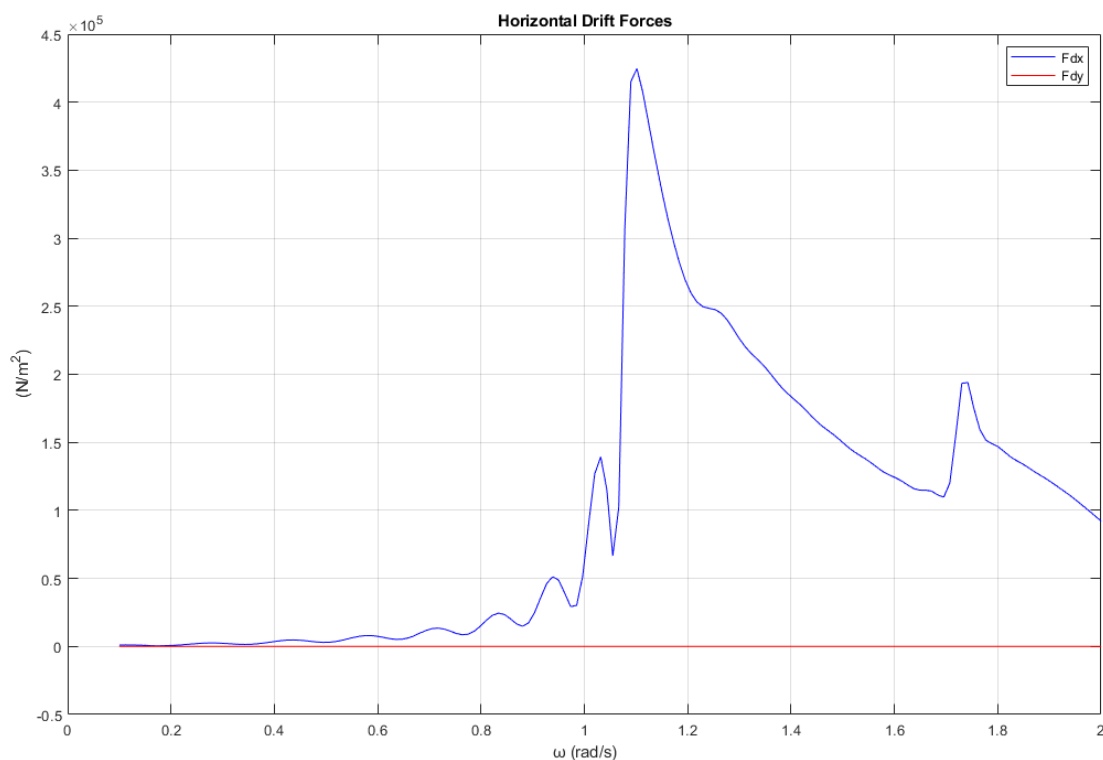
Εικόνα 622: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για όλους τους κυλίνδρους της διάταξης ως προς το νέο εύρος συχνοτήτων

Από την Εικόνα 622 παρατηρούμε πως ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους

της διάταξης, με τις συνθήκες Neumann και Dirichlet να ικανοποιούνται στις ίδιες συχνότητες. Οι φορτίσεις που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τη συνθήκη Neumann είναι ίδια για όλους τους κυλίνδρους με εξαίρεση μόνο τον κύλινδρο 5. Στον κύλινδρο αυτό ασκούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και μπορούμε να συμπεράνουμε πως όταν έχουμε μια διάταξη κυλίνδρων σε σειρά, τότε οι μεγαλύτερες φορτίσεις θα ασκούνται στον μεσαίο κύλινδρο όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι τέτοια ώστε αυτός να περνάει από τον άξονα συμμετρίας της διάταξης.

3.9.1 Μελέτη σαν ανεξάρτητα σώματα

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται συνολικά στη διάταξη, οι οποίες είναι ίδιες με αυτές λόγω της περιθλάσης του κυματισμού, φαίνονται στην Εικόνα 623.



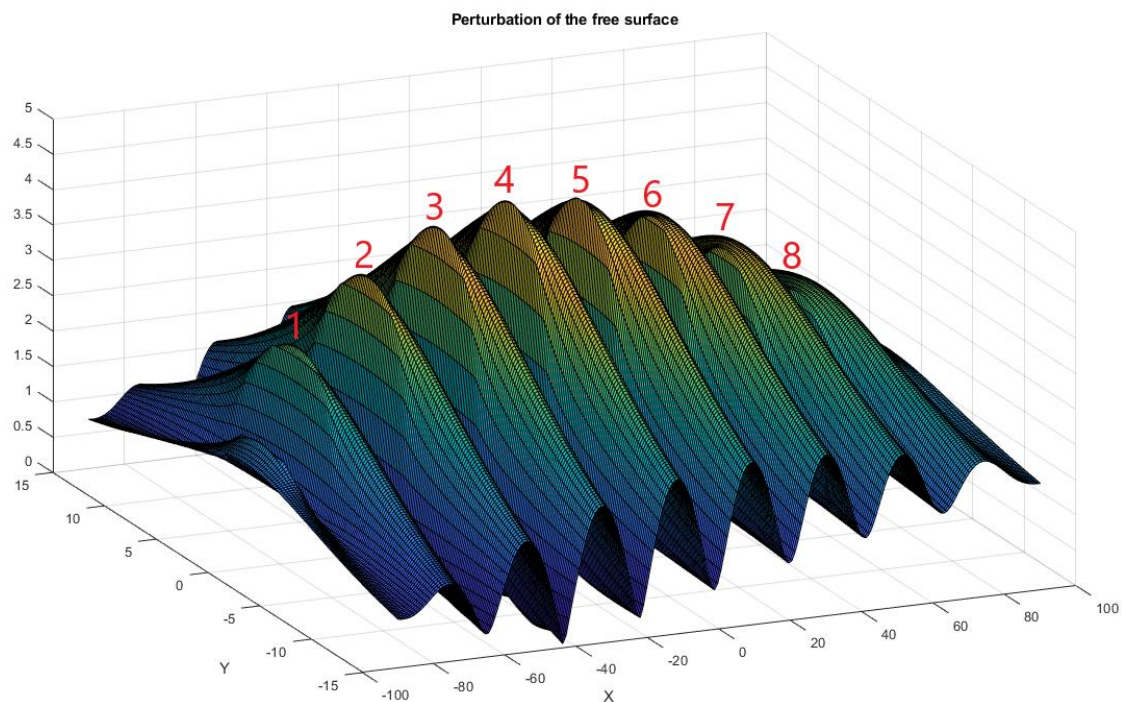
Εικόνα 623: Συνολικές μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης F_{d_x} και F_{d_y} που ασκούνται στη διάταξη

Στην Εικόνα 624 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 161 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην

Εικόνα 625 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 161: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	3.03 m
2	3.90 m
3	4.46 m
4	4.71 m
5	4.61 m
6	4.22 m
7	3.72 m
8	3.04 m

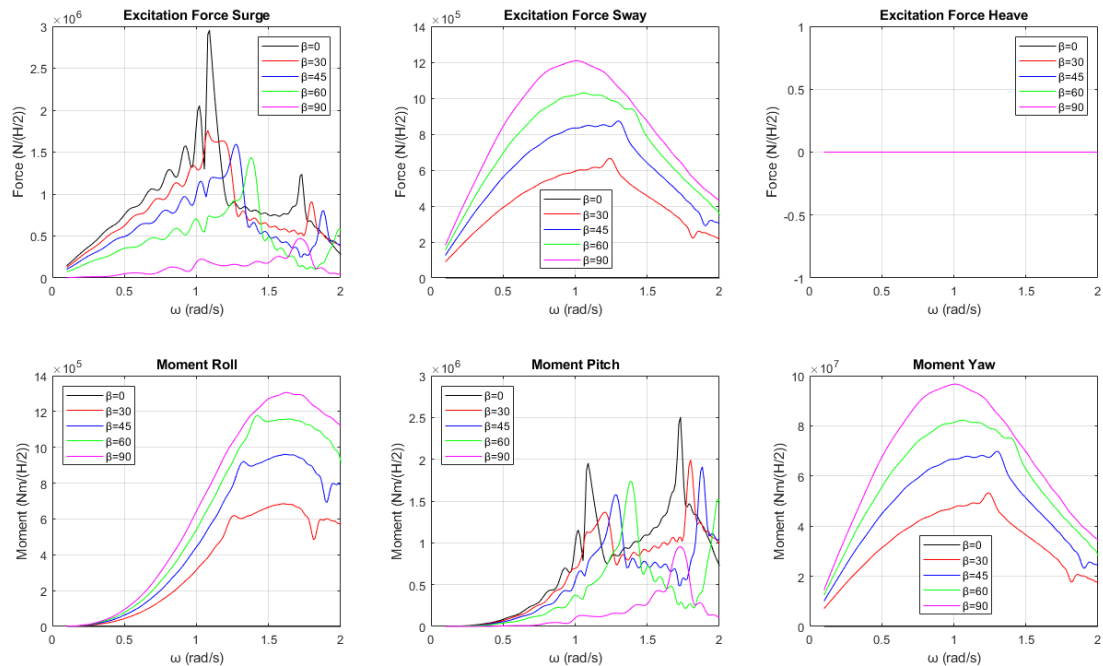


Εικόνα 624: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

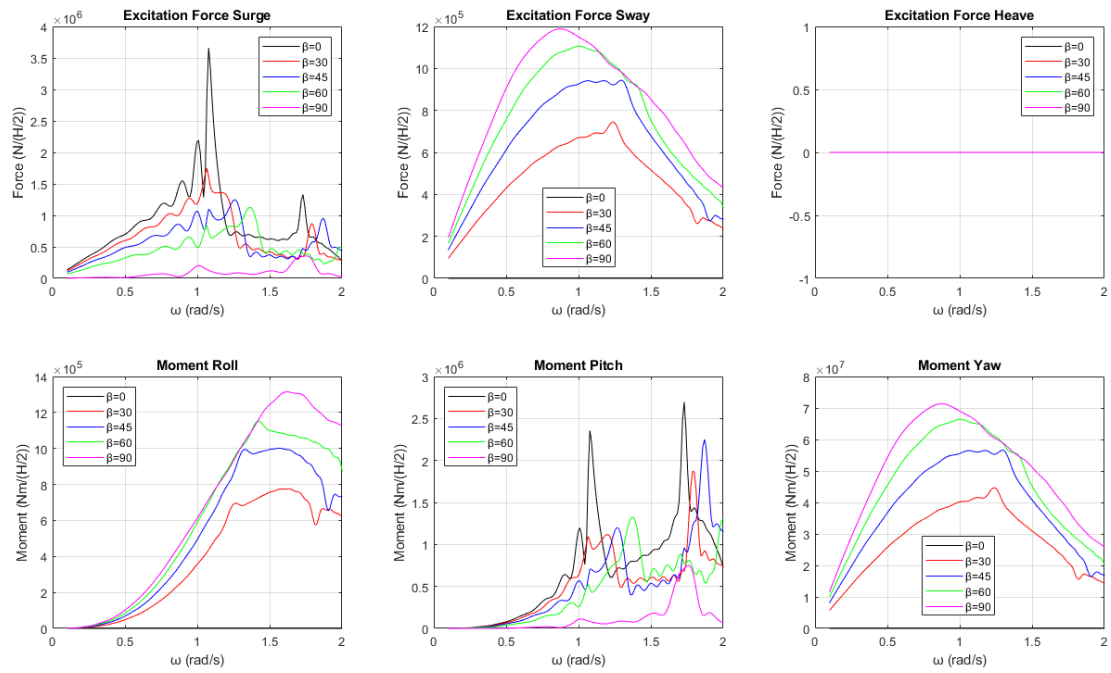


Εικόνα 625: Θέσεις των κορυφών στην διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

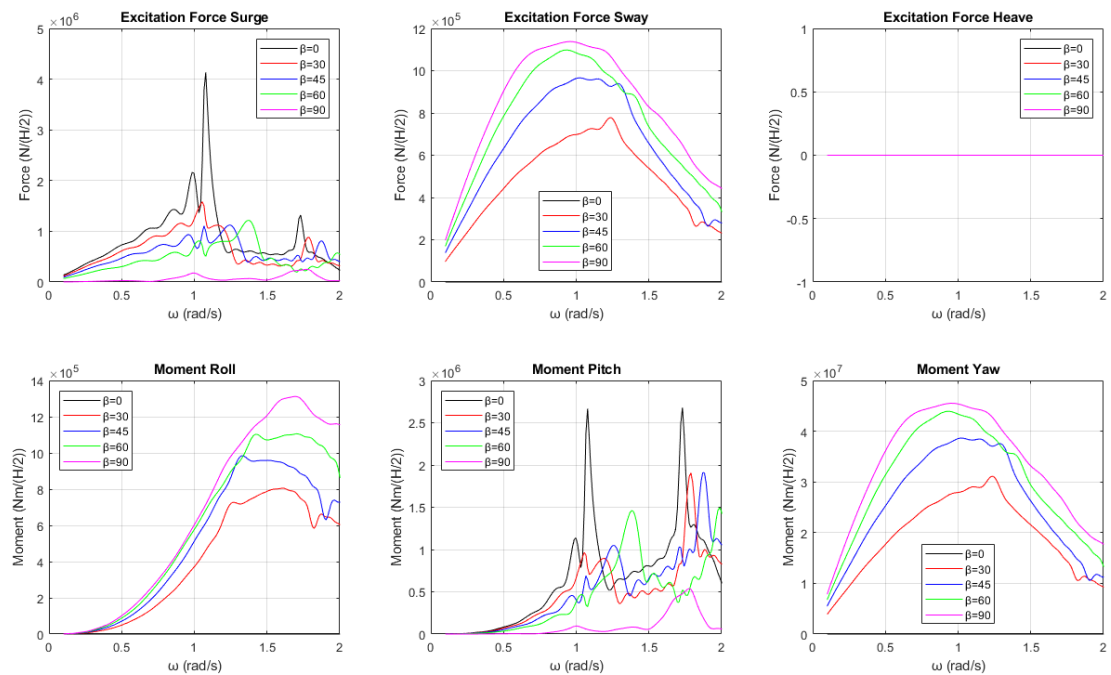
Προκειμένου να ελέγξουμε με ποιον τρόπο αλλάζουν οι συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών πρέπει να μελετήσουμε τη διάταξη και για άλλες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, όπου στην προκειμένη περίπτωση οι γωνίες είναι $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Στις Εικόνες 626-634 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού πάνω στην διάταξη.



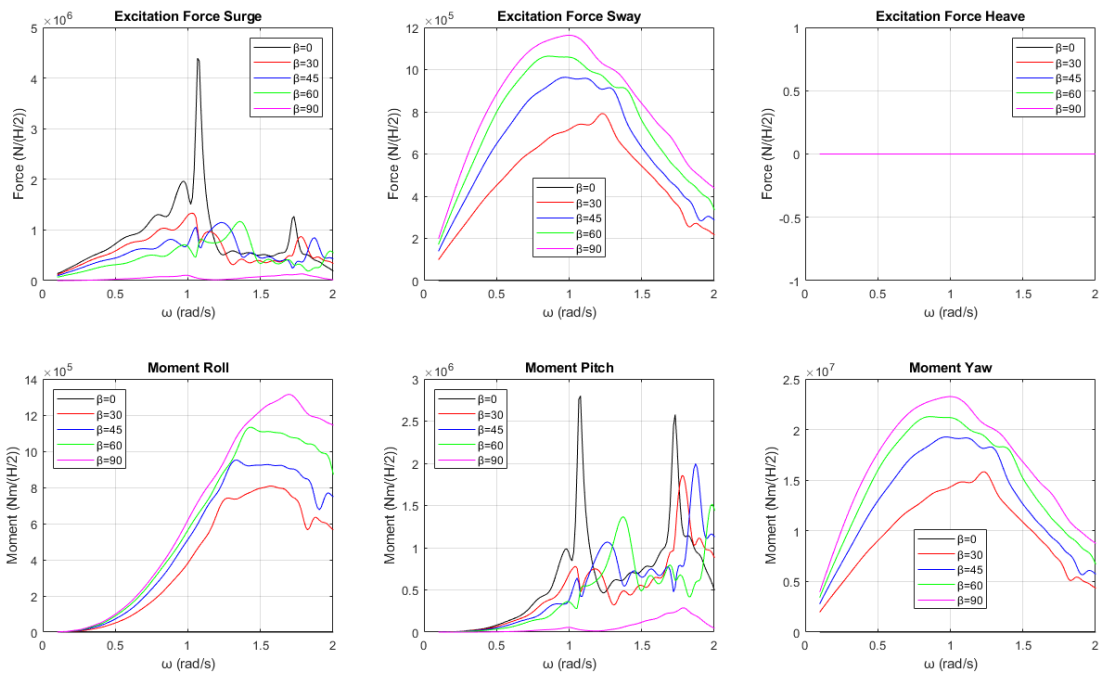
Εικόνα 626: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



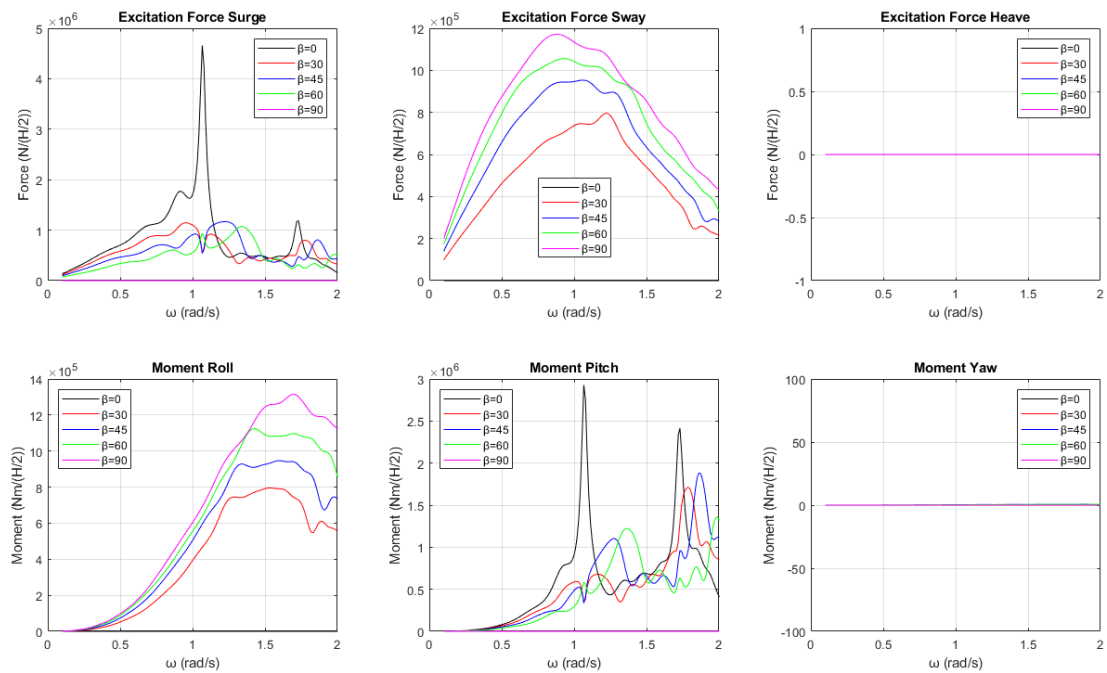
Εικόνα 627: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



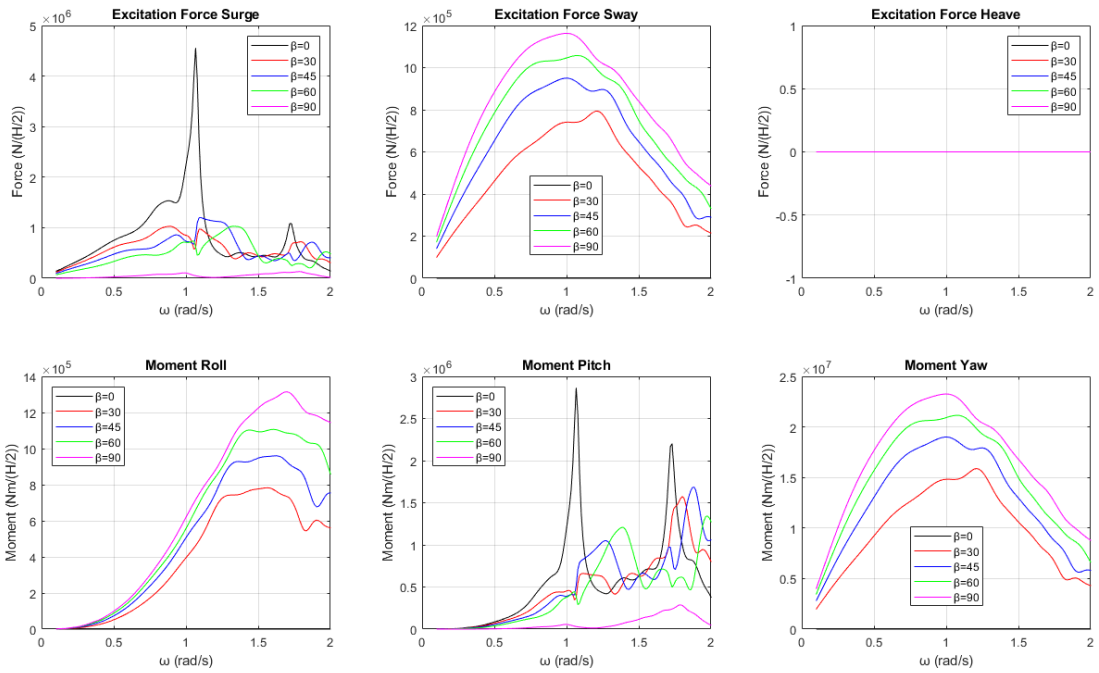
Εικόνα 628: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



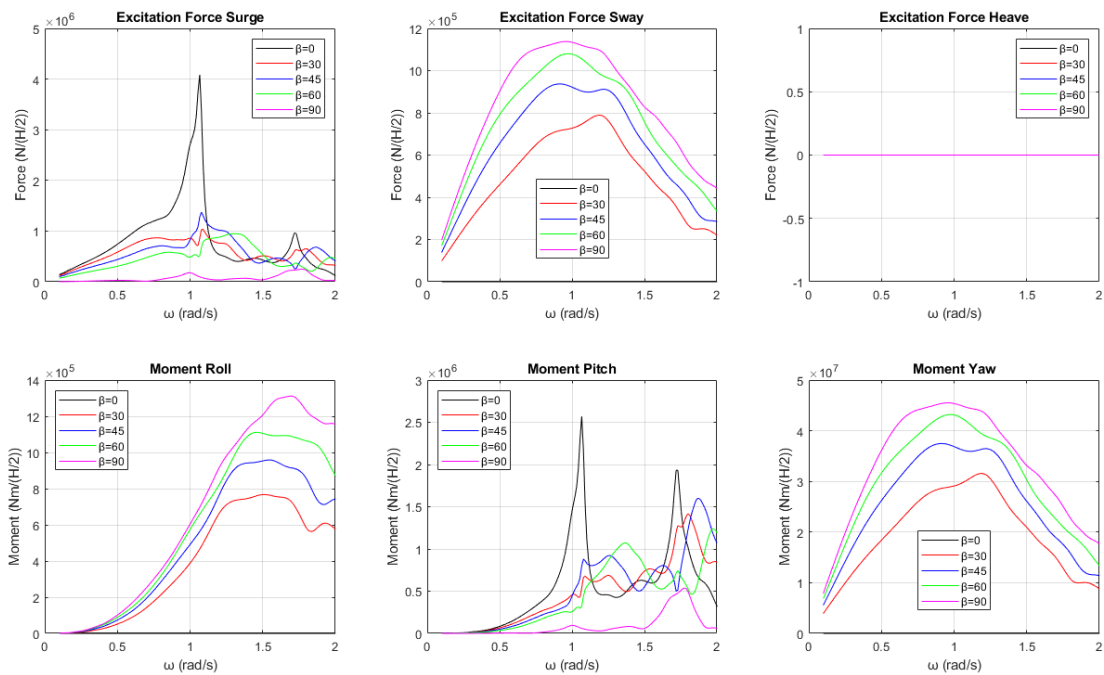
Εικόνα 629: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



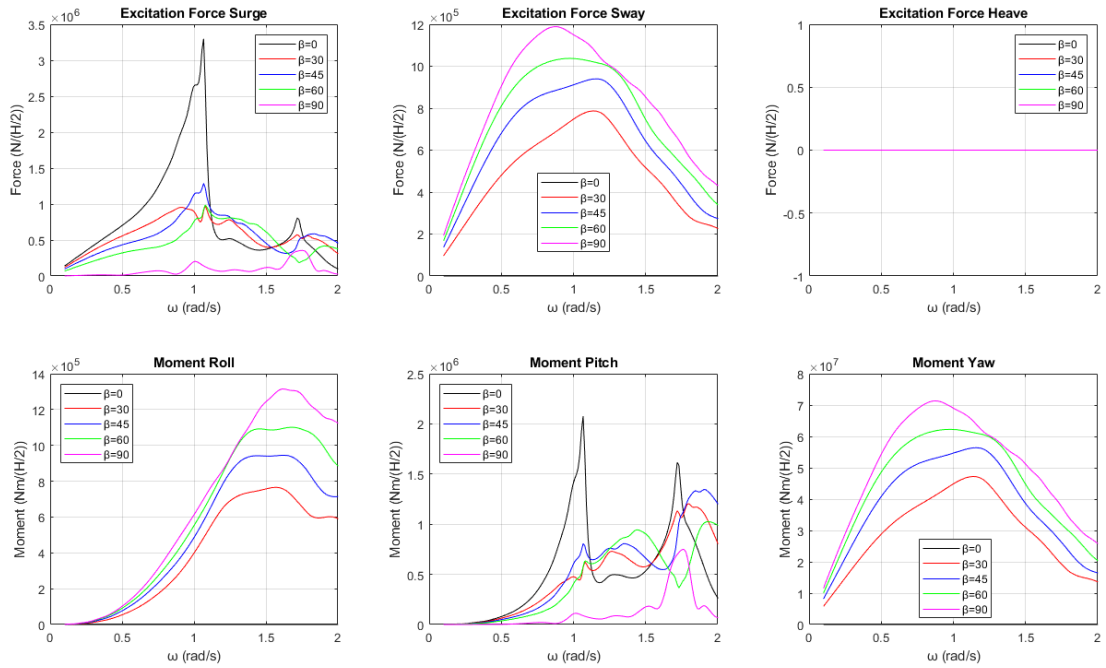
Εικόνα 630: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



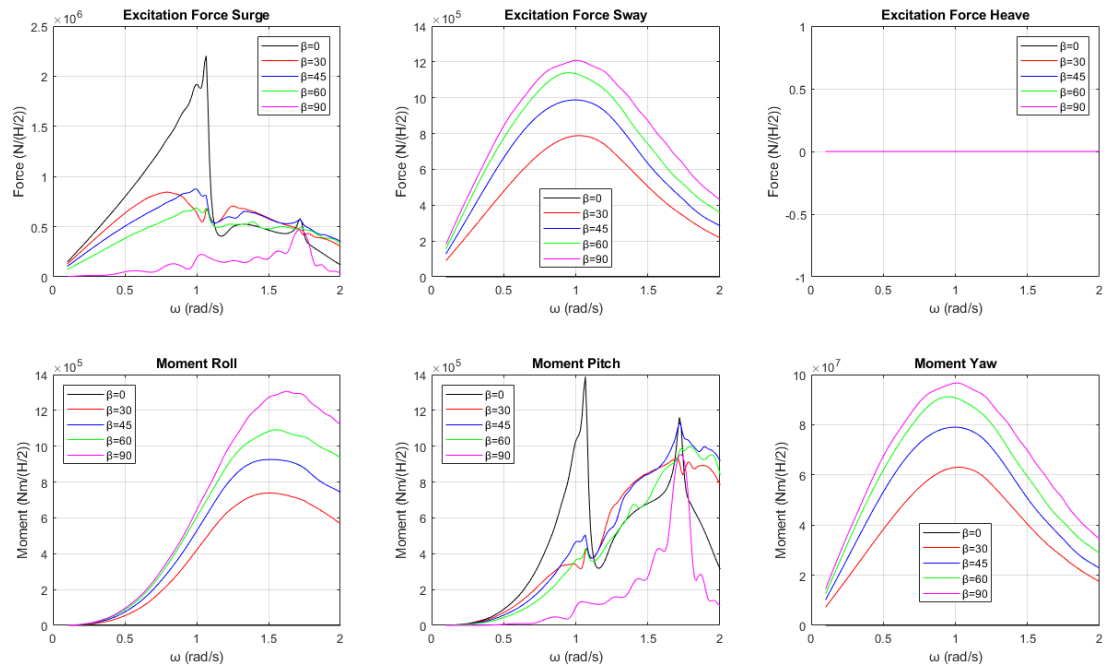
Εικόνα 631: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 632: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 7 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 633: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 8 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού



Εικόνα 634: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης για τον κύλινδρο 9 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Από τις Εικόνες 626-634 παρατηρούμε πως όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού τότε οι φορτίσεις που ασκούνται στους κυλίνδρους της διάταξης μειώνονται δραματικά σε σχέση με αυτές όταν η γωνία είναι $\beta = 0^\circ$. Προκειμένου να ελέγξουμε τον τρόπο με τον οποίον επηρεάζονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις

συνθήκες Neumann και Dirichlet θα πρέπει να γίνει έλεγχος των οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης ξεχωριστά. Στον Πίνακα 162 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet για κάθε κύλινδρο της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

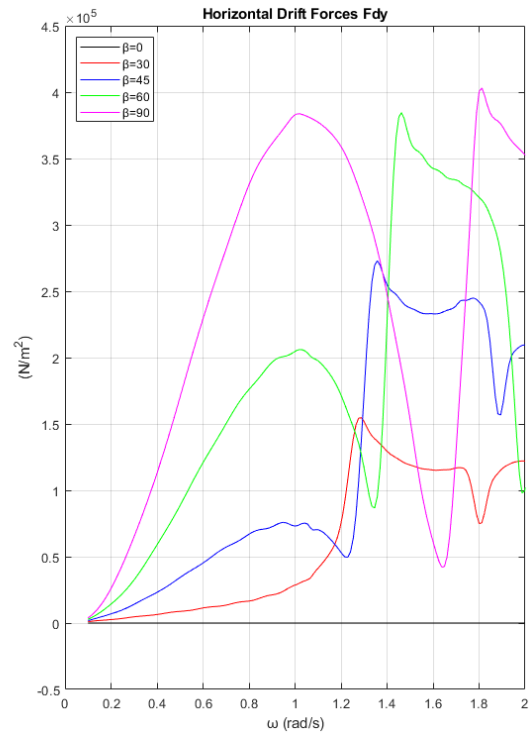
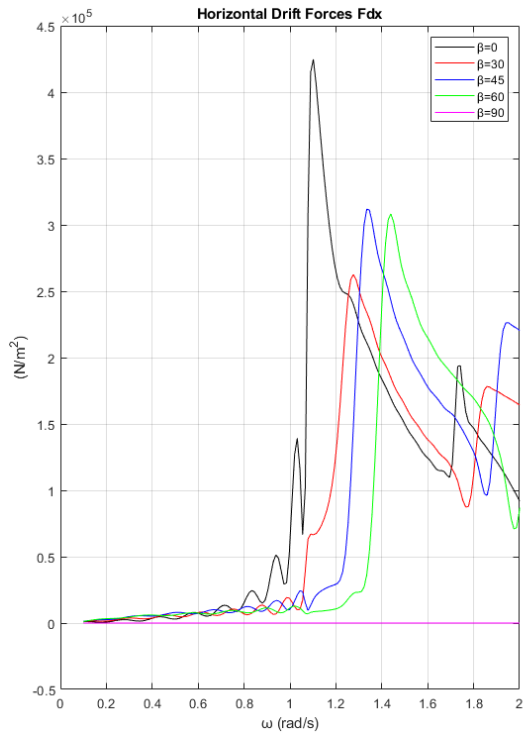
Πίνακας 162: Συχνότητες που ικανοποιείται η συνθήκη Neumann και Dirichlet αντίστοιχα για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

Κύλινδρος 1		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.08$	$\cong 1.80$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.28$	$\cong 1.88$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.38$	$\cong 1.99$
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.72$	–
Κύλινδρος 2		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.80$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.25$	$\cong 1.87$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.37$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 3		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.05$	$\cong 1.78$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.87$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.37$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 4		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.03$	$\cong 1.78$
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.06$	$\cong 1.87$
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.36$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–

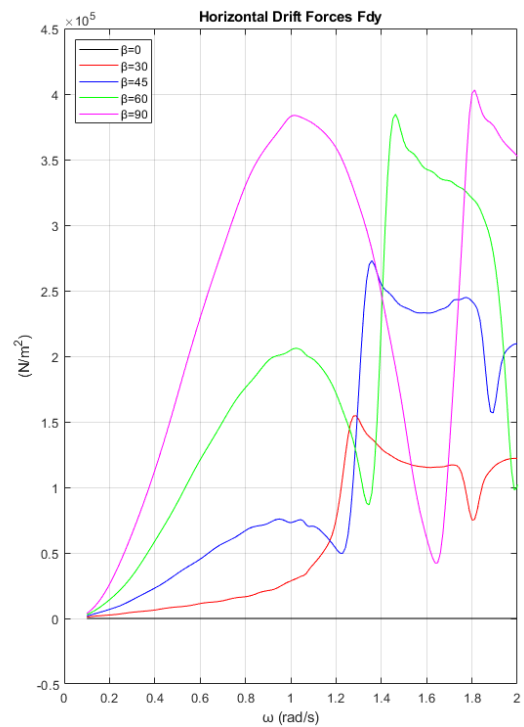
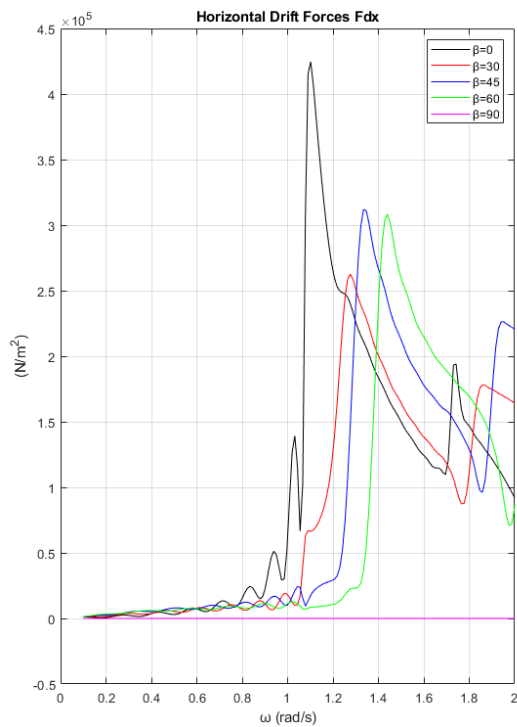
Κύλινδρος 5		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 6		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	–	–
$\beta = 45^\circ$	–	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 7		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.08$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.08$	–
$\beta = 60^\circ$	–	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 8		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.08$	–
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.07$	–
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.08$	–
$\beta = 90^\circ$	–	–
Κύλινδρος 9		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	$\cong 1.73$
$\beta = 30^\circ$	–	–

$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.08$	—
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.73$	—

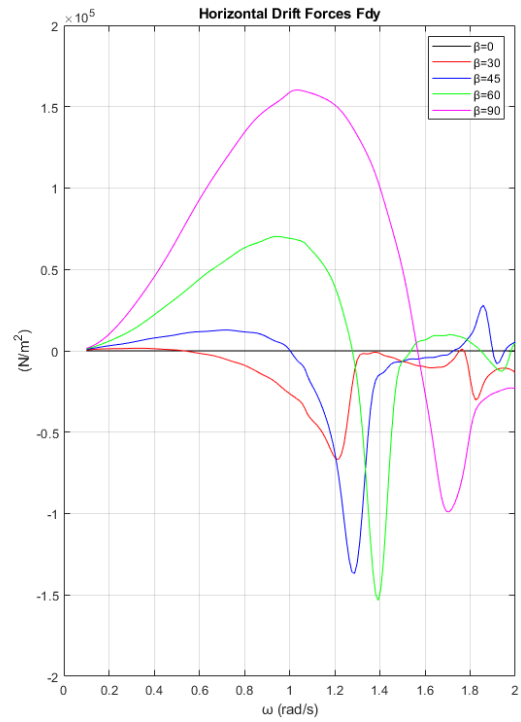
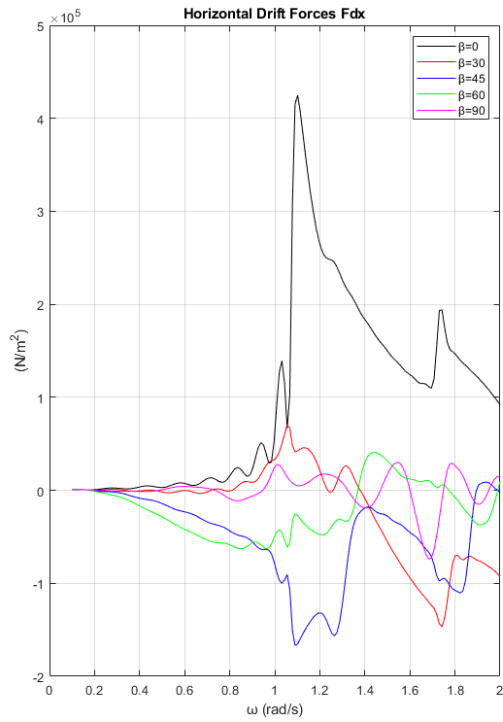
Από τον Πίνακα 162 παρατηρούμε πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών δεν εμφανίζεται σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και σε όλους τους κυλίνδρους, παρά μόνο στη γωνία $\beta = 0^\circ$ όπου ικανοποιούνται οι συνθήκες Neumann και Dirichlet σε όλους τους κυλίνδρους. Για παράδειγμα το φαινόμενο δεν εμφανίζεται στους κυλίνδρους 5 και 6 όταν αλλάξει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Φαίνεται, πως ο κύλινδρος 1 αποτελεί έναν δυνητικό υποψήφιο για την εγκατάσταση μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς ικανοποιείται η συνθήκη Neumann για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης. Όμως, επειδή οι κύλινδροι βρίσκονται σε σειρά τότε πρέπει να παραλείψουμε τη γωνία $\beta = 90^\circ$, καθώς όχι μόνο δεν ασκούνται μεγάλες φορτίσεις αλλά δεν ικανοποιείται καμία συνθήκη σε κανέναν κύλινδρο πλην του κυλίνδρου 1 και 9. Επομένως παραλείποντας τη γωνία αυτή, παρατηρούμε πως οι κύλινδροι 2, 3, 4 και 8 είναι και αυτοί υποψήφιοι για να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε αυτούς. Ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y παρατηρούμε πως δεν ικανοποιείται καμία οριακή συνθήκη. Επομένως, προκειμένου να αποφανθούμε σε ποιον κύλινδρο της διάταξης θα μπορούσε να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τα δεδομένα του Πίνακα 162. Όπως αναφέρθηκε πριν οι κύλινδροι 1, 2, 3, 4 και 8 της διάταξης είναι δυνητικοί υποψήφιοι για να εγκατασταθεί μια συσκευή ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε αυτούς. Στην Εικόνα 635 φαίνονται οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη. Αντίστοιχα, στις Εικόνες 636-644 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο της διάταξης.



