



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος-moonpool για παράκτιες
ανεμογεννήτριες»

«Analysis of a moonpool floater for off shore wind turbines»



Υποψήφια Διπλωματούχος: Ολυμπία Μπουραντά

Επιβλέπων Καθηγητής : Σπυρίδων Βουτσινάς

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	ΕΙΔΗ ΔΟΜΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	9
1.2	ΔΟΜΗ ΜΟΟΝΡΟΟΛ	11
1.3	ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	13
2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	17
2.1	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ	19
2.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ	20
2.3	ΗΜΙ-ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	23
2.4	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	23
3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
3.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΟΟΝΡΟΟΛ.....	31
3.2	ΑΚΙΝΗΤΟ ΣΩΜΑ.....	33
3.2.1	<i>Υπολογισμοί Μη Γραμμικής θεωρίας:</i>	36
3.3	ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΣΩΜΑ	42
3.3.1	<i>Υπολογισμοί Γραμμικής θεωρίας</i>	42
3.3.2	<i>Υπολογισμός κινήσεων πλωτού σώματος</i>	47
4	ΣΥΝΟΨΗ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	59
4.1	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	61
5	ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	62

**Η διπλωματική εργασία αποτελεί για τον κάθε φοιτητή το τέλος μιας εποχής και την επισφράγιση της ακαδημαϊκής του πορείας.*

Για την πρόταση και την ανάθεση αυτής της ερευνητικής ιδέας θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Βουτσινά που με εμπιστεύθηκε με καθοδήγησε και έδειξε την απαιτούμενη υπομονή και κατανόηση σε κάθε δυσκολία που παρουσιάστηκε.

Για την υλοποίηση, τη συγγραφή, την επεξήγηση και την αδιάκοπη καθοδήγηση θέλω να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά το Δημήτρη Μανωλά. Μεγάλο μέρος της διπλωματικής στηρίχθηκε στη διδακτορική του διατριβή και νιώθω πολύ τυχερή όχι μόνο που με μύησε σε νέες επιστημονικές έννοιες αλλά και που γνώρισα έναν νέο φίλο που ήταν πάντα γεμάτος υπομονή, χαμόγελο και κατανόηση. Ευχαριστώ για τις 'εργατώρες' που διέθεσε και το ενδιαφέρον του για την πορεία μου.

Για όλη την κοινή πορεία μας εντός και εκτός σχολής και την υποστήριξη που δείξαμε ο ένας στον άλλον ευχαριστώ τους 'μηχ μηχ' φίλους Στεφανία, Σπυράκο, Αθηνά, Γαβριήλ, Πολυχρόνη.

*Τέλος για τη συνολική μου πορεία μέχρι σήμερα ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ τους γονείς μου, τους τρεις μεγαλύτερους αδερφούς μου και τους φίλους μου που είναι πάντα εκεί σε κάθε επιλογή μου. **

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την υδροδυναμική συμπεριφορά της δομής ενός πλωτήρα κλειστού περιγράμματος (moonpool) για παράκτιες ανεμογεννήτριες.

Με αφορμή την τεχνολογική και μηχανολογική εξέλιξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το ενδιαφέρον για νέες κατασκευές θαλάσσιων πλωτήρων είναι ένα από τα σημαντικότερα θέματα ενασχόλησης των επιστημόνων παγκοσμίως προκειμένου να εκμεταλλευτούμε όσο γίνεται αρτιότερα, τον υδάτινο χώρο.

Εφαρμόστηκαν στην πράξη οι υδροδυναμικές μέθοδοι προκειμένου να εξάγουμε ένα συμπέρασμα για τη συμπεριφορά αυτών των δομών και να αποδειχθεί παράλληλα κατά πόσο μπορούν να υπάρξουν ως κατασκευές στήριξης. Η μείωση των κινήσεων του σώματος που εκτίθεται σε διερχόμενα κύματα καθώς και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού εντός του πλωτήρα, αποτελούν τη βασική εστίαση των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν.

Στηριζόμενοι στις μεθόδους έγκυρης επιστημονικής δημοσίευσης (*Fredriksen, Kristiansen, Faltinsen, 2014, Wave-induced response of a floating two-dimensional body with a moonpool*) αλλά και στον επιλύτη hFLOW που είχαμε ως υπολογιστικό εργαλείο, υπολογίσαμε και συγκρίναμε για δύο διαφορετικά σενάρια πλωτήρα (ακίνητου και ελεύθερα κινούμενου) την ανύψωση και τις κινήσεις του.

Στο πρώτο σενάριο με το ακίνητο σώμα η ελεύθερη επιφάνεια εκτιμήθηκε με τη γραμμική θεωρία αλλά και με τη μη γραμμική, και συγκρίθηκε με τις μεθόδους που αναφέρονται στη δημοσίευση. Αντίθετα στο σενάριο του ελεύθερα πλεύμενου σώματος οι όροι της επιφάνειας του νερού εκτιμήθηκαν μόνο με τη γραμμική θεωρία.

Έπειτα ακολούθησαν οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων καθώς και ο σχολιασμός τους προκειμένου να γίνει μια ευρύτερη ανάλυση και να δοθούν όπου είναι εφικτό, εξηγήσεις ως προς το υδροδυναμικό αυτό φαινόμενο.

Οι μέθοδοι συγκλίνουν αρκετά μεταξύ τους, ιδιαίτερα για τη μη γραμμική θεωρία έχοντας ως μόνη απόκλιση την περιοχή γύρω από το συντονισμό κάτι που είναι αναμενόμενο μιας και δε λαμβάνονται υπόψη οι όροι συνεκτικότητας.

ABSTRACT

The present thesis studies the hydrodynamic behavior of a moonpool floater for offshore wind turbines.

Due to technological and engineering developments in the field of renewable energy, the interest in new marine buoys is one of the most important issues for scientists worldwide to exploit as much as possible, aquatic space. According to present studies by 2050 is to create enormous waterfront parks around the world in order to meet up the greatest energy needs.

Therefore, hydrodynamic methods have been applied in practice to understand and quantify the behavior of these structures showing at the same time whether they can be used as support structures. The reduction of body movements exposed to passing waves and the elevation of the free surface of water within the floater, are the main focus of the calculations made.

Relying on the methods of a scientific publication (*Fredriksen, Kristiansen