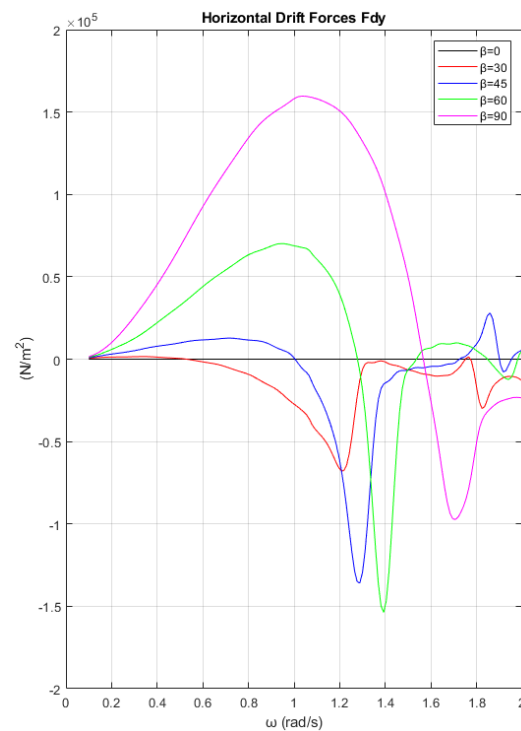
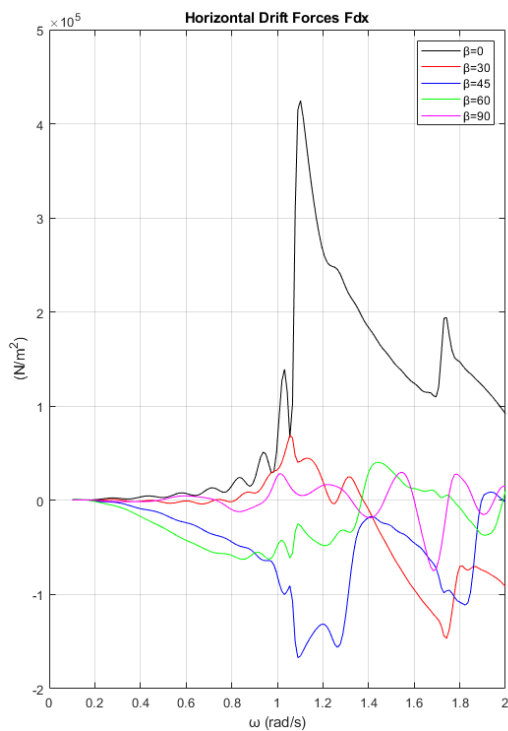
Εικόνα 635: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



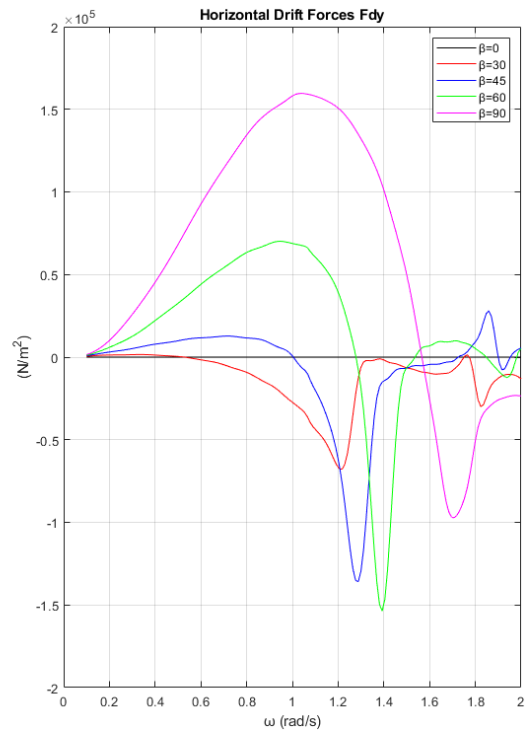
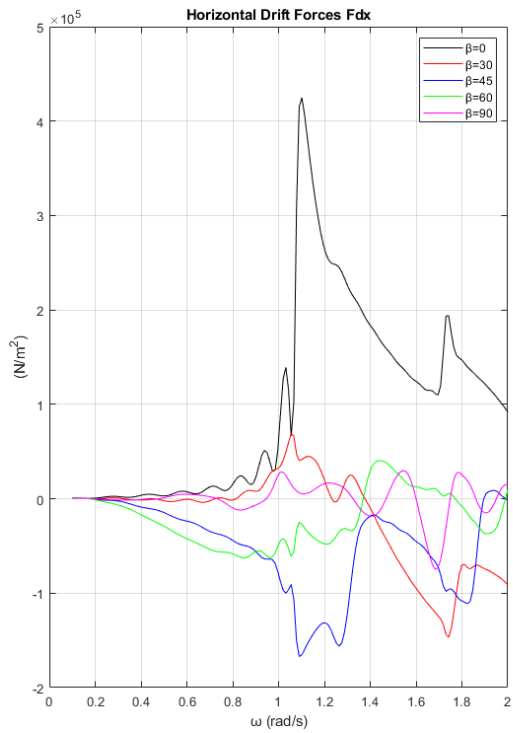
Εικόνα 636: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 1 της διάταξης για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



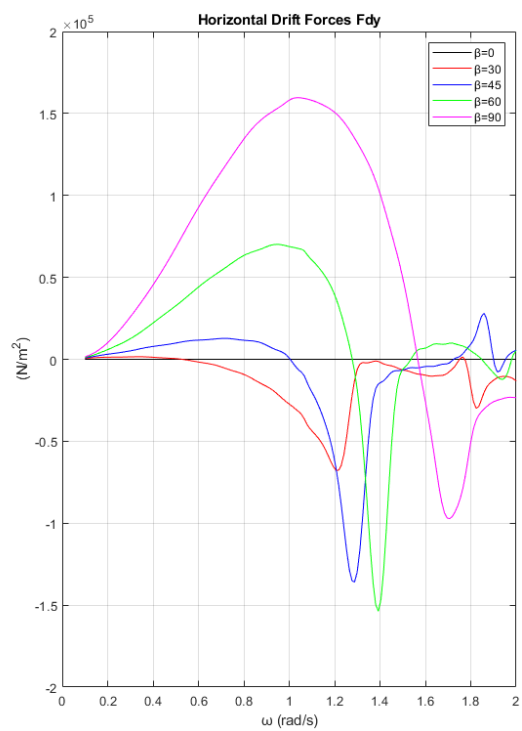
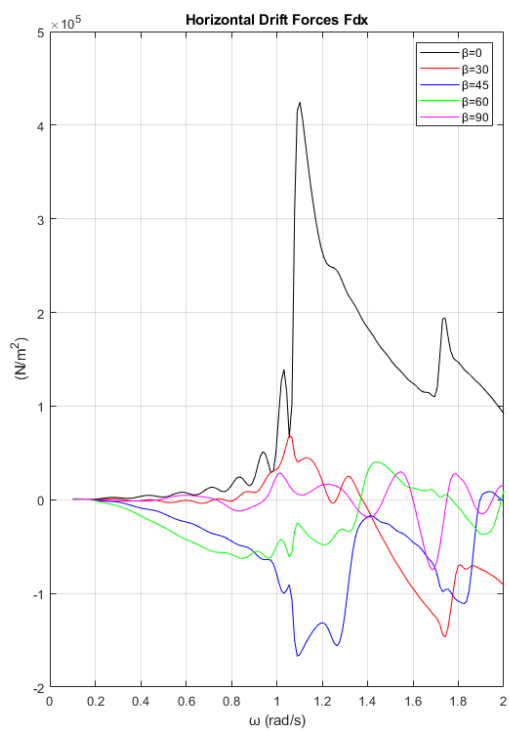
Εικόνα 637: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 2 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



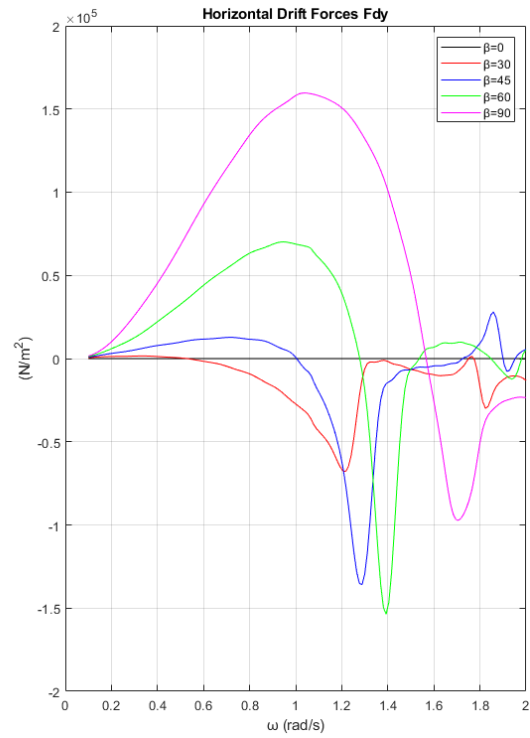
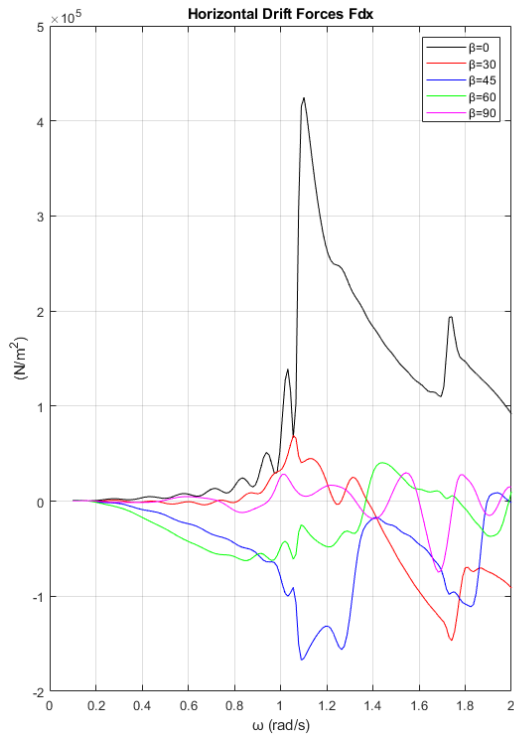
Εικόνα 638: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 3 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



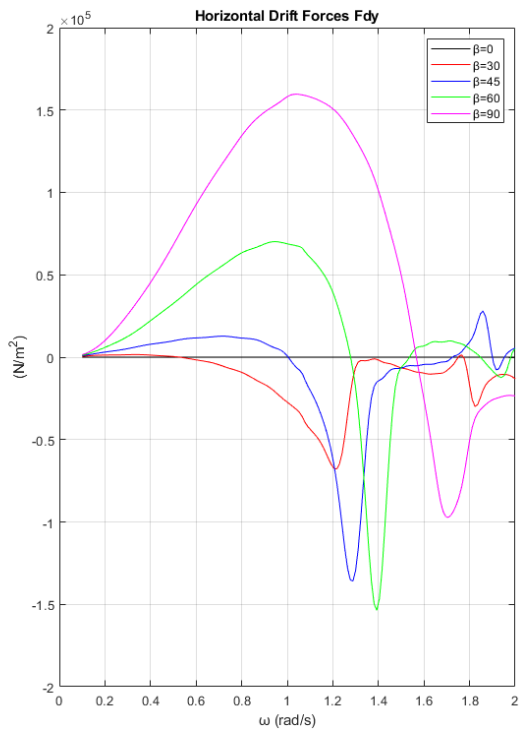
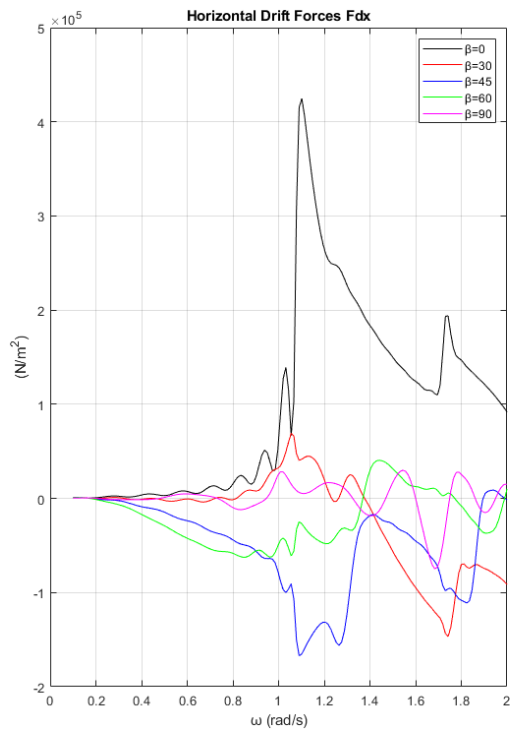
Εικόνα 639: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 4 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



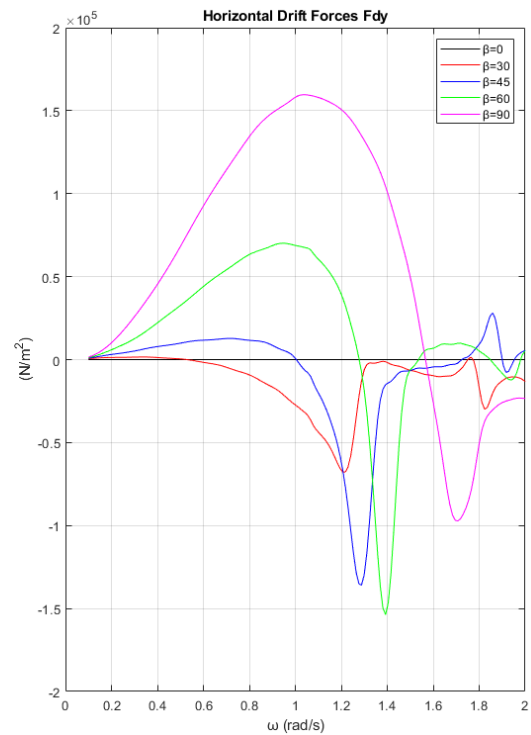
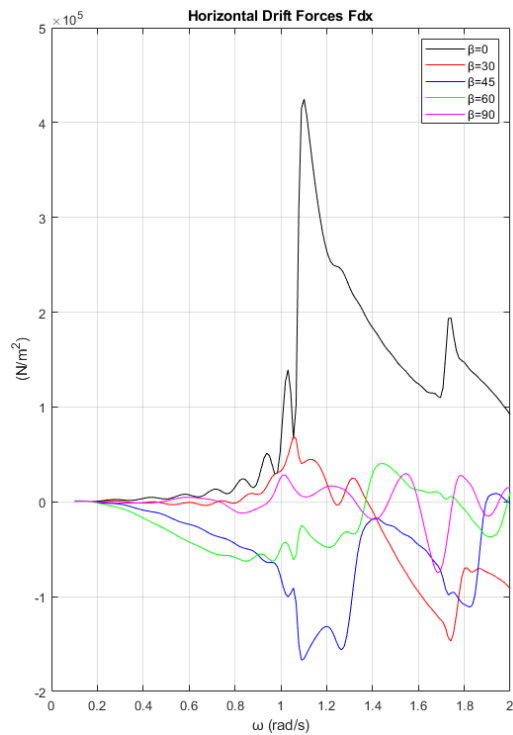
Εικόνα 640: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 5 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



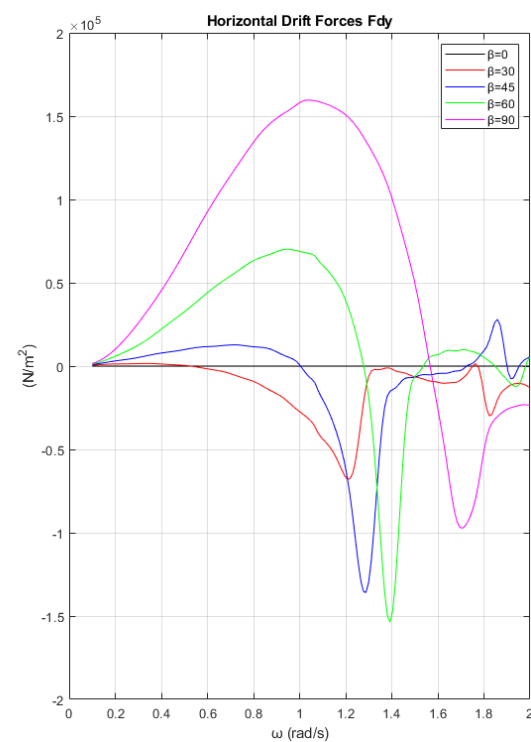
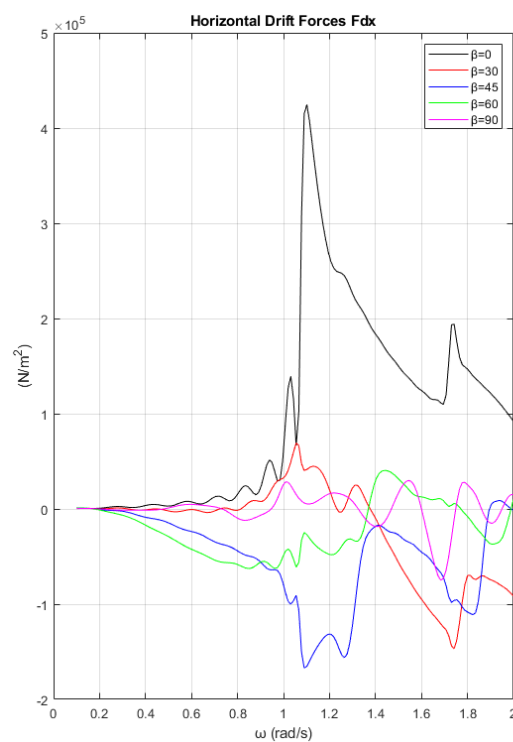
Εικόνα 641: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 6 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 642: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 7 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 643: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 8 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν



Εικόνα 644: Οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο 9 της διάταξης για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που μελετήθηκαν

Όπως και με τις προηγούμενες διατάξεις, θα αναπαραστήσουμε την κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 163 φαίνονται ως προς ποιον κύλινδρο και ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

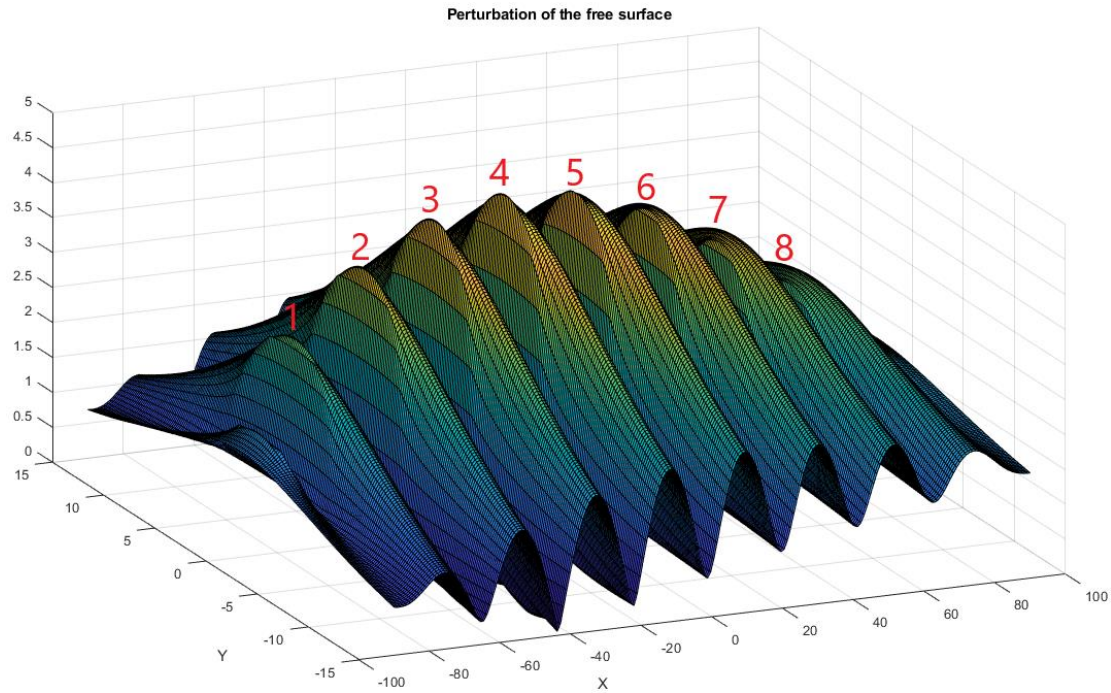
Πίνακας 163: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Μεγαλύτερες ασκούμενες δυνάμεις	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.07$	Κύλινδρος 5	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.08$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.28$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 1.38$	Κύλινδρος 1	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 1.00$	Κύλινδρος 1	F_y	ΟΧΙ

Στην Εικόνα 645 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 164 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 646 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 164: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	3.03 m
2	3.90 m
3	4.46 m
4	4.71 m
5	4.61 m
6	4.22 m
7	3.72 m
8	3.04 m



Εικόνα 645: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 5 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



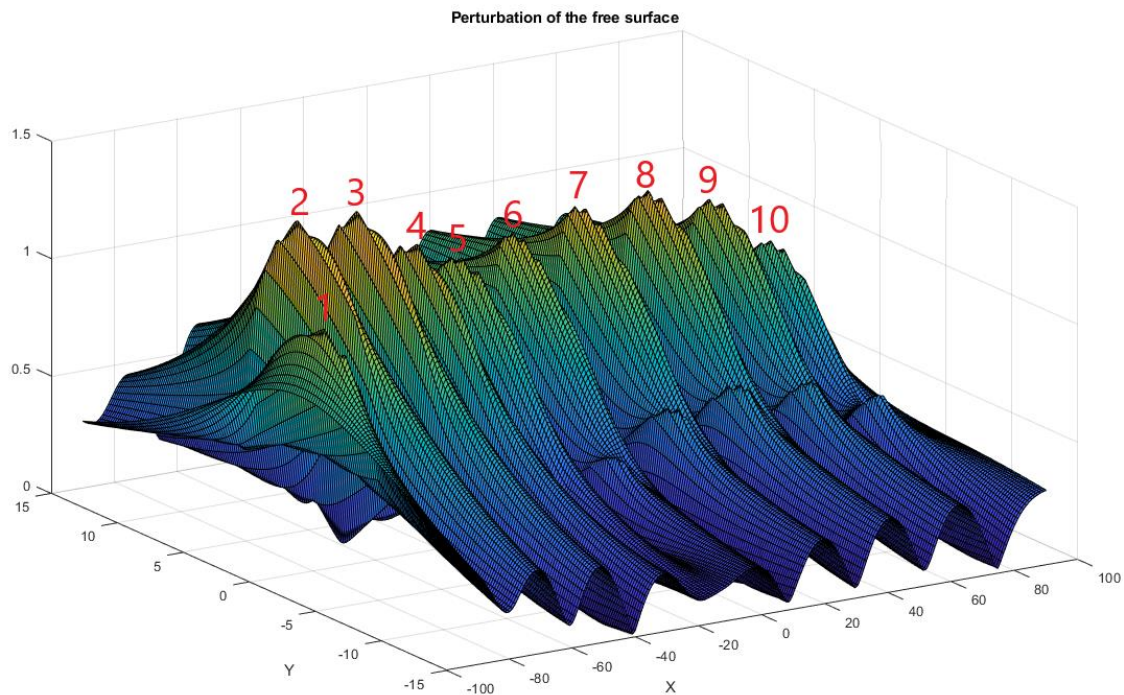
Εικόνα 646: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

Στην Εικόνα 647 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 165 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 648 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

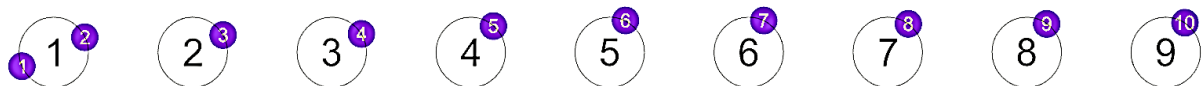
Πίνακας 165: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.09 m
2	1.42 m
3	1.41 m
4	1.22 m
5	1.09 m
6	1.13 m
7	1.20 m

8	1.23 m
9	1.14 m
10	0.92 m



Εικόνα 647: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



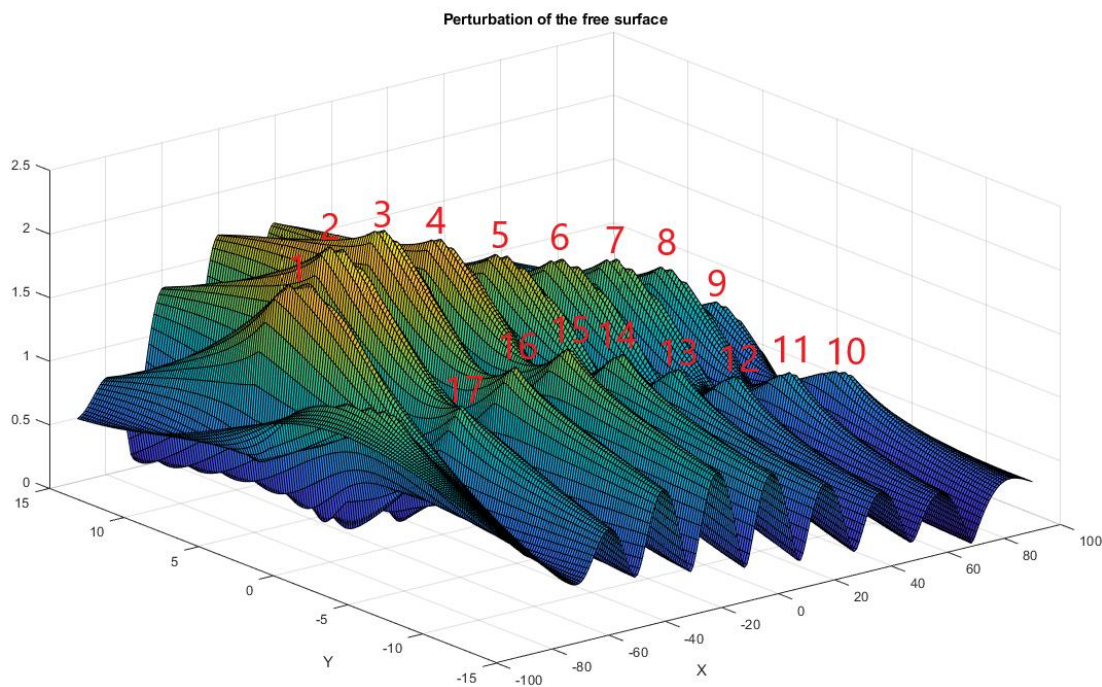
Εικόνα 648: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 649 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 166 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 650 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

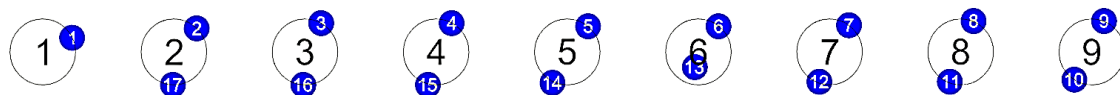
Πίνακας 166: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.05 m
2	2.16 m

3	2.18 m
4	2.00 m
5	1.77 m
6	1.64 m
7	1.53 m
8	1.33 m
9	0.95 m
10	0.83 m
11	0.94 m
12	1.01 m
13	0.94 m
14	1.38 m
15	1.56 m
16	1.54 m
17	1.33 m



Εικόνα 649: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



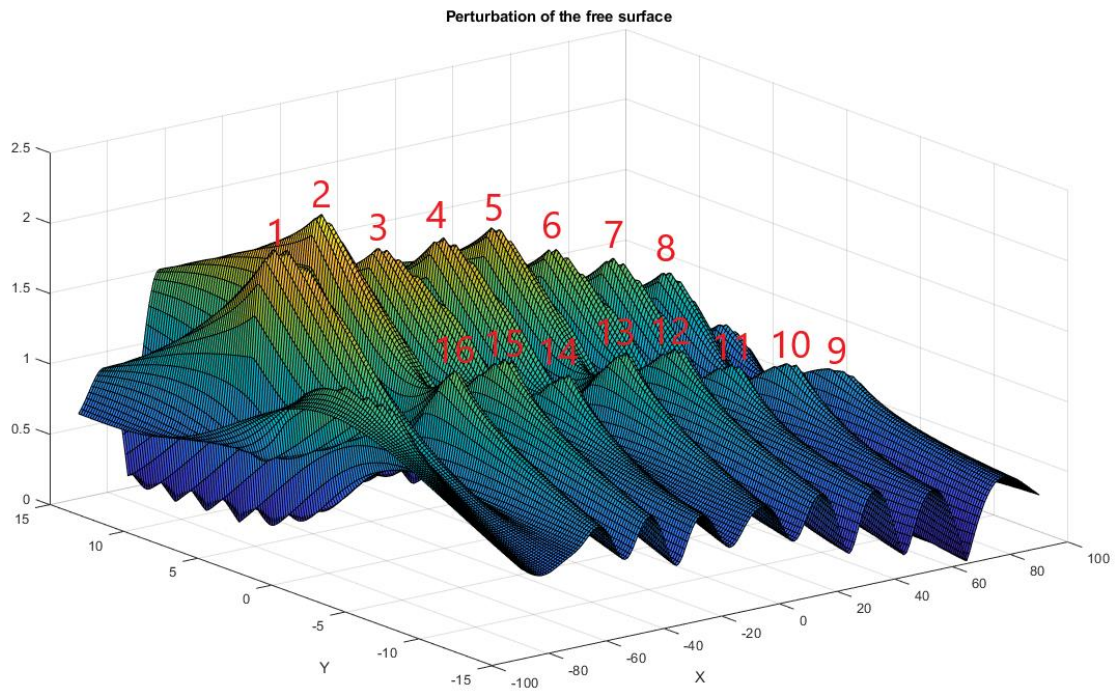
Εικόνα 650: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 651 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη

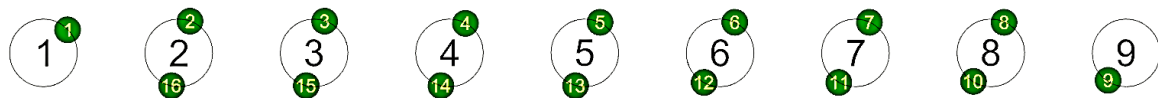
Neumann για τον κύλινδρο 1 της διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 167 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 652 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 167: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	2.14 m
2	2.27 m
3	1.94 m
4	1.94 m
5	1.90 m
6	1.68 m
7	1.53 m
8	1.33 m
9	0.90 m
10	1.04 m
11	1.13 m
12	1.33 m
13	1.40 m
14	1.33 m
15	1.52 m
16	1.54 m



Εικόνα 651: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann για τον κύλινδρο 1 διάταξης ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



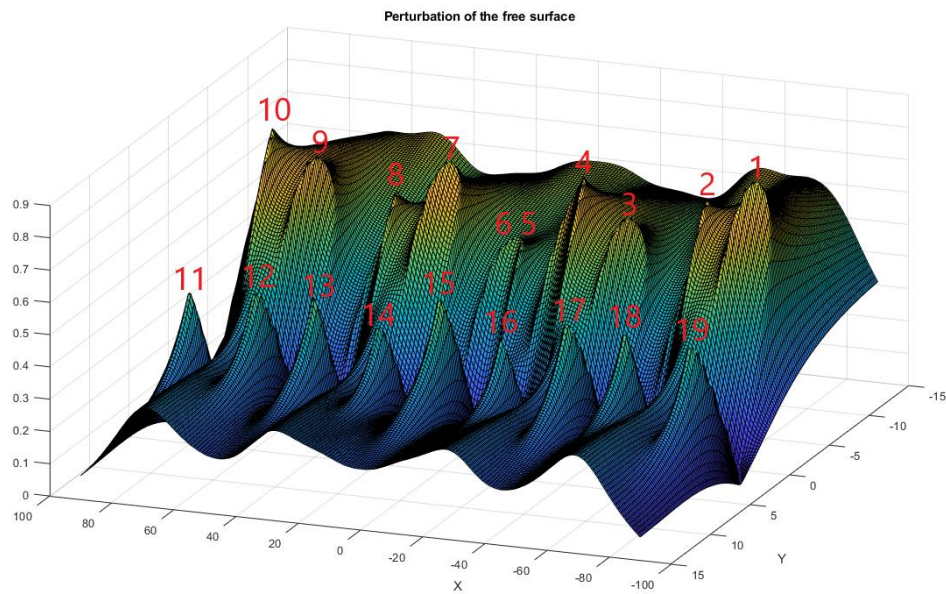
Εικόνα 652: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

Στην Εικόνα 653 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ασκούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y στον κύλινδρο 1 της διάταξης. Αντίστοιχα στον Πίνακα 168 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 654 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

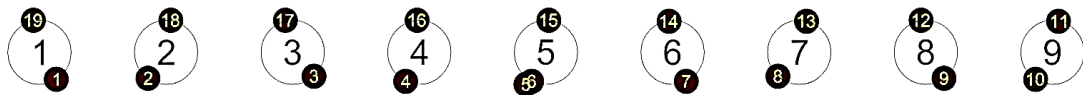
Πίνακας 168: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.81 m
2	0.74 m
3	0.66 m
4	0.76 m
5	0.50 m
6	0.50 m

7	0.76 m
8	0.66 m
9	0.74 m
10	0.81 m
11	0.46 m
12	0.48 m
13	0.49 m
14	0.41 m
15	0.52 m
16	0.42 m
17	0.48 m
18	0.48 m
19	0.46 m



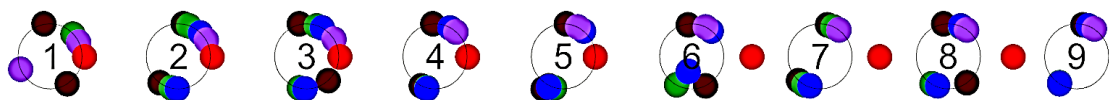
Εικόνα 653: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που ασκούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y στον κύλινδρο 1 της διάταξης



Εικόνα 654: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

Στην Εικόνα 655 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν, με την Εικόνα 656 να εξηγεί τι συμβολίζει κάθε χρώμα. Αντίστοιχα στην Εικόνα 657 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών εκείνων που παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις διάφορες γωνίες

πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 657 συμπεραίνουμε πως στη διάταξη θα μπορούσαν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κύλινδρους 2 και 4 της διάταξης. Ο τρόπος με τον οποίο είναι διατεταγμένοι οι κύλινδροι εμφανίζει μια δυσκολία για την παραγωγή ενέργειας όταν αλλάξει η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Για τον λόγο αυτό εάν εγκατασταθεί η συσκευή στον κύλινδρο 2 της διάταξης αυτή θα μπορεί να παράξει ενέργεια για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ και 90° . Αντίστοιχα, η συσκευή στον τέταρτο κύλινδρο μπορεί να παράξει ενέργεια για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ και 90° . Όμως, επειδή η Εικόνα 657 αποτελεί έναν οδηγό για το που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες κορυφές, τότε προκύπτει η Εικόνα 658 όπου φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 658 συμπεραίνουμε πως τελικά μπορούν να εγκατασταθούν τέσσερις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κύλινδρους 2, 3, 4 και 5. Οι κύλινδροι αυτοί είναι οι καταλληλότεροι για την εγκατάσταση των συσκευών, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν με πολλή καλή απόδοση για τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ και 60° . Η γωνία $\beta = 90^\circ$ παραλείπεται διότι οι κορυφές που σχηματίζονται είναι αρκετά μικρές, με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο αποδοτικές ως προς την παραγωγή ενέργειας.



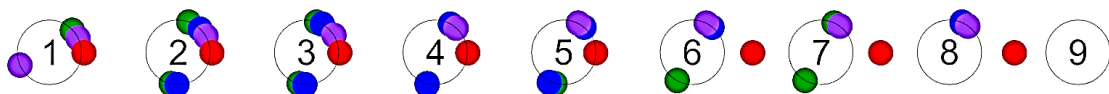
Εικόνα 655: Θέσεις όλων των κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 656: Επεξήγηση των χρωματισμένων κύκλων



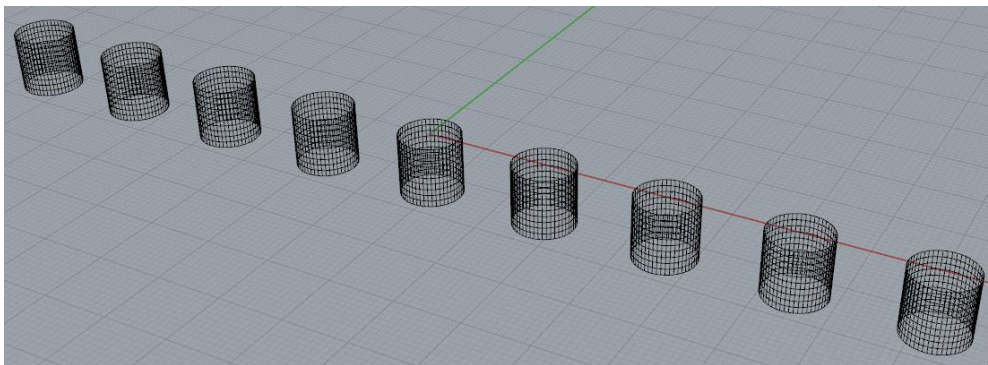
Εικόνα 657: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 658: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

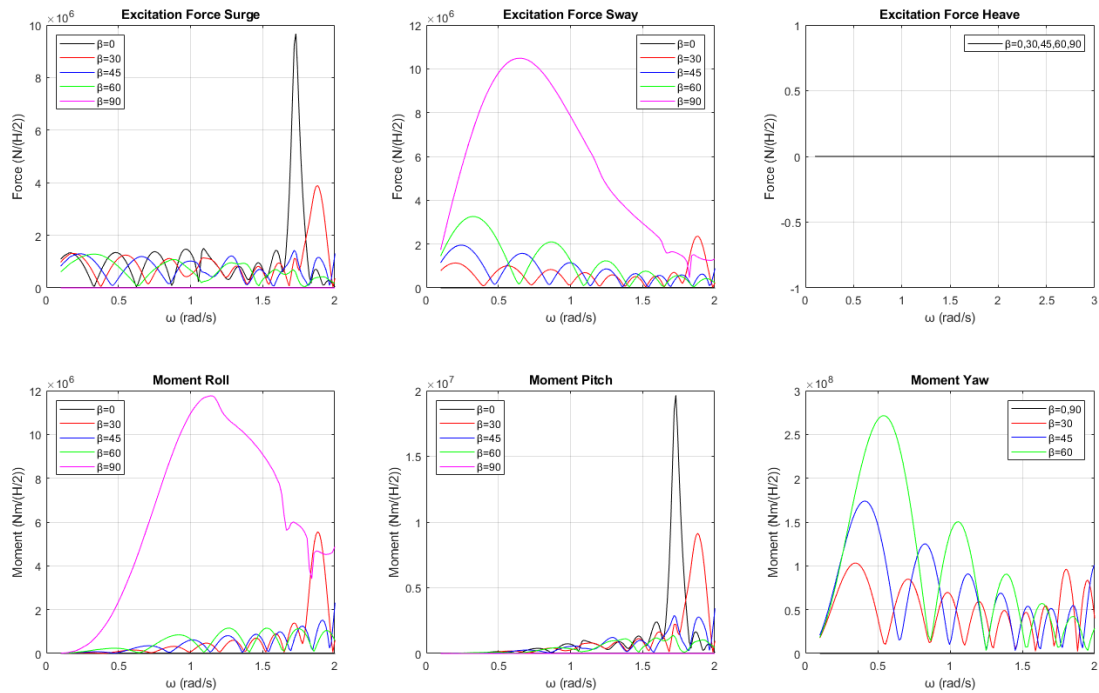
3.9.2 Μελέτη σαν ένα σώμα

Εδώ θα μελετήσουμε το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών στην διάταξη όταν οι εννιά κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα. Στην Εικόνα 659 φαίνεται η διακριτοποίηση της διάταξης των εννιά κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα και αποτελείται από 4950 σημεία και 4500 στοιχεία.



Εικόνα 659: Παράδειγμα διακριτοποίησης της διάταξης των εννιά κατακόρυφων κυλίνδρων σαν ένα σώμα που αποτελείται από 4950 σημεία και 4500 στοιχεία

Οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης που ασκούνται στη διάταξη για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού φαίνονται στην Εικόνα 660. Στον Πίνακα 169 φαίνονται οι συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y αντίστοιχα. Όπως και στους μεμονωμένους κυλίνδρους, ομοίως και εδώ το φαινόμενο εμφανίζεται μέχρι την γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$, το οποίο οφείλεται στην ιδιομορφία της διάταξης.

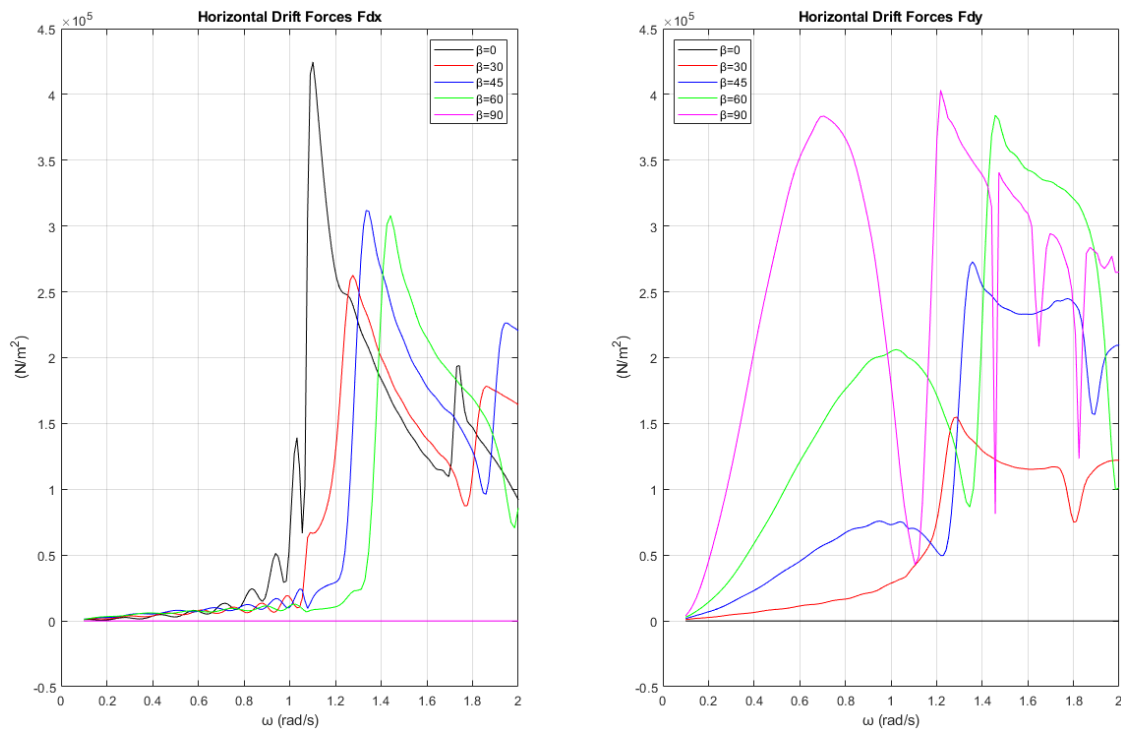


Εικόνα 660: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται συνολικά στην διάταξη ως προς τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού

Πίνακας 169: Συχνότητες που ικανοποιούν τις συνθήκες Neumann και Dirichlet ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x και F_y

Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_x		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.73$	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.88$	—
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.72$	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—
Οριζόντιες Δυνάμεις Διέγερσης F_y		
Γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού	Συνθήκη Neumann	Συνθήκη Dirichlet
$\beta = 0^\circ$	—	—
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.88$	—
$\beta = 45^\circ$	—	—
$\beta = 60^\circ$	—	—
$\beta = 90^\circ$	—	—

Οι συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη φαίνονται στην Εικόνα 661.



Εικόνα 661: Συνολικές οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στη διάταξη από τον κυματισμό

Λόγω του ότι δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών για όλες τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού, θα αναπαραστήσουμε το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις συχνότητες εκείνες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης. Στον Πίνακα 170 φαίνονται ως προς ποια συχνότητα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης, καθώς και αν η συχνότητα αυτή ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann.

Πίνακας 170: Συχνότητες που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης

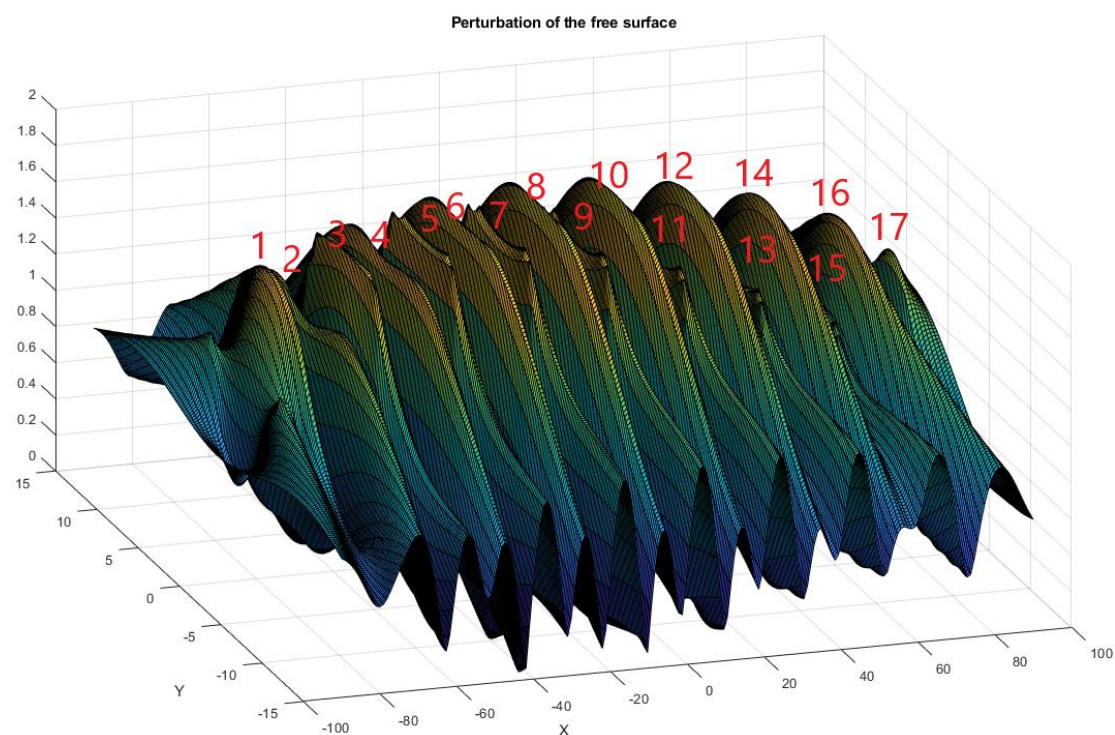
Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού	Συχνότητα	Δυνάμεις διέγερσης	Εμφανίζεται το φαινόμενο;
$\beta = 0^\circ$	$\cong 1.73$	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 30^\circ$	$\cong 1.88$	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 45^\circ$	$\cong 1.72$	F_x	ΝΑΙ
$\beta = 60^\circ$	$\cong 0.32$	F_y	ΟΧΙ
$\beta = 90^\circ$	$\cong 0.64$	F_y	ΟΧΙ

Στην Εικόνα 662 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 171 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 663 φαίνονται οι θέσεις

των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 171: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.70 m
2	1.40 m
3	1.75 m
4	1.71 m
5	1.78 m
6	1.82 m
7	1.75 m
8	1.93 m
9	1.67 m
10	1.94 m
11	1.54 m
12	1.90 m
13	1.37 m
14	1.81 m
15	1.27 m
16	1.67 m
17	1.47 m



Εικόνα 662: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x

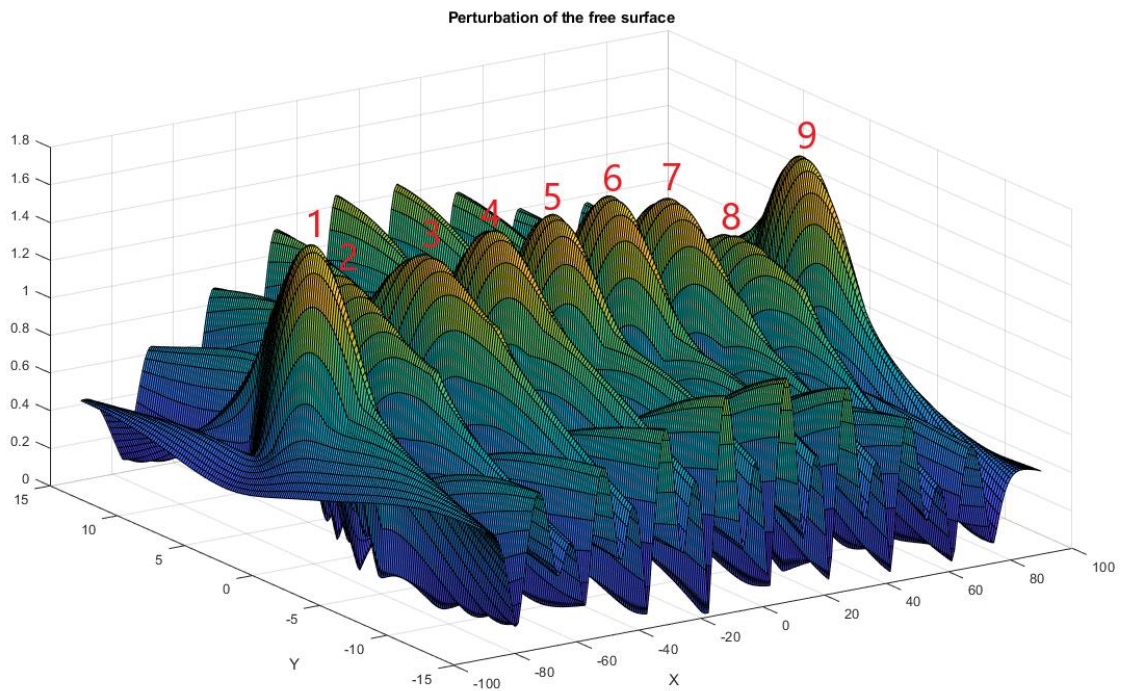


Εικόνα 663: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 0^\circ$

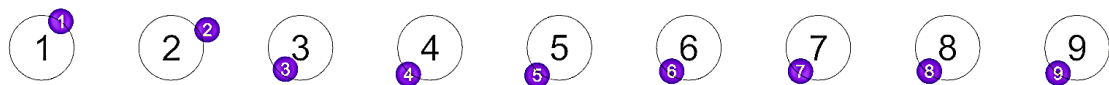
Στην Εικόνα 664 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 172 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 665 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 172: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.69 m
2	1.37 m
3	1.49 m
4	1.59 m
5	1.58 m
6	1.60 m
7	1.52 m
8	1.29 m
9	1.65 m



Εικόνα 664: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 30^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



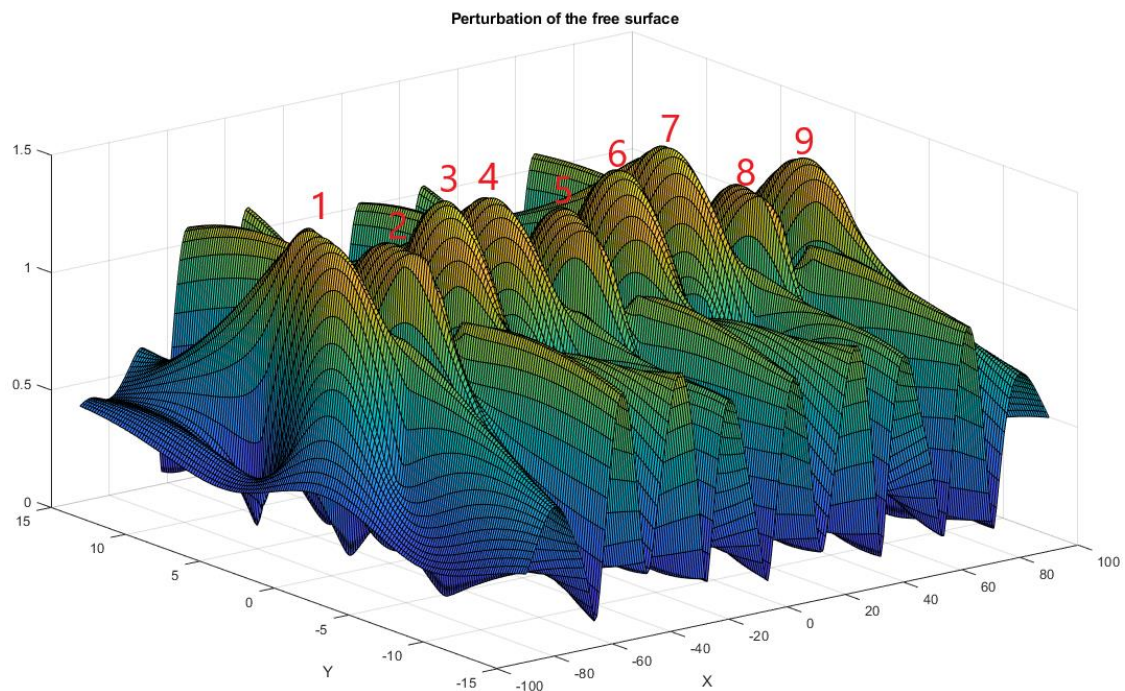
Εικόνα 665: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 30^\circ$

Στην Εικόνα 666 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x . Αντίστοιχα στον Πίνακα 173 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 667 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

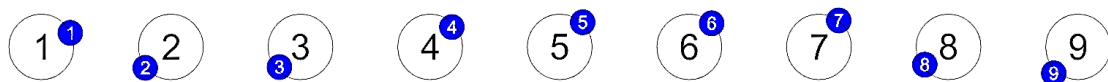
Πίνακας 173: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	1.41 m
2	1.38 m
3	1.49 m
4	1.41 m
5	1.36 m
6	1.46 m

7	1.47 m
8	1.31 m
9	1.38 m



Εικόνα 666: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 45^\circ$ για τη συχνότητα που ικανοποιεί τη συνθήκη Neumann ως προς τις οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_x



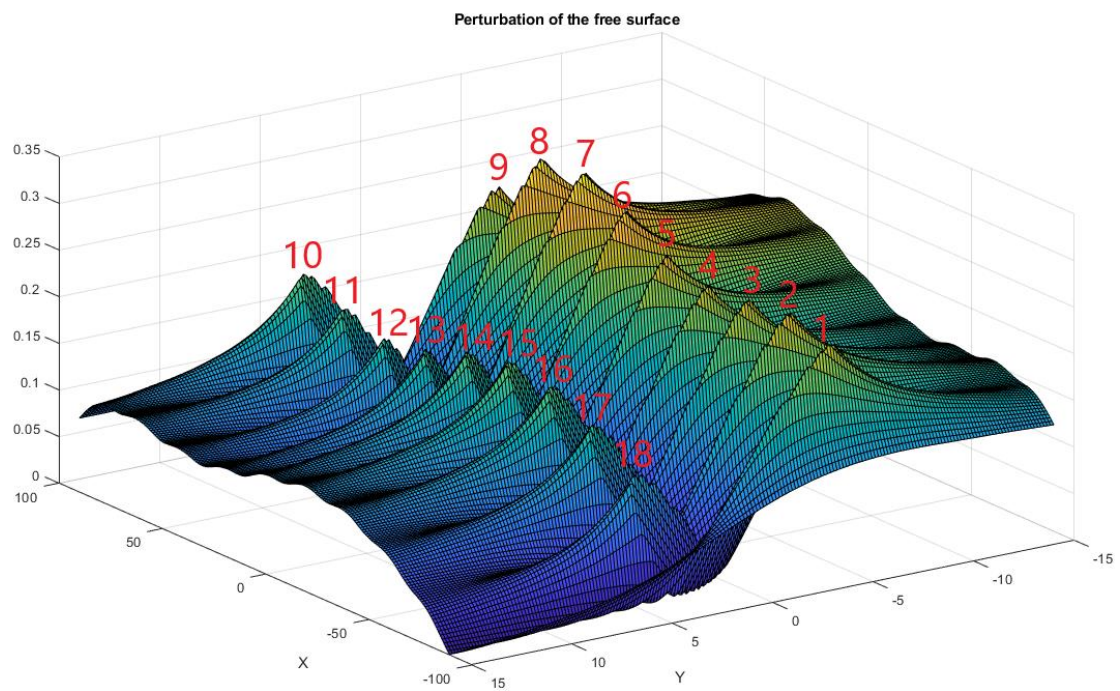
Εικόνα 667: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 45^\circ$

Στην Εικόνα 668 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 174 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 669 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

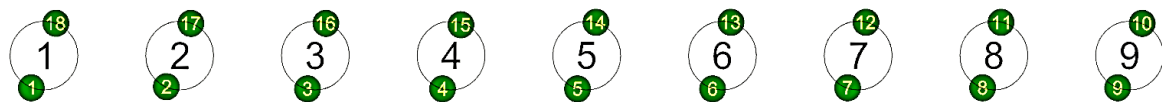
Πίνακας 174: Μεγαλύτερες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
--------	---

1	0.24 m
2	0.25 m
3	0.25 m
4	0.24 m
5	0.25 m
6	0.28 m
7	0.30 m
8	0.30 m
9	0.25 m
10	0.20 m
11	0.18 m
12	0.17 m
13	0.18 m
14	0.19 m
15	0.20 m
16	0.19 m
17	0.17 m
18	0.14 m



Εικόνα 668: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 60^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y

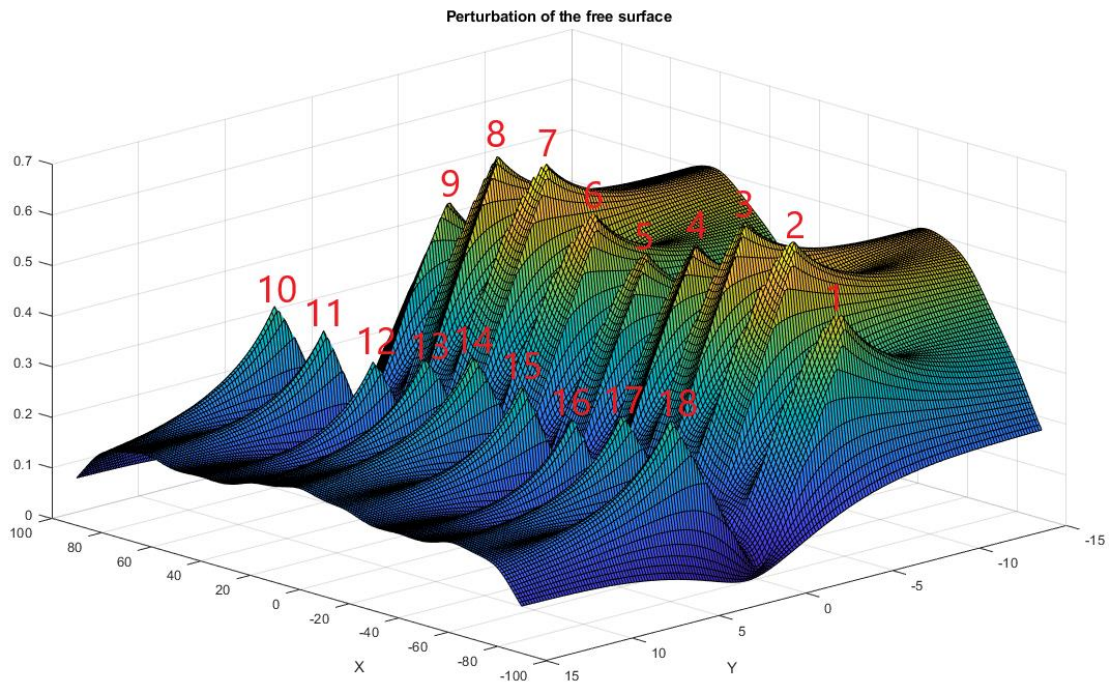


Εικόνα 669: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 60^\circ$

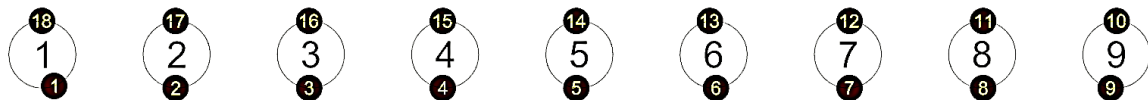
Στην Εικόνα 670 φαίνεται το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y . Αντίστοιχα στον Πίνακα 175 φαίνονται οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου και στην Εικόνα 671 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που παρατηρούνται στη διάταξη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ ως προς τη συχνότητα αυτή.

Πίνακας 175: Τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Κορυφή	Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας
1	0.47 m
2	0.59 m
3	0.61 m
4	0.53 m
5	0.49 m
6	0.53 m
7	0.61 m
8	0.59 m
9	0.47 m
10	0.36 m
11	0.34 m
12	0.30 m
13	0.34 m
14	0.37 m
15	0.34 m
16	0.30 m
17	0.34 m
18	0.36 m

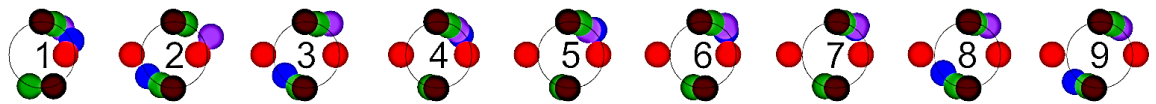


Εικόνα 670: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 90^\circ$ για τη συχνότητα που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης F_y



Εικόνα 671: Θέσεις των κορυφών στη διάταξη όταν η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού είναι $\beta = 90^\circ$

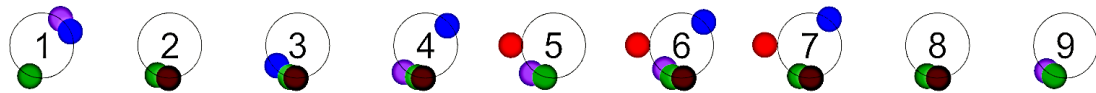
Στην Εικόνα 672 φαίνονται οι θέσεις όλων των κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στην διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν, με την Εικόνα 673 να εξηγεί τι συμβολίζει κάθε χρωματισμός. Αντίστοιχα στην Εικόνα 674 φαίνονται οι θέσεις των κορυφών εκείνων που παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν. Από την Εικόνα 674 συμπεραίνουμε πως στην διάταξη θα μπορούσαν να εγκατασταθούν πέντε συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1, 3, 4, 6 και 7 της διάταξης. Όμως, επειδή η Εικόνα 674 αποτελεί έναν οδηγό για το που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες κορυφές, τότε προκύπτει η Εικόνα 675 όπου φαίνονται οι θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπό μελέτη γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού. Από την Εικόνα 675 συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν εννιά συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όσοι είναι και οι κύλινδροι. Η βασική διαφορά των εννιά κυλίνδρων που συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα έναντι των μεμονωμένων έγκειται όχι μόνο στο μικρότερες τιμές που έχει το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, αλλά και στις γωνίες πρόσπτωσης που μπορούν οι συσκευές να παράγουν ενέργεια.



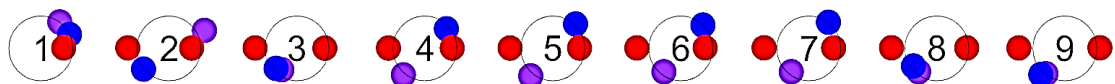
Εικόνα 672: Θέσεις όλων των κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 673: Επεξήγηση των χρωματισμένων κύκλων



Εικόνα 674: Θέσεις των μεγαλύτερων κορυφών του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης που μελετήθηκαν



Εικόνα 675: Θέσεις των κορυφών που μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

4 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη του φαινομένου της παγίδευσης των κυματισμών σε διατάξεις κυλινδρικών σωμάτων και η εκμετάλλευση του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη των διατάξεων έγινε κάνοντας χρήση του ανοιχτού κώδικα BEM NEMOH, του οποίου η εγγύτητα ελέγχθηκε στον έναν κατακόρυφο κύλινδρο για διάφορους αριθμούς στοιχείων, λύνοντας τα προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας. Η δεύτερη διάταξη που μελετήθηκε ήταν αυτή των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων, όπου παρατηρήσαμε μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στις συχνότητες που εμφανίζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών τόσο όταν αυτοί συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα, όσο όταν αυτοί συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα.

Η επόμενη διάταξη που μελετήσαμε ήταν αυτή των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων σε κυκλικές θέσεις, των οποίων η μελέτη χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, θεωρήσαμε πως οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα, ενώ στο δεύτερο υποθέσαμε πως αυτοί συμπεριφέρονται σαν ένα. Η μελέτη χωρίστηκε περαιτέρω και σε δύο υποκατηγορίες, όπου στην πρώτη υποθέσαμε πως η διάταξη είναι ακίνητη (diffraction problem) και στη δεύτερη αυτή αφήνεται να ταλαντωθεί ελεύθερα (radiation problem). Αυτό που παρατηρήσαμε είναι πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα, καθώς μόνο τότε ικανοποιούνται πραγματικά οι συνθήκες Neumann και Dirichlet, αντίστοιχα. Όμως, παρατηρώντας την κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα, διακρίνουμε δύο κορυφές στο εσωτερικό της διάταξης για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού $\beta = 0^\circ$ και 90° . Οι δύο αυτές κορυφές υποδεικνύουν ότι μέρος της ενέργειας του κυματισμού παγιδεύεται στο εσωτερικό της διάταξης και προσομοιάζει ένα «ποσποούλ». Εάν επρόκειτο να γίνει μελέτη της διάταξης για εγκατάσταση συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας, τότε οι κύλινδροι της διάταξης θα πρέπει να αφηθούν να ταλαντωθούν ελεύθερα και αυτές μπορούν να εγκατασταθούν στους κυλίνδρους 2 και 3.

Η δεύτερη διάταξη των τεσσάρων κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων τοποθετημένων σε τριγωνική διάταξη αποτελούν μέρος μιας πλωτής κατασκευής, την οποία αναλύσαμε στην παράγραφο 3.4. Η μελέτη χωρίστηκε σε δύο μέρη και αντίστοιχα σε δύο υποκατηγορίες, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Παρατηρώντας τις δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται στους κυλίνδρους της πλωτής κατασκευής, όταν αυτοί συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα αλλά και σαν ένα, βλέπουμε το φαινόμενο. Όμως, δεν παρατηρείται μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα. Αντιθέτως, το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λαμβάνει μεγάλες τιμές μόνο όταν η πλωτή κατασκευή δεν μπορεί να ταλαντωθεί. Στη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε όλους τους κυλίνδρους της, με αυτήν του κυλίνδρου 1 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση.

Η διάταξη των πέντε κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων τοποθετημένων σε περιφέρεια κύκλου έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς το μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Είναι εμφανές πως το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης ανάλογα τη διεύθυνση των δυνάμεων διέγερσης. Στην διάταξη συμπεραίνουμε πως μπορούν να εγκατασταθούν δύο συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 1 και 5, καθώς προσφέρουν ευελιξία ως προς τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού που παρατηρούνται μεγάλες κορυφές. Η διάταξη των έξι κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων τοποθετημένων σε περιφέρεια κύκλου αποτελεί επέκταση της προηγούμενης διάταξης. Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εξακολουθεί να εμφανίζεται σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης, ανάλογα με τη διεύθυνση των δυνάμεων διέγερσης. Όμως, ενδιαφέρον έχει η κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς παρατηρούμε μεγάλες τιμές της στους κυλίνδρους 1 και 6. Στους κυλίνδρους αυτούς μπορούν να εγκατασταθούν συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας, καθώς προσφέρουν ευελιξία ως προς τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού.

Στην συνέχεια μελετήσαμε μια δεύτερη πλωτή κατασκευή, η οποία αποτελείται από πέντε κατακόρυφους πλωτούς κυλίνδρους τοποθετημένους σε κυκλική μορφή. Παρόλο που οι κύλινδροι δεν ήταν σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ένα σώμα αλλά και σαν ανεξάρτητα. Η βασική διαφορά βρίσκεται στην κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, όπου όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα, τότε οι μεγαλύτερες τιμές του μέτρου είναι περίπου τρεις με τέσσερις φορές μικρότερες από αυτές της περίπτωσης που οι κύλινδροι είναι ένα σώμα. Η πλωτή κατασκευή θα πρέπει να παραμείνει ακίνητη, διότι εάν αφεθεί ελεύθερη να ταλαντωθεί τότε μειώνονται οι μέγιστες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Κρατώντας ακίνητη την πλωτή κατασκευή μπορούν να εγκατασταθούν συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας σε όλους τους κυλίνδρους.

Η διάταξη των οχτώ κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων που είναι τοποθετημένοι σε περιφέρεια κύκλου είναι ίσως η πιο ενδιαφέρουσα διάταξη όλων. Σκοπός της μελέτης ήταν να ελέγξουμε αν στο εσωτερικό της διάταξης μπορεί να εμφανιστεί ένα «pool», δηλαδή να παρατηρήσουμε μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στο εσωτερικό της λόγω του φαινομένου της παγίδευσης των κυματισμών. Αυτό παρατηρήθηκε όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονταν σαν ένα σώμα. Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών εμφανίζεται πραγματικά σε όλους τους κυλίνδρους της διάταξης ανάλογα με τη διεύθυνση των δυνάμεων διέγερσης, μόνο όταν οι κύλινδροι συμπεριφέρονται σαν ανεξάρτητα σώματα. Η κατανομή του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας επωφελείται από τις κινήσεις των κυλίνδρων, καθώς οι μέγιστες τιμές της είναι μεγαλύτερες έναντι αυτών όταν οι κύλινδροι θεωρούνται ακίνητοι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να εγκατασταθούν έξι συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 3, 4, 5, 6, 7 και 8.

Η τελευταία διάταξη που μελετήσαμε ήταν αυτή των εννιά σε σειρά κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων. Το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών, σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες διατάξεις, δεν ωφελείται από την

αλλαγή στην γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού. Στη συγκεκριμένη διάταξη μπορούν να εγκατασταθούν συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους 3, 4, 5 και 6, καθώς μέχρι την γωνία $\beta = 45^\circ$ παρατηρούνται μεγάλες τιμές του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.

Η παγίδευση των κυματισμών είναι ένα πολύ ιδιαίτερο φαινόμενο, το οποίο χρίζει περαιτέρω διερεύνησης. Όμως, μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διατάξεις που είναι σκοπίμως κατασκευασμένες κατάλληλα ώστε αυτό να εμφανιστεί.

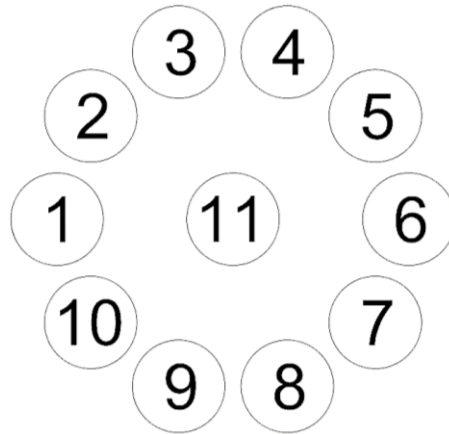
5 Προτάσεις

Ο ανοιχτός κώδικας BEM NEMOH είναι ένα πρόγραμμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υδροδυναμική. Οι προγραμματιστές του με τη βοήθεια της κοινότητας έχουν καταφέρει να διορθώσουν διάφορες υπορουτίνες και “bugs” στον κώδικα, αλλά δεν έχουν αναβαθμίσει τους κώδικες στο Matlab, οι οποίοι χρίζουν βελτίωσης. Πρέπει να γίνει περεταίρω έλεγχος των μέσων δυνάμεων δεύτερης τάξης και με άλλα προγράμματα. Στην παρούσα εργασία έγινε έλεγχος σε απλές γεωμετρίες. Θα ήταν ιδιαιτέρως χρήσιμο σε επόμενο στάδιο να ελεγχθούν όλες οι διατάξεις. Όμως, μπορεί να γραφτεί κάποιος κώδικας ο οποίος να μπορεί να υπολογίζει τις ροπές των δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης. Ακόμη θα μπορούσε να γραφεί αντίστοιχη υπορουτίνα που να υπολογίζει τις δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης και με τη μέθοδο της απ’ ευθείας ολοκλήρωσης (near field method). Επιπρόσθετα, ο τρόπος με τον οποίον κάποιος μπορεί να εκτελέσει μια προσομοίωση στο NEMOH μπορεί να βελτιωθεί κάνοντας χρήση κάποιου UI, το οποίο μπορεί να αποτελέσει βελτίωση του προγράμματος BEM Rosetta. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να συγκριθούν με άλλα προγράμματα, όπως είναι το ANSYS AQWA, AQUAPLUS, Bureau Veritas HYDROSTAR, SHIPMO 3D και MARIN DIFRAC και να ελεγχθεί η εγγύτητα τους. Επιπλέον, μπορεί να ελεγχθεί και η απόδοση των συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας στους κυλίνδρους που προτάθηκαν. Τέλος, οι διατάξεις που μελετήθηκαν περιορίστηκαν στις αποστάσεις των κυλίνδρων, όμως έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εμπλουτιστεί η παρούσα έρευνα αλλάζοντας τις αποστάσεις αυτές ή και τις διαστάσεις των κυλίνδρων για να ελεγχθεί πως επηρεάζεται το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών από τις παραμέτρους αυτές.

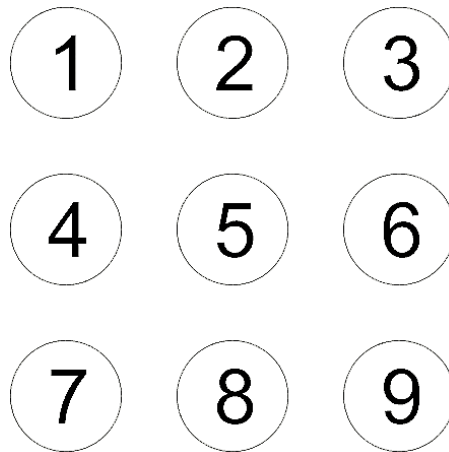
Στις Εικόνες 676-682 προτείνονται διατάξεις που μπορούν να μελετηθούν ως προς το φαινόμενο της παγίδευσης των κυματισμών, κάνοντας παραμετρική ανάλυση των αποστάσεων μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση του φαινομένου στις διατάξεις μπορεί να γίνει στους κυλίνδρους είτε αυτοί είναι πλωτοί είτε πακτωμένοι.



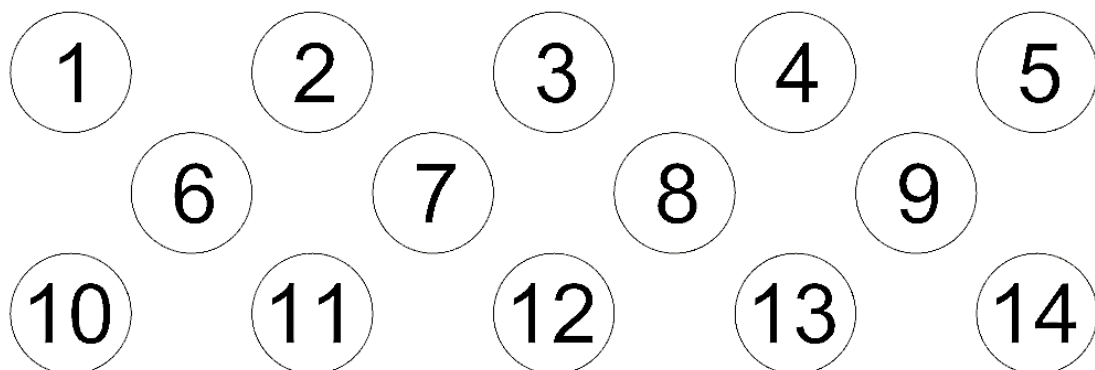
Εικόνα 676: Διάταξη εννέα κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων



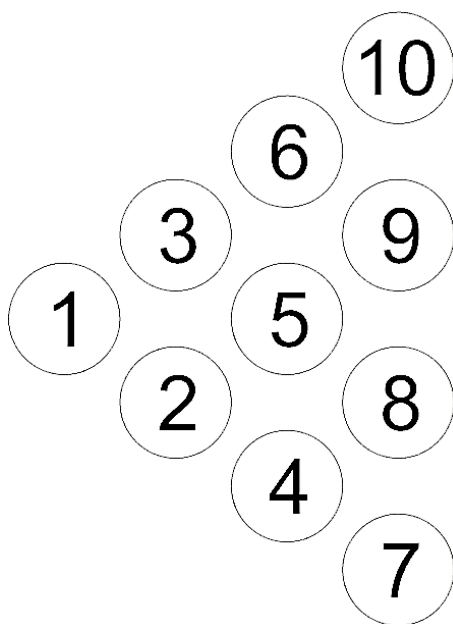
Εικόνα 677: Διάταξη έντεκα κατακόρυφων κυλίνδρων, όπου οι δέκα από τους έντεκα κυλίνδρους βρίσκονται εξωτερικά της διάταξης



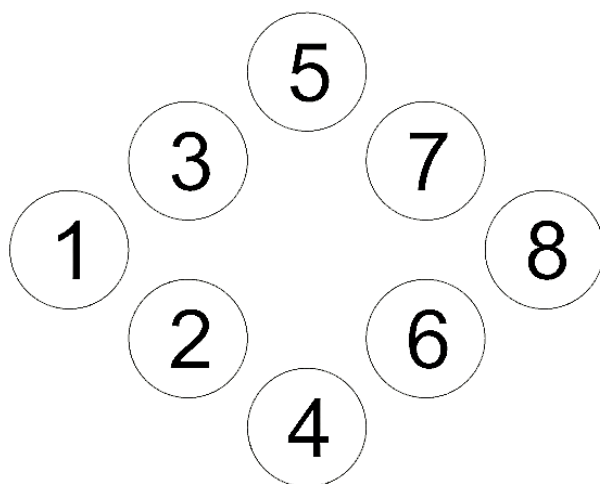
Εικόνα 678: Διάταξη εννέα κατακόρυφων κυλίνδρων που σχηματίζουν τετράγωνο



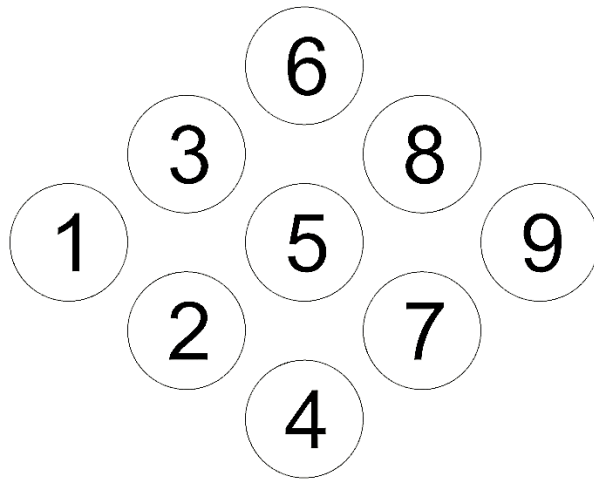
Εικόνα 679: Διάταξη δεκατεσσάρων κατακόρυφων κυλίνδρων



Εικόνα 680: Διάταξη δέκα κατακόρυφων κυλίνδρων σε μορφή πυραμίδας



Εικόνα 681: Διάταξη οχτώ κατακόρυφων κυλίνδρων σε μορφή ρόμβου



Εικόνα 682: Διάταξη εννέα κατακόρυφων κυλίνδρων σε μορφή ρόμβου

Βιβλιογραφία

Έντυπη

- Babarit, A., & Delhommeau, G. (2015). Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH. *In Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015)*. Nantes, France.
- Bai, W., Feng, X., Taylor, E. R., & Ang, K. (2014). Fully nonlinear analysis of near-trapping phenomenon around an array of cylinders. Στο *Applied Ocean Research* (Τόμ. 44, σσ. 71-81). Elsevier.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.11.003>
- Callan, M., Linton, C. M., & Evans, D. V. (1991). Trapped modes in two-dimensional waveguides. Στο *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 229, σσ. 51-64).
doi:[10.1017/S0022112091002938](https://doi.org/10.1017/S0022112091002938)
- Chatjigeorgiou, I. K. (2018). Water wave trapping in a long array of bottomless circular. Στο *Wave motion* (Τόμ. 83, σσ. 25-48). Elsevier.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2018.08.003>
- Chatjigeorgiou, I. K., & Katsardi, V. (2018). Hydrodynamics and near trapping effects in arrays of multiple elliptical cylinders in waves. Στο *Ocean Engineering* (Τόμ. 157, σσ. 121-39). Elsevier.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.045>
- Chatjigeorgiou, I. K., Chatziioannou, K., & Mazarakos, T. (2018). Near trapped modes in long array of truncated circular cylinders. Στο *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. American Society of Civil Engineers.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000495](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000495)
- Clauss, G., Lehmann, E., & Östergaard, C. (1992). *Offshore Structures Volume I*. London: Springer-Verlag.
- Evans, D. V., & Porter, P. (1998). Trapped modes embedded in the continuous spectrum. Στο *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* (Τόμ. 51, σσ. 263-274). doi:[10.1093/qjmam/51.2.263](https://doi.org/10.1093/qjmam/51.2.263).
- Evans, D. V., & Porter, R. (1997a). Trapped modes about multiple cylinders in a channel. Στο *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 339, σσ. 331-356).
doi:<https://doi.org/10.1017/S0022112097005302>
- Evans, D. V., & Porter, R. (2007). Wave-free motions of isolated bodies and the existence of motion-trapped modes. Στο C. U. Press, *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 584, σσ. 225-334). Cambridge University Press.
doi:<https://doi.org/10.1017/S0022112007006957>
- Evans, D., & Porter, R. (1997b). Near-trapping of waves by circular arrays of vertical cylinders. Στο *Applied Ocean Research* (Τόμ. 19, σσ. 83-99). Elsevier.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(97\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(97)00015-1)

- Evans, D., & Porter, R. (1999). Trapping and near-trapping by arrays of cylinders in waves. Στο *Journal of Engineering Mathematics* (Τόμ. 35, σσ. 149-179). Springer. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1004358725444>
- Evans, D., Levitin, M., & Vassiliev, D. (1994). Existence theorems for trapped modes. Στο *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 261, σσ. 21-31). doi:[10.1017/S0022112094000236](https://doi.org/10.1017/S0022112094000236)
- Grice, J., Taylor, P., & Taylor, E. R. (2013). Near-trapping effects for multi-column structures in deterministic and random waves. Στο *Ocean Engineering* (Τόμ. 58, σσ. 60-77). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.09.021>
- He, G., Zhang, Z., Wang, W., Wang, Z., & Jing, P. (2020). Near-trapping on a four-column structure and the reduction of wave drift forces using optimized method. MDPI. doi:<https://doi.org/10.3390/jmse8030174>
- Journée, J., & Massie, W. (2001). *Offshore Hydromechanics*. Delft: TU Delft.
- Karadeniz, H. (2013). *Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures*. London: Springer.
- Lewis, E. V. (1989). *Principles of Naval Architecture Volume III*. Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Maniar, H., & Newman, J. (1997). Wave diffraction by a long array of cylinders. Στο *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 339, σσ. 309-330). Cambridge: Cambridge University Press. doi:[10.1017/S0022112097005296](https://doi.org/10.1017/S0022112097005296)
- Mazarakos, T. P. (2010). *Second Order Wave Loading and Wave Drift Damping on Floating Structures*. National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering. Athens: National Technical University of Athens.
- Mazarakos, T. P., & Mavrakos, S. A. (2013). Wave–current interaction on a vertical truncated cylinder floating in finite-depth waters. Στο *Journal of Engineering for the Maritime Environment*. Institution of Mechanical Engineers. doi:[10.1177/1475090212454096](https://doi.org/10.1177/1475090212454096)
- Mazarakos, T. P., & Mavrakos, S. A. (2020). Mean second-order wave drift forces contour of a floating structure concept for wind energy exploitation. Στο *Developments in Renewable Energies Offshore* (σσ. 324-335). CRS Press. doi:[10.1201/9781003134572-38](https://doi.org/10.1201/9781003134572-38)
- Mazarakos, T. P., & Mazarakos, K. P. (2018, Δεκέμβριος). First order Hydrodynamic interactions in floating cylinder arrays. The direct matrix inversion method. Στο *35th Annual Symposium on Mathematics*. Athens: Hellenic Mathematical Society.
- Mazarakos, T. P., & Mazarakos, K. P. (2019, November). Second order Hydrodynamic interactions in floating cylinder arrays. The direct matrix inversion method. Larissa: Hellenic Mathematical Society.

- Mazarakos, T. P., Konispoliatis, D. N., & Mavrakos, S. A. (2018). Loads on the brace system of an offshore floating structure. *IMDC 2018: 13th INTERNATIONAL MARINE DESIGN CONFERENCE*. Helsinki, Finland.
- Newman, J. (2017). *Marine Hydrodynamics*. Cambridge: MIT.
- Newman, J. N. (2017). Trapped-wave modes of bodies in channels. Στο *Journal of Fluid Mechanics* (Τόμ. 812, σσ. 178-198). doi:10.1017/jfm.2016.777
- Ning, D., He, Z., Gou, Y., & Göteman, M. (2020, Μάϊος 5). Near trapping effect on wave-power extraction by linear periodic arrays. Στο *Sustainability* (Τόμ. 12). MDPI. doi: <https://doi.org/10.3390/su12010029>
- Porter, R., & Evans, D. V. (1998). The trapping of surface waves by multiple submerged horizontal cylinders. Στο *Journal of Engineering Mathematics* (Τόμ. 34, σσ. 417-433). doi:<https://doi.org/10.1023/A:1004361929350>
- Siddorn, P., & Taylor, E. R. (2008). Diffraction and independent radiation by an array of floating cylinders. Στο *Ocean Engineering* (Τόμ. 35, σσ. 1289-1303). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.06.003>
- Swan, C., Taylor, P., & Langen, H. (1997). Observations of wave-structure interaction for a multi-legged concrete platform. Στο *Applied Ocean Research* (Τόμ. 19, σσ. 309-327). Elsevier. doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(97\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(97)00036-9)
- Ursell, F. (1951). Trapping modes in the theory of surface waves. Στο *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* (Τόμ. 47, σσ. 347-358). doi:10.1017/S0305004100026700
- Walker, D., & Taylor, E. R. (2005). Wave diffraction from linear arrays of cylinders. Στο *Ocean Engineering* (Τόμ. 32, σσ. 2053-2078). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.04.002>
- Walker, D., Taylor, E. R., Taylor, P., & Zang, J. (2008). Wave diffraction and near-trapping by a multi-column gravity based structure. Στο *Ocean Engineering* (Τόμ. 35, σσ. 201-229). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.08.005>
- Wang, C., & Wu, G. (2007). Time domain analysis of second-order wave diffraction by an array of vertical cylinders. Στο *Journal of Fluids and Structures* (Τόμ. 23, σσ. 605-631). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.10.008>
- Wang, Z., He, G., Zhang, Z., & Meng, Y. (2018). Viscous-Flow-Based Analysis of Wave Near-Trapped in a Four-Cylinder Structure. Στο *Journal of Marine Science and Application* (Τόμ. 17, σσ. 371-379). doi:<https://doi.org/10.1007/s11804-018-0047-z>
- Wolgamot, H. A., Taylor, E. R., & Taylor, P. H. (2015). Radiation, trapping and near-trapping in arrays of floating truncated cylinders. Στο *Journal of Engineering Mathematics* (Τόμ. 91, σσ. 17-35). Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/s10665-014-9734-1>

Xiros , N., & Dhanak, M. R. (2016). *Springer Handbook of Ocean Engineering*. New York: Springer.

Διαδικτυακή

- BEMRosetta. (2021, Μαΐου 17). Ανάκτηση από https://github.com/BEMRosetta/BEMRosetta/tree/master/BEMRosetta_cl
- Delhommeau, G. (2021, Μάιος 25). *Les Problemes de Diffraction-Radiation et de Resistance de Vagues: Etude Theorique et Resolution Numerique par la Methode des Singularites*,. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Laboratoire d'Hydrodynamique Navale. Nantes: Ecole Nationale Supérieure de Mécanique. Ανάκτηση από TU Delft: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:ada3e6d4-2366-4cec-b094-3981ca73ccd0>
- Delhommeau, G. (2021, Ιούνιος 2). *Seakeeping codes AQUADYN and AQUAPLUS*. Ανάκτηση από LHEEA: <https://lheea.ec-nantes.fr/valorisation/logiciels-et-brevets/nemoh-theory>
- Haskind, M. D. (1957). The exciting forces and wetting of ships in waves. Στο *Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk* (Τόμ. 7, σσ. 65-79). Izvestia Akademii Nauk SSSR. Ανάκτηση από <https://dome.mit.edu/handle/1721.3/51307>
- Kim, M. H. (1993). The use of Kochin functions for the second-order wave-body interaction. Ανάκτηση από International Workshop on Water Waves and Floating Bodies: http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb08/iwwwfb08_14.pdf
- Kling, K. A. (2021, Ιούνιος 1). *Dynamic Analysis of Single-and Multi-Module Platforms in Waves*. Ανάκτηση από https://fau.digital.flvc.org/islandora/object/fau%3A10249/datastream/OBJ/view/Dynamic_analysis_of_single_and_multi-module_platforms_in_waves.pdf
- Mazarakos, T. P. (2020). *Design of Offshore Structures*. Ανάκτηση από <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=NA191&openDir=/>
- Mazarakos, T. P. (2020). *Dynamic and Vibrations of Naval Structures*. Ανάκτηση από <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=NA253&openDir=/5f78534fxabR/5f79e3dcW8Xj>
- Newman, J. N. (1967). The drift forces and moment on ships in waves. Στο *Journal of Ship Research* (σσ. 51-60). Society of Naval Architects and Marine Engineers. Ανάκτηση από <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5c490ca2-f67c-44d3-ab6f-aa1069ecaefd>
- Rhinoceros. (2021, Μαΐου 10). *Rhinoceros*. Ανάκτηση από <https://www.rhino3d.com/>

Παραρτήματα

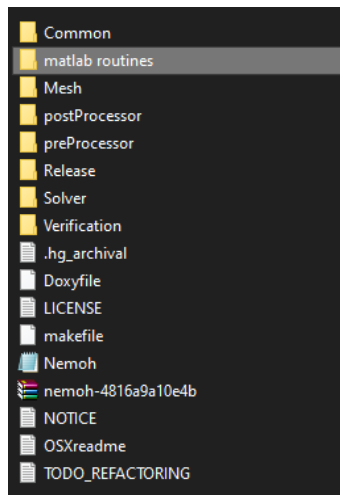
Παράρτημα Α

Εγχειρίδιο χρήσης ανοιχτού κώδικα BEM NEMOH

A.1 Εγκατάσταση και βασικές οδηγίες

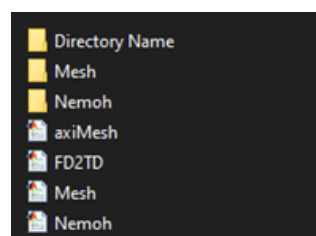
Ο ανοιχτός κώδικας NEMOH αξιοποιεί την μέθοδο των συνοριακών στοιχείων, γνωστή ως Boundary Element Method (BEM), για τον υπολογισμό των φορτίσεων που ασκούνται μια πλωτή κατασκευή λόγω των θαλάσσιων κυματισμών. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από το ερευνητικό εργαστήριο [LHEEA](#), που βρίσκεται στη Γαλλία, και μπορεί να εγκατασταθεί ακολουθώντας τις οδηγίες της [ιστοσελίδας](#). Η εγγραφή στο community του NEMOH, πέρα από απαραίτητη για την εγκατάσταση του, είναι πολύ σημαντική, καθώς ο χρήστης μπορεί να βρει επιπλέον κώδικες και λύσεις για τα προβλήματα που θα προκύψουν.

Έχοντας εγκαταστήσει και αποσυμπιέσει το φάκελο που περιέχει τον κώδικα NEMOH. Το πρώτο βήμα είναι να εντοπίσει τον φάκελο «matlab routines», όπως φαίνεται στην Εικόνα A.1, και να αντιγράψει το περιεχόμενο του σε έναν ξεχωριστό φάκελο, με όνομα «Working Folder», στον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να φτιάξει ένα φάκελο, με όνομα «Directory Name», που θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον κώδικα. Τέλος, ο χρήστης πρέπει να γράψει ένα αρχείο script στο MATLAB, όπου θα ορίζει τις κατάλληλες μεταβλητές εισόδου που χρειάζονται για να δουλέψουν οι κώδικες του NEMOH. Στην Εικόνα A.2 παρουσιάζεται το περιεχόμενο του «Working Folder».



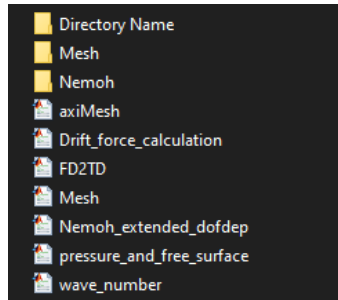
Εικόνα A.1: Εντοπισμός του φακέλου «matlab routines»

Οι κώδικες δεν ενεργοποιούν όλες τις λειτουργίες του NEMOH. Από το [Toolbox](#) του NEMOH ο χρήστης πρέπει να κατεβάσει το αρχείο που υπολογίζει τις [Drift Forces](#). Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τους κώδικες «Nemoh_extended_dofdep.m» και «drift_force_calculation.m», οι οποίοι θα πρέπει να ενταχθούν στον φάκελο «Working Folder». Η function «Nemoh_extended_dofdep.m» λόγω το ότι εκτελεί περισσότερες λειτουργίες από τη function «Nemoh.m», θα λάβει τη θέση της στο φάκελο (δηλαδή θα την αντικαταστήσει).



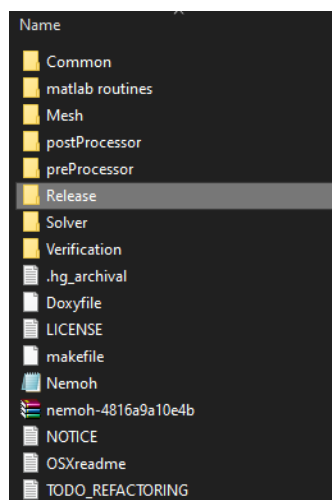
Εικόνα A.2: Το περιεχόμενο του φακέλου «Working Folder»

Οι δύο επόμενοι κώδικες που χρειάζονται παρέχονται από το community του NEMOH. Ο πρώτος κώδικας ονομάζεται «wave_number.m» και μπορεί να βρεθεί στη συζήτηση με θέμα «[Kochin Function and Drift Forces](#)». Ο δεύτερος κώδικας ονομάζεται «pressure_and_free_surface.m» και μπορεί να βρεθεί στην συζήτηση με θέμα «[Matlab routine for using pressure, free surface elevation and kochin functions output files: flags in Nemoh.cal + reading](#)». Στην Εικόνα A.3 φαίνεται η τελική μορφή που θα έχει το περιεχόμενο του φακέλου «Working Folder».



Εικόνα Α.3: Η τελική μορφή του περιεχομένου του «Working Folder»

Ο φάκελος «Working Folder» είναι ένας από τους δύο τρόπους-φακέλους που μπορεί να εκτελεστεί ο ανοιχτός κώδικας NEMOH. Η διαδικασία που οφείλει να κάνει ο χρήστης για να φτιάξει το δεύτερο φάκελο, μοιάζει πολύ με αυτή του «Working Folder». Αρχικά, στον αποσυμπίεσμένο φάκελο που περιέχει τον κώδικα του NEMOH, ο χρήστης πρέπει να εντοπίσει το φάκελο «Release», όπως φαίνεται στην Εικόνα Α.4, και να αντιγράψει το περιεχόμενο του σε ένα ξεχωριστό φάκελο, με όνομα «Exe Folder».



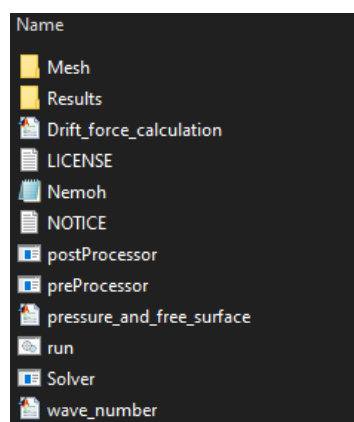
Εικόνα Α.4: Εντοπισμός του φακέλου «Release»

Όπως και στην περίπτωση του «Working Folder», χρειάζονται κάποιοι επιπλέον κώδικες που ενεργοποιούν όλες τις δυνατότητες του NEMOH. Οι κώδικες αυτοί είναι οι «pressure_and_free_surface.m», «drift_force_calculation.m» και «wave_number.m», οι οποίοι ανακτήθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε για τον «Working Folder». Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να κάνει download το παράδειγμα του [κατακόρυφου κυλίνδρου](#), έτσι ώστε να αντιγράψει το αρχείο «Nemoh.cal» στο φάκελο «Exe Folder». Τέλος, μέσα στον «Exe Folder» δημιουργούνται οι δύο φάκελοι «Mesh» και «Results», μέσα στους οποίους θα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τον κώδικα. Για την ταχύτερη

χρήση των αρχείων exe ο χρήστης μπορεί να φτιάξει ένα αρχείο που να τρέχει τα αρχεία. Τα βήματα της διαδικασίας είναι:

- Πληκτρολογούμε τις ακόλουθες εντολές σε ένα αρχείο txt:
START/W preProcessor.exe
START/W Solver.exe
START/W postProcessor.exe
- Αποθήκευση του αρχείου ως «run.bat»

Με αυτό τον τρόπο κάθε φορά που ο χρήστης επιθυμεί να τρέξει τα αρχεία exe, το μόνο που χρειάζεται να κάνει είναι να πατήσει διπλό κλικ στο «run.bat». Στην Εικόνα A.5 φαίνεται η τελική μορφή του φακέλου «Exe Folder».



Εικόνα A.5: Η τελική μορφή του φακέλου «Exe Folder»

A.2 Χρήση των κωδίκων MATLAB που παρέχει το πρόγραμμα BEM NEMOH

Οι κώδικες που εμπεριέχονται στο φάκελο «Working Folder» αποτελούν τον πιο εύκολο τρόπο εκμάθησης και εξοικείωσης του χρήστη με το πρόγραμμα NEMOH. Μόλις ο χρήστης αποκτήσει κάποια εμπειρία με τον κώδικα τότε μπορεί να προχωρήσει στο φάκελο «Exe Folder» και να μελετήσει περίπλοκες γεωμετρίες.

A.2.1 Πλέγμα ενός κυλίνδρου

Στην παρούσα εργασία το σώμα που μελετάται είναι αυτό του κυλίνδρου και η κατασκευή του πλέγματός του απαιτεί μεγάλη προσοχή, διότι ο χρήστης πρέπει να περιγράψει μόνο τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος. Ο κύλινδρος μπορεί να βρεθεί βυθισμένος στο νερό με τέσσερεις διαφορετικούς τρόπους. Αυτοί είναι:

- 1) Ένα τμήμα του κυλίνδρου να είναι βυθισμένο
- 2) Ο κύλινδρος να είναι πακτωμένος
- 3) Ο κύλινδρος να είναι πλήρως βυθισμένος ως την επιφάνεια του νερού

- 4) Ο κύλινδρος είναι πακτωμένος στον πυθμένα, αλλά ένα τμήμα του να βρίσκεται έξω από το νερό

Στην πρώτη περίπτωση το πλέγμα που πρέπει να δημιουργήσει ο χρήστης αφορά μόνο τα τοιχώματα και τον πυθμένα του κυλίνδρου, καθώς αυτά μόνο έρχονται σε επαφή με το νερό. Στη δεύτερη περίπτωση η βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου είναι τα τοιχώματα του και το πάνω κομμάτι του. Στην τρίτη περίπτωση, η βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου είναι όλος ο κύλινδρος, ενώ στην τέταρτη περίπτωση η βρεχόμενη επιφάνεια είναι μόνο τα τοιχώματα του.

Στον φάκελο «Working Folder», ο χρήστης μπορεί να εντοπίσει τη function «axiMesh.m», την οποία θα αξιοποιήσει για να δημιουργήσει το πλέγμα του κυλίνδρου. Η συγκεκριμένη function απαιτεί τις ακόλουθες μεταβλητές:

- 1) n : Τον αριθμό των σημείων για τη διακριτοποίηση
- 2) r : Οι ακτινικές συντεταγμένες
- 3) z : Οι κατακόρυφες συντεταγμένες

Πριν καλέσει τη function «axiMesh.m», ο χρήστης χρειάζεται να ορίσει πρώτα έναν αριθμό σημείων που να περιγράφουν το προφίλ του σώματος ως προς το επίπεδο xOz , όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα σημεία αυτά, τα οποία ονομάζονται κόμβοι, εισάγονται στη μεταβλητή εισόδου n και αντίστοιχα οι συντεταγμένες τους εισάγονται στις μεταβλητές r, z . Η μεταβλητή εισόδου r ορίζεται ως διάνυσμα, όπου κάθε στοιχείο του διανύσματος αντιστοιχεί στις συντεταγμένες που έχει κάθε κόμβος ως προς τον οριζόντιο άξονα x . Παρόμοια ορίζεται και η μεταβλητή εισόδου z , με τη μόνη διαφορά ότι κάθε στοιχείο αντιστοιχεί στις συντεταγμένες που έχει κάθε κόμβος ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Στην Εικόνα Α.6 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον ορίζουμε τις μεταβλητές εισόδου για ένα κύλινδρο του οποίου ένα τμήμα βρίσκεται εντός του νερού.

```
% Create Mesh
clc
clear
close all

nBodies=1;

n=3;
R=10; %Radius (m)
T=10; %Draft (m)

%tX,tY,tZ να βρω πως τα ορίζω

r=[R R 0];
z=[0 -T -T];
%Vertical position of CG: C-(T+C)*0.5
[Mass, Inertia, KH, XB, YB, ZB]=axiMesh(r, z, n);

Mesh_outputs=struct('M', Mass, 'KH', KH, 'nBodies', nBodies);
save('Results', 'Mesh_outputs')
```

Εικόνα Α.6: Παράδειγμα ορισμού μεταβλητών εισόδου για έναν κύλινδρο

Ο αριθμός των κόμβων παίρνει τιμές ανάλογα με την περίπτωση που βρίσκεται το σώμα στο νερό. Δηλαδή:

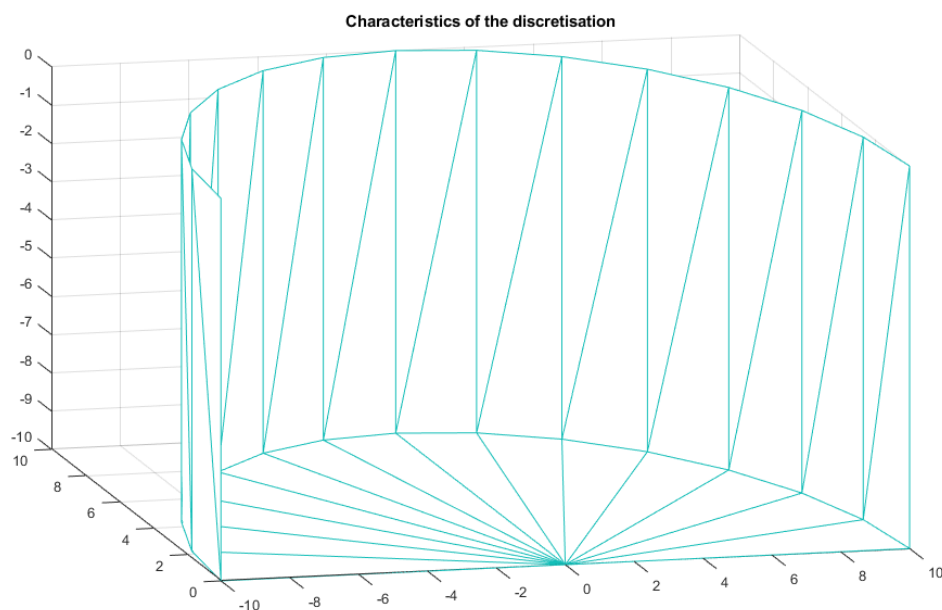
- $n = 2$: Αντιστοιχεί στην 3^η περίπτωση
- $n = 3$: Αντιστοιχεί στην 1^η και τη 2^η περίπτωση
- $n = 4$: Αντιστοιχεί στην 4^η περίπτωση

Η function «axiMesh.m», θεωρεί ότι η ελεύθερη επιφάνεια βρίσκεται στο $z = 0$, με αποτέλεσμα ότι βρίσκεται πάνω από αυτή την τιμή να μη λαμβάνεται υπόψιν.

Εφόσον έχουν οριστεί σωστά οι μεταβολές εισόδου, ο χρήστης μπορεί να καλέσει τη function. Μόλις πατήσει το «Run», παρατηρεί ότι εμφανίζεται το ακόλουθο μήνυμα στο Command Window:

Enter number of points for angular discretization :

Ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει πόσα «αντίγραφα» του προφίλ που όρισε θέλει να φτιάξει. Τα «αντίγραφα» θα κατανεμηθούν κυκλικά γύρω από το κέντρο του κυλίνδρου, με το τελευταίο «αντίγραφο» να είναι συμμετρικό με αυτό που όρισε ο χρήστης. Ο αριθμός των σημείων αυτών είναι μεταξύ 10-20. Πατώντας το Enter το Matlab θα εμφανίσει ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση (Εικόνα A.7).



Εικόνα A.7: Παράδειγμα διακριτοποίησης

Πέρα από το διάγραμμα, όμως, εμφανίζεται και το ακόλουθο μήνυμα:

Directory name for storage of results :

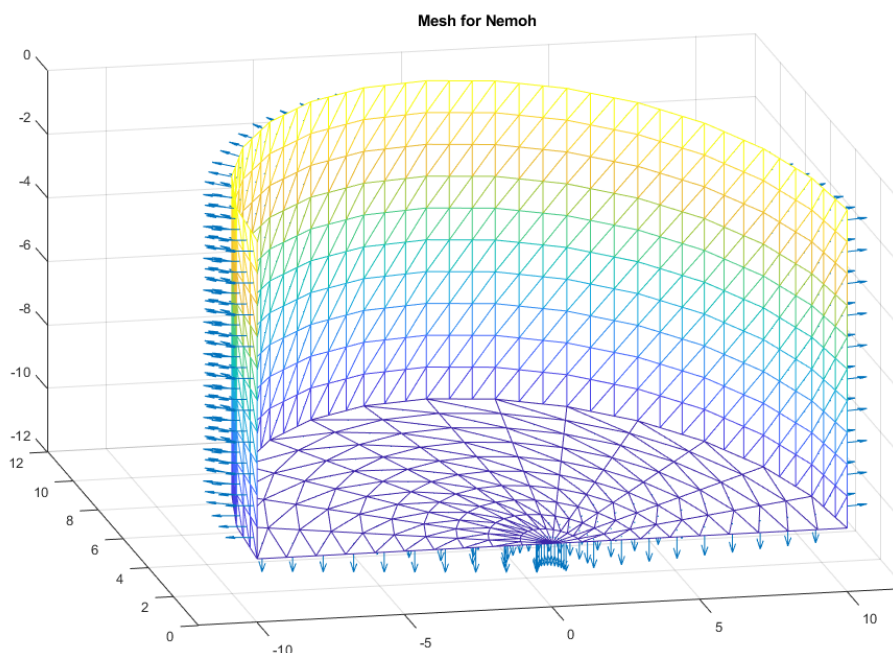
Ο χρήστης πρέπει να γράψει το ακόλουθο μήνυμα: *'Directory Name'*. Η function θα αποθηκεύσει εκεί τα αποτελέσματα που θα προκύψουν. Στη συνέχεια, ζητείται η κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους του κυλίνδρου:

Vertical position of gravity center :

Η τιμή που θα πρέπει να έχει, εξαρτάται αποκλειστικά από τις συντεταγμένες του σημείου. Δηλαδή, αν ένας κύλινδρος ύψους 80 μέτρων εκ των οποίων τα 50 μέτρα είναι βυθισμένα στο νερό, τότε το κέντρο βάρους του είναι στην θέση $z = -10$. Τέλος, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει τον αριθμό των panels.

Target for number of panels :

Ο αριθμός των panels θα πρέπει να ξεκινήσει από μικρές τιμές, για παράδειγμα 300, και να αυξάνονται, μέχρι να βρεθεί ο ιδανικός αριθμός. Ο ιδανικός αυτός αριθμός, είναι εκείνος στον οποίον όσο ο χρήστης αυξάνει τα panels ο κώδικας σταματάει σε έναν συγκεκριμένο αριθμό ή δεν παρατηρεί αλλαγή στα αποτελέσματα. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι τα αποτελέσματα συγκλίνουν, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται περαιτέρω αύξηση των panels. Το πλέγμα που θα προκύψει είναι ένας συνδυασμός τριγωνικών panels μορφοποιημένα σαν τετράεδρα panels, όπως φαίνεται στην Εικόνα A.8.



Εικόνα A.8: Πλέγμα κυλίνδρου

Το τελικό αποτέλεσμα που παρατηρεί ο χρήστης είναι το πλέγμα του βυθισμένου τμήματος του κυλίνδρου, με τα βέλη να δείχνουν προς τα έξω. Αν έστω και ένα βέλος έδειχνε προς το κέντρο του κυλίνδρου, τότε το πλέγμα που δημιούργησε ο χρήστης έχει κενά και επιτρέπει την είσοδο του νερού στο σώμα.

Η function «axiMesh.m», πέρα από τη δημιουργία του πλέγματος δίνει και κάποιες τιμές. Οι τιμές αυτές είναι:

- *XB, YB, ZB*: Οι συντεταγμένες του κέντρου άνωσης
- *KH*: Η υδροστατική σταθερά επαναφοράς για κάθε βαθμό ελευθερίας
- *Inertia*: Η ροπή αδράνειας για κάθε βαθμό ελευθερίας
- *Mass*: Η μάζα του βυθισμένου σώματος

A.2.2 Αξιοποίηση των ικανοτήτων του προγράμματος BEM NEMOH

Στην παράγραφο A.1 ο χρήστης χρειάστηκε να διαγράψει τη function «Nemoh.m», διότι την αντικατέστησε με την ενημερωμένη function «Nemoh_extended_dofdep.m». Ένας από τους βασικούς λόγους είναι ο περιορισμός των υπολογισμών που κάνει σε σύγκριση με την ενημερωμένη έκδοση. Η νέα αυτή έκδοση μπορεί να εξάγει επιπλέον αποτελέσματα, που θα χρησιμεύσουν στον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, την κατανομή της πίεσης στο σώμα και τον υπολογισμό των μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης (mean second order forces). Ο χρήστης χρειάζεται να ορίσει τις ακόλουθες μεταβλητές εισόδου για να εκτελέσει τη function. Αυτές είναι:

- 1) *w*: Το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας σε *rad/s*
- 2) *dir*: Η γωνία πρόσπτωσης του κύματος σε μοίρες
- 3) *depth*: Το βάθος του νερού (Για βαθύ νερό είναι ίσο με 0)
- 4) *added_options*: «Ξεκλειδώνει» τις επιπλέον ικανότητες του NEMOH

Η νέα μεταβλητή εισόδου είναι μια μεταβλητή τύπου *struct*, στην οποία περιλαμβάνονται οι ακόλουθοι όροι:

- *kochin_number_of_angles*: Ο αριθμός των γωνιών σε μοίρες για τον υπολογισμό των συναρτήσεων Kochin
- *kochin_angle_min*: Η μικρότερη γωνία
- *kochin_angle_max*: Η μεγαλύτερη γωνία
- *create_pressure_file*: Ο χρήστης ορίζει είτε 0, αν δεν θέλει να αποθηκεύσει τις πιέσεις στο σώμα, είτε 1, αν θέλει
- *FS_numb_of_points* = [*X Y*] Ο αριθμός των σημείων ως προς τον άξονα *X* και *Y*
- *FS_dimensions* = [*length(X)m length(X)m*]: Οι διαστάσεις του ορθογωνίου για την οπτικοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας όταν συναντήσει το σώμα
- *do_irf*: Ο χρήστης ορίζει είτε 0, αν θέλει να μην γίνει υπολογισμός του IRF, είτε 1, αν θέλει
- *time_step*: Το βήμα του χρόνου για το IRF
- *duration*: Το διάνυσμα του χρόνου για το IRF

Ο τρόπος με τον οποίον γράφεται η μεταβλητή εισόδου *added options* φαίνεται στο παρακάτω τυχαίο παράδειγμα:

```

added_options = struct('kochin_number_of_angles', 361, 'kochin_angle_min', 0,
'kochin_angle_max', 360, 'create_pressure_file', 1, 'FS_numb_of_points', [200 200],
FS_dimensions', [20 20], 'do_irf', 0, 'time_step', 0.5, 'duration', 1);

```

Επειδή κάνουμε χρήση της σχέσης (57), οι γωνίες των συναρτήσεων Kochin λαμβάνουν τιμές από 0° έως 360° και ο συνολικός αριθμός τους πρέπει να είναι 361. Επομένως, στη μεταβλητή εισόδου οι γωνίες των συναρτήσεων Kochin είναι σταθερές μεταβλητές και δεν τις αλλάζουμε.

A.2.3 Κώδικας υπολογισμού Τελεστή Πλάτους Απόκρισης (RAO)

Ο υπολογισμός των RAO's των κινήσεων είναι η αμέσως επόμενη κίνηση που πρέπει να κάνει ο χρήστης, διότι αυτοί είναι απαραίτητοι για την περιγραφή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και τον υπολογισμό των μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης. Το NEMOH δεν παρέχει κάποια function για τον υπολογισμό τους, με αποτέλεσμα ο χρήστης να χρειάζεται να γράψει το δικό του κώδικα. Η εξίσωση που θα πρέπει ο χρήστης να αποτυπώσει σε μορφή κώδικα είναι αυτή του Cummins:

$$X(\omega) = RAO = \frac{Fe(\omega)}{-\omega^2 \cdot (M + A(\omega)) - i \cdot \omega \cdot B(\omega) + K_H}$$

Από την παραπάνω εξίσωση οι μεταβλητές εισόδου που χρειάζονται είναι οι ακόλουθες:

- *K_H*: Υδροστατική σταθερά επαναφοράς για κάθε βαθμό ελευθερίας
- *Mass*: Μάζα του σώματος
- *w*: Πίνακας συχνοτήτων
- *Fe*: Πίνακας δυνάμεων διέγερσης
- *A*: Πίνακας συντελεστών πρόσθετης μάζας
- *B*: Πίνακας συντελεστών απόσβεσης

Οι μεταβλητές αυτές είναι γνωστές, καθώς υπολογίστηκαν από τις functions «axiMesh.m» και «Nemoh_extended_dofdep.m». Στην Εικόνα A.9 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον περιγράφεται η εξίσωση για ένα ή και περισσότερα σώματα:

```

clc
clear
load Results

dof=Nemoh_sol.dof;
M=Nemoh_sol.M;
KH = Nemoh_sol.KH;
w=Nemoh_sol.w;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;

for n=1:nBodies
    A=Bodies_sol(n).A;
    B=Bodies_sol(n).B;
    Fe=Bodies_sol(n).Fe;
    for k=1:length(w)
        for p=1:length(dof)
            RAO{1,n}(k,p)=(Fe(k,p))/(-M(n,1)+A(p,p,k))*(w(k))^2-li*w(k)*(B(p,p,k))+KH(p,p);
            % RAO{1,n}(k,p)=(Fe(k,p))/(-M(n,1)+A(p,p,k))*(w(k))^2-li*w(k)*(B(p,p,k))+KH(n,p,p); for 2 or more bodies
        end
    end
end
end

```

Εικόνα Α.9: Υπολογισμός των Τελεστών Πλάτους Απόκρισης (RAO) των κινήσεων

A.2.4 Υπολογισμός μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης

Οι δυνάμεις Drift που ασκούνται στον κύλινδρο μπορούν να υπολογιστούν από την function «drift_force_calculation.m», με την προϋπόθεση ότι ο χρήστης έχει υπολογίσει τα RAO's των κινήσεων. Η συγκεκριμένη function απαιτεί τις ακόλουθες μεταβλητές εισόδου για να τρέξει:

- 1) *RAO*: Πίνακας που περιλαμβάνει τα RAO's των κινήσεων που υπολογίστηκαν
- 2) *w*: Ο πίνακας των γωνιακών ταχυτήτων (rad/s)
- 3) *depth*: το βάθος της περιοχής εγκατάστασης (m)
- 4) *dir*: Κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος (degrees)
- 5) *plotflag*: 1 αν ο χρήστης επιθυμεί να δει τις δυνάμεις σε διάγραμμα ή 0 αν δεν επιθυμεί
- 6) *amp1_wave*: το πλάτος του κύματος (m)
- 7) *nBodies*: ο αριθμός των σωμάτων
- 8) *nb_DOF*: ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας
- 9) *rep*: Ο φάκελος που περιέχει τα αποτελέσματα ('Directory Name')

Αφού ορίσει ο χρήστης τις μεταβλητές εισόδου, τότε μπορεί να καλέσει τη function. Τα αποτελέσματα που δίνει η function είναι τα ακόλουθα:

- 1) *Fdrift_x*: Οι τιμές των δυνάμεων ως προς τον άξονα x
- 2) *Fdrift_y*: Οι τιμές των δυνάμεων ως προς τον άξονα y
- 3) Διάγραμμα με την κατανομή των δυνάμεων, αν το έχει επιλέξει ο χρήστης

Στην Εικόνα Α.10 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίον καλεί ο χρήστης τη function.

```

clear
clc
load Results

nb_DoF=6;
depth=RAO_sol.depth ;% !!!! NEED TO BE AJUSTED !
% dir=RAO_sol.dir;
dir=0;
RAO=RAO_sol.RAO;
w=RAO_sol.w;
% RAO=zeros(length(w),nb_DoF); % If radiation is neglected
ampl_wave=1;
nBodies=1;
plotflag=1;
rep='Cylinder';
rho=1025;
[Fdrift_x,Fdrift_y,H,theta]=Drift_force_calculation(depth,w,RAO,ampl_wave,dir,nBodies,nb_DoF,plotflag,rep,rho);
Fdrift=Fdrift_x;

```

Εικόνα A.10: Ορισμός μεταβλητών εισόδου

A.2.5 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή της πίεσης στο σώμα

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς και η κατανομή της πίεσης γίνονται από το script «pressure_and_free_surface.m». Οι δύο βασικές προϋποθέσεις για να εκτελεστούν οι δύο κώδικες, είναι ο χρήστης να έχει εκτελέσει τη function «Nemoh_extended_dofder.m», με ενεργοποιημένες τις επιπλέον λειτουργίες, και να έχει υπολογίσει τα RAO's των κινήσεων.

A.2.6 Υπολογισμοί άλλων μεταβλητών

Οι μόνες functions που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί είναι οι «wave_number.m» και «FD2TD.m». Η function «wave_number.m» υπολογίζει τον κυματαριθμό για κάθε συχνότητα και είναι απαραίτητη για να μπορέσει να δουλέψει η function «drift_force_calculation.m». Οι μεταβλητές εισόδου που απαιτεί η function για να την εκτελέσει ο χρήστης:

- w : Πίνακας γωνιακών ταχυτήτων σε (r/s)
- $depth$: Το βάθος της περιοχής εγκατάστασης (m)

Αφού ορίσει τις μεταβλητές εισόδου, ο χρήστης πρέπει να υπολογίσει τη συχνότητα για κάθε γωνιακή ταχύτητα, κάνοντας χρήση της γνωστής σχέσης:

$$f = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$$

Στην Εικόνα A.11 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίον ο χρήστης μπορεί να καλέσει τη function. Ο κυματαριθμός συμβολίζεται ως k_{wn} .

```

clear
clc
load Results

w=RAO_sol.w;
depth=RAO_sol.depth; %if it's known
% depth=100;
freq=RAO_sol.freq; %if it's known
%freq=w/(2*pi);

k_wn = wave_number(freq, depth);

```

Εικόνα A.11: Υπολογισμός κυματαριθμού

Η function «FD2TD.m» υπολογίζει την πρόσθετη μάζα και retardation function. Οι μεταβλητές εισόδου που απαιτούνται για να καλέσει ο χρήστης τη function είναι οι ακόλουθες:

- w : Πίνακας γωνιακών συχνοτήτων
- T : Διάνυσμα χρόνου
- A : Πίνακας συντελεστών πρόσθετης μάζας
- B : Πίνακας συντελεστών απόσβεσης

Τα αποτελέσματα που δίνει η function συμβολίζονται ως:

- K : Πίνακας retardation function
- Mu : Πίνακας πρόσθετης μάζας

Στην Εικόνα A.12 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ο χρήστης υπολογίζει τη retardation function και την πρόσθετη μάζα για πολλά σώματα.

```

clear
clc
load Results
T=[1:10];
dof=Nemoh_sol.dof;
w=Nemoh_sol.w;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;

for n=1:nBodies
    A1=Bodies_sol(n).A;
    B1=Bodies_sol(n).B;
    for ii=(1+(n-1)*length(dof)):(n*length(dof))
        for jj=1:length(w)
            A2(jj,1)=A1(ii,ii,jj);
            A=A2;
            B2(jj,1)=B1(ii,ii,jj);
            B=B2;
        end
        [K, Mu]=FD2TD(w, A, B, T);
    end
    K1{1,nBodies}=K;
    K=K1;
    Mu1{1,nBodies}=Mu;
    Mu=Mu1;
end

```

Εικόνα A.12: Υπολογισμός retardation function και πρόσθετης μάζας για πολλά σώματα

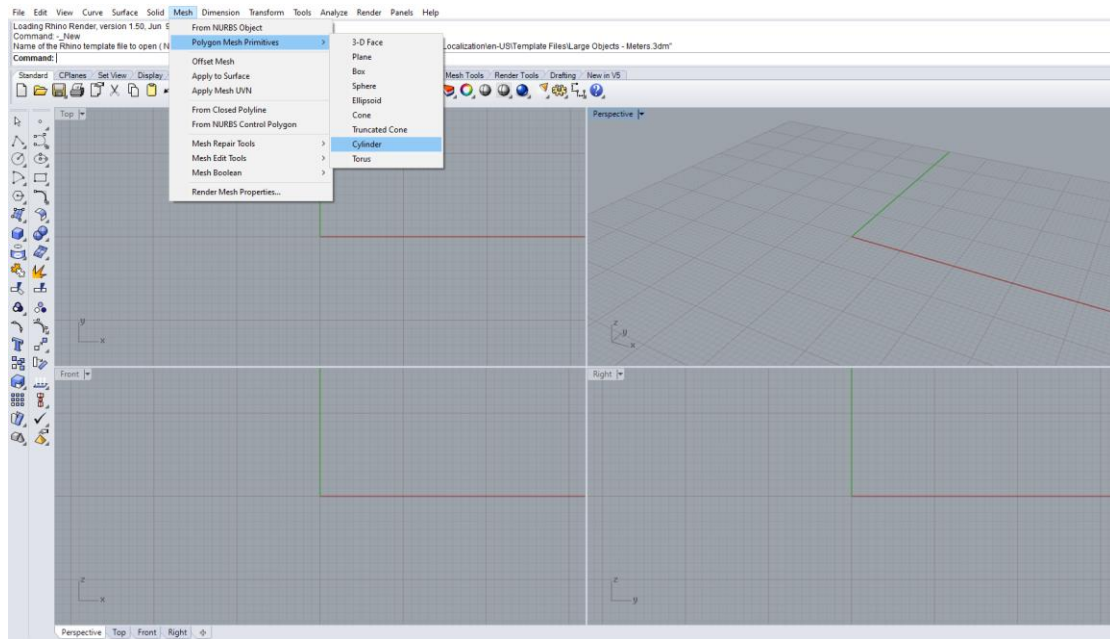
A.3 Χρήση των αρχείων .exe

Οι functions που παρέχει το NEMOH περιορίζονται αρκετά στις γεωμετρίες που μπορεί να τρέξει ο χρήστης. Για παράδειγμα, ο κώδικας «axiMesh.m» δημιουργεί το πλέγμα ενός μόνο κυλίνδρου ως προς την αρχή των αξόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζει το χρήστη στο να μελετήσει μια αρκετά περίπλοκη γεωμετρία, όπως είναι αυτή του πλοίου, ή έναν κύλινδρο μετατοπισμένο ως προς τους άξονες x,y και z. Τότε για τις περιπτώσεις αυτές ο χρήστης θα αξιοποιήσει τον φάκελο «Exe Folder» που δημιούργησε στην αρχή.

A.3.1 Δημιουργία του πλέγματος

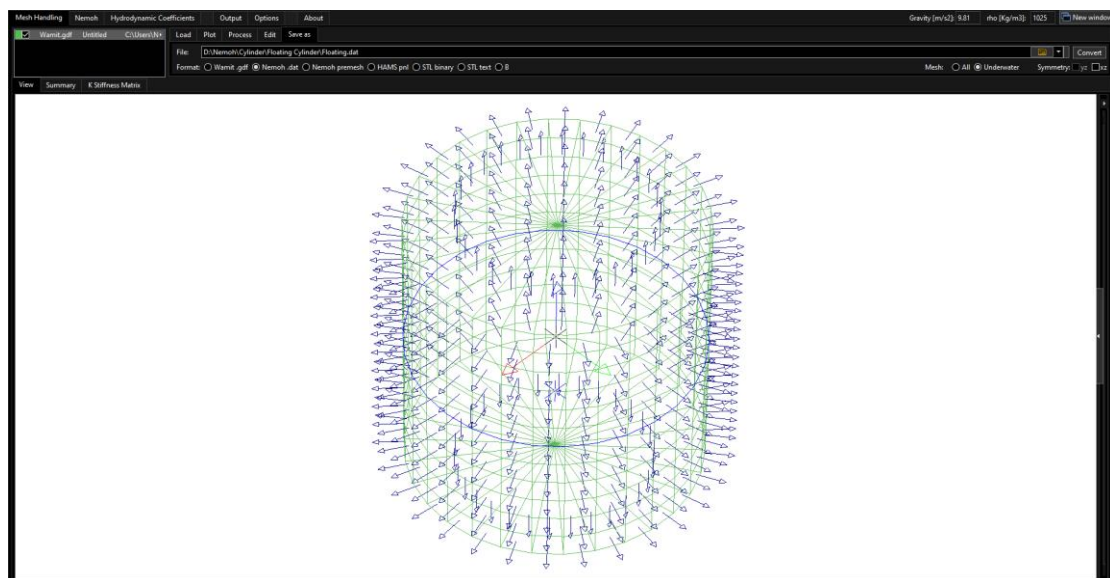
Σε αντίθεση με τον κώδικα «axiMesh.m» που ο χρήστης χρειαζόταν να ορίσει κάποιες παραμέτρους, τώρα πρέπει να δημιουργήσει το πλέγμα σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα, όπως είναι το Rhinoceros, και να το μετατρέψει σε μια μορφή που να συνεργάζεται με το NEMOH. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί ο χρήστης να μετατρέψει το πλέγμα σε μια μορφή που θα διαβάσει το NEMOH είναι μέσω του προγράμματος BEM Rosetta. Η εγκατάσταση του προγράμματος είναι απλή, καθώς ο χρήστης πρέπει να κάνει download μόνο τα αρχεία «BEMRosetta.exe» και «BEMRosetta_cl.exe» που εμπεριέχονται στον φάκελο «bin» στην [ιστοσελίδα του προγράμματος](#).

Αρχικά, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros ο χρήστης πρέπει να εντοπίσει την καρτέλα «Mesh», να επιλέξει το «Polygon Mesh Primitives» και στη συνέχεια να επιλέξει το «Cylinder». Στη συνέχεια, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει κάποιες παραμέτρους, οι οποίες είναι οι «Vertical Faces» και «Around Faces». Η παράμετρος «Vertical Faces» ορίζει τον αριθμό των επιφανειών που θα πρέπει να δημιουργήσει το Rhinoceros κατά τον κατακόρυφο άξονα και η παράμετρος «Around Faces» ορίζει τον αριθμό των επιφανειών που πρέπει να δημιουργήσει γύρω από την περιφέρεια του κύκλου. Ο χρήστης θα πρέπει να προσέξει πως θα ορίσει τις παραμέτρους, διότι αυτές επηρεάζουν το κατά πόσο «πυκνό» ή «αραιό» θα είναι το πλέγμα του κυλίνδρου. Αφού ορίσει τις τιμές των παραμέτρων, ο χρήστης πρέπει απλά να ορίσει που θα είναι η βάση του κυλίνδρου, τί ακτίνα και τί ύψος θα έχει ο κύλινδρος. Το πλέγμα του κυλίνδρου που θα πρέπει να δημιουργήσει ο χρήστης πρέπει να είναι μόνο για το βυθισμένο τμήμα του κυλίνδρου. Τέλος, ο χρήστης θα πρέπει να αποθηκεύσει το πλέγμα σε μορφή «.gdf», έτσι ώστε να μπορέσει να αναγνωρίσει το αρχείο το πρόγραμμα BEM Rosetta.



Εικόνα Α.13: Εντοπισμός της εντολής για την κατασκευή πλέγματος ενός κυλίνδρου

Στην καρτέλα «Mesh Handling» του προγράμματος BEM Rosetta, ο χρήστης μπορεί να εισάγει το πλέγμα που δημιούργησε στο Rhinoceros. Το BEM Rosetta δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει κάποιες μεταβλητές για το σώμα, όπως είναι οι ακριβείς συντεταγμένες για το κέντρο βάρους του ή κάποια μετατόπιση ως προς τον άξονα x , y και z . Στην συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει το πλέγμα επιλέγοντας την καρτέλα «Save as» και επιλέγοντας την κατηγορία «Nemoh.dat». Επιπρόσθετα στην καρτέλα αυτή, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν θέλει να αποθηκεύσει το πλέγμα του βυθισμένου τμήματος ή αν υπάρχει κάποια συμμετρία ως προς το επίπεδο xy ή το επίπεδο xz .



Εικόνα Α.14: Αποθήκευση του πλέγματος του βυθισμένου κυλίνδρου σε μορφή .dat

Ένα από τα μειονεκτήματα του προγράμματος BEM Rosetta είναι ότι δεν αναφέρει τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων. Αυτό πρέπει να το κάνει ο χρήστης χειροκίνητα εκτελώντας μια συγκεκριμένη διαδικασία. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- Άνοιγμα του αρχείου .dat
- Εντοπισμός της γραμμής:

$$0 \quad 0.0000000E+00 \quad 0.0000000E+00 \quad 0.0000000E+00$$
- Έστω X η γραμμή, τότε ο αριθμός των κόμβων είναι:

$$Nodes = X - 2$$
- Εντοπισμός της τελευταίας γραμμής
- Έστω Y η τελευταία γραμμή. Τότε ο αριθμός των στοιχείων είναι

$$Panels = Y - X - 1$$

A.3.2 Τα αρχεία exe

Στην αρχή έγινε αναφορά στο αρχείο «Nemoh.cal», το οποίο είναι απαραίτητο για την εκκίνηση των αρχείων exe. Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί να κάνει κάποιος μόλις ανοίξει το αρχείο, είναι η αυστηρή δομή που έχει το αρχείο. Αρχικά, στο πρώτο τμήμα του αρχείου ορίζονται οι συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι η πυκνότητα του νερού, το βάθος της περιοχής εγκατάστασης, η επιτάχυνση της βαρύτητας και τις συντεταγμένες που μετράται το κύμα. Στο επόμενο τμήμα ορίζονται ο αριθμός των σωμάτων με τα χαρακτηριστικά τους να ορίζονται στο ακριβώς επόμενο τμήμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα A.15.

```

--- Environment -----
1025.0          ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81           ! G            ! M/S**2      ! Gravity
20.           ! DEPTH        ! M            ! Water depth
0.            ! KEFF YEFF    ! M            ! Wave measurement point
--- Description of floating bodies -----
1              ! Number of Bodies
--- Body 1 -----
Cylinders.dat ! Name of mesh file
660 600       ! Number of points and number of panels
6            ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Yaw about a point
6            ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Moment force in z direction about a point
0            ! Number of lines of additional information
--- Load cases to be solved -----
50 0.1 2.0      ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1 0. 0.         ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
--- Post processing -----
0 0.1 10.       ! IMF calculation (0 for no calculation), time step and duration
1          ! Show pressure
361 0. 360.     ! Kochin function
150 150 200. 200. ! Free surface elevation

```

Εικόνα A.15: Δομή του αρχείου «Nemoh.cal»

Στο ενδιαμέσο αυτό μέρος, ο χρήστης χρειάζεται να ορίσει τα ακόλουθα:

- Το όνομα του αρχείου .dat που περιλαμβάνει τις λεπτομέρειες του πλέγματος
- Τον αριθμό των κόμβων και των panel, τα οποία υπολογίζονται σύμφωνα με τη μέθοδο που αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα
- Τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του σώματος

- Τον αριθμό των γενικευμένων δυνάμεων που πρέπει να υπολογίσει το πρόγραμμα

Στην Εικόνα A.15 κάτω από τον ορισμό των βαθμών ελευθερίας του σώματος, οι επόμενες 6 γραμμές αναφέρονται σε κάθε βαθμό ελευθερίας με τη γνωστή σειρά, δηλαδή:

- 1^η Γραμμή: Surge
- 2^η Γραμμή: Sway
- 3^η Γραμμή: Heave
- 4^η Γραμμή: Roll
- 5^η Γραμμή: Pitch
- 6^η Γραμμή: Yaw

Ο τελευταίος αριθμός στις κινήσεις Roll, Pitch και Yaw είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη του σημείου που θα περιστραφεί το σώμα. Σε περίπτωση που χρειάζεται να μελετηθεί ένα σώμα που εκτελεί περιορισμένες κινήσεις, τότε το μόνο πράγμα που χρειάζεται να κάνει ο χρήστης είναι να διαγράψει τις γραμμές των κινήσεων που δεν κάνει το σώμα. Για παράδειγμα, εάν ένα σώμα εκτελεί τις κινήσεις Surge, Heave και Pitch τότε ο χρήστης απλά θα διαγράψει την 2^η, 4^η και 6^η γραμμή. Η ίδια λογική ισχύει και για τις γενικευμένες δυνάμεις.

```

--- Environment -----
1025.0          ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81           ! G            ! M/S**2      ! Gravity
20.            ! DEPTH        ! M            ! Water depth
0.            ! XEYF YEFF    ! M            ! Wave measurement point
--- Description of floating bodies -----
2              ! Number of bodies
--- Body 1 -----
Cylinder1.dat  ! Name of mesh file
660 600        ! Number of points and number of panels
6              ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Yaw about a point
6              ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Moment force in z direction about a point
0              ! Number of lines of additional information
--- Body 2 -----
Cylinder2.dat  ! Name of mesh file
660 600        ! Number of points and number of panels
6              ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Yaw about a point
6              ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Moment force in z direction about a point
0              ! Number of lines of additional information
--- Load cases to be solved -----
50            0.1 2.0          ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1              0. 0.          ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
--- Post processing -----
0             0.1 10.         ! IRF                               ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
1              ! Snow pressure
361            0. 360.         ! Kochin function                   ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
150           150 200. 200. ! Free surface elevation            ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction

```

Εικόνα A.16: Παράδειγμα αρχείου Nemoh.cal για δύο σώματα

Στην συνέχεια, ο χρήστης ορίζει το διάστημα και τον αριθμό των συχνοτήτων και γωνιών πρόσπτωσης του κύματος που θέλει να μελετήσει. Το τελευταίο τμήμα του «Nemoh.cal», περιλαμβάνει τους υπολογισμούς που χρειάζονται για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, την κατανομή της πίεσης, των συναρτήσεων Kochin και IRF. Εφόσον, ο χρήστης προσαρμόσει το αρχείο στις ανάγκες του προβλήματος του, τότε μπορεί να εκτελέσει το «run.bat» για να ξεκινήσει το πρόγραμμα.

A.3.3 Χρήση του Matlab

Σε σχέση με τον φάκελο «Working Folder» που ο χρήστης όριζε απλά τις απαραίτητες μεταβλητές και έτρεχε τους κώδικες που ήταν γραμμένοι στο Matlab, τώρα θα χρειαστεί να φτιάξει έναν νέο κώδικα. Ο κώδικας αυτός θα περιλαμβάνει τον υπολογισμό των πινάκων της υδροστατικής σταθεράς επαναφοράς, της μάζας και την ανάγνωση των φακέλων που περιέχουν τις τιμές για την πρόσθετη μάζα και τις δυνάμεις διέγερσης. Ο κώδικας αυτός είναι απαραίτητος έτσι ώστε να μπορέσει ο χρήστης να υπολογίσει τα RAO's των κινήσεων, τις μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης, την κατανομή της πίεσης και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Ο πίνακας των μαζών είναι ο ακόλουθος:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix}$$

Όπου:

- x_G, y_G, z_G : οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους (m)
- m : η μάζα του σώματος (kg)
- I_{ij} : οι ροπές όγκου ως προς το κέντρο του σώματος (kgm^2)

Οι ροπές όγκου υπολογίζονται σύμφωνα με τα ακόλουθα ολοκληρώματα:

$$I_{11} = \int_m (y^2 + z^2) dm$$

$$I_{22} = \int_m (x^2 + z^2) dm$$

$$I_{33} = \int_m (x^2 + y^2) dm$$

$$I_{12} = I_{21} = - \int_m xy dm$$

$$I_{13} = I_{31} = - \int_m xz dm$$

$$I_{23} = I_{32} = - \int_m yz dm$$

Ο πίνακας των υδροστατικών όρων επαναφοράς είναι ο ακόλουθος:

$$KH = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Οι όροι του πίνακα υπολογίζονται με τα ακόλουθα ολοκληρώματα:

$$K_{33} = \rho g A_{wl} \quad (N/m)$$

$$K_{34} = K_{43} = -\rho g \iint_{A_{wl}} y dA \quad (N/rad)$$

$$K_{35} = K_{53} = -\rho g \iint_{A_{wl}} x dA \quad (N/rad)$$

$$K_{44} = \rho g \iint_{A_{wl}} y^2 dA + \rho g \nabla(z_B - z_G) \quad (Nm/rad)$$

$$K_{45} = K_{54} = -\rho g \iint_{A_{wl}} xy dA \quad (Nm/rad)$$

$$K_{46} = \rho g \nabla(x_G - x_B) \quad (Nm/rad)$$

$$K_{55} = \rho g \iint_{A_{wl}} x^2 dA + \rho g \nabla(z_B - z_G) \quad (Nm/rad)$$

$$K_{56} = \rho g \nabla(y_G - y_B) \quad (Nm/rad)$$

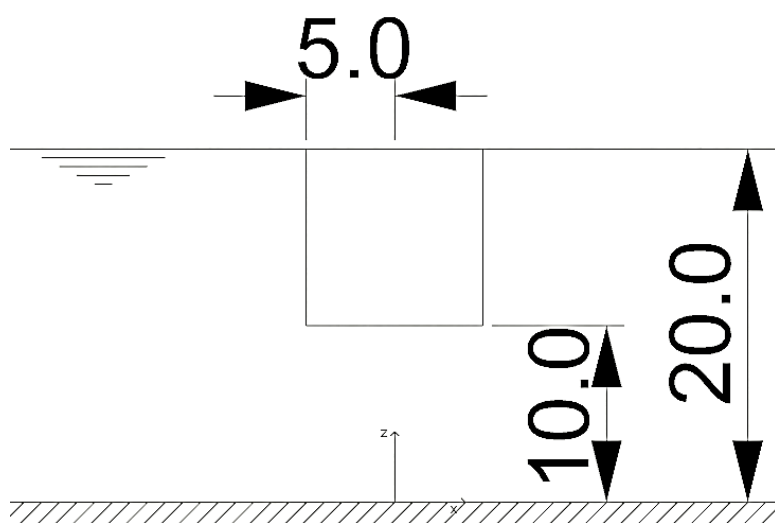
Όπου:

- x_B, y_B, z_B : οι συντεταγμένες του κέντρου άνωσης (m)
- A_{wl} : το εμβαδόν της επιφάνειας ισάλου (m^2)
- ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
- ∇ : ο όγκος εκτοπίσματος (m^3)

Παράρτημα Β

Ένας κατακόρυφος πλωτός κύλινδρος (κώδικες Matlab)

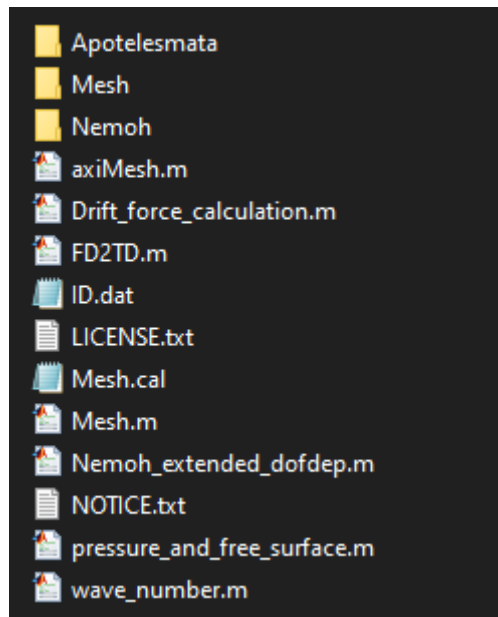
Στο παράδειγμα αυτό, θα μελετήσουμε τον κατακόρυφο πλωτό κύλινδρο του Mazarakos και Manrakos (2013), ο οποίος αναλύθηκε στην παράγραφο 3.1.2. Οι διαστάσεις του κυλίνδρου φαίνονται στην Εικόνα Β.1.



Εικόνα Β.1: Διαστάσεις κυλίνδρου σε m

B.1 Κατασκευή φακέλου

Πριν προχωρήσουμε στη διακριτοποίηση του κυλίνδρου θα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα φάκελο που να περιέχει τα δεδομένα του «Working Folder». Το περιεχόμενο αυτού του φακέλου φαίνεται στην Εικόνα Β.2.



Εικόνα Β.2: Περιεχόμενο φακέλου που θα γίνει η προσομοίωση

Β.2 Σχεδίαση πλέγματος ενός κυλίνδρου κάνοντας χρήση του κώδικα «axiMesh.m»

Εφόσον ο κύλινδρος είναι πλωτός η βρεχόμενη επιφάνεια του αποτελείται από τα τοιχώματα του και τον πυθμένα του. Επομένως πρέπει να ορίσουμε 3 σημεία του κυλίνδρου, του οποίου θα κάνουμε τη διακριτοποίηση. Στην Εικόνα Β.3 φαίνονται οι συντεταγμένες των σημείων, καθώς είναι απαραίτητες για να εκτελεστεί ο κώδικας «axiMesh.m».

```

% Create Mesh
clc
clear
close all

nBodies=1;

n=3;
R=10; %Radius (m)
T=10; %Draft (m)

%tX,tY,tZ να βρω πως τα ορίζω

r=[R R 0];
z=[0 -T -T];
%Vertical position of CG: C-(T+C)*0.5
[Mass, Inertia, KH, XB, YB, ZB]=axiMesh(r, z, n);

Mesh_outputs=struct('M', Mass, 'KH', KH, 'nBodies', nBodies);
save('Results', 'Mesh_outputs')

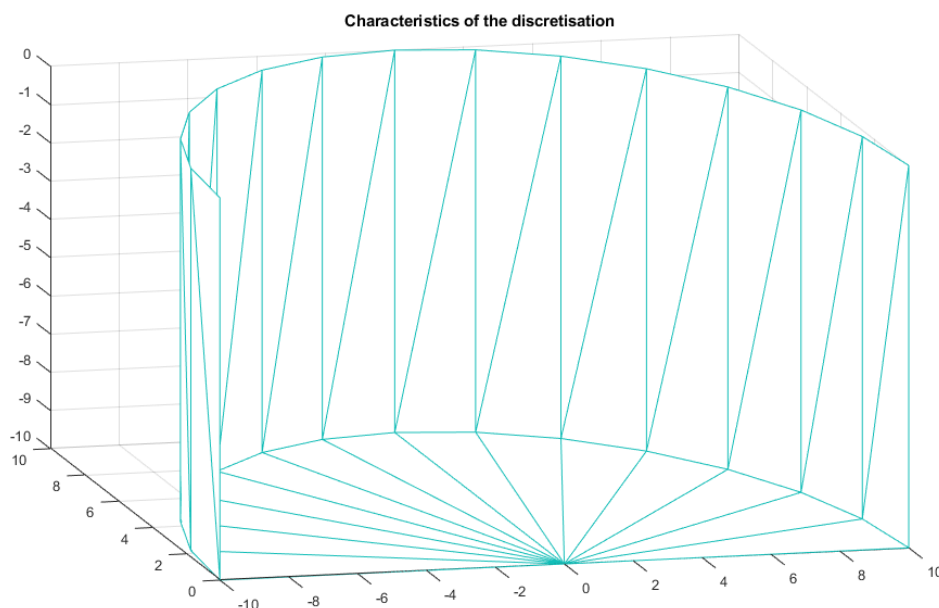
```

Εικόνα Β.3: Μεταβλητές εισόδου για τον υπολογισμό του πλέγματος

Αφού ορίσουμε τις μεταβλητές επιλέγουμε το «Run». Τότε, το Matlab θα εμφανίσει το ακόλουθο μήνυμα, όπου θα ορίσουμε τον αριθμό των σημείων για τη γωνιακή διακριτοποίηση:

Enter number of points for angular discretization : 15

Αφού πατήσουμε το «Enter» θα εμφανίσει ένα διάγραμμα, το οποίο είναι ένα παράδειγμα της διακριτοποίησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα Β.4.



Εικόνα Β.4: Γωνιακή διακριτοποίηση κυλίνδρου

Στην συνέχεια ορίζουμε το φάκελο που θέλουμε να αποθηκεύσουμε τα αποτελέσματα, όπου για λόγους κατανόησης τον ονομάζουμε «Apotelesmata».

Directory name for storage of results : 'Apotelesmata'

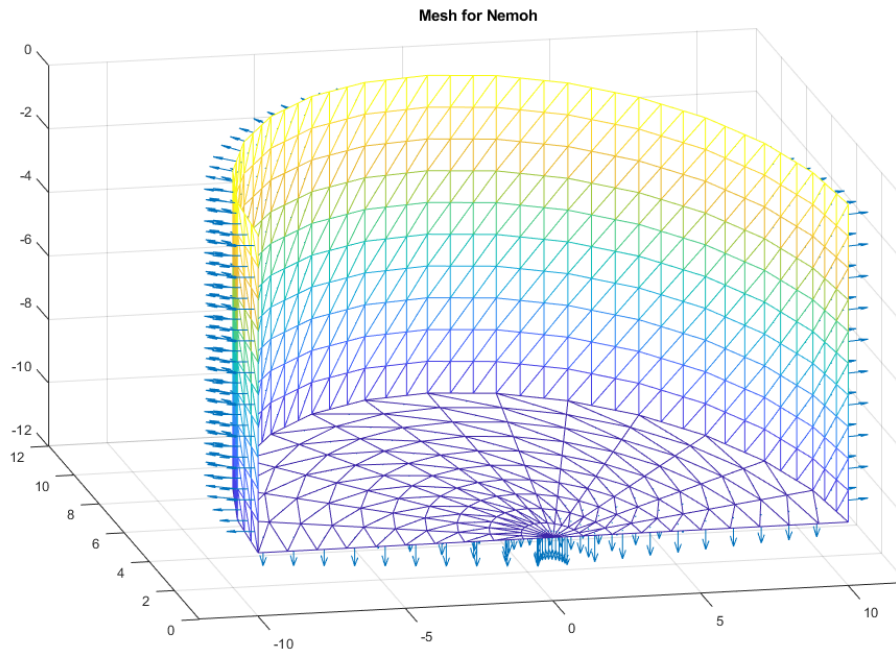
Το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε την κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους του κυλίνδρου:

Vertical position of gravity center : -5

Τέλος, ορίζουμε τον επιθυμητό αριθμό των στοιχείων που θέλουμε:

Target for number of panels : 500

Το πλέγμα που σχηματίστηκε φαίνεται στην Εικόνα Β.5.



Εικόνα Β.5: Πλέγμα του μισού κυλίνδρου

Τέλος, αποθηκεύουμε τα αποτελέσματα κάνοντας χρήση των παρακάτω εντολών:

```
Mesh_outputs=struct('M',Mass,'KH',KH,'nBodies',nBodies);
save('Results','Mesh_outputs')
```

B.3 Έναρξη του ανοιγτού κώδικα BEM NEMOH

Αφού κατασκευάσουμε το πλέγμα του κυλίνδρου, το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε τις απαραίτητες μεταβλητές εισόδου ώστε να εκτελέσουμε τον κώδικα «Nemoh_extended_dofdep.m». Στην Εικόνα Β.6 φαίνονται οι τιμές του βάθους της περιοχής εγκατάστασης, της γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού και ο αριθμός των συχνοτήτων. Στην Εικόνα Β.8 ορίζονται οι απαραίτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, πίεσης, συναρτήσεων Kochin, δυνάμεων διέγερσης, συντελεστών πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης. Στην Εικόνα Β.9 φαίνεται το κείμενο που γράφτηκε για τον κώδικα «Nemoh_extended_dofdep.m».

```

tic
nbfreq=50; % number of calculation = 7*nbfreq
w_min=0.1;
w_max=1.6;
w=[linspace(w_min,w_max,nbfreq)'];
dir=0; % γωνία πρόσπτωσης του κύματος
depth=20; % water depth (m)

```

Εικόνα Β.6: Ορισμός αριθμού συχνοτήτων, γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού και βάθους περιοχής εγκατάστασης

```

% Run Nemoh
clc
clear
load Results
M=Mesh_outputs.M;
EM=Mesh_outputs.EM;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;

tic
nbfreq=50; % number of calculation = 7*nbfreq
w_min=0.1;
w_max=1;
w=[linspace(w_min,w_max,nbfreq)'];
dir=0; % γωνία πρόσπτωσης του κύματος
depth=100; % water depth (m)

% DOF DEP
dof=[1 2 3 4 5 6];
forces=dof;
CG=[0 0 -10];
added_options=struct('kochin_number_of_angles',361,'kochin_angle_min',0, 'kochin_angle_max',360,'create_pressure_files',1,'FS_num_of_points',[200 200],'FS_dimensions',[20 20],'time_step',0.5,'duration',10);
[A,B,Fe,theta,Kochin_BVP,FS_pos_X,FS_pos_Y,FS_BVP,pressure,nodes,panels,nomrep]=Nemoh_extended_dofdep(w, dir, depth,dof,forces,CG,added_options); %calls function

too
A_temp=A; B_temp=B; Fe_temp=Fe;
A=zeros(6*nBodies,6*nBodies,length(w));
B=zeros(6*nBodies,6*nBodies,length(w));
Fe=zeros(length(w),6*nBodies);
for i=1:nBodies*length(dof)
    A(i,i,:)=A_temp(i,i,:);
    B(i,i,:)=B_temp(i,i,:);
    Fe(i,:)=Fe_temp(i,:);
end

```

Εικόνα Β.7: Ορισμός μεταβλητών εισόδου για την έναρξη του κώδικα BEM NEMOH

```

% DOF DEP
dof=[1 2 3 4 5 6];
forces=dof;
CG=[0 0 -10];
added_options=struct('kochin_number_of_angles',361,'kochin_angle_min',0, 'kochin_angle_max',360,'create_pressure_files',1,'FS_num_of_points',[200 200],'FS_dimensions',[20 20],'time_step',0.5,'duration',10);
[A,B,Fe,theta,Kochin_BVP,FS_pos_X,FS_pos_Y,FS_BVP,pressure,nodes,panels,nomrep]=Nemoh_extended_dofdep(w, dir, depth,dof,forces,CG,added_options); %calls function

```

Εικόνα Β.8: Ορισμός μεταβλητών για τον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, πίεσης, συναρτήσεων Kochin, δυνάμεων διέγερσης, συντελεστών πρόσθετης μάζας και υδροδυναμικής απόσβεσης

```

% Run Nemoh
clc
clear
load Results
M=Mesh_outputs.M;
EM=Mesh_outputs.EM;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;

tic
nbfreq=50; % number of calculation = 7*nbfreq
w_min=0.1;
w_max=1.6;
w=[linspace(w_min,w_max,nbfreq)'];
dir=0; % γωνία πρόσπτωσης του κύματος
depth=20; % water depth (m)

% DOF DEP
dof=[1 2 3 4 5 6];
forces=dof;
CG=[0 0 -10];
added_options=struct('kochin_number_of_angles',361,'kochin_angle_min',0, 'kochin_angle_max',360,'create_pressure_files',1,'FS_num_of_points',[200 200],'FS_dimensions',[20 20],'time_step',0.5,'duration',10);
[A,B,Fe,theta,Kochin_BVP,FS_pos_X,FS_pos_Y,FS_BVP,pressure,nodes,panels,nomrep]=Nemoh_extended_dofdep(w, dir, depth,dof,forces,CG,added_options); %calls function

too
A_temp=A; B_temp=B; Fe_temp=Fe;
A=zeros(6*nBodies,6*nBodies,length(w));
B=zeros(6*nBodies,6*nBodies,length(w));
Fe=zeros(length(w),6*nBodies);
for i=1:nBodies*length(dof)
    A(i,i,:)=A_temp(i,i,:);
    B(i,i,:)=B_temp(i,i,:);
    Fe(i,:)=Fe_temp(i,:);
end

Nemoh_sol=struct('nomrep',nomrep,'M',M, 'Fe',Fe,'A','B','w','w','dir',dir, 'depth',depth, 'EM',EM,'BVP',Kochin_BVP, 'theta',theta, 'FS_pos_X',FS_pos_X, 'FS_pos_Y',FS_pos_Y, 'FS_BVP',FS_BVP, 'pressure',pressure, 'panels',panels, 'nodes',nodes);
save('Results','Mesh_outputs','Nemoh_sol')

```

Εικόνα Β.9: Ορισμός μεταβλητών εισόδου για να ξεκινήσει ο κώδικας

Μόλις ορίσουμε τις απαραίτητες μεταβλητές με «Run» το πρόγραμμα BEM NEMOH αρχίζει τους υπολογισμούς. Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση, αποθηκεύουμε τα αποτελέσματα με τις παρακάτω εντολές:

```
Nemoh_sol=struct('nomrep',nomrep,'M',M,  
'Fe',Fe,'A',A,'B',B,'w',w,'dir',dir,'depth',depth,'KH',KH,'HBVP',Koch  
in_BVP,'theta',theta,'FS_pos_X',FS_pos_X,'FS_pos_Y',FS_pos_Y,'FS_BVP'  
,FS_BVP,'Pressure',pressure,'panels',panels,'nodes',nodes,'dof',dof);
```

```
save('Results','Mesh_outputs','Nemoh_sol')
```

```
----- Starting NEMOH -----  
  
Summary of calculation  
  
-> Water depth = 20.00 m  
-> 50 wave frequencies from 0.1000 to 1.6000  
-> 1 wave directions from 0.0000 to 0.0000  
-> 6 radiation problems  
-> 6 forces  
  
----- Solving BVPs -----  
  
-> Initialisation . . Done !  
  
-> Solve BVPs and calculate forces  
  
Problem 1 / 350
```

Εικόνα Β.10: Ο κώδικας ξεκίνησε τους υπολογισμούς

```
Problem 350 / 350 . . Done !  
  
-> Save results  
  
----- Postprocessing results ---  
  
-> Initialisation . . Done !  
  
-> Save results  
  
Elapsed time is 16030.904300 seconds.
```

Εικόνα Β.11: Ο κώδικας τελείωσε και αποθήκευσε τα αποτελέσματα

B.4 Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, σειρά έχει η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η οπτικοποίηση τους γίνεται μέσω συγγραφής κώδικα. Στην Εικόνα B.12 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον ορίζουμε τις απαραίτητες μεταβλητές. Στην Εικόνα B.13 φαίνεται ο κώδικας που δίνει τα διαγράμματα των συντελεστών πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ και υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$. Αντίστοιχα στην Εικόνα B.14 φαίνεται ο κώδικας για την αναπαράσταση των δυνάμεων και ροπών διέγερσης.

```
clear
clc
load Results

A=Nemoh_sol.A;
B=Nemoh_sol.B;
Fe=Nemoh_sol.Fe;
w=Nemoh_sol.w;
dof=Nemoh_sol.dof;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;
```

Εικόνα B.12: Εισαγωγή μεταβλητών εισόδου για την κατασκευή των διαγραμμάτων

```

%%Coefficients
figure
subplot(2,3,1) %Surge
for n=1:nBodies
    ii=(1+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Surge motion')

subplot(2,3,2) %Sway
for n=1:nBodies
    ii=(2+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Sway motion')

subplot(2,3,3) %Heave
for n=1:nBodies
    ii=(3+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Heave motion')

subplot(2,3,4) %Roll
for n=1:nBodies
    ii=(4+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Roll motion')

subplot(2,3,5) %Pitch
for n=1:nBodies
    ii=(5+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Pitch motion')

subplot(2,3,6) %Yaw
for n=1:nBodies
    ii=(6+(n-1)*length(dof));
    a(n,:)=A(ii,ii,:);
    b(n,:)=B(ii,ii,:);
    plot(w,a(n,:), 'b-+',w,b(n,:), 'r-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel('Coeffs' )
legend('Added mass (A)', 'Damping (B)')
title('Hydro coeffs Yaw motion')

```

Εικόνα Β.13: Κώδικας για την αναπαράσταση των διαγραμμάτων των συντελεστών πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ και υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$

```

%%Forces and Moments
figure
subplot(2,3,1) %Surge
for n=1:nBodies
    ii=(1+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (N/(H/2)) ' )
title('Excitation Force Surge')

subplot(2,3,2) %Sway
for n=1:nBodies
    ii=(2+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (N/(H/2)) ' )
title('Excitation Force Sway')

subplot(2,3,3) %Heave
for n=1:nBodies
    ii=(3+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (N/(H/2)) ' )
title('Excitation Force Heave')

subplot(2,3,4) %Roll
for n=1:nBodies
    ii=(4+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (Nm/(H/2)) ' )
title('Moment Roll')

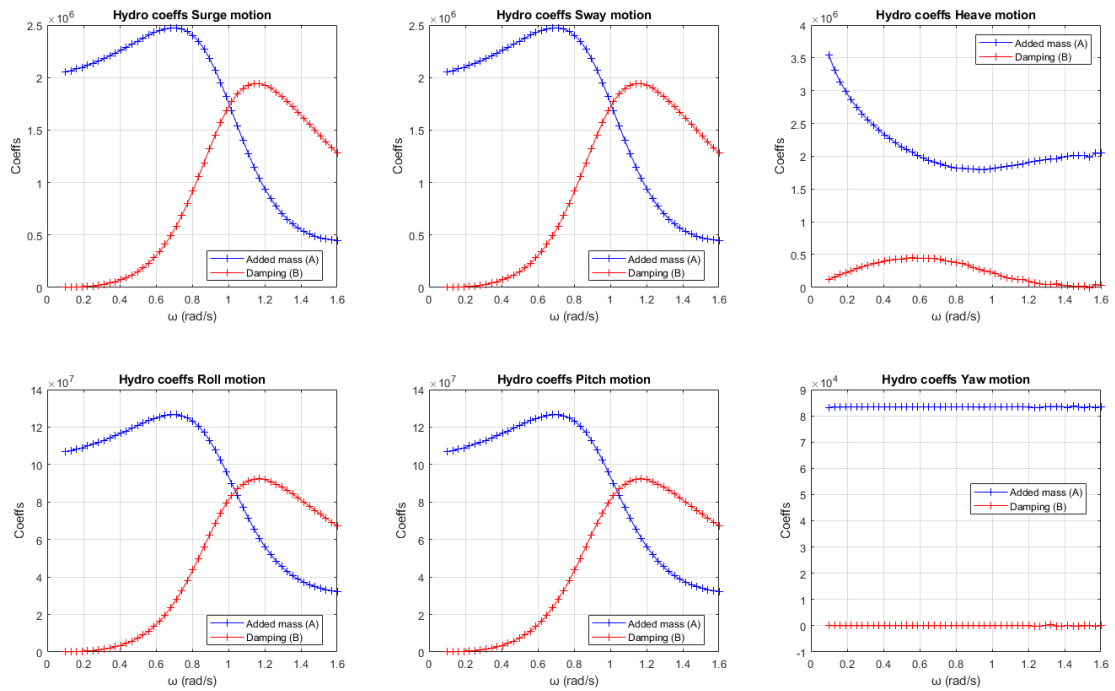
subplot(2,3,5) %Pitch
for n=1:nBodies
    ii=(5+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (Nm/(H/2)) ' )
title('Moment Pitch')

subplot(2,3,6) %Yaw
for n=1:nBodies
    ii=(6+(n-1)*length(dof));
    plot(w,abs(Fe(:,ii)), 'g-+')
end
xlabel('ω (rad/s)')
grid ON
ylabel(' (Nm/(H/2)) ' )
title('Moment Yaw')

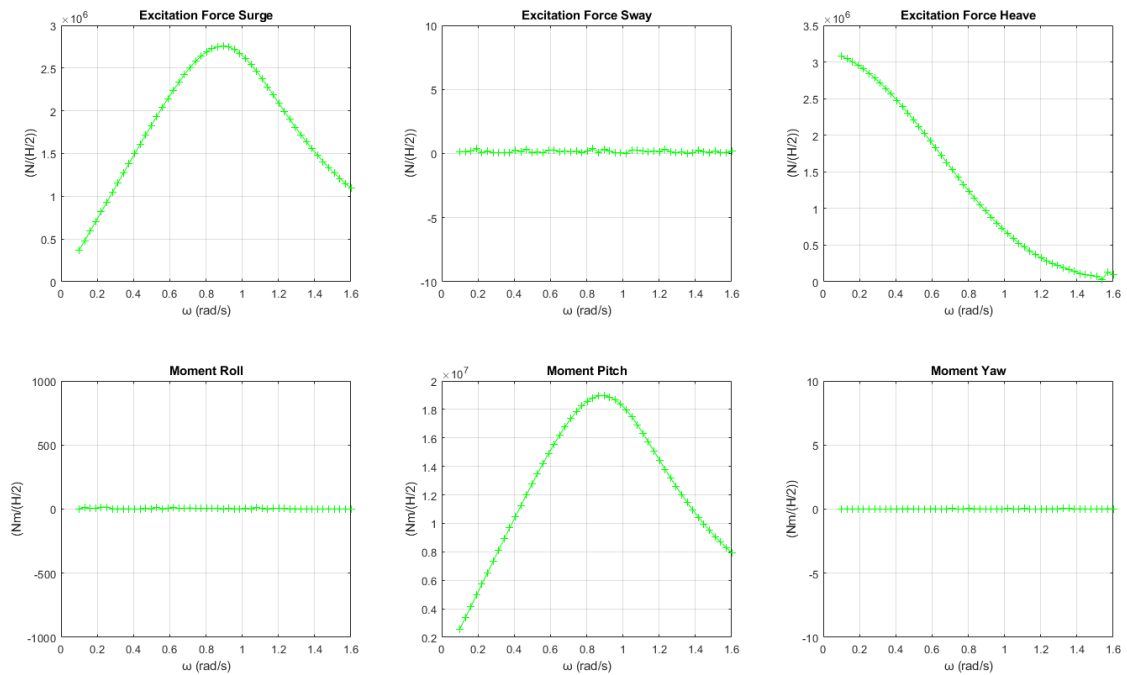
```

Εικόνα Β.14: Κώδικας για την αναπαράσταση των διαγραμμάτων των δυνάμεων και ροπών διέγερσης

Στην Εικόνα Β.15 φαίνονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές και αντίστοιχα στην Εικόνα Β.16 φαίνονται οι δυνάμεις και ροπές διέγερσης.



Εικόνα Β.15: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ και υδροδυναμικής απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$



Εικόνα Β.16: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης

B.5 Υπολογισμός RAO's

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο A.2.3, το πρόγραμμα δεν παρέχει κάποιον κώδικα για τον υπολογισμό των κινήσεων του σώματος. Ο κώδικας υπολογισμού των κινήσεων του σώματος φαίνεται στην Εικόνα B.17 και αντίστοιχα στην Εικόνα B.18 φαίνεται ο κώδικας για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Στην Εικόνα B.19 φαίνονται οι κινήσεις του κυλίνδρου ως προς τους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησής του.

```
clc
clear
load Results

dof=Nemoh_sol.dof;
M=Nemoh_sol.M;
KH = Nemoh_sol.KH;
depth=20;
w=Nemoh_sol.w;
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;

for n=1:nBodies
    A=Bodies_sol(n).A;
    B=Bodies_sol(n).B;
    Fe=Bodies_sol(n).Fe;
    for k=1:length(w)
        for p=1:length(dof)
            RAO{1,n}(k,p)=(Fe(k,p))/(-M(n,1)+A(p,p,k))*(w(k))^2-li*w(k)*(B(p,p,k))+KH(p,p);
            % RAO{1,n}(k,p)=(Fe(k,p))/(-M(n,1)+A(p,p,k))*(w(k))^2-li*w(k)*(B(p,p,k))+KH(n,p,p)); for 2 or more bodies
        end
    end
end
```

Εικόνα B.17: Κώδικας υπολογισμού των κινήσεων του κυλίνδρου


```

%-----Plot the results-----%
freq=w/(2*pi);
title_RAO={'Surge' 'Sway' 'Heave' 'Roll' 'Pitch' 'Yaw'};
dof_surge=find((dof-1)==0);
dof_sway=find((dof-2)==0);
dof_heave=find((dof-3)==0);
dof_roll=find((dof-4)==0);
dof_pitch=find((dof-5)==0);
dof_yaw=find((dof-6)==0);

% w-RAO
figure
subplot(2,3,1) % Surge
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(1,n) (:,dof_surge)),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(1), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('RAO' )
hold off

subplot(2,3,2) % Sway
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(1,n) (:,dof_sway)),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(2), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('RAO' )
hold off

subplot(2,3,3) % Heave
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(1,n) (:,dof_heave)),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(3), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('RAO' )

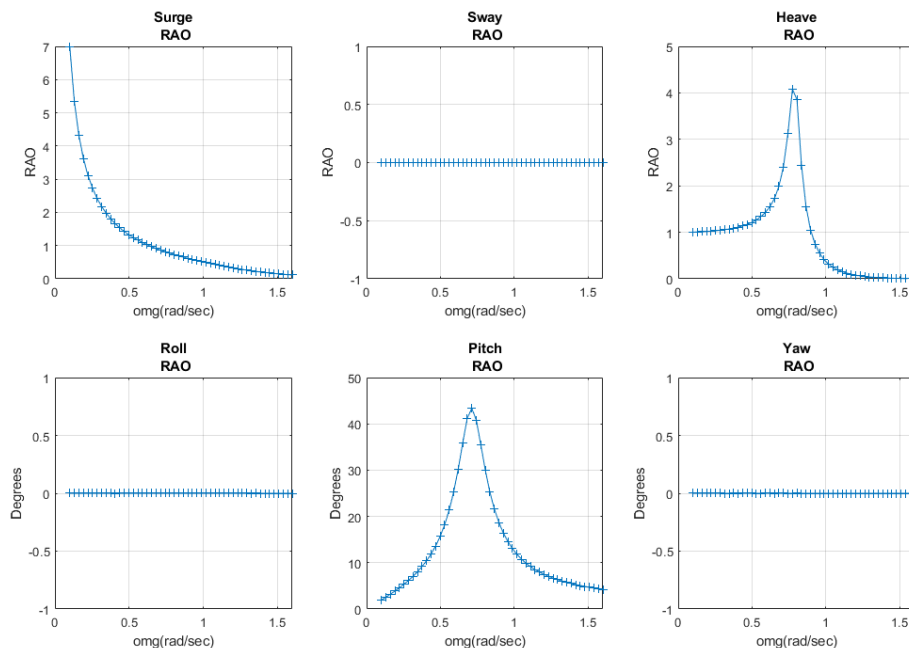
subplot(2,3,4) % Roll
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(n) (:,dof_roll)*180/pi),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(4), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('Degrees' )
hold off

subplot(2,3,5) % Pitch
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(1,n) (:,dof_pitch)*180/pi),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(5), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('Degrees' )
hold off

subplot(2,3,6) % Yaw
for n=1:nBodies
plot(w,abs(RAO(1,n) (:,dof_yaw)*180/pi),'-+');
hold on
end
title([title_RAO(6), ' RAO']);
xlabel('omg(rad/sec)')
grid ON
ylabel('Degrees' )
hold off

```

Εικόνα Β.18: Κώδικας για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων



Εικόνα Β.19: Κινήσεις του κυλίνδρου ως προς τους έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης

B.6 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή πίεσης στον κύλινδρο

Ο τρόπος με τον οποίον υπολογίζουμε την ανύψωση και την πίεση είναι με τον κώδικα «pressure_and_free_surface.m». Οι μεταβλητές εισόδου φαίνονται στην Εικόνα B.20 και αντίστοιχα στην Εικόνα B.21 φαίνεται ο συνολικός κώδικας. Η μόνη αλλαγή που χρειάζεται να κάνουμε είναι να ορίσουμε τη συχνότητα εκείνη, όπου ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις διέγερσης στον κύλινδρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα B.22. Τα αποτελέσματα του κώδικα φαίνονται στην Εικόνα B.23, όπου φαίνεται ο κάναβος του μέτρου της ανύψωσης, και στην Εικόνα B.24 αντίστοιχα, όπου φαίνεται η κατανομή του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας στον χώρο.

```

clc
clear all
load Results

RAO=RAO_sol.RAO; %!!! RAO are required for radiation terms !
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;
FS_BVP=Nemoh_sol.FS_BVP;
w=Nemoh_sol.w;
X=Nemoh_sol.FS_pos_X;
Y=Nemoh_sol.FS_pos_Y;
nw=length(w);
FS_X=length(X);
FS_Y=length(Y);
FS=zeros(FS_X,FS_Y,nw);

```

Εικόνα B.20: Ορισμός απαραίτητων μεταβλητών εισόδου

```

clc
clear all
load Results

RAO=RAO_sol.RAO; %!!! RAO are required for radiation terms !
nBodies=Mesh_outputs.nBodies;
FS_BVP=Nemoh_sol.FS_BVP;
w=Nemoh_sol.w;
X=Nemoh_sol.FS_pos_X;
Y=Nemoh_sol.FS_pos_Y;
nw=length(w);
FS_X=length(X);
FS_Y=length(Y);
FS=zeros(FS_X,FS_Y,nw);
% BVP 1 -> Diffraction.
% BVP 2->7: Surge sway,...,Yaw
for p=1:nw
    locall=zeros(FS_X,FS_Y,7);
    locall(:, :, 1)=FS_BVP(:, :, (6*nBodies+1)*(p-1)+1); % Diffraction term
    for i=2:7% sum of the radiation terms times velocities RAOs.
        x=7*(p-1)+i;
        locall(:, :, i)=- (li*w(p)) *RAO(p, i-1) * (FS_BVP(:, :, x));
    end
    FS(:, :, p)=sum(locall, 3);
end
FS_chosen(:, :) = abs(FS(:, :, 27)'); %FS_chosen(:, :) = abs(FS(:, :, w(X, 1)))

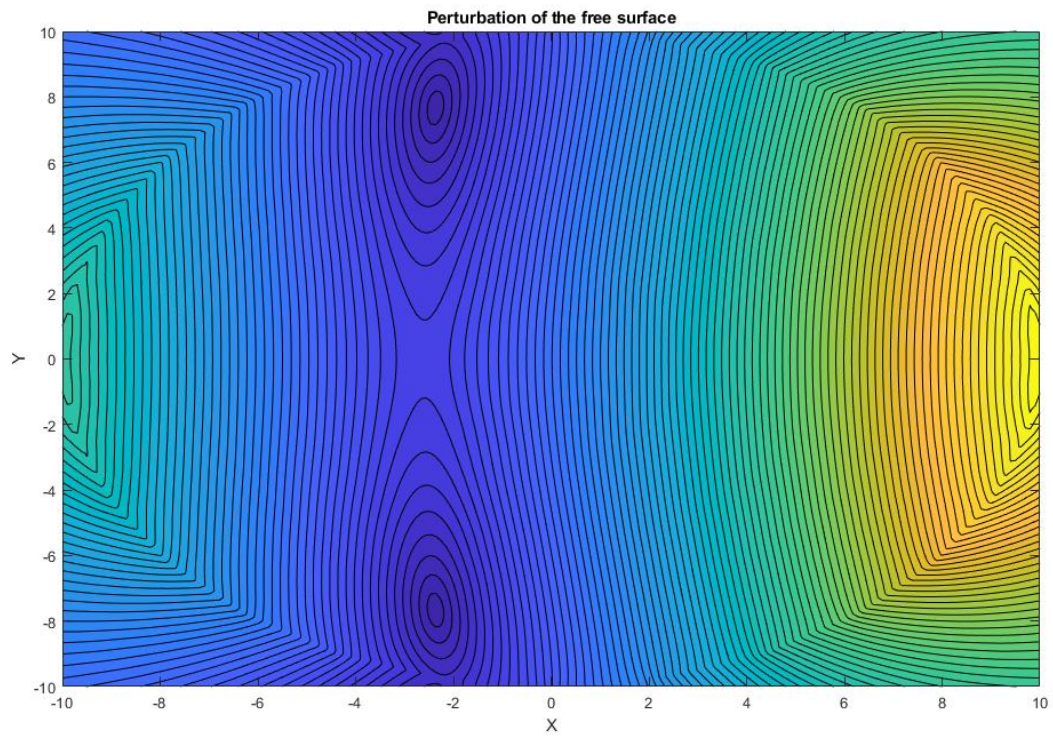
figure
contourf(X, Y, FS_chosen, 80)
xlabel('X')
ylabel('Y')
title('Perturbation of the free surface')
figure
surf(X, Y, FS_chosen)
xlabel('X')
ylabel('Y')
title('Perturbation of the free surface')

```

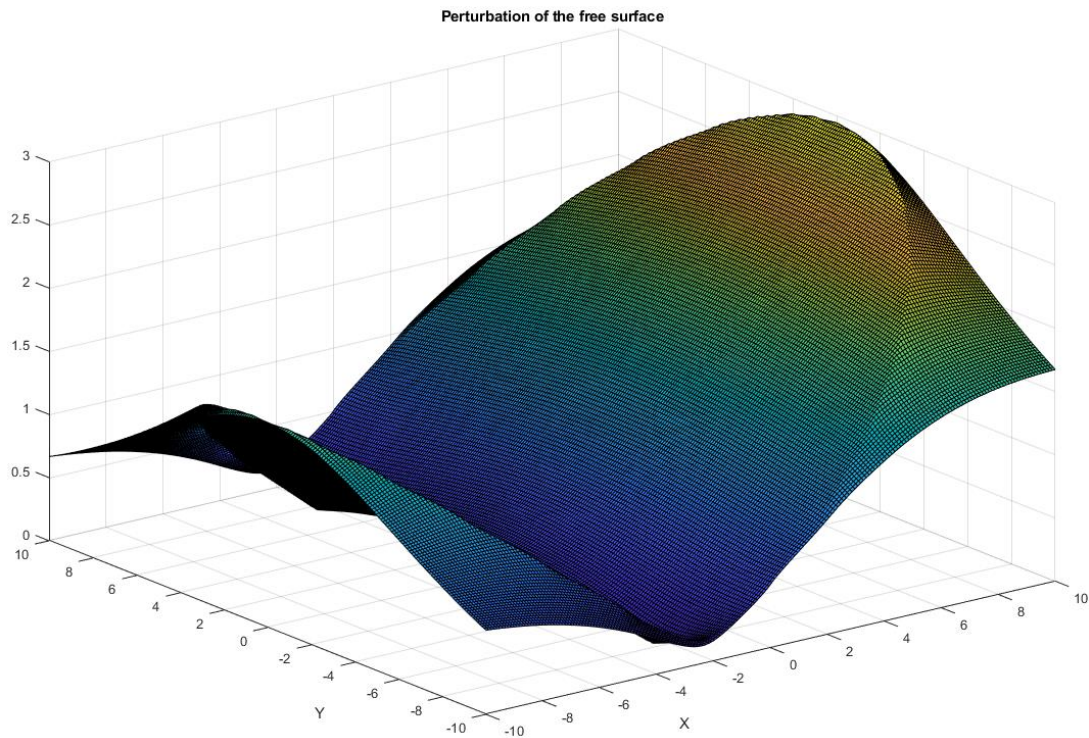
Εικόνα B.21: Κώδικας υπολογισμού της ανύψωσης του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας

```
FS_chosen(:, :) = abs(FS(:, :, 27)'); %FS_chosen(:, :) = abs(FS(:, :, w(X, 1))')
```

Εικόνα B.22: Ορίζουμε τη σωστή συχνότητα για την αναπαράσταση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα B.23: Κάναβος του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα B.24: Ανύψωση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Ο κώδικας λαμβάνει άμεσα τα δεδομένα που χρειάζεται για την κατανομή της πίεσης από τον πίνακα «Results», όπως φαίνεται στην Εικόνα B.25. Επειδή ο κύλινδρος ταλαντώνεται πρέπει να γίνει εισαγωγή της πίεσης του δυναμικού ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα B.26. Τέλος, επειδή μας ενδιαφέρει να αναπαραστήσουμε την κατανομή της πίεσης σε συγκεκριμένη συχνότητα, προσαρμόζουμε τον κώδικα όπως φαίνεται στην Εικόνα B.27. Η κατανομή της πίεσης στο σώμα φαίνεται στην Εικόνα B.29

```

clc
clear all
load Results

X_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,1);
Y_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,2);
Z_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,3);
P=Nemoh_sol.Pressure;
w=Nemoh_sol.w;
panels=Nemoh_sol.panels;
nftri=0;
for i=1:size(panels,1)
    nftri=nftri+1;
    tri(nftri,:)=[panels(i,1) panels(i,2) panels(i,3)];
    nftri=nftri+1;
    tri(nftri,:)=[panels(i,1) panels(i,3) panels(i,4)];
end;

```

Εικόνα Β.25: Εισαγωγή μεταβλητών εισόδου

```

for ii=1:50
    diff(ii,:)=P(1+(ii-1)*6,:);
    surge(ii,:)=P(2+(ii-1)*6,:);
    sway(ii,:)=P(3+(ii-1)*6,:);
    heave(ii,:)=P(4+(ii-1)*6,:);
    roll(ii,:)=P(5+(ii-1)*6,:);
    pitch(ii,:)=P(6+(ii-1)*6,:);
    yaw(ii,:)=P(7+(ii-1)*6,:);
    total(ii,:)=diff(ii,:)+surge(ii,:)+sway(ii,:)+heave(ii,:)+roll(ii,:)+pitch(ii,:)+yaw(ii,:); %Diffraction Pressure + Radiated
end

```

Εικόνα Β.26: Εισαγωγή κινήσεων κυλίνδρου και υπολογισμός συνολικής πίεσης

```

clc
clear all
load Results

X_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,1);
Y_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,2);
Z_mesh=Nemoh_sol.nodes(:,3);
P=Nemoh_sol.Pressure;
w=Nemoh_sol.w;
panels=Nemoh_sol.panels;
nftri=0;
for i=1:size(panels,1)
    nftri=nftri+1;
    tri(nftri,:)=[panels(i,1) panels(i,2) panels(i,3)];
    nftri=nftri+1;
    tri(nftri,:)=[panels(i,1) panels(i,3) panels(i,4)];
end;

for ii=1:50
    diff(ii,:)=P(1+(ii-1)*6,:);
    surge(ii,:)=P(2+(ii-1)*6,:);
    sway(ii,:)=P(3+(ii-1)*6,:);
    heave(ii,:)=P(4+(ii-1)*6,:);
    roll(ii,:)=P(5+(ii-1)*6,:);
    pitch(ii,:)=P(6+(ii-1)*6,:);
    yaw(ii,:)=P(7+(ii-1)*6,:);
    total(ii,:)=diff(ii,:)+surge(ii,:)+sway(ii,:)+heave(ii,:)+roll(ii,:)+pitch(ii,:)+yaw(ii,:); %Diffraction Pressure + Radiated
end

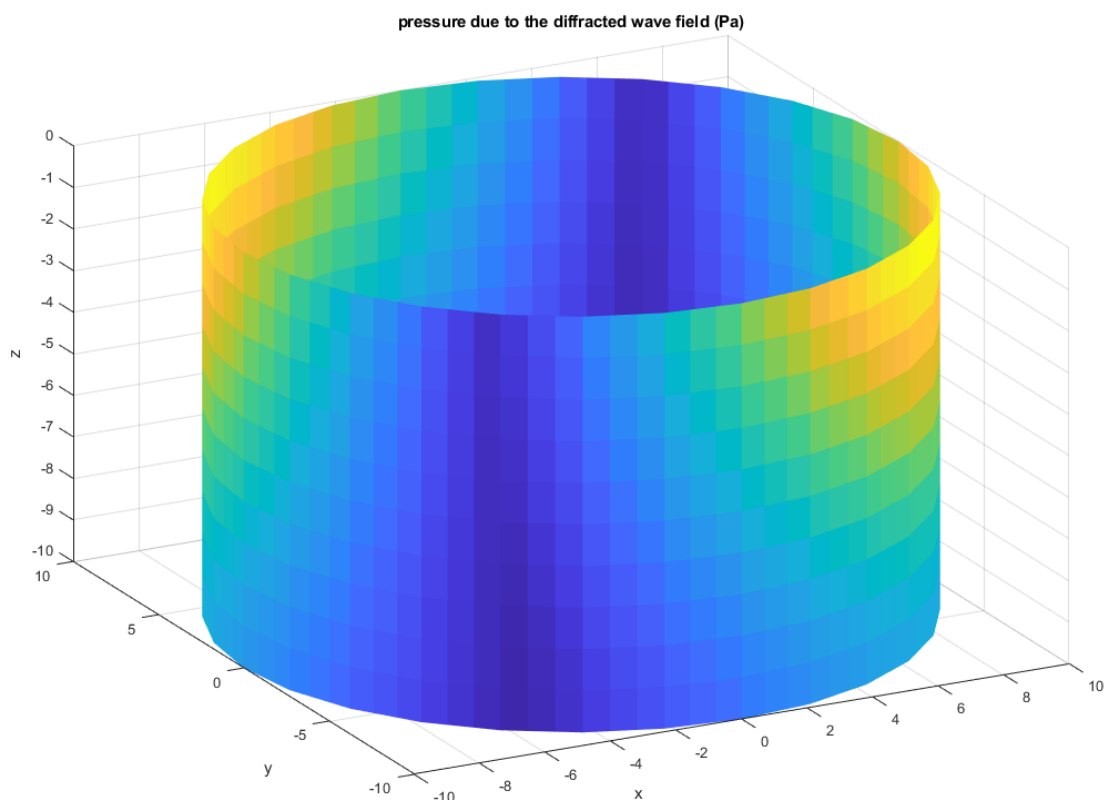
P_chosen=abs(total(27,:));
figure
trisurf(tri,X_mesh,Y_mesh,Z_mesh,P_chosen)
shading flat
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')
title('pressure due to the diffracted wave field (Pa)')

```

Εικόνα Β.27: Κώδικας υπολογισμού κατανομή της πίεσης στο σώμα

```
P_chosen=abs(total(27,:)); %P_chosen=abs(w(X,1))
```

Εικόνα Β. 28: Ορισμός σωστής συχνότητας για την αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης



Εικόνα Β.29: Κατανομή της πίεσης στο σώμα

B.7 Υπολογισμός μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης

Για τον υπολογισμό των μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης χρειάζεται να ορίσουμε τις κατάλληλες μεταβλητές εισόδου ώστε να εκτελέσουμε τον κώδικα «drift_force_calculation.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Β.30. Ο κύλινδρος θεωρείται ακίνητος αλλά και κινούμενος. Οι μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης όταν ο κύλινδρος είναι ακίνητος φαίνονται στην Εικόνα Β.31 και αντίστοιχα στην Εικόνα Β.32 όταν αυτός είναι ελεύθερος.

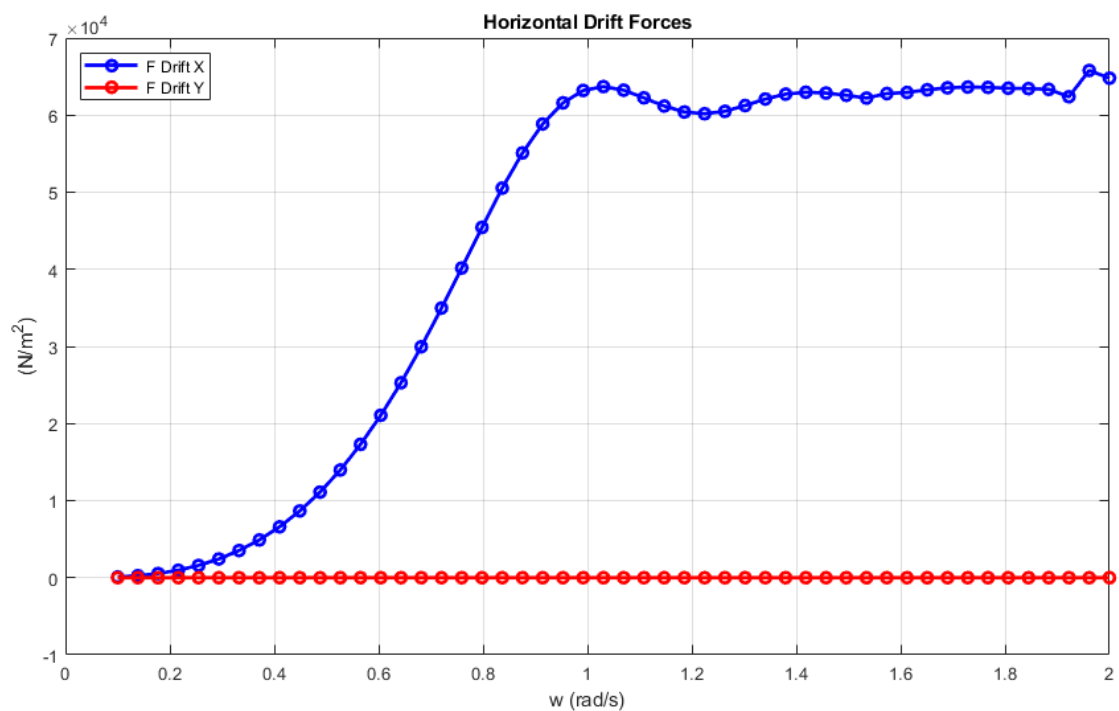
```

% Calculate Drift Forces
clear
clc
load Results

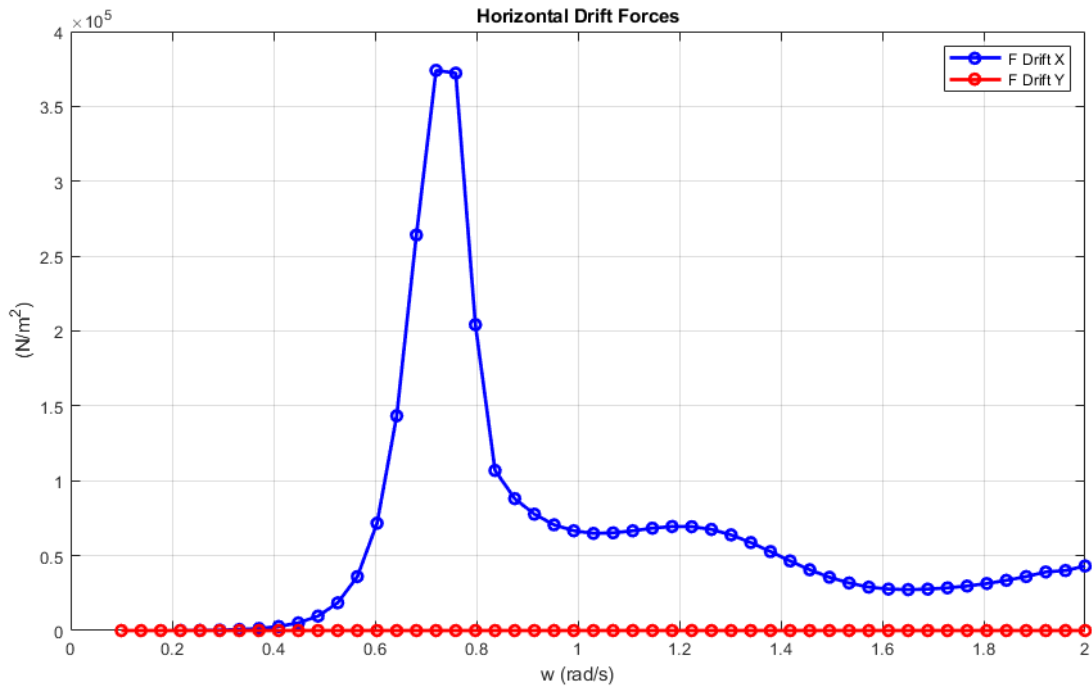
nb_DoF=6;
depth=RAO_sol.depth ;
dir=0;
RAO=RAO_sol.RAO;
w=RAO_sol.w;
% RAO=zeros(length(w),nb_DoF); % If radiation is neglected
ampl_wave=1;
nBodies=1;
plotflag=1;
rep='Apotelesmata';
rho=1025;
[Fdrift_x,Fdrift_y,H,theta]=Drift_force_calculation(depth,w,RAO,ampl_wave,dir,nBodies,nb_DoF,plotflag,rep,rho);
Fdrift=Fdrift_x;

```

Εικόνα Β.30: Κώδικας υπολογισμού μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης



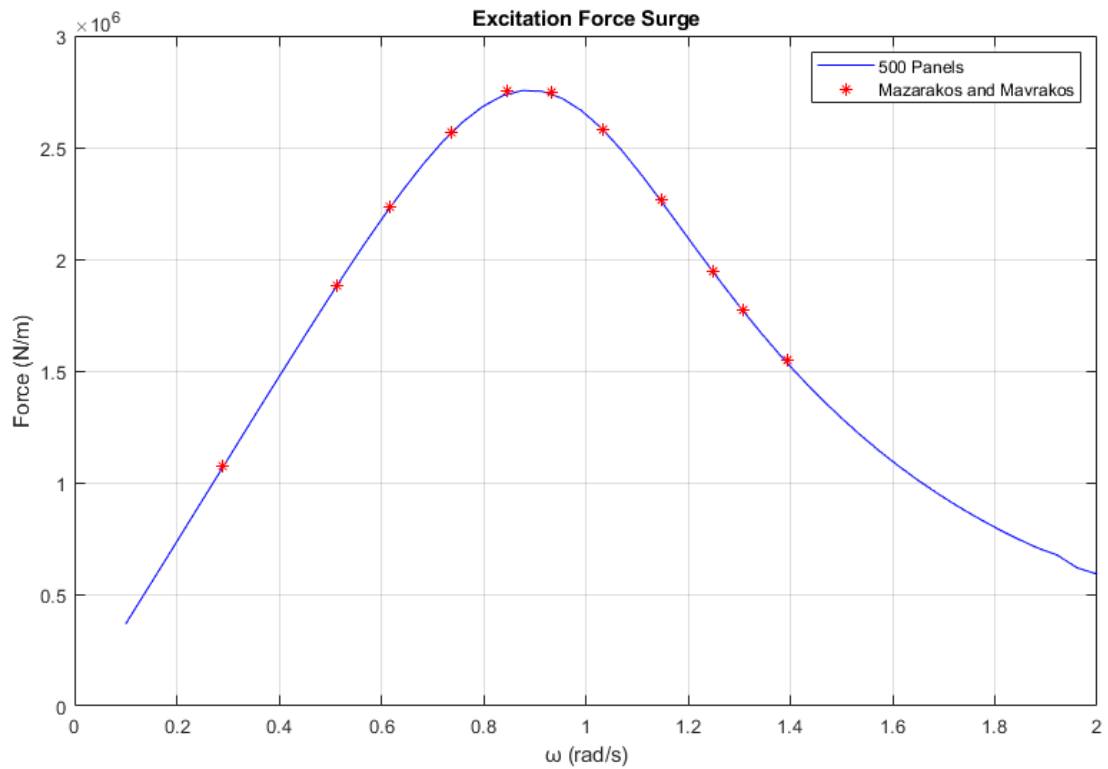
Εικόνα Β.31: Μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης του ακίνητου κυλίνδρου



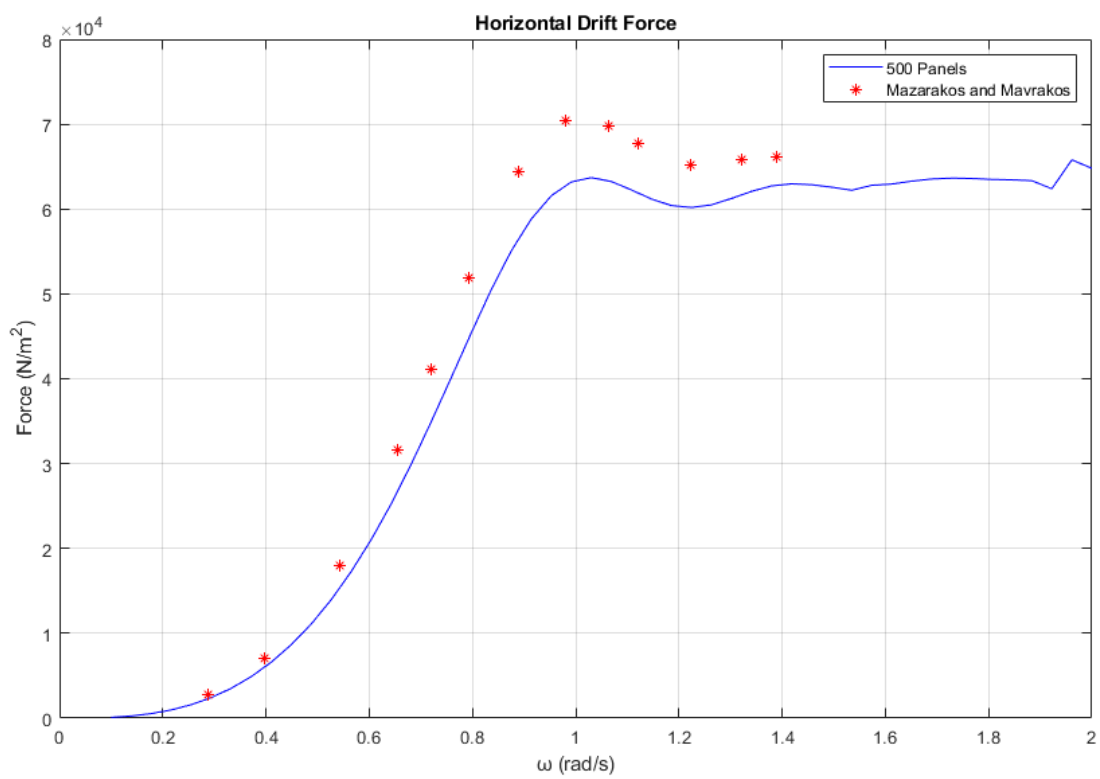
Εικόνα Β.32: Μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης όταν ο κύλινδρος ταλαντώνεται

B.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αφού έχουμε κάνει τους βασικούς υπολογισμούς πρέπει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος BEM NEMOH με αυτά των Mazarakos και Μανρακος (2013), ο οποίος κάνει χρήση αναλυτικών λύσεων, ώστε να ελέγξουμε την ακρίβεια του προγράμματος. Στην Εικόνα Β.33 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο και αντίστοιχα στην Εικόνα Β.34 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης του ακίνητου κυλίνδρου.



Εικόνα Β.33: Σύγκριση οριζοντιών δυνάμεων διέγερσης

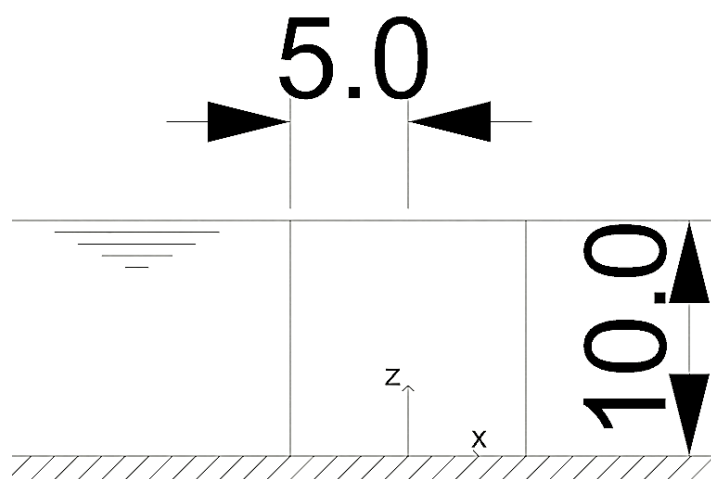


Εικόνα Β.34: Σύγκριση μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης του ακίνητου κυλίνδρου

Παράρτημα Γ

Κατακόρυφος πακτωμένος κύλινδρος (αρχεία .exe)

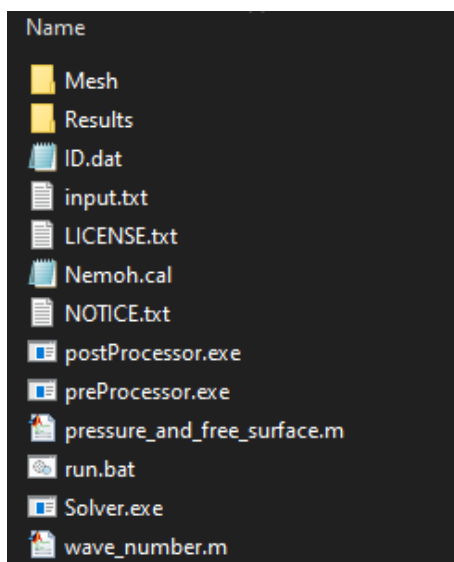
Στο παράδειγμα αυτό θα μελετήσουμε τον κατακόρυφο πακτωμένο κύλινδρο του Mazarakos (2010), ο οποίος αναλύθηκε στην παράγραφο 3.1.1. Οι διαστάσεις του κυλίνδρου φαίνονται στην Εικόνα Γ.1



Εικόνα Γ.1: Διαστάσεις κυλίνδρου σε m

Γ.1 Κατασκευή φακέλου

Πριν προχωρήσουμε στη διακριτοποίηση του κυλίνδρου θα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα φάκελο που να περιέχει τα δεδομένα του «Exe Folder». Το περιεχόμενο αυτού του φακέλου φαίνεται στην Εικόνα Γ.2.

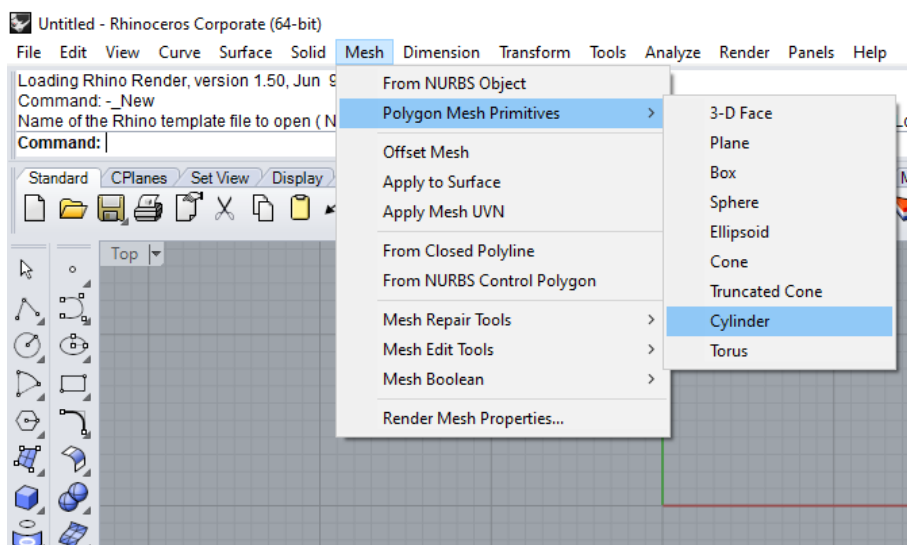


Εικόνα Γ.2: Περιεχόμενο φακέλου που θα γίνει η προσομοίωση

Γ.2 Σχεδίαση πλέγματος ενός κυλίνδρου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros

Σε πρώτο στάδιο θα πρέπει να δημιουργήσουμε το πλέγμα του κυλίνδρου. Στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros, ακολουθούμε τα βήματα:

1. Επιλέγουμε την καρτέλα «Mesh»
2. Επιλέγουμε την κατηγορία «Polygon Mesh Primitives»
3. Επιλέγουμε την εντολή «Cylinder»



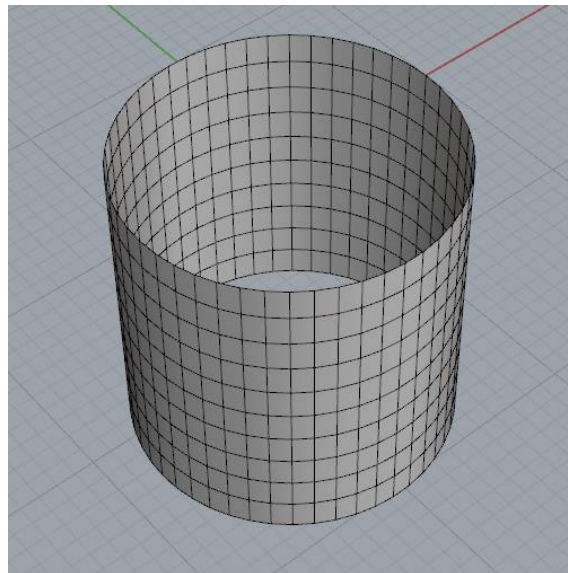
Εικόνα Γ.3: Εύρεση εντολής «Cylinder» για την κατασκευή του πλέγματος

Στη συνέχεια, θα πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό των στοιχείων που θέλουμε. Επειδή, τα 500 στοιχεία δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα, το πλέγμα που θα δημιουργήσουμε θα αποτελείται από αυτόν τον αριθμό στοιχείων. Επομένως, κάνουμε τις απαραίτητες αλλαγές στην εντολή «Cylinder»:

- VerticalFaces: 10
- AroundFaces: 50

Έχοντας αλλάξει τις απαραίτητες παραμέτρους για τον αριθμό των στοιχείων, τότε επιλέγουμε το «Solid=Yes» έτσι ώστε να γίνει «Solid=No». Αλλάζοντας αυτή την παράμετρο, το πλέγμα του κυλίνδρου θα αποτελείται μόνο από τα τοιχώματα του, όπου στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι και η βρεχόμενη επιφάνεια του κυλίνδρου. Εκτελώντας τα ακόλουθα βήματα φτιάχνουμε το πλέγμα του κυλίνδρου:

- Base of Cylinder: 0,0,0
- Radius: 5
- End of Cylinder: -10



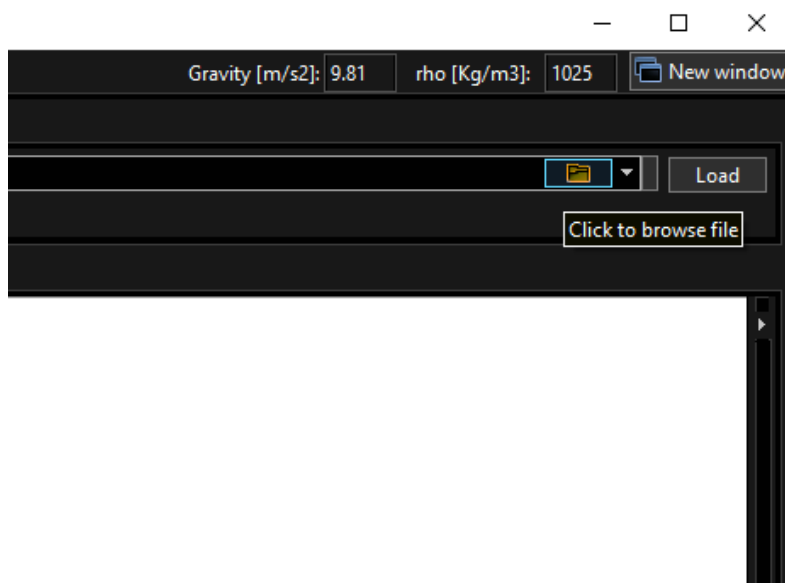
Εικόνα Γ.4: Διακριτοποίηση κυλίνδρου που αποτελείται από 550 σημεία και 500 στοιχεία

Στο «File» επιλέγουμε το «Save as» και αλλάζουμε τη μορφή του αρχείου από «Rhino 3D Models (*.3dm)» σε μορφή «WAMIT (*.gdf)». Στη συνέχεια, εντοπίζουμε το φάκελο που θα εκτελέσουμε την προσομοίωση και πατάμε «Save».

Γ.3 Αξιοποίηση του προγράμματος BEMRosetta

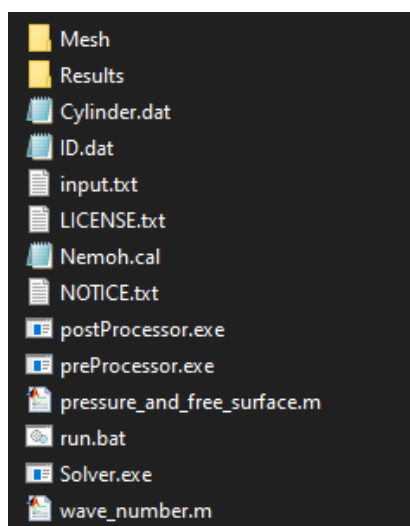
Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα BEMRosetta, τότε στην καρτέλα «Load» επιλέγουμε το εικονίδιο με το φάκελο που είναι δίπλα στο «Load». Στη συνέχεια εντοπίζουμε το

φάκελο που αποθηκεύσαμε την διακριτοποίηση του κυλίνδρου και την επιλέγουμε δύο φορές.



Εικόνα Γ.5: Επιλέγουμε το εικονίδιο με τον φάκελο

Στη συνέχεια, επιλέγουμε την καρτέλα «Save as» και ελέγχουμε αν το κουτάκι xz είναι επιλεγμένο, δηλαδή αν έχει ενεργοποιηθεί η συμμετρία ως προς αυτό το επίπεδο, και αν είναι επιλεγμένο το «Nemoh.dat», αν όχι το επιλέγουμε. Αφού το ελέγξουμε, τότε πατάμε το εικονίδιο με το φάκελο που βρίσκεται δίπλα από το κουμπί «Convert» και εντοπίζουμε το φάκελο που θα εκτελέσουμε την προσομοίωση. Εφόσον τον εντοπίσουμε, τότε αποθηκεύουμε το αρχείο με όνομα «Cylinder.dat».



Εικόνα Γ.6: Περιεχόμενο φακέλου μετά την κατασκευή των αρχείων με τις πληροφορίες για το πλέγμα του κάθε κυλίνδρου της διάταξης

Γ.4 Προσαρμογή του αρχείου «Nemoh.cal»

Όπως αναφέρθηκε και στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος BEM NEMOH, το αρχείο «Nemoh.cal» πρέπει να προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με την προσομοίωση που θέλουμε να κάνουμε. Στην Εικόνα Γ.7 φαίνεται το περιεχόμενο του αρχείου «Nemoh.cal», το οποίο θα προσαρμόσουμε.

```
----- Environment -----
1000.0          ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81           ! G           ! M/S**2      ! Gravity
0.             ! DEPTH      ! M           ! Water depth
0.             ! XEFF YEFF  ! M           ! Wave measurement point
-----
1              ! Number of bodies
-----
1              ! Body 1
Cylinder.dat  ! Name of mesh file
540 300       ! Number of points and number of panels
6            ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -7.5 ! Roll about CGS
2 0. 1. 0. 0. 0. -7.5 ! Pitch about CGS
2 0. 0. 1. 0. 0. -7.5 ! Yaw about CGS
6            ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -7.5 ! Moment force in x direction about CGS
2 0. 1. 0. 0. 0. -7.5 ! Moment force in y direction about CGS
2 0. 0. 1. 0. 0. -7.5 ! Moment force in z direction about CGS
0            ! Number of lines of additional information
-----
41            ! Load cases to be solved
0.1 2.0      ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1 0. 0.      ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
-----
1            ! Post processing
0.1 10.      ! IRF          ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
0          ! Show pressure
360. 0. 90.  ! Kochin function ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
0 2 1000. 2. ! Free surface elevation ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction
```

Εικόνα Γ.7: Περιεχόμενο αρχείου «Nemoh.cal»

Οι πρώτες αλλαγές που θα κάνουμε αφορούν τις συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή την πυκνότητα του νερού και το βάθος της περιοχής εγκατάστασης, οι οποίες πρέπει να ανταποκρίνονται στα δεδομένα μας. Στην Εικόνα Γ.8 φαίνονται οι αλλαγές που έγιναν.

```
----- Environment -----
1025.0         ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81          ! G           ! M/S**2      ! Gravity
10.           ! DEPTH      ! M           ! Water depth
0.           ! XEFF YEFF  ! M           ! Wave measurement point
```

Εικόνα Γ.8: Προσαρμοσμένες περιβαλλοντολογικές συνθήκες

Στη συνέχεια αφήνουμε τον αριθμό των σωμάτων ως έχει και προχωράμε στα δεδομένα που πρέπει να ορίσουμε για το σώμα. Προκειμένου να βρούμε τον αριθμό των σημείων και στοιχείων, ανοίγουμε το αρχείο «Cylinder.dat» και εκτελούμε τα βήματα υπολογισμού τους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο Α.3.1 του παραρτήματος Α. Αφού αλλάξουμε το κέντρο βάρους στους βαθμούς ελευθερίας και στις γενικευμένες δυνάμεις, τότε μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα. Ο λόγος που δεν επηρεάζουμε τους βαθμούς ελευθερίας του σώματος είναι επειδή έστω και ένας βαθμός χρειάζεται προκειμένου να διαβάσουμε τα αποτελέσματα στο Matlab. Στην Εικόνα Γ.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του σώματος.

```

--- Body 1 -----
Cylinder.dat          ! Name of mesh file
550      500          ! Number of points and number of panels
6          ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -5. ! Roll about CdG
2 0. 1. 0. 0. 0. -5. ! Pitch about CdG
2 0. 0. 1. 0. 0. -5. ! Yaw about CdG
6          ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -5 ! Moment force in x direction about CdG
2 0. 1. 0. 0. 0. -5 ! Moment force in y direction about CdG
2 0. 0. 1. 0. 0. -5 ! Moment force in z direction about CdG
0          ! Number of lines of additional information

```

Εικόνα Γ.9: Χαρακτηριστικά του σώματος

Το επόμενο βήμα που πρέπει να γίνει είναι να οριστεί ο αριθμός των συχνοτήτων που θα λυθεί το πρόβλημα, καθώς και η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.10.

```

--- Load cases to be solved -----
50      0.1      2.0          ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1       0.       0.          ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)

```

Εικόνα Γ.10: Ορισμός αριθμού συχνοτήτων και γωνία πρόσπτωσης κυματισμού

Το τελευταίο βήμα, είναι να ορίσουμε τον αριθμό των γωνιών Kochin, να ενεργοποιήσουμε την επιλογή για τον υπολογισμό της πίεσης και της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς και να ορίσουμε τις διαστάσεις του χώρου και τον αριθμό των σημείων σε αυτόν. Στην Εικόνα Γ.11 φαίνονται αυτά που ορίστηκαν.

```

--- Post processing -----
0       0.1      10.          ! IRF
1          ! Show pressure
361.    0.       360.        ! Kochin function
200     200     20.      20.   ! Free surface elevation

```

Εικόνα Γ.11: Ορισμός γωνιών για τις συναρτήσεις Kochin, ενεργοποίηση υπολογισμών πίεσης και ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας

Έχοντας κάνει αυτά τα βήματα η τελική μορφή που πρέπει να έχει το αρχείο «Nemoh.cal» φαίνεται στην Εικόνα Γ.12.

```

----- Environment -----
1025.0      ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81       ! G           ! M/S**2      ! Gravity
10.        ! DEPTH       ! M           ! Water depth
0.         ! XEFF VEFF   ! M           ! Wave measurement point
----- Description of floating bodies -----
1          ! Number of bodies
----- Body 1 -----
Cylinder.dat ! Name of mesh file
550 500     ! Number of points and number of panels
6         ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -5. ! Roll about CDG
2 0. 1. 0. 0. 0. -5. ! Pitch about CDG
2 0. 0. 1. 0. 0. -5. ! Yaw about CDG
6         ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -5. ! Moment force in x direction about CDG
2 0. 1. 0. 0. 0. -5. ! Moment force in y direction about CDG
2 0. 0. 1. 0. 0. -5. ! Moment force in z direction about CDG
0         ! Number of lines of additional information
----- Load cases to be solved -----
50 0.1 2.0 ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1 0. 0. ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
----- Post processing -----
0 0.1 10. ! IRF          ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
1 ! Show pressure
361. 0. 360. ! Kochin function ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
200 200 20. 20. ! Free surface elevation ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction

```

Εικόνα Γ.12: Τελική μορφή αρχείου «Nemoh.cal»

Τέλος, στο φάκελο που θα γίνει η προσομοίωση εκτελούμε το αρχείο «run.bat» προκειμένου να τρέξει το πρόγραμμα.

```

Summary of calculation
-> Water depth = 10.00 m
-> 50 wave frequencies from 0.1000 to 2.0000
-> 1 wave directions from 0.0000 to 0.0000
-> 6 radiation problems
-> 6 forces

```

Εικόνα Γ.13: Το πρόγραμμα ξεκίνησε να διαβάζει τα δεδομένα του προβλήματος

```

-> Initialisation . . Done !
-> Solve BVPs and calculate forces

Problem 1 / 350 .

```

Εικόνα Γ.14: Το πρόγραμμα ξεκίνησε τους υπολογισμούς

Γ.5 Υπολογισμός πίνακα μάζας και υδροστατικών όρων επαναφοράς

Παρόλο που ο κύλινδρος είναι πακτωμένος και δεν κινείται, για λόγους κατανόησης και εξάσκησης κατασκευάζουμε τους πίνακες μάζας και υδροστατικών όρων επαναφοράς του σώματος. Οι πίνακες της μάζας και των υδροστατικών όρων επαναφοράς του κυλίνδρου είναι οι ακόλουθοι:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix}$$

$$KH = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

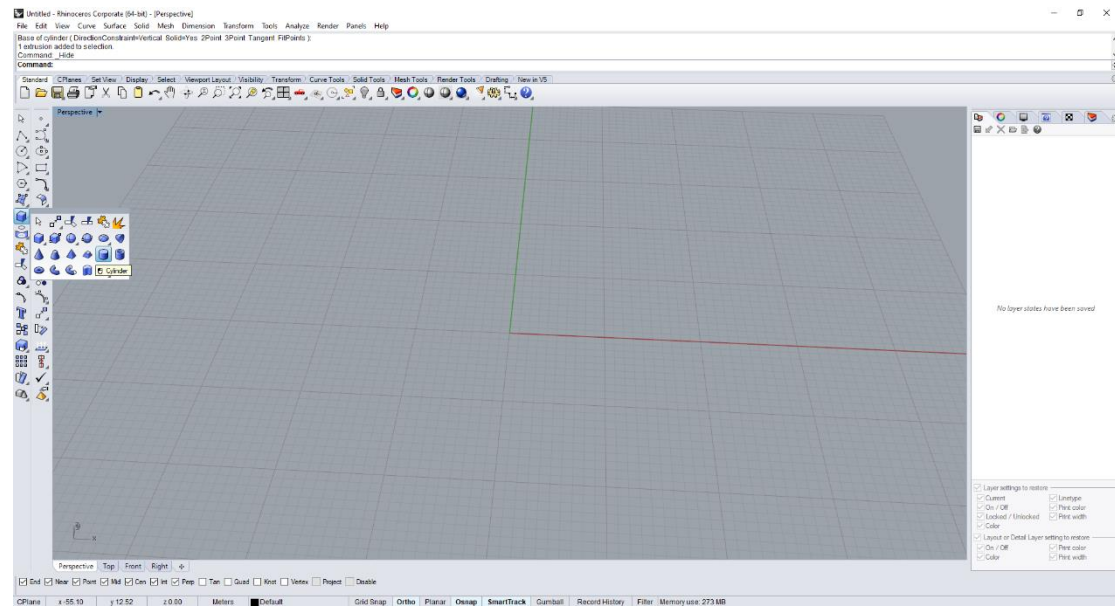
Πριν ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς για κάθε κύλινδρο θα ορίσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων ως προς το κέντρο βάρους του κυλίνδρου. Με τον τρόπο αυτό ο πίνακας ροπών όγκου που περιέχεται στον πίνακα της μάζας γράφεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_{11i} & I_{12i} & I_{13i} \\ I_{21i} & I_{22i} & I_{23i} \\ I_{31i} & I_{32i} & I_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_i R_i^2}{4} + \frac{m_i H_{C_i}^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_i R_i^2}{4} + \frac{m_i H_{C_i}^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_i R_i^2}{2} \end{bmatrix}$$

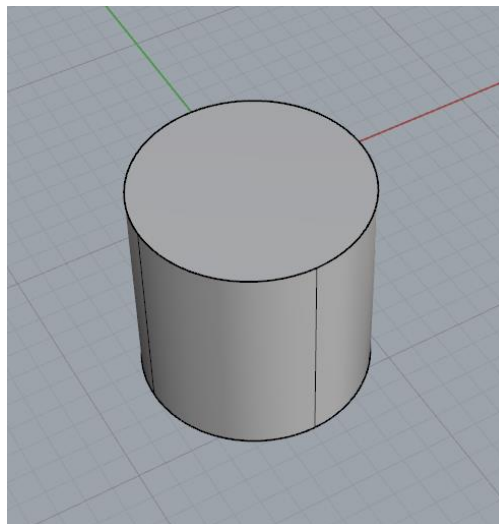
Όπου H_C είναι το ύψος του κυλίνδρου

Από το πρόγραμμα Rhinoceros εντοπίζουμε την εντολή «Cylinder», όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.15, και ορίζουμε τις ακόλουθες μεταβλητές:

- **Base of cylinder:** 0,0,0
- **Radius:** 5
- **End of Cylinder:** -10



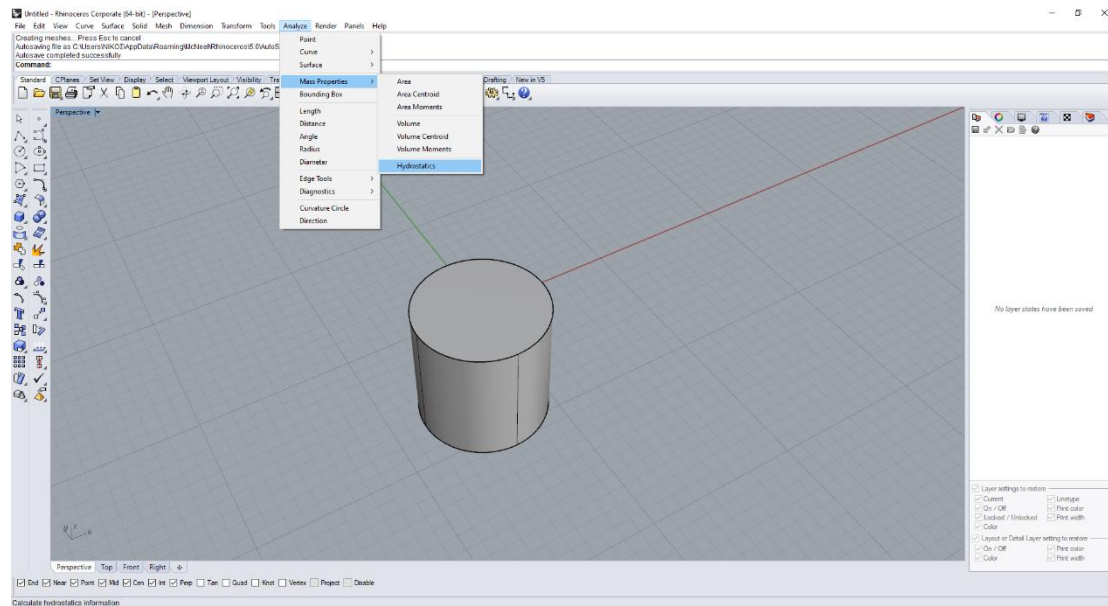
Εικόνα Γ.15: εντοπισμός εντολής «Cylinder»



Εικόνα Γ.16: Ο κύλινδρος που κατασκευάστηκε με την εντολή «Cylinder»

Στην συνέχεια από την καρτέλα «Analyze» εντοπίζουμε την κατηγορία «Mass Properties» και επιλέγουμε το «Hydrostatics», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.20. Μια βασική παράμετρος που πρέπει να ορίσουμε, πριν επιλέξουμε τον κύλινδρο, είναι που βρίσκεται η ανύψωση του κύματος. Δηλαδή:

- **Water Elevation: 0**



Εικόνα Γ. 17: Εντοπισμός εντολής «Hydrostatics»

Αφού επιλέξουμε το σώμα διαβάζουμε τις ακόλουθες τιμές:

$$(x_B, y_B, z_B) = (0, 0, -5)$$

$$\nabla = 785.398 \text{ m}^3$$

$$WPA = 196 \text{ m}^2$$

Η μάζα του σώματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα του νερού με τον όγκο εκτοπίσματος:

$$m = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 785.398 \text{ m}^3 = 805032.95 \text{ kg}$$

Οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του κυλίνδρου είναι οι ακόλουθες:

$$(x_G, y_G, z_G) = (0, 0, -5)$$

Εφόσον έχουμε όλα τα δεδομένα που χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό του πίνακα της μάζας του κάθε σώματος, τότε στο Matlab ο πίνακας αυτός έχει τιμή όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.18.

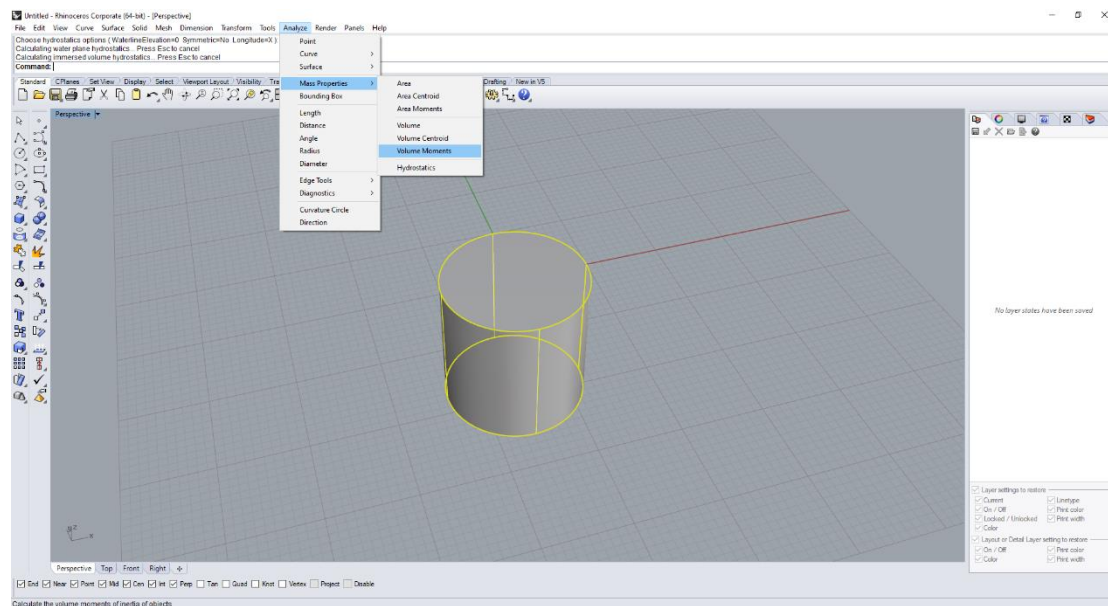
$$M =$$

$$1.0e+08 *$$

0.0081	0	0	0	-0.0403	0
0	0.0081	0	0.0403	0	0
0	0	0.0081	0	0	0
0	0.0403	0	0.1174	0	0
-0.0403	0	0	0	0.1174	0
0	0	0	0	0	1.0063

Εικόνα Γ.18: Πίνακας μάζας

Αντίστοιχα κατασκευάζουμε τον πίνακα των υδροστατικών όρων επαναφοράς, όπου τα μόνα στοιχεία εισόδου είναι ο όγκος του σώματος, το ύψος του κυλίνδρου και το εμβαδό της επιφάνειας ισάλου. Τον όγκο του κυλίνδρου τον λαμβάνουμε από την καρτέλα «Analyze» εντοπίζοντας την κατηγορία «Mass Properties» και επιλέγοντας το «Volume Moments», όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.19.



Εικόνα Γ.19: Εντοπισμός εντολής «Volume Moments»

Ο όγκος του σώματος στην περίπτωση αυτή είναι ίδιος με το εκτόπισμα, όμως αυτό το βήμα το κάνουμε διότι αν ο κύλινδρος είναι πλωτός, τότε δεν είναι ίδιος με το εκτόπισμα. Ο πίνακας των υδροστατικών όρων επαναφοράς στη γενική του μορφή υπολογίζεται ως εξής:

$$KH = \rho g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & WPA & WPA \times y_{wl} & -WPA \times x_{wl} & 0 \\ 0 & 0 & WPA \times y_{wl} & \frac{\pi R^4}{4} + \nabla(z_B - z_G) & -WPA \times y_{wl} \times x_{wl} & \nabla(x_G - x_B) \\ 0 & 0 & -WPA \times x_{wl} & -WPA \times y_{wl} \times x_{wl} & \frac{\pi R^4}{4} + \nabla(z_B - z_G) & \nabla(y_G - y_B) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Όπου (x_{wl}, y_{wl}) είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της ισάλου, αλλά επειδή το σώμα είναι κύλινδρος και έχουμε θεωρήσει ότι το σύστημα συντεταγμένων του σώματος είναι στο κέντρο του, τότε αυτές είναι ίσες με το 0. Κατασκευάζουμε τον πίνακα των υδροστατικών όρων επαναφοράς στο Matlab, όπου οι τιμές του φαίνονται στην Εικόνα Γ.20.

```

KH =

1.0e+06 *

     0     0     0     0     0     0
     0     0     0     0     0     0
     0     0  1.9708     0     0     0
     0     0     0  4.9359     0     0
     0     0     0     0  4.9359     0
     0     0     0     0     0     0

```

Εικόνα Γ.20: Πίνακας υδροστατικών όρων επαναφοράς

Γ.6 Ανάγνωση αποτελεσμάτων και οπτικοποίηση τους

Αφού τελειώσει το πρόγραμμα BEM NEMOH τους υπολογισμούς, σειρά έχει η ανάγνωση τους κάνοντας χρήση του Matlab. Εισάγουμε τις απαραίτητες μεταβλητές στον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.21.

```

%% Input

nbfreq=50;
w_min=0.1;
w_max=2.0;
w=linspace(w_min,w_max,nbfreq)';
nw=length(w);

nBodies=1; %Number of Bodies

dof=[1 2 3 4 5 6];
nb_of_dof=length(dof);

forces=[1 2 3 4 5 6];
nb_of_forces=length(dof);

rep='Results';

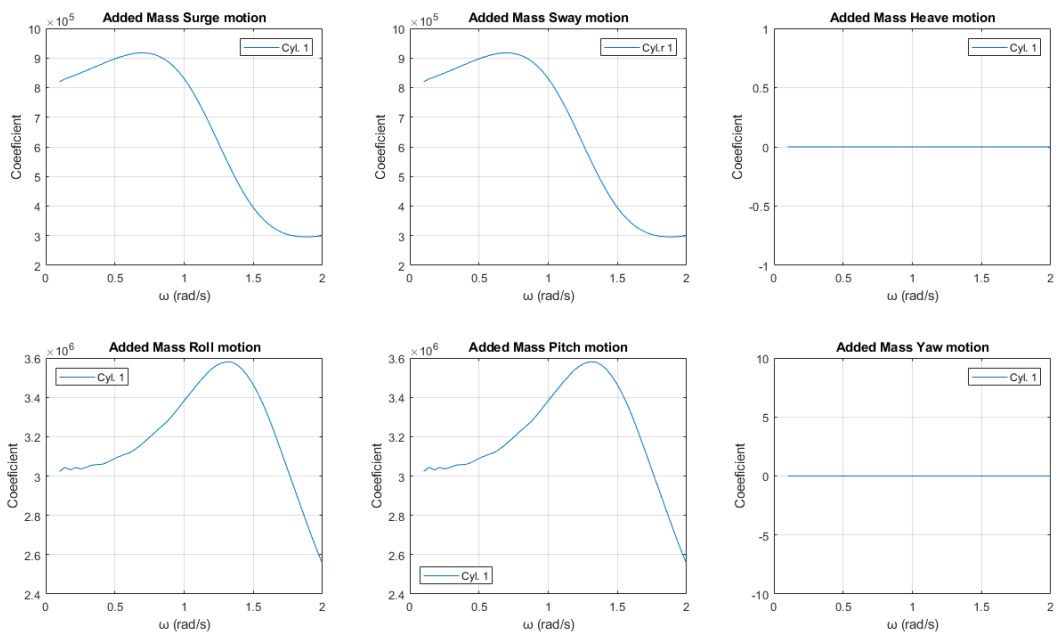
%Free Surface
FS_X=200; %Number of points in x direction
FS_Y=200; %Number of points in y direction
FS_dim=[20 20]; %Dimensions of domain in x and y direction

%Pressure
choice_pressure=1;

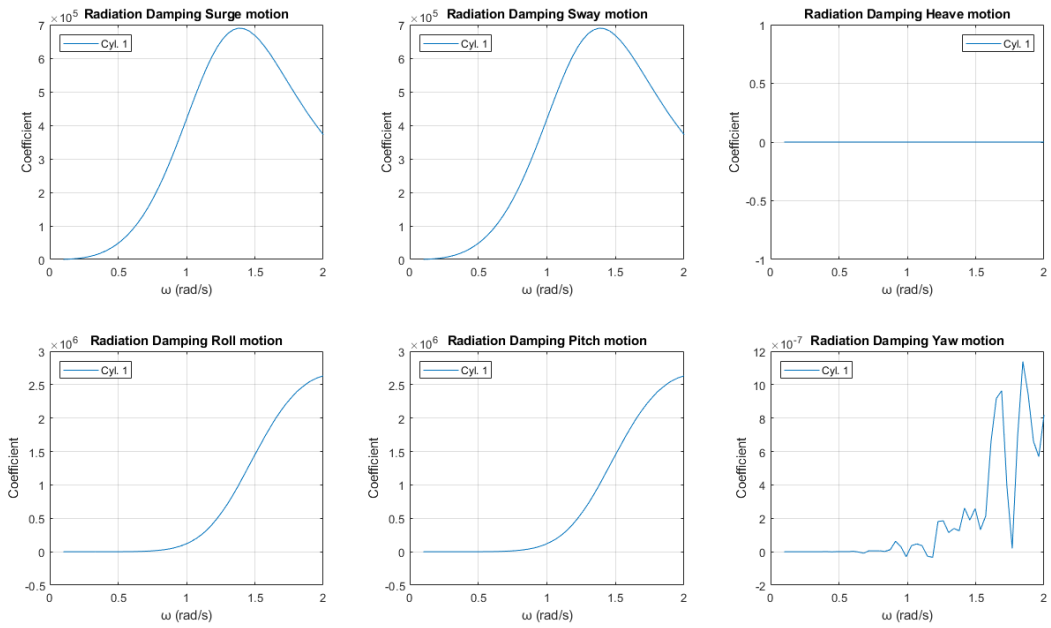
```

Εικόνα Γ.21: Ορισμός απαραίτητων μεταβλητών στον κώδικα «Calculations.m»

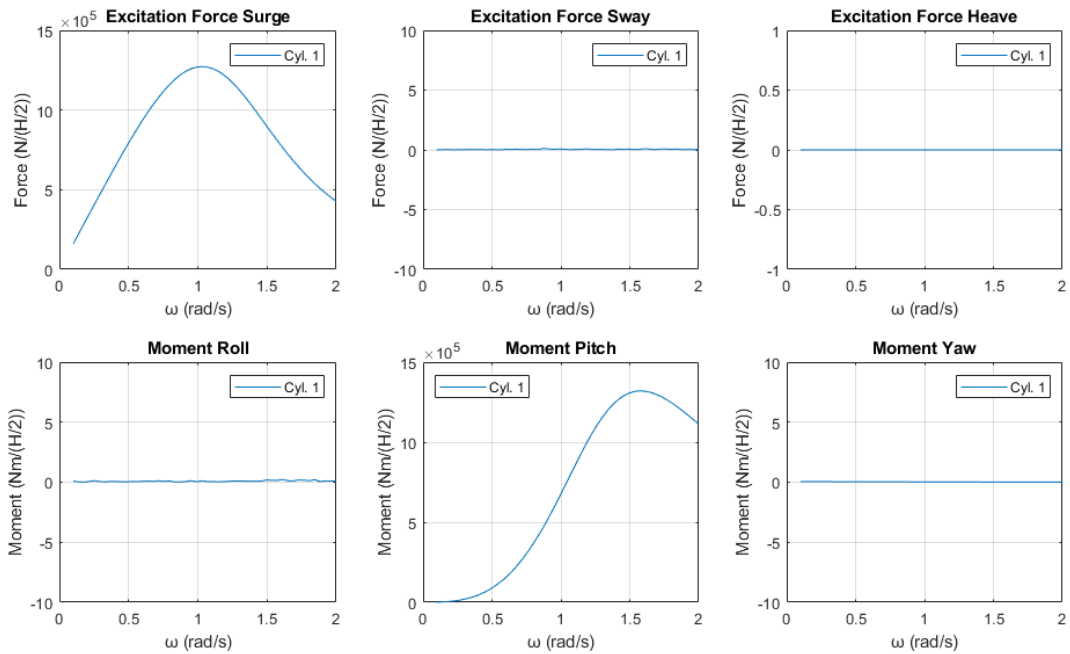
Μόλις ορίσουμε τις απαραίτητες μεταβλητές τότε επιλέγουμε το «Run», ώστε να τρέξει ο κώδικας και να διαβάσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα BEM NEMOH. Το επόμενο βήμα είναι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων για τους συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης και των δυνάμεων και ροπών διέγερσης, κάνοντας χρήση του κώδικα «A_B_Fe_Plots.m». Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης του κυλίνδρου φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα Γ.22 και Εικόνα Γ.23. Αντίστοιχα, οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης του φαίνονται στην Εικόνα Γ.24.



Εικόνα Γ.22: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$



Εικόνα Γ.23: Συντελεστές απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$



Εικόνα Γ.24: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης

Εφόσον ο κύλινδρος είναι πακτωμένος δε χρειάζεται να γίνει υπολογισμός των κινήσεων του, οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης κάνοντας χρήση του κώδικα «Drift.m». Στην Εικόνα Γ.25 ορίζουμε τις απαραίτητες μεταβλητές που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην Εικόνα Γ.26 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στον κύλινδρο.

```

clear
clc
% load RAO_sol
load Calculations

dir=0.; % Wave heading
nb_DOF=6;
nBodies=1;
plotflag=1;
rep='Results';
depth=10;
rho=1025;

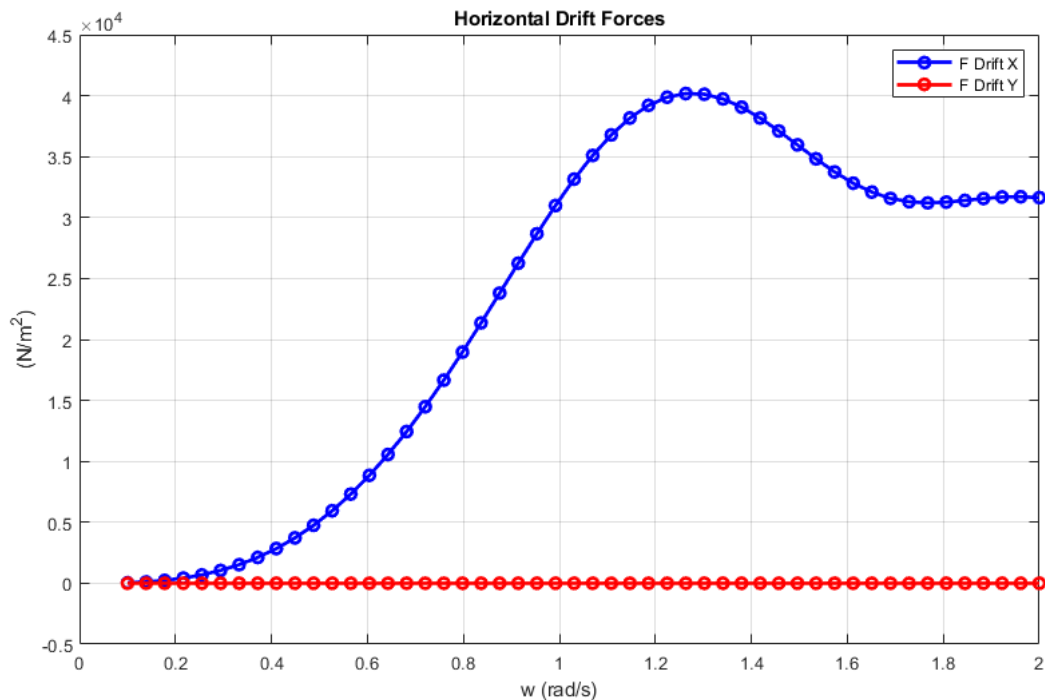
%Τα ω που υπάρχουν στο Nemoh.cal
w=Nemoh_sol.w;
nw=length(w);

% RAO=RAO_sol.RAOd; %κινούνται όλοι οι κύλινδροι
RAO=zeros(nw,nBodies*nb_DOF); %ακίνητοι όλοι οι κύλινδροι

% for n=1 %Ορίζω ποιο σώμα είναι ακίνητο
%   RAO(:,(1+6*(n-1):(6+6*(n-1)))=zeros;
% end

```

Εικόνα Γ.25: Ορισμός απαραίτητων μεταβλητών στον κώδικα «Drift.m»

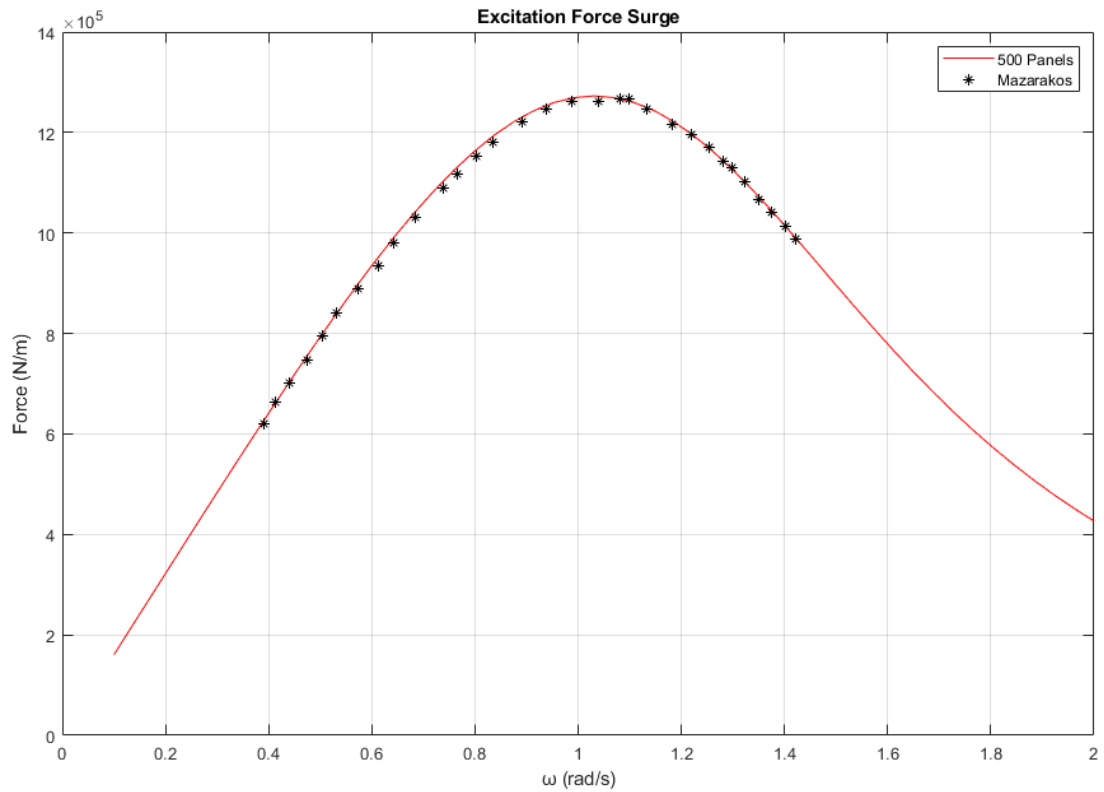


Εικόνα Γ.26: Οριζόντιες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης

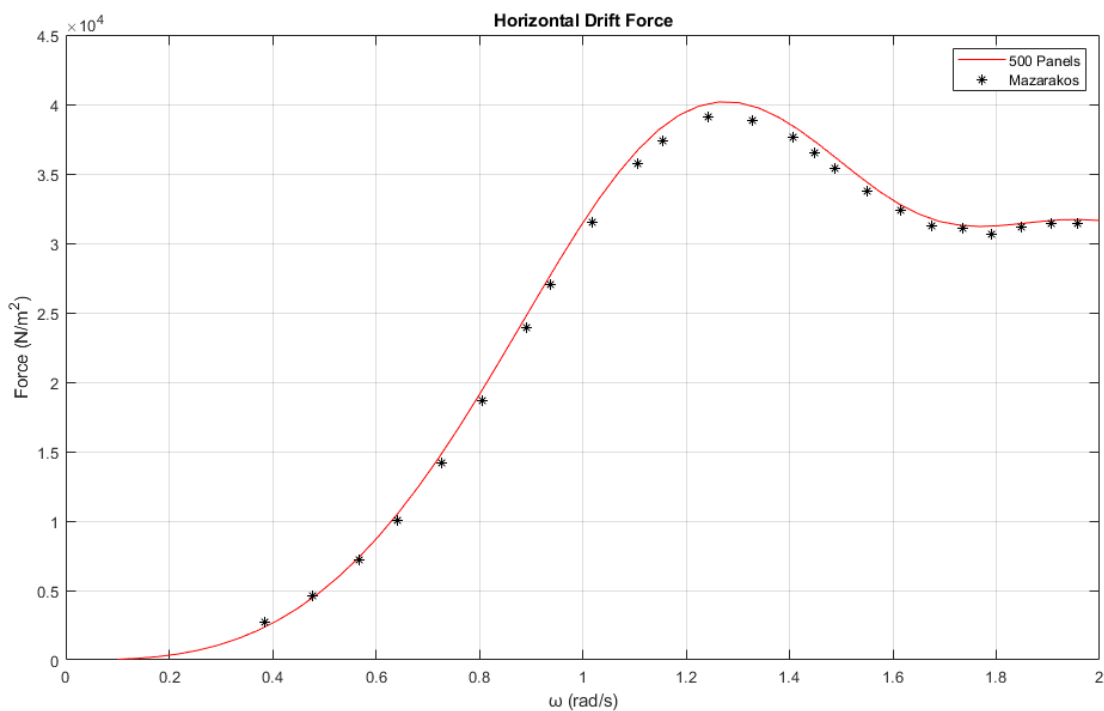
Γ.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αφού έχουμε κάνει τους βασικούς υπολογισμούς πρέπει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του προγράμματος BEM NEMOH με αυτά του Mazarakos (2010), ο οποίος κάνει χρήση αναλυτικών λύσεων, ώστε να ελέγξουμε την ακρίβεια του προγράμματος. Στην Εικόνα Γ.27 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που

ασκούνται σε κάθε κύλινδρο και αντίστοιχα στην Εικόνα Γ.28 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης.



Εικόνα Γ.27: Σύγκριση οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης



Εικόνα Γ.28: Σύγκριση οριζοντίων μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης

Γ.8 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή πίεσης σε κάθε κύλινδρο

Ο τρόπος υπολογισμού της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και της πίεσης είναι μέσω του κώδικα «pressure_and_free_surface.m». Για τον υπολογισμό του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας τα απαραίτητα δεδομένα λαμβάνονται από τον πίνακα που αποθήκευσε το Matlab από τον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.29:. Η μόνη αλλαγή που χρειάζεται στον κώδικα, παρά το γεγονός ότι το σώμα είναι πακτωμένο, είναι η εισαγωγή των κινήσεων του, ώστε να γίνει υπολογισμός του συνολικού μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.30. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι περισσότερο για εξάσκηση και κατανόηση του τρόπου με τον οποίον τρέχουμε τον κώδικα όταν ένα ή περισσότερα σώματα κινούνται. Τα αποτελέσματα του κώδικα φαίνονται στην Εικόνα Γ.31, όπου φαίνεται ο κánaβος του μέτρου της ανύψωσης, και στην Εικόνα Γ.32 αντίστοιχα, όπου φαίνεται η κατανομή του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας στον χώρο.

```
%% Free surface elevation
clc
clear
load Calculations
load RAO_sol

dof=Nemoh_sol.dof;
nb_DOF=length(dof);
nBodies=Nemoh_sol.nBodies;
w=Nemoh_sol.w;
nw=length(w);

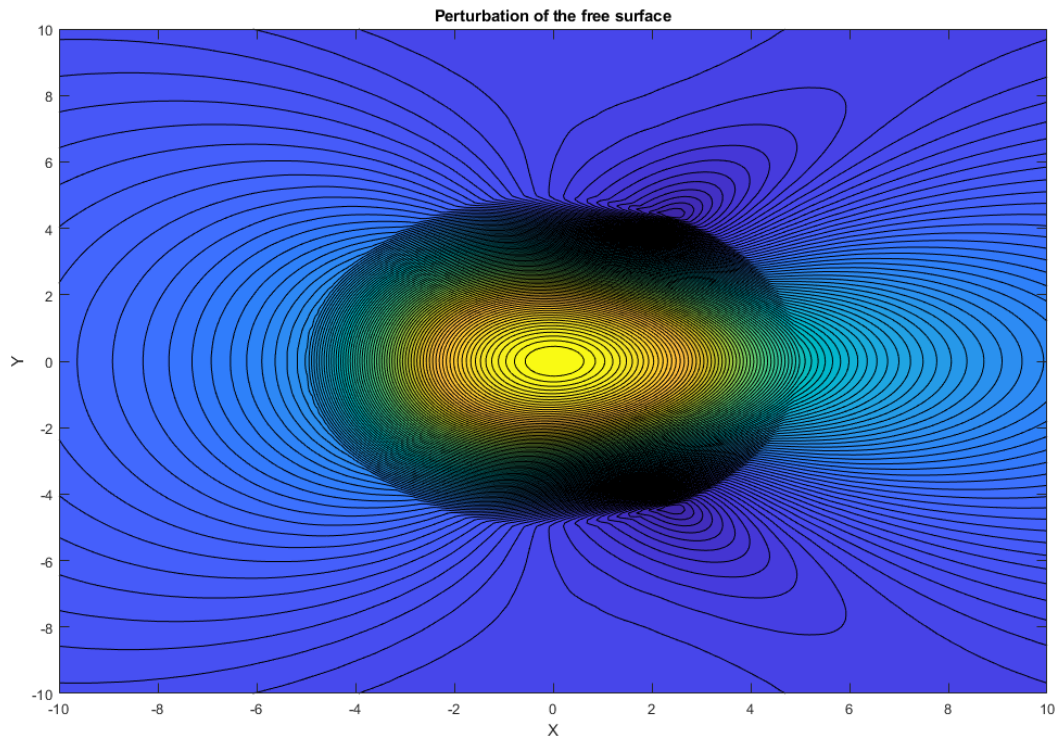
% RAO=RAO_sol.RAOd;
RAO=zeros(nw,nBodies*nb_DOF);

% for n=4 %Ορίζω ποιο σώμα είναι ακίνητο
%   RAO(:,(1+6*(n-1)):(6+6*(n-1)))=zeros;
% end
```

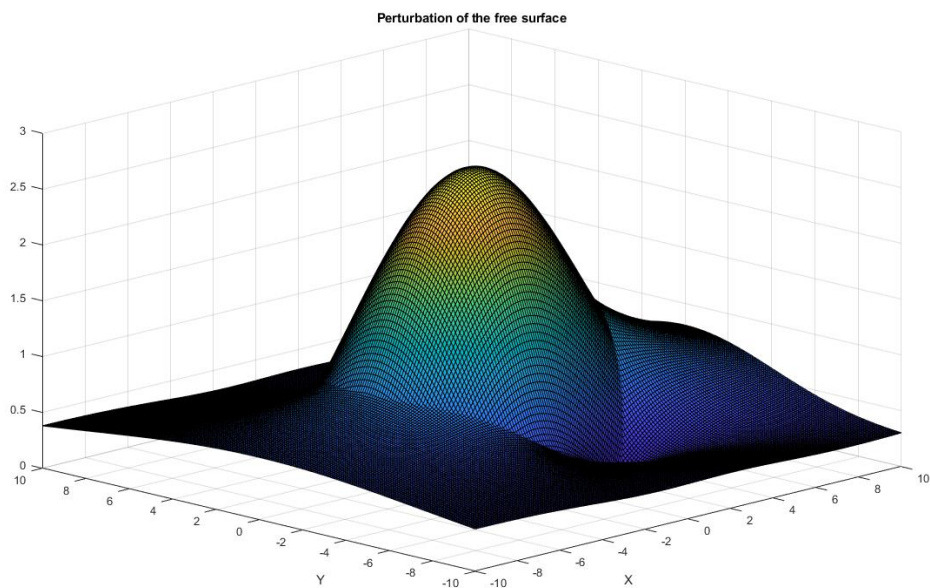
Εικόνα Γ.29: Μεταβλητές εισόδου για τον υπολογισμό του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

```
for ii=1:6
    locall(:, :, ii+1)=FStotal(:, :, ii);
    %   locall(:, :, ii+1)=FStotal(:, :, ii)+FStotal(:, :, ii+6); %multiple bodies
end
```

Εικόνα Γ.30: Εισάγουμε τις κινήσεις του κυλίνδρου



Εικόνα Γ.31: Κάναβος του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα Γ.32: Ανύψωση του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Ο κώδικας λαμβάνει απευθείας τα δεδομένα που χρειάζεται για την κατανομή της πίεσης από τον πίνακα που αποθήκευσε το Matlab, ο οποίος περιέχει τα αποτελέσματα από τον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Γ.33. Η κατανομή της πίεσης στο σώμα φαίνεται στην Εικόνα Γ.34

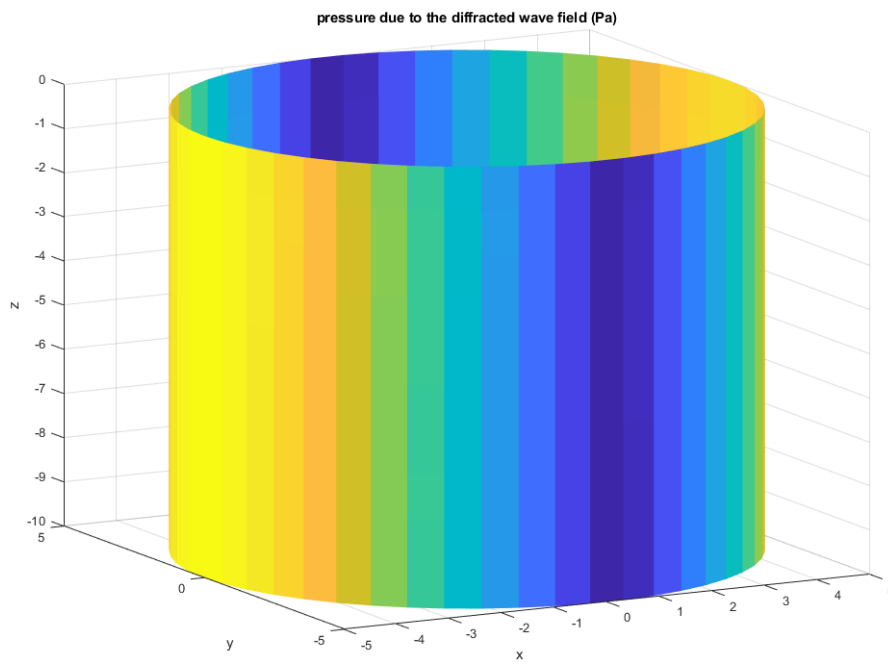
```

%% Pressure on the body
clc
clear
load Calculations

X_mesh=Pressure_sol.nodes(:,1);
Y_mesh=Pressure_sol.nodes(:,2);
Z_mesh=Pressure_sol.nodes(:,3);
P=Pressure_sol.Pressure;
w=Nemoh_sol.w;
panels=Pressure_sol.panels;

```

Εικόνα Γ.33: Ορισμός μεταβλητών εισόδου για την κατανομή της πίεσης στο σώμα

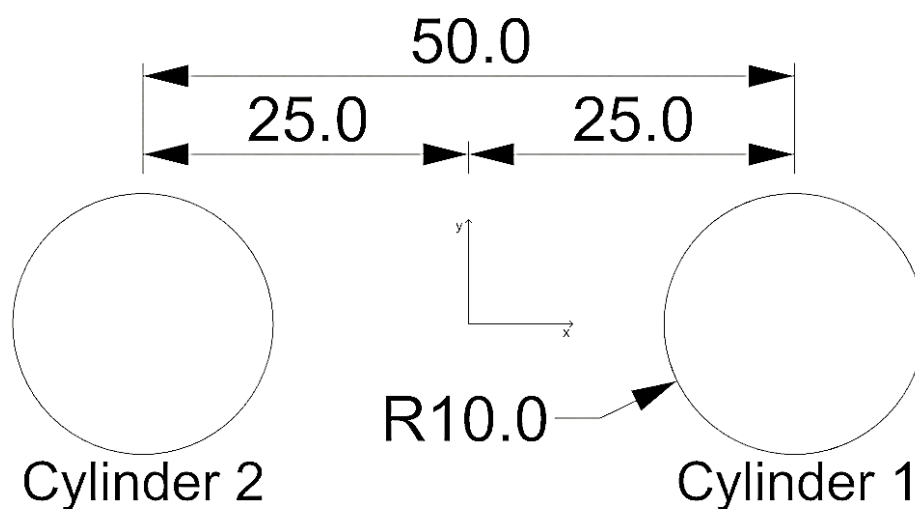


Εικόνα Γ.34: Κατανομή της πίεσης στο σώμα

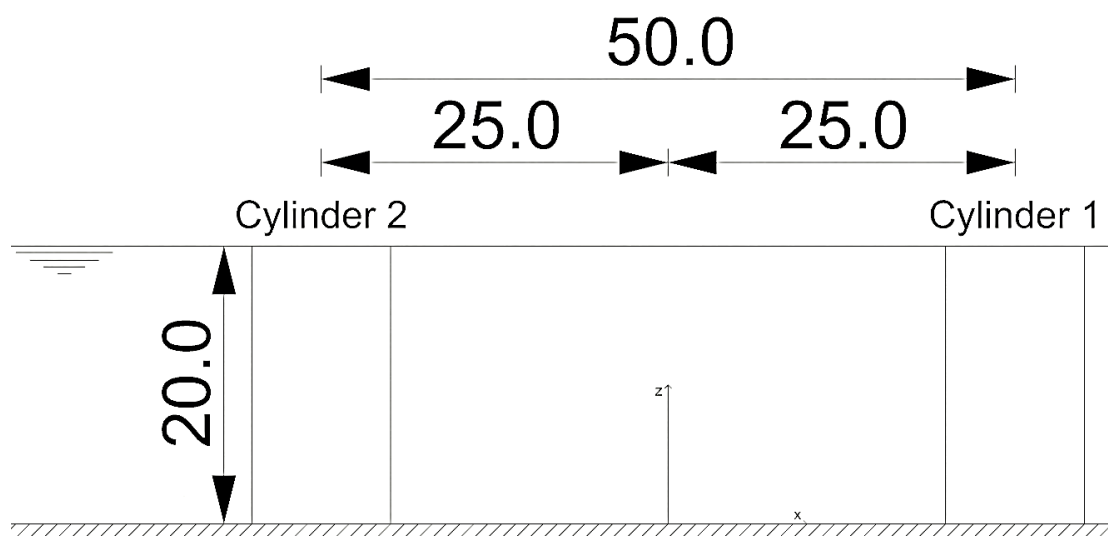
Παράρτημα Δ

Δύο κατακόρυφοι πακτωμένοι κύλινδροι (αρχεία .exe)

Στο παρών παράδειγμα θα μελετήσουμε την διάταξη των δύο κατακόρυφων πλωτών κυλίνδρων του Mazarakos (2010), η οποία αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων και οι συντεταγμένες τους στο χώρο φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα Δ.1-Εικόνα Δ.2.



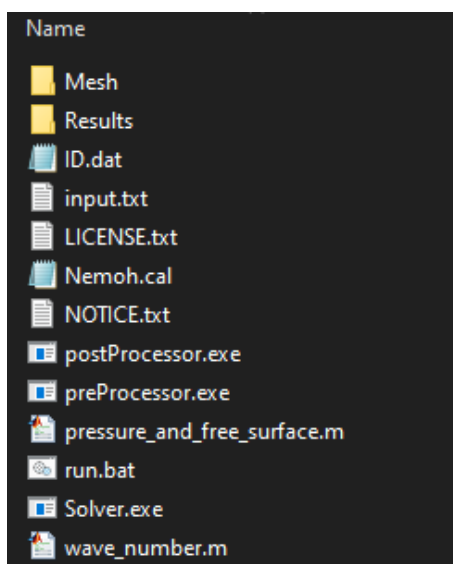
Εικόνα Δ.1: Κάτοψη της διάταξης των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων



Εικόνα Δ.2: Πλάγια όψη της διάταξης των δύο κατακόρυφων πακτωμένων κυλίνδρων

Δ.1 Κατασκευή φακέλου

Πριν προχωρήσουμε στην διακριτοποίηση των κυλίνδρων θα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα φάκελο που να περιέχει τα δεδομένα του «Exe Folder». Το περιεχόμενο αυτού του φακέλου φαίνεται στην Εικόνα Δ.3.

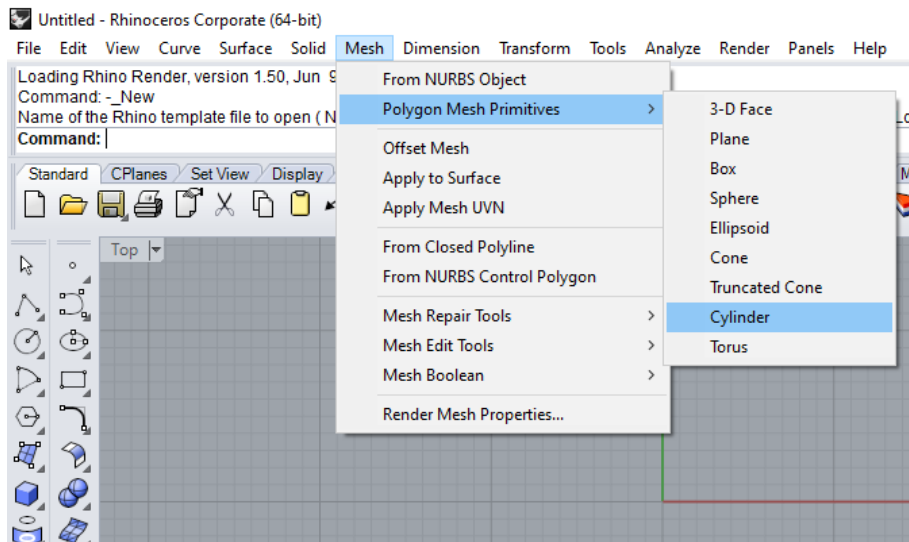


Εικόνα Δ.3: Περιεχόμενο φακέλου που θα γίνει η προσομοίωση

Δ.2 Σχεδίαση πλέγματος ενός κυλίνδρου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros

Σε πρώτο στάδιο θα πρέπει να κατασκευάσουμε το πλέγμα ενός κυλίνδρου με τις διαστάσεις που έχουν οι κύλινδροι της διάταξης. Αφού ανοίξουμε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros, τότε εκτελούμε τα ακόλουθα βήματα:

4. Επιλέγουμε την καρτέλα «Mesh»
5. Επιλέγουμε την κατηγορία «Polygon Mesh Primitives»
6. Επιλέγουμε την εντολή «Cylinder»



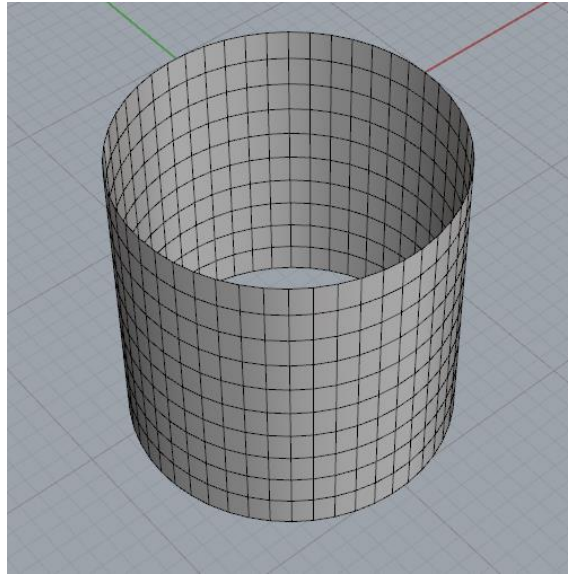
Εικόνα Δ.4: Εύρεση εντολής «Cylinder» για την κατασκευή του πλέγματος

Στη συνέχεια, θα πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό των στοιχείων που θέλουμε. Επειδή, τα 500 στοιχεία δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, το πλέγμα θα αποτελείται από αυτόν τον αριθμό στοιχείων. Επομένως, κάνουμε τις απαραίτητες αλλαγές στην εντολή «Cylinder»:

- VerticalFaces: 10
- AroundFaces: 50

Έχοντας αλλάξει τις απαραίτητες παραμέτρους για τον αριθμό των στοιχείων, τότε επιλέγουμε το «Solid=Yes» έτσι ώστε να γίνει «Solid=No». Αλλάζοντας αυτή την παράμετρο, το πλέγμα του κυλίνδρου θα αποτελείται μόνο από τα τοιχώματα του, όπου στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι και η βρεχόμενη επιφάνεια των κυλίνδρων. Εκτελώντας τα ακόλουθα βήματα ορίζουμε το πλέγμα του κυλίνδρου:

- Base of Cylinder: 0,0,0
- Radius: 10
- End of Cylinder: -20

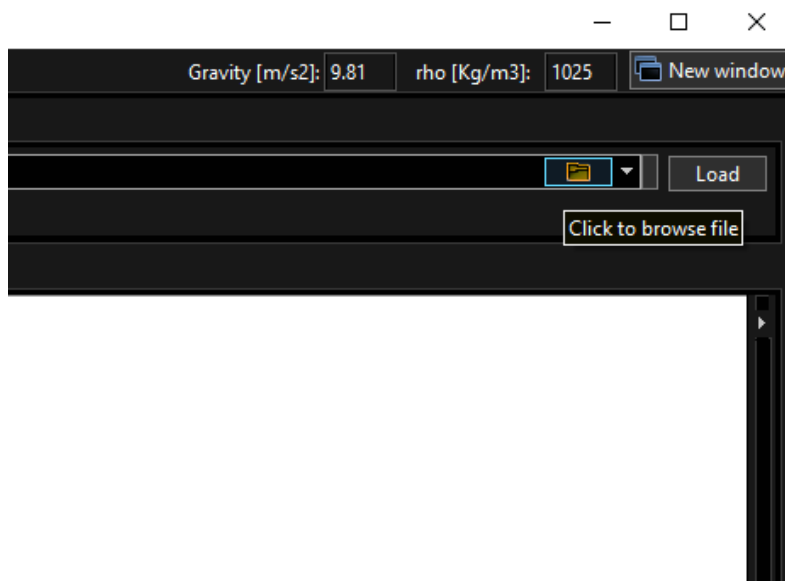


Εικόνα Δ.5: Διακριτοποίηση κυλίνδρου που αποτελείται από 550 σημεία και 500 στοιχεία

Στο «File» επιλέγουμε το «Save as» και αλλάζουμε τη μορφή του αρχείου από «Rhino 3D Models (*.3dm)» σε μορφή «WAMIT (*.gdf)». Στη συνέχεια, εντοπίζουμε το φάκελο που θα τρέξουμε την προσομοίωση και πατάμε «Save». Το αρχείο, όμως, δεν έχει αποθηκευτεί καθώς πρέπει να πατήσουμε το κουμπί «Enter» στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros, διότι εμφανίζει κάποιες επιπλέον επιλογές στο «Command Window».

Δ.3 Αξιοποίηση του προγράμματος BEMRosetta

Αφού ανοίξουμε το πρόγραμμα BEMRosetta, τότε στην καρτέλα «Load» επιλέγουμε το εικονίδιο με το φάκελο που είναι δίπλα στο «Load». Στη συνέχεια εντοπίζουμε το φάκελο που αποθηκεύσαμε τη διακριτοποίηση του κυλίνδρου και την επιλέγουμε δύο φορές.



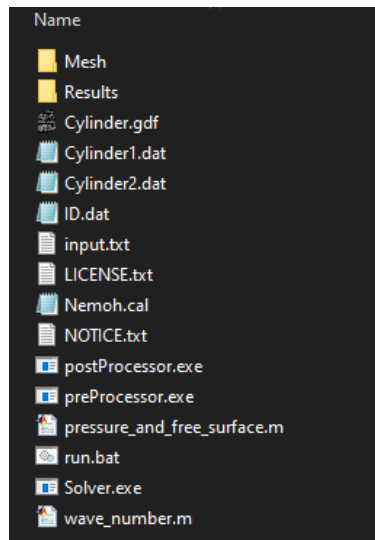
Εικόνα Δ.6: Επιλέγουμε το εικονίδιο με τον φάκελο

Επιλέγουμε την καρτέλα «Process» και εντοπίζουμε τη στήλη που λέει «Translate». Στην στήλη αυτή γράφουμε τους ακόλουθους αριθμούς και πατάμε «Translate»:

$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
25	0	0

Στη συνέχεια, επιλέγουμε την καρτέλα «Save as» και ελέγχουμε αν το «κουτάκι» xz είναι επιλεγμένο, δηλαδή αν έχει ενεργοποιηθεί η συμμετρία ως προς αυτό το επίπεδο. Επίσης πρέπει να είναι επιλεγμένο το «Nemoh .dat», αν όχι το επιλέγουμε. Αφού το ελέγξουμε, τότε πατάμε το εικονίδιο με το φάκελο που βρίσκεται δίπλα από το «Convert» και εντοπίζουμε το φάκελο που θα εκτελέσουμε την προσομοίωση. Τότε αποθηκεύουμε το αρχείο με όνομα «Cylinder1.dat». Κάνουμε την ίδια διαδικασία για τον κύλινδρο 2 με την μόνη διαφορά να βρίσκεται στην καρτέλα «Process» και στην στήλη «Translate», όπου γράφουμε τους ακόλουθους αριθμούς:

$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
-25	0	0



Εικόνα Δ.7: Περιεχόμενο φακέλου μετά την κατασκευή των αρχείων με τις πληροφορίες για το πλέγμα του κάθε κυλίνδρου της διάταξης

Δ.4 Προσαρμογή του αρχείου «Nemoh.cal»

Όπως αναφέρθηκε και στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος BEM NEMOH, το αρχείο «Nemoh.cal» πρέπει να προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με την προσομοίωση που θέλουμε να κάνουμε. Στην Εικόνα Δ.8 φαίνεται το περιεχόμενο του αρχείου «Nemoh.cal», το οποίο θα προσαρμόσουμε.

```

----- Environment -----
1000.0      ! RHO      ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81       ! G        ! M/S**2      ! Gravity
0.         ! DEPTH    ! M           ! Water Depth
0.         ! KEFF YEFF ! M           ! Wave measurement point
----- Description of floating bodies -----
1          ! Number of bodies
----- Body 1 -----
Cylinder.dat ! Name of mesh file
540 300     ! Number of points and number of panels
6          ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -7.5 ! Roll about Cdg
2 0. 1. 0. 0. 0. -7.5 ! Pitch about Cdg
2 0. 0. 1. 0. 0. -7.5 ! Yaw about Cdg
6          ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -7.5 ! Moment force in x direction about Cdg
2 0. 1. 0. 0. 0. -7.5 ! Moment force in y direction about Cdg
2 0. 0. 1. 0. 0. -7.5 ! Moment force in z direction about Cdg
0          ! Number of lines of additional information
----- Load cases to be solved -----
41 0.1 2.0 ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1 0. 0. ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
----- Post processing -----
1 0.1 10. ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
0
360. 0. 90. ! Kochin function ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
0 2 1000. 2. ! Free surface elevation ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction

```

Εικόνα Δ.8: Περιεχόμενο αρχείου «Nemoh.cal»

Οι πρώτες αλλαγές που θα κάνουμε αφορούν τις συνθήκες περιβάλλοντος, δηλαδή την πυκνότητα του νερού και το βάθος της περιοχής εγκατάστασης, οι οποίες πρέπει να ανταποκρίνονται στα δεδομένα μας. Στην Εικόνα Δ.9 φαίνονται οι αλλαγές που έγιναν

```

--- Environment -----
1025.0                ! RHO                ! KG/M**3            ! Fluid specific volume
9.81                  ! G                  ! M/S**2            ! Gravity
20.                   ! DEPTH              ! M                  ! Water depth
0.                   0.                  ! XEFF YEFF         ! M                  ! Wave measurement point

```

Εικόνα Δ.9: Προσαρμοσμένες περιβαλλοντολογικές συνθήκες

Το επόμενο βήμα είναι να αλλάξουμε τον αριθμό των σωμάτων από 1 σε 2, όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.10.

```

--- Description of floating bodies -----
2                               ! Number of bodies

```

Εικόνα Δ.10: Αλλαγή του πλήθους των σωμάτων

Στη συνέχεια, πηγαίνουμε στην κατηγορία «Body 1» και αλλάζουμε το όνομα του αρχείου από «Cylinder.dat» σε «Cylinder1.dat». Προκειμένου να βρούμε τον αριθμό των σημείων και στοιχείων, ανοίγουμε το αρχείο «Cylinder1.dat» και εκτελούμε τα βήματα υπολογισμού τους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο Α.3.1 του παραρτήματος Α. Αφού αλλάξουμε το κέντρο βάρους στους βαθμούς ελευθερίας και στις γενικευμένες δυνάμεις, ακολουθούμε τα ίδια βήματα και για το δεύτερο σώμα. Ο λόγος που δεν επηρεάζουμε τους βαθμούς ελευθερίας του σώματος είναι επειδή χρειάζεται έστω και ένας βαθμός (ελευθερίας) προκειμένου να λάβουμε τα αποτελέσματα στο Matlab. Στην Εικόνα Δ.11 φαίνονται τα χαρακτηριστικά για το ένα σώμα και στην Εικόνα Δ.12 για τα δύο σώματα.

```

--- Body 1 -----
Cylinder1.dat                ! Name of mesh file
550 500                      ! Number of points and number of panels
6                             ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.         ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.         ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.         ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10        ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10        ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10        ! Yaw about a point
6                             ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.         ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.         ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.         ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10        ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10        ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10        ! Moment force in z direction about a point
0                             ! Number of lines of additional information

```

Εικόνα Δ.11: Δεδομένα για το πρώτο σώμα

```

--- Body 1 -----
Cylinder1.dat          ! Name of mesh file
550 500                ! Number of points and number of panels
6                     ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.   ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.   ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.   ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10  ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10  ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10  ! Yaw about a point
6                     ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.   ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.   ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.   ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10  ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10  ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10  ! Moment force in z direction about a point
0                     ! Number of lines of additional information
--- Body 2 -----
Cylinder2.dat          ! Name of mesh file
550 500                ! Number of points and number of panels
6                     ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.   ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.   ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.   ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10  ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10  ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10  ! Yaw about a point
6                     ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0.   ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0.   ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0.   ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10  ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10  ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10  ! Moment force in z direction about a point
0                     ! Number of lines of additional information

```

Εικόνα Δ.12: Δεδομένα και για τα δύο σώματα

Το επόμενο βήμα, είναι να οριστεί ο αριθμός των συχνοτήτων που θα λυθεί το πρόβλημα, καθώς και η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.13.

```

--- Load cases to be solved -----
50 0.1 1.4            ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1 0. 0.               ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)

```

Εικόνα Δ.13: Ορισμός αριθμού συχνοτήτων και γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού

Το τελευταίο βήμα, είναι να ορίσουμε τον αριθμό των γωνιών Kochin, να ενεργοποιήσουμε την επιλογή για τον υπολογισμό της πίεσης και της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς και να ορίσουμε τις διαστάσεις του χώρου και τον αριθμό των σημείων σε αυτόν. Στην Εικόνα Δ.14 μπορούμε να δούμε αυτή τη διαδικασία.

```

--- Post processing -----
0 0.1 10.             ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
1                     ! Snow pressure
361 0. 360.           ! Kochin function ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
200 200 100. 100.    ! Free surface elevation ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction

```

Εικόνα Δ.14: Ορισμός γωνιών για τις συναρτήσεις Kochin, ενεργοποίηση υπολογισμών πίεσης και ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας

Η τελική μορφή που πρέπει να έχει το αρχείο «Nemoh.cal» φαίνεται στην Εικόνα Δ.15.

```

----- Environment -----
1025.0      ! RHO          ! KG/M**3      ! Fluid specific volume
9.81       ! G           ! M/S**2      ! Gravity
20.        ! DEPTH       ! M           ! Water depth
0.         ! XEFF YEFF   ! M           ! Wave measurement point
----- Description of floating bodies -----
2          ! Number of bodies
----- Body 1 -----
Cylinder1.dat ! Name of mesh file
550 500     ! Number of points and number of panels
6          ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Yaw about a point
6          ! Number of resulting generalised forces
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Moment force in z direction about a point
0          ! Number of lines of additional information
----- Body 2 -----
Cylinder2.dat ! Name of mesh file
550 500     ! Number of points and number of panels
6          ! Number of degrees of freedom
1 1. 0. 0. 0. 0. 0. ! Surge
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Sway
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Heave
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Roll about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Pitch about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Yaw about a point
6          ! Number of resulting generalised forces
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in x direction
1 0. 1. 0. 0. 0. 0. ! Force in y direction
1 0. 0. 1. 0. 0. 0. ! Force in z direction
2 1. 0. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in x direction about a point
2 0. 1. 0. 0. 0. -10 ! Moment force in y direction about a point
2 0. 0. 1. 0. 0. -10 ! Moment force in z direction about a point
0          ! Number of lines of additional information
----- Load cases to be solved -----
50        ! Number of wave frequencies, Min, and Max (rad/s)
1         ! Number of wave directions, Min and Max (degrees)
----- Post processing -----
0         ! IRF
1         ! IRF calculation (0 for no calculation), time step and duration
1         ! Show pressure
361      ! Kochin function ! Number of directions of calculation (0 for no calculations), Min and Max (degrees)
200      ! Free surface elevation ! Number of points in x direction (0 for no calculations) and y direction and dimensions of domain in x and y direction

```

Εικόνα Δ.15: Τελική μορφή του αρχείου «Nemoh.cal»

Τέλος, στον φάκελο που θα γίνει η προσομοίωση εκτελούμε το αρχείο «run.bat».

```

Summary of calculation
-> Water depth = 20.00 m
-> 50 wave frequencies from 0.1000 to 1.4000
-> 1 wave directions from 0.0000 to 0.0000
-> 12 radiation problems
-> 12 forces

```

Εικόνα Δ.16: Το πρόγραμμα ξεκίνησε να διαβάζει τα δεδομένα του προβλήματος

```

-> Initialisation . . Done !
-> Solve BVPs and calculate forces
Problem 1 / 650 .

```

Εικόνα Δ.17: Το πρόγραμμα ξεκίνησε τους υπολογισμούς

Δ.5 Υπολογισμός πίνακα μάζας και υδροστατικών όρων επαναφοράς

Παρόλο που οι κύλινδροι είναι πακτωμένοι και δεν κινούνται, για λόγους κατανόησης και ορίζουμε τους πίνακες μάζας και υδροστατικών όρων επαναφοράς των σωμάτων. Οι πίνακες της μάζας και υδροστατικών όρων επαναφοράς για κάθε κύλινδρο είναι οι ακόλουθοι:

$$M_i = \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 & 0 & m_i z_{G_i} & -m_i y_{G_i} \\ 0 & m_i & 0 & -m_i z_{G_i} & 0 & m_i x_{G_i} \\ 0 & 0 & m_i & m_i y_{G_i} & -m_i x_{G_i} & 0 \\ 0 & -m_i z_{G_i} & m_i y_{G_i} & I_{11i} & I_{12i} & I_{13i} \\ m_i z_{G_i} & 0 & -m_i x_{G_i} & I_{21i} & I_{22i} & I_{23i} \\ -m_i y_{G_i} & m_i x_{G_i} & 0 & I_{31i} & I_{32i} & I_{33i} \end{bmatrix}$$

$$KH_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33i} & K_{34i} & K_{35i} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43i} & K_{44i} & K_{45i} & K_{46i} \\ 0 & 0 & K_{53i} & K_{54i} & K_{55i} & K_{56i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Όπου $i = 1, 2$ ανάλογα τον κύλινδρο

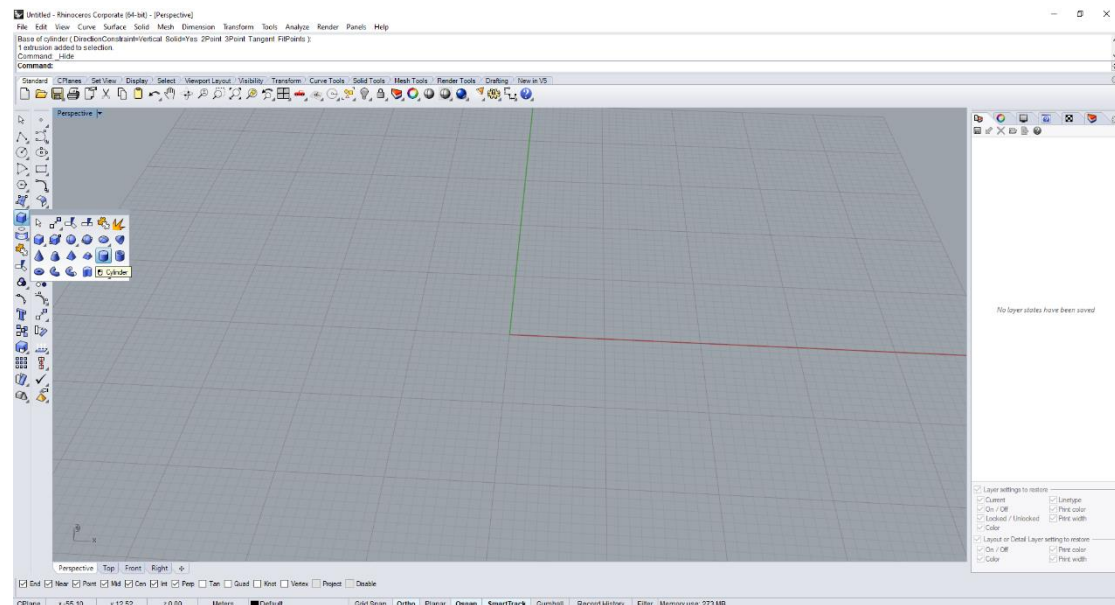
Πριν ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς για κάθε κύλινδρο θα ορίσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων ως προς το κέντρο βάρους του κάθε σώματος. Με τον τρόπο αυτό ο πίνακας ροπών όγκου που εμπεριέχεται στον πίνακα της μάζας γράφεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_{11i} & I_{12i} & I_{13i} \\ I_{21i} & I_{22i} & I_{23i} \\ I_{31i} & I_{32i} & I_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_i R_i^2}{4} + \frac{m_i H_{C_i}^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_i R_i^2}{4} + \frac{m_i H_{C_i}^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_i R_i^2}{2} \end{bmatrix}$$

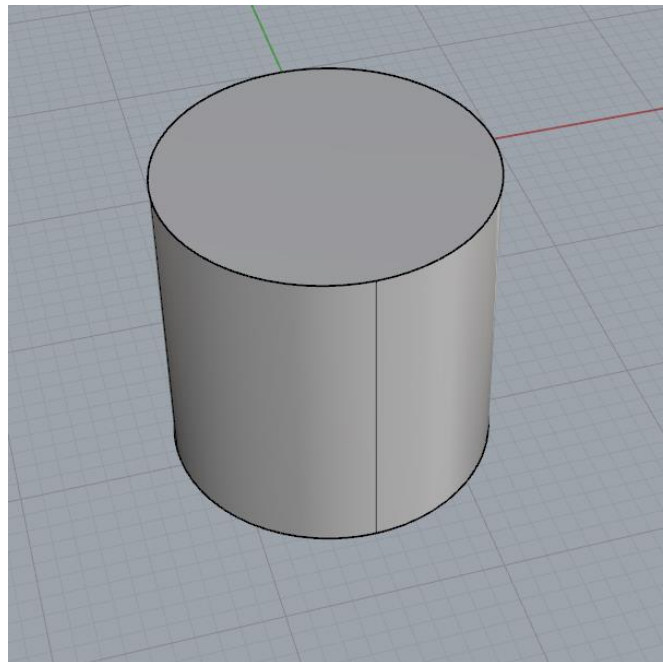
Όπου H_C είναι το ύψος του κυλίνδρου

Από το πρόγραμμα Rhinoceros εντοπίζουμε την εντολή «Cylinder», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.18, και ορίζουμε τις ακόλουθες μεταβλητές:

- **Base of cylinder:** 0,0,0
- **Radius:** 10
- **End of Cylinder:** -20



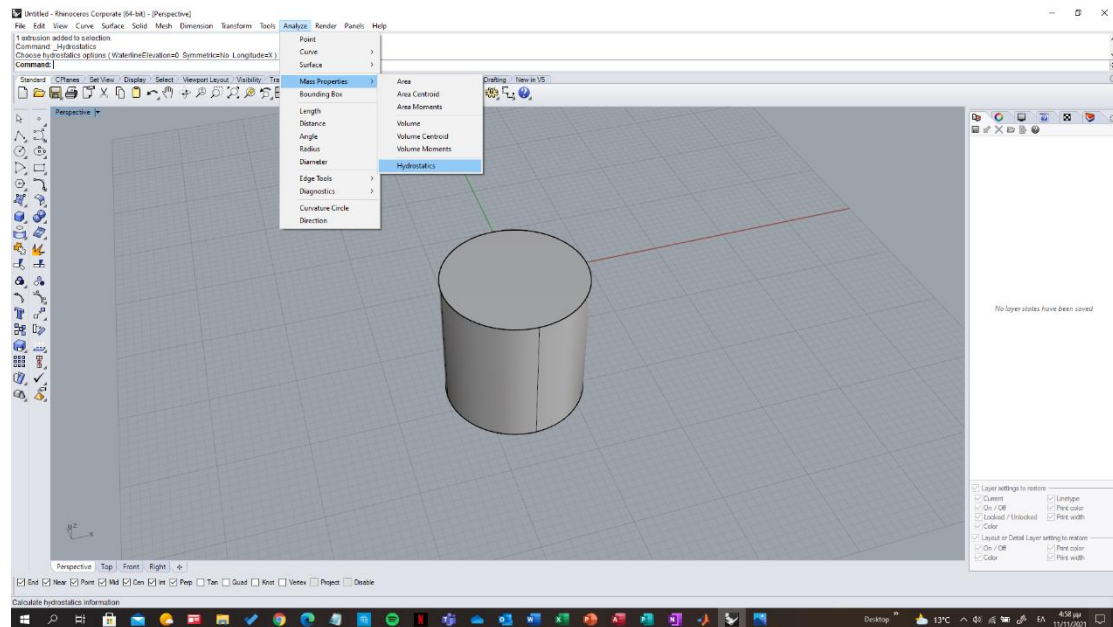
Εικόνα Δ.18: Εντοπισμός εντολής «Cylinder»



Εικόνα Δ.19: Ο κύλινδρος που κατασκευάστηκε με την εντολή «Cylinder»

Στην συνέχεια από την καρτέλα «Analyze» εντοπίζουμε την κατηγορία «Mass Properties» και επιλέγουμε το «Hydrostatics», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.20. Μια βασική παράμετρος που πρέπει να ορίσουμε, πριν επιλέξουμε τον κύλινδρο, είναι που βρίσκεται η ανύψωση του κύματος. Δηλαδή:

- **Water Elevation: 0**



Εικόνα Δ.20: Εντοπισμός εντολής «Hydrostatics»

Ο όγκος του σώματος στην περίπτωση αυτή είναι ίδιος με το εκτόπισμα. Αφού επιλέξουμε το σώμα διαβάζουμε τις ακόλουθες τιμές:

$$(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1}) = (x_{B_2}, y_{B_2}, z_{B_2}) = (0, 0, -10)$$

$$\nabla_1 = \nabla_2 = 6283.19 \text{ m}^3$$

$$WPA_1 = WPA_2 = 676 \text{ m}^2$$

Η μάζα του σώματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πυκνότητα του νερού με τον όγκο εκτοπίσματος:

$$m_1 = m_2 = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 6283.19 \text{ m}^3 = 6440269.75 \text{ kg}$$

Οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του κυλίνδρου είναι οι ακόλουθες:

$$(x_{G_1}, y_{G_1}, z_{G_1}) = (x_{G_2}, y_{G_2}, z_{G_2}) = (0, 0, -10)$$

Εφόσον έχουμε όλα τα δεδομένα για τον υπολογισμό του πίνακα της μάζας του κάθε σώματος, τότε στο Matlab ο πίνακας αυτός θα είναι ένας τρισδιάστατος πίνακας με διαστάσεις $6 \times 6 \times 2$, όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.21.

```

M
6x6x2 double

val(:,:,1) =

    1.0e+09 *

    0.0064         0         0         0    -0.0644         0
         0    0.0064         0    0.0644         0         0
         0         0    0.0064         0         0         0
         0    0.0644         0    0.3757         0         0
   -0.0644         0         0         0    0.3757         0
         0         0         0         0         0    3.2201

val(:,:,2) =

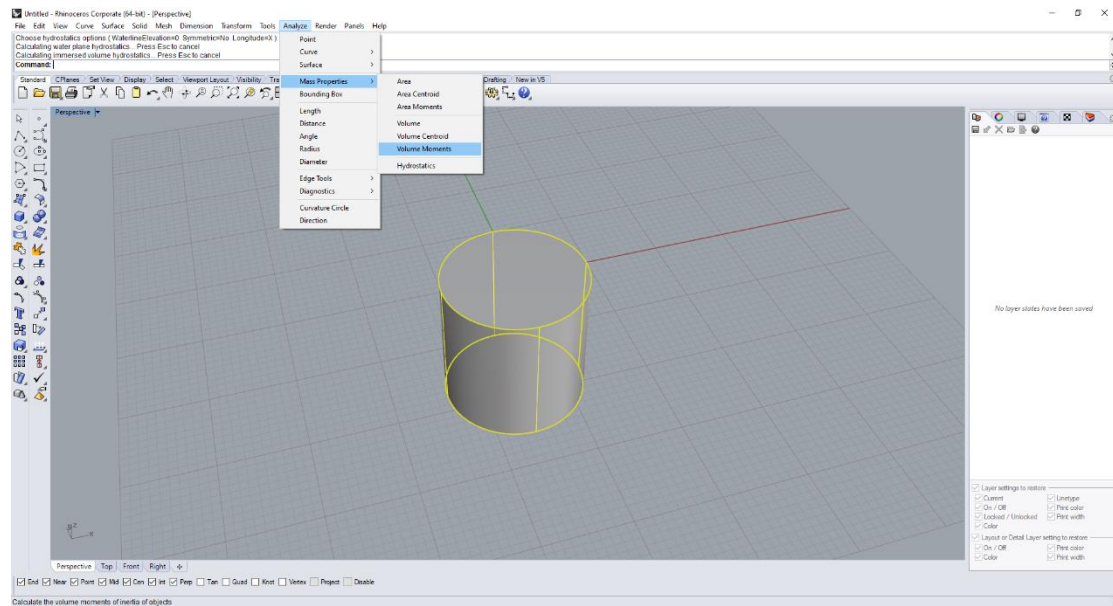
    1.0e+09 *

    0.0064         0         0         0    -0.0644         0
         0    0.0064         0    0.0644         0         0
         0         0    0.0064         0         0         0
         0    0.0644         0    0.3757         0         0
   -0.0644         0         0         0    0.3757         0
         0         0         0         0         0    3.2201

```

Εικόνα Δ.21: Πίνακας μάζας

Ομοίως, συμπληρώνουμε τον πίνακα των υδροστατικών όρων επαναφοράς, όπου τα στοιχεία μας είναι ο όγκος του σώματος, το ύψος του κυλίνδρου και το εμβαδόν της επιφάνειας της ισάλου. Τον όγκο του κυλίνδρου τον λαμβάνουμε από την καρτέλα «Analyze» εντοπίζοντας την κατηγορία «Mass Properties» και επιλέγοντας το «Volume Moments», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.22.



Εικόνα Δ.22: Εντοπισμός εντολής «Volume Moments»

Ο πίνακας των υδροστατικών όρων επαναφοράς στη γενική του μορφή υπολογίζεται ως εξής:

$$KH = \rho g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & WPA & WPA \times y_{wl} & -WPA \times x_{wl} & 0 \\ 0 & 0 & WPA \times y_{wl} & \frac{\pi R^4}{4} + \nabla(z_B - z_G) & -WPA \times y_{wl} \times x_{wl} & \nabla(x_G - x_B) \\ 0 & 0 & -WPA \times x_{wl} & -WPA \times y_{wl} \times x_{wl} & \frac{\pi R^4}{4} + \nabla(z_B - z_G) & \nabla(y_G - y_B) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Όπου (x_{wl}, y_{wl}) είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της ισάλου, αλλά επειδή το σώμα είναι κύλινδρος και έχουμε θεωρήσει ότι το σύστημα συντεταγμένων του σώματος είναι στο κέντρο του, τότε αυτές είναι ίσες με το 0. Όπως και ο πίνακας της μάζας, έτσι και ο πίνακας των υδροστατικών όρων επαναφοράς στο Matlab θα είναι ένας τριδιάστατος πίνακας διαστάσεων $6 \times 6 \times 2$, όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.23.

```

KH
6x6x2 double

val(:,:,1) =
    1.0e+07 *
        0         0         0         0         0         0
        0         0         0         0         0         0
        0         0         0.6797         0         0         0
        0         0         0         7.8974         0         0
        0         0         0         0         7.8974         0
        0         0         0         0         0         0

val(:,:,2) =
    1.0e+07 *
        0         0         0         0         0         0
        0         0         0         0         0         0
        0         0         0.6797         0         0         0
        0         0         0         7.8974         0         0
        0         0         0         0         7.8974         0
        0         0         0         0         0         0

```

Εικόνα Δ.23: Πίνακας υδροστατικών όρων επαναφοράς

Δ.6 Αποτελέσματα και οπτικοποίηση τους

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση στο πρόγραμμα BEM NEMOH, σειρά έχει η ανάγνωση τους κάνοντας χρήση του Matlab. Εισάγουμε τις απαραίτητες μεταβλητές στον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.24.

```

nbfreq=50;
w_min=0.1;
w_max=1.4;
w=linspace(w_min,w_max,nbfreq)';
nw=length(w);

nBodies=2; %Number of Bodies

dof=[1 2 3 4 5 6];
nb_of_dof=length(dof);

forces=[1 2 3 4 5 6];
nb_of_forces=length(dof);

rep='Results';

%Free Surface
FS_X=200; %Number of points in x direction
FS_Y=200; %Number of points in y direction
FS_dim=[100 100]; %Dimensions of domain in x and y direction

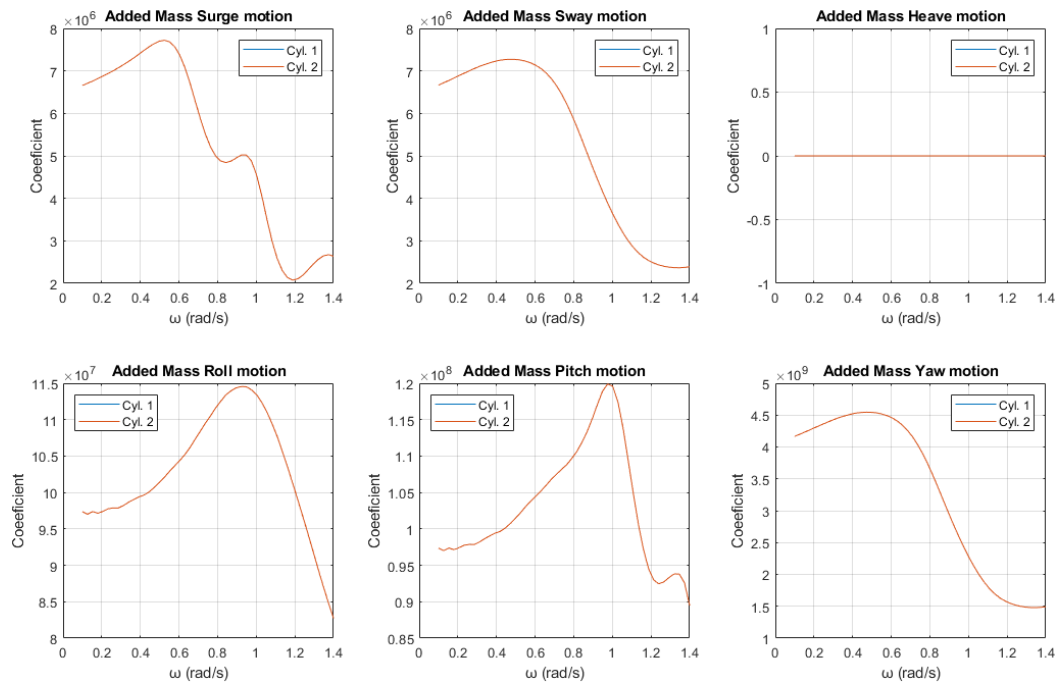
%Pressure
choice_pressure=1;

```

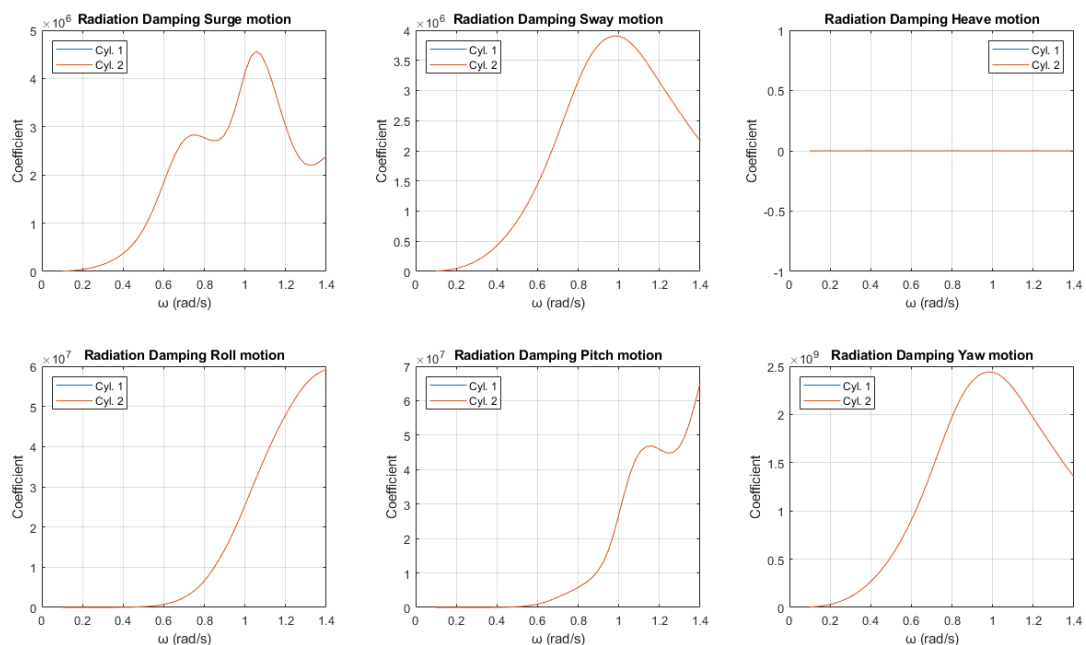
Εικόνα Δ.24: Ορισμός απαραίτητων μεταβλητών στον κώδικα «Calculations.m»

Μόλις ορίσουμε τις απαραίτητες μεταβλητές τότε επιλέγουμε το «Run», ώστε ο κώδικας να διαβάσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα BEM NEMOH. Το επόμενο βήμα είναι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων για τους

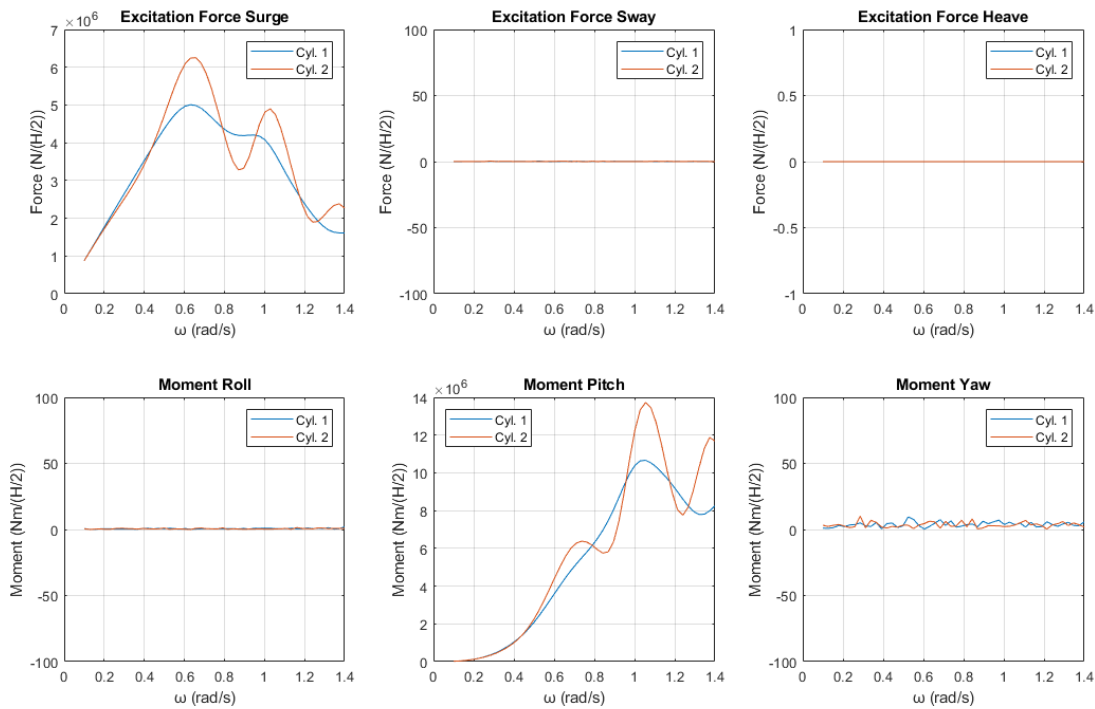
συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης και των δυνάμεων και ροπών διέγερσης, κάνοντας χρήση του κώδικα «A_B_Fe_Plots.m». Οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης του κάθε κυλίνδρου της διάταξης φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα Δ.25 και Εικόνα Δ.26. Αντίστοιχα, οι δυνάμεις και οι ροπές διέγερσης κάθε κυλίνδρου της διάταξης φαίνονται στην Εικόνα Δ.27.



Εικόνα Δ.25: Συντελεστές πρόσθετης μάζας $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55}, A_{66}$ κάθε κυλίνδρου



Εικόνα Δ.26: Συντελεστές απόσβεσης $B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{44}, B_{55}, B_{66}$ κάθε κυλίνδρου



Εικόνα Δ.27: Δυνάμεις και ροπές διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο

Εφόσον οι κύλινδροι είναι πακτωμένοι δε χρειάζεται να γίνει υπολογισμός των κινήσεων των σωμάτων, οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης κάνοντας χρήση του κώδικα «Drift.m». Στην Εικόνα Δ.28 ορίζουμε τις απαραίτητες μεταβλητές που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην Εικόνα Δ.29 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης που ασκούνται στην διάταξη.

```

clear
clc
% load RAO_sol
load Calculations

dir=0.; % Wave heading
nb_DOF=6;
nBodies=2;
plotflag=1;
rep='Results';
depth=20;
rho=1025;

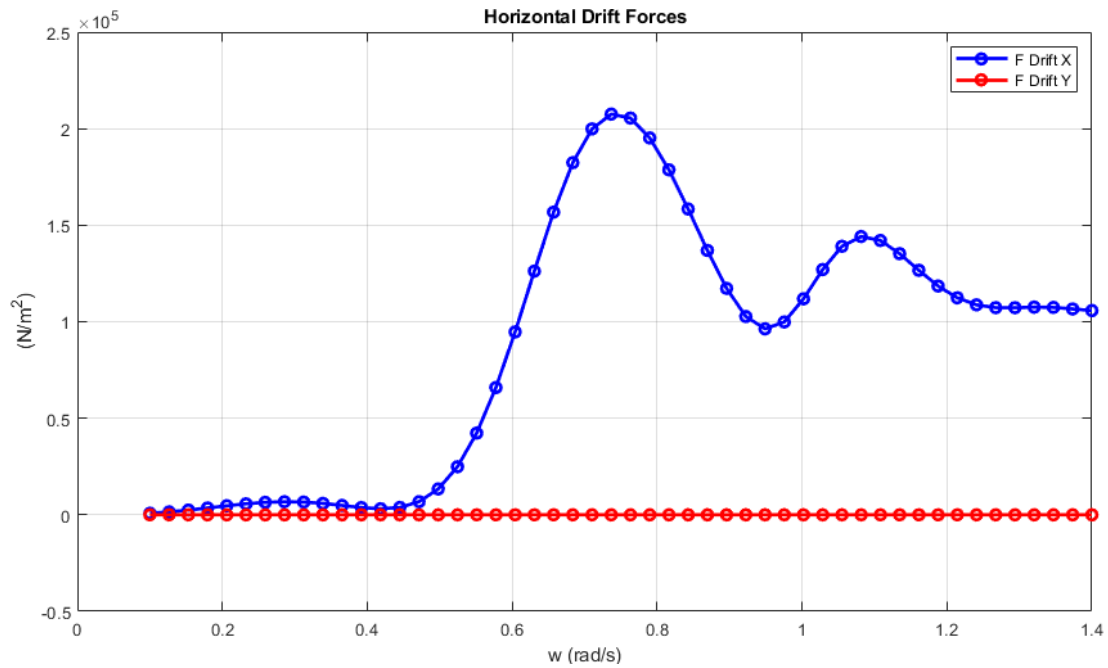
w=Nemoh_sol.w;
nw=length(w);

% RAO=RAO_sol.RAOd; %κινούνται όλοι οι κύλινδροι
RAO=zeros(length(w),nBodies*nb_DOF); %ακίνητοι όλοι οι κύλινδροι

% for n=1 %Περίπτωση πλωτών κυλίνδρων όπου κρατάμε ακίνητο κάποιον κύλινδρο
%   RAO(:,(1+6*(n-1)):(6+6*(n-1)))=zeros;
% end

```

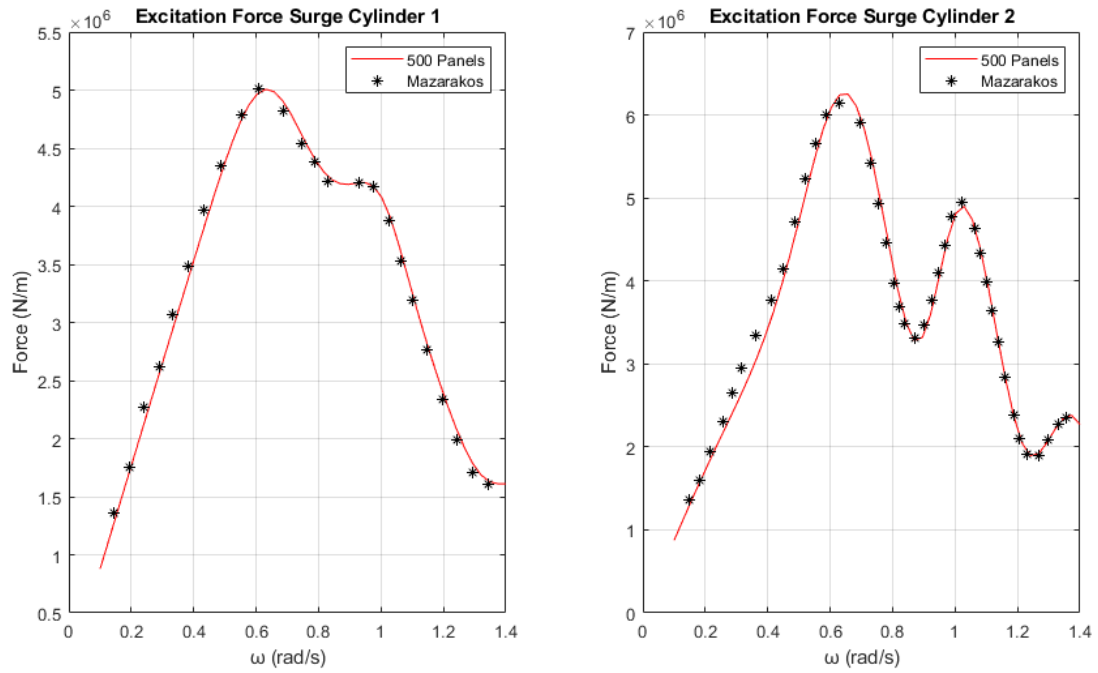
Εικόνα Δ.28: Ορισμός απαραίτητων μεταβλητών στον κώδικα «Drift.m»



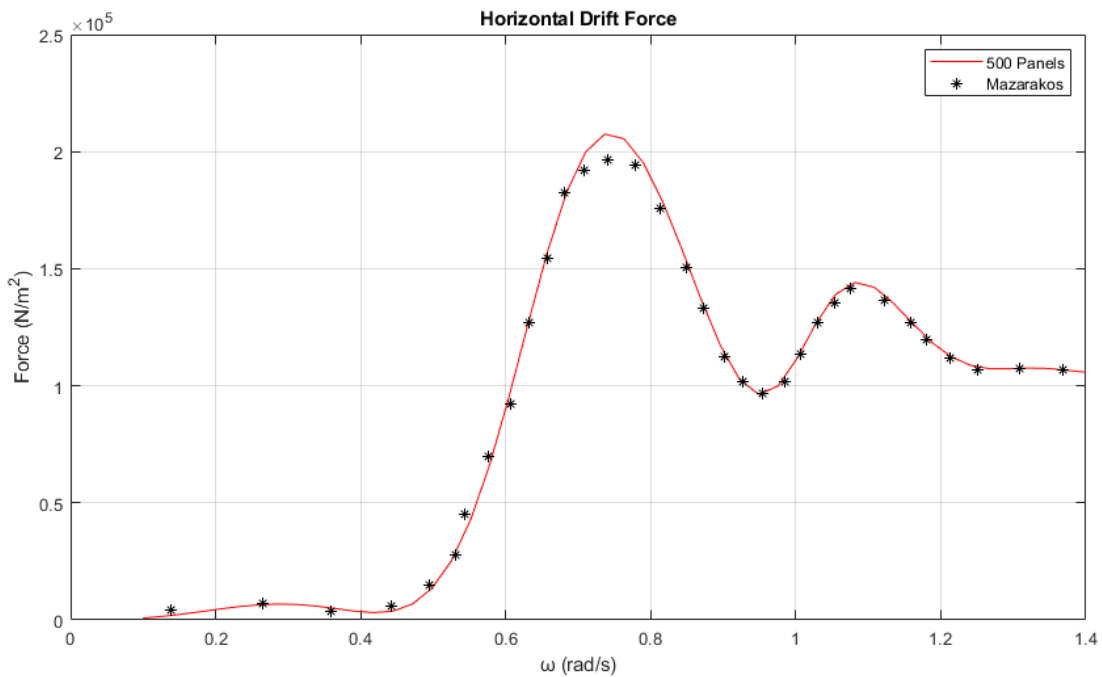
Εικόνα Δ.29: Οριζόντιες και κάθετες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης

Δ.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Αφού έχουμε κάνει τους βασικούς υπολογισμούς πρέπει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του BEM NEMOH με αυτά του Mazarakos (2010), ο οποίος κάνει χρήση αναλυτικών λύσεων, ώστε να ελέγξουμε την ακρίβεια του προγράμματος. Στην Εικόνα Δ.30 φαίνονται οι οριζόντιες δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται σε κάθε κύλινδρο και αντίστοιχα στην Εικόνα Δ.31 φαίνονται οι οριζόντιες μέσες δυνάμεις έκπτωσης δεύτερης τάξης.



Εικόνα Δ.30: Σύγκριση οριζοντίων δυνάμεων διέγερσης



Εικόνα Δ.31: Σύγκριση οριζοντίων μέσων δυνάμεων έκπτωσης δεύτερης τάξης

Δ.8 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή πίεσης σε κάθε κύλινδρο

Τέλος, αποτυπώνουμε την κατανομή του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας στη διάταξη και την πίεση που ασκείται σε κάθε σώμα κάνοντας χρήση του κώδικα «pressure_and_free_surface.m». Για τον υπολογισμό του μέτρου της ανύψωσης της

ελεύθερης επιφάνειας τα απαραίτητα δεδομένα λαμβάνονται κατευθείαν από τον πίνακα που αποθήκευσε το Matlab από τον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.32. Η μόνη αλλαγή που χρειάζεται στον κώδικα, παρά το γεγονός ότι τα σώματα, είναι πακτωμένα είναι η εισαγωγή των κινήσεων των σωμάτων, ώστε να γίνει υπολογισμός του συνολικού μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.33. Τα αποτελέσματα του κώδικα φαίνονται στην Εικόνα Δ.34, που φαίνεται ο κέρσιμος του μέτρου της ανύψωσης, και στην Εικόνα Δ.35, που φαίνεται η κατανομή του μέτρου της ελεύθερης επιφάνειας στο χώρο.

```

%% Free surface elevation
clc
clear
load Calculations
% load RAO_sol

dof=Nemoh_sol.dof;
nb_DOF=length(dof);
nBodies=Nemoh_sol.nBodies;
w=Nemoh_sol.w;
nw=length(w);

% RAO=RAO_sol.RAOd;
RAO=zeros(nw,nBodies*nb_DOF);

% for n=4 %Ορίζω ποιο σώμα είναι ακίνητο
%   RAO(:,(1+6*(n-1)):(6+6*(n-1)))=zeros;
% end

FS_BVP=Free_Surface_sol.FS_BVP;
X=Free_Surface_sol.FS_pos_X;
Y=Free_Surface_sol.FS_pos_Y;

FS_X=length(X);
FS_Y=length(Y);
FS=zeros(FS_X,FS_Y,nw);

```

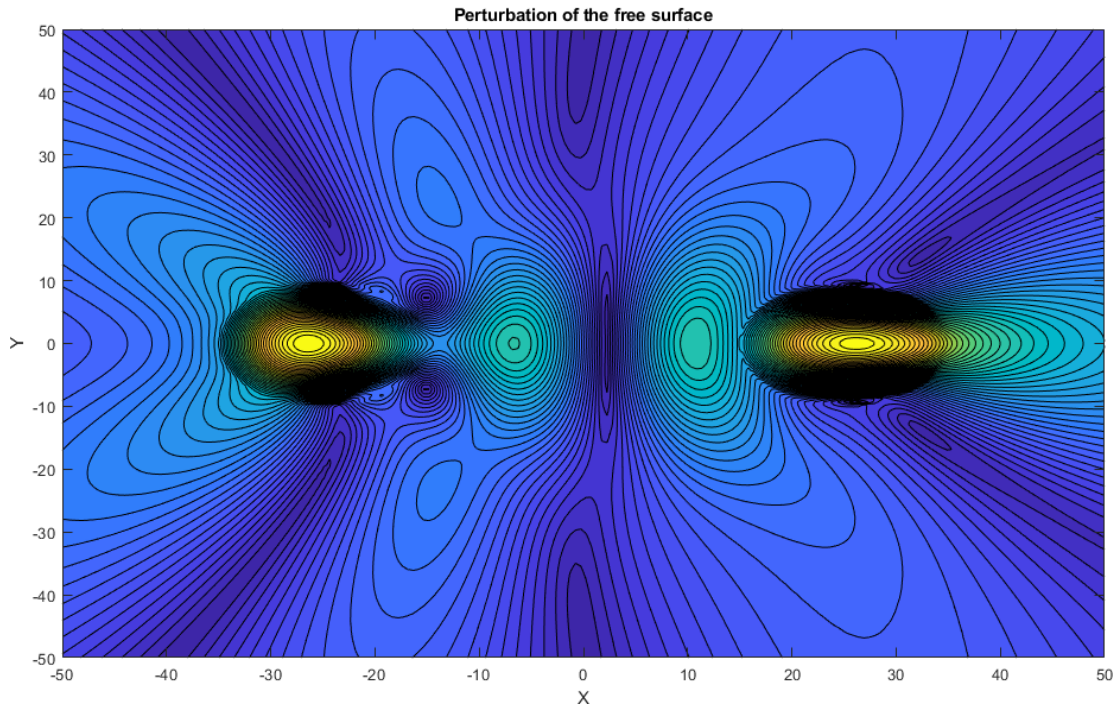
Εικόνα Δ.32: Μεταβλητές εισόδου για τον υπολογισμό του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

```

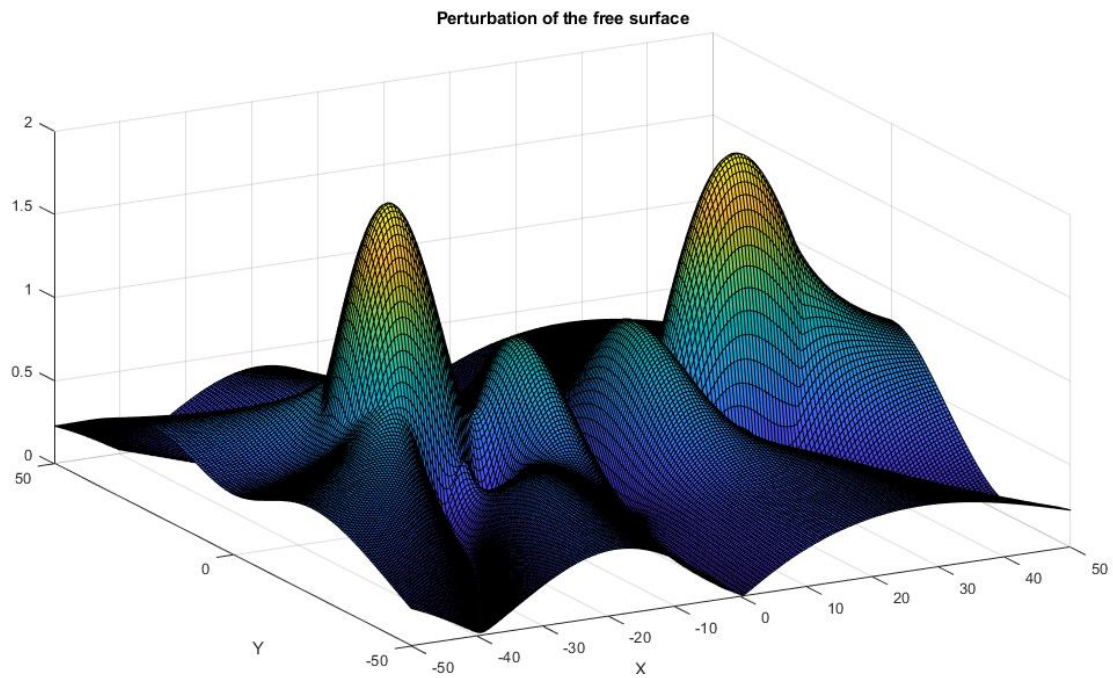
for ii=1:6
    local1(:,ii)=FStotal(:,ii);
    % local1(:,ii+1)=FStotal(:,ii)+FStotal(:,ii+6); %multiple bodies local1(:,ii+1)=FStotal(:,ii)+FStotal(:,ii+6)+FStotal(:,2*ii+6)....
end

```

Εικόνα Δ.33: Εισάγουμε τις κινήσεις των σωμάτων στον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα Δ.34: Κάναβος του μέτρου της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα Δ.35: Μέτρο της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Όπως και πριν, έτσι και εδώ, ο κώδικας λαμβάνει απευθείας τα δεδομένα που χρειάζεται από τον πίνακα που αποθήκευσε το Matlab, ο οποίος περιέχει τα αποτελέσματα από τον κώδικα «Calculations.m», όπως φαίνεται στην Εικόνα Δ.36. Η κατανομή της πίεσης στα σώματα φαίνεται στην Εικόνα Δ.37

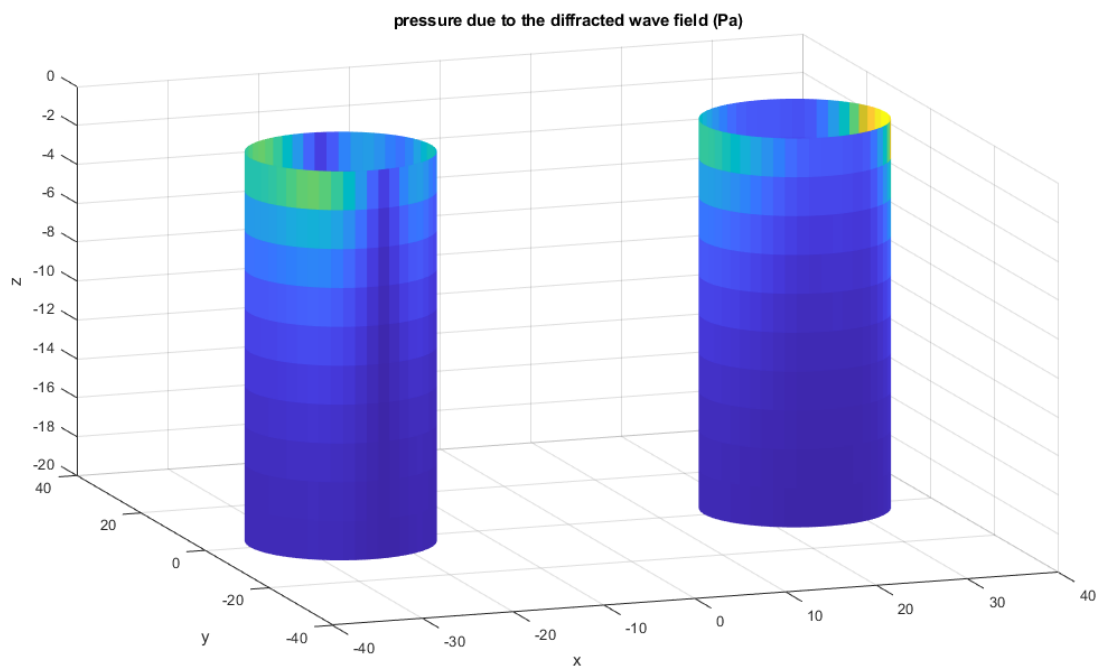
```

%% Pressure on the body
clc
clear
load Calculations

X_mesh=Pressure_sol.nodes(:,1);
Y_mesh=Pressure_sol.nodes(:,2);
Z_mesh=Pressure_sol.nodes(:,3);
P=Pressure_sol.Pressure;
w=Nemoh_sol.w;
panels=Pressure_sol.panels;

```

Εικόνα Δ.36: Μεταβλητές εισόδου για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης στα σώματα



Εικόνα Δ.37: Κατανομή της πίεσης σε κάθε κύλινδρο

Παράρτημα Ε

Πίνακας Ροπών Όγκου του Κατακόρυφου Κυλίνδρου

Οι συντεταγμένες ενός κυλίνδρου μεταφράζονται σε κυλινδρικές συντεταγμένες. Δηλαδή:

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Ο όγκος ενός κυλίνδρου είναι ίσος με:

$$V = \pi R^2 H$$

Όπου:

- R : ακτίνα κυλίνδρου
- H : ύψος κυλίνδρου

Ο πίνακας ροπών όγκου ενός κυλίνδρου, με σύστημα συντεταγμένων ως προς το κέντρο του, είναι ο ακόλουθος:

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Οι ροπές όγκου υπολογίζονται σύμφωνα με τα ακόλουθα ολοκληρώματα:

$$I_{11} = \int_m (y^2 + z^2) dm$$

$$I_{22} = \int_m (x^2 + z^2) dm$$

$$I_{33} = \int_m (x^2 + y^2) dm$$

$$I_{12} = I_{21} = - \int_m xy dm$$

$$I_{13} = I_{31} = - \int_m xz dm$$

$$I_{23} = I_{32} = - \int_m yz dm$$

Οι λύσεις των ολοκληρωμάτων υπολογίζονται αναλυτικά με τον ακόλουθο τρόπο.

Υπολογισμός I_{11}

Το ολοκλήρωμα I_{11} είναι ίσο με:

$$I_{11} = \int_m (y^2 + z^2) dm = \int (r^2 \sin^2 \varphi + z^2) \rho dV = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 \sin^2 \varphi + z^2) dV$$

$$\stackrel{dV=rdrd\varphi dz}{\iff} I_{11} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 \sin^2 \varphi + z^2) r dr d\varphi dz$$

$$\iff I_{11} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^3 \sin^2 \varphi + rz^2) dr d\varphi dz$$

$$\iff I_{11} = \rho \left(\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 \sin^2 \varphi dr d\varphi dz + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R rz^2 dr d\varphi dz \right)$$

Οι λύσεις των ολοκληρωμάτων είναι ίσες με:

$$\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 \sin^2 \varphi dr d\varphi dz = \frac{\pi}{4} HR^4$$

$$\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r z^2 dr d\varphi dz = \frac{\pi}{12} R^2 H^3$$

Επομένως:

$$I_{11} = \rho \left(\frac{\pi}{4} H R^4 + \frac{\pi}{12} R^2 H^3 \right) \stackrel{V=\pi R^2 H}{\iff} I_{11} = \frac{m R^2}{4} + \frac{m H^2}{12}$$

Υπολογισμός I_{22}

Το ολοκλήρωμα I_{22} είναι ίσο με:

$$I_{22} = \int_m (x^2 + z^2) dm = \int (r^2 \cos^2 \varphi + z^2) \rho dV = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 \cos^2 \varphi + z^2) dV$$

$$\stackrel{dV=rdrd\varphi dz}{\iff} I_{22} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 \cos^2 \varphi + z^2) r dr d\varphi dz$$

$$\Leftrightarrow I_{22} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^3 \cos^2 \varphi + r z^2) dr d\varphi dz$$

$$\Leftrightarrow I_{22} = \rho \left(\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 \cos^2 \varphi dr d\varphi dz + \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r z^2 dr d\varphi dz \right)$$

Οι λύσεις των ολοκληρωμάτων είναι ίσες με:

$$\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r^3 \cos^2 \varphi dr d\varphi dz = \frac{\pi}{4} H R^4$$

$$\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R r z^2 dr d\varphi dz = \frac{\pi}{12} R^2 H^3$$

Επομένως:

$$I_{22} = \rho \left(\frac{\pi}{4} HR^4 + \frac{\pi}{12} R^2 H^3 \right) \stackrel{V=\pi R^2 H}{\iff} I_{22} = \frac{mR^2}{4} + \frac{mH^2}{12}$$

Υπολογισμός I_{33}

Το ολοκλήρωμα I_{33} υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} I_{33} &= \int_m (x^2 + y^2) dm = \int (r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi) \rho dV \\ &= \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)) dV \\ &\stackrel{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1}{\iff} I_{33} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2) dV \\ &\stackrel{dV=rdrd\varphi dz}{\iff} I_{33} = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^3) dr d\varphi dz = \rho \frac{\pi}{2} HR^4 \\ &\stackrel{V=\pi R^2 H}{\iff} I_{33} = \frac{mR^2}{2} \end{aligned}$$

Υπολογισμός I_{12} και I_{21}

Το ολοκλήρωμα $I_{12} = I_{21}$ υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} I_{12} = I_{21} &= - \int_m xy dm = - \int (r^2 \sin \varphi \cos \varphi) \rho dV \\ &\stackrel{dV=rdrd\varphi dz}{\iff} I_{12} = I_{21} = -\rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 \sin \varphi \cos \varphi) dr d\varphi dz = 0 \end{aligned}$$

Υπολογισμός I_{13} και I_{31}

Το ολοκλήρωμα $I_{13} = I_{31}$ υπολογίζεται ως:

$$I_{13} = I_{31} = - \int_m xz dm = - \int (rz \cos \varphi) \rho dV$$

$$\begin{aligned} \left\langle \begin{array}{l} dV=rdrd\varphi dz \\ \longleftrightarrow \end{array} \right\rangle I_{13} = I_{31} = -\rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 z \cos \varphi) dr d\varphi dz = 0 \end{aligned}$$

Υπολογισμός I_{23} και I_{32}

Το ολοκλήρωμα $I_{23} = I_{32}$ υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} I_{23} = I_{32} &= - \int_m yz dm = - \int (rz \sin \varphi) \rho dV \\ \left\langle \begin{array}{l} dV=rdrd\varphi dz \\ \longleftrightarrow \end{array} \right\rangle I_{23} = I_{32} &= -\rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^R (r^2 z \sin \varphi) dr d\varphi dz = 0 \end{aligned}$$

Επομένως ο πίνακας ροπών όγκου έχει την εξής μορφή:

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{mR^2}{4} + \frac{mH^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{mR^2}{4} + \frac{mH^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{mR^2}{2} \end{bmatrix}$$

Εάν ο κύλινδρος ήταν μετατοπισμένος τότε οι ροπές όγκου προσαρμόζονται ως εξής:

$$I_{11} = I_{xx} + m(y_G^2 + z_G^2)$$

$$I_{12} = I_{21} = I_{xy} + mx_G y_G$$

$$I_{13} = I_{31} = I_{xz} + mx_G z_G$$

$$I_{22} = I_{yy} + m(x_G^2 + z_G^2)$$

$$I_{23} = I_{32} = I_{yz} + my_G z_G$$

$$I_{33} = I_{zz} + m(x_G^2 + y_G^2)$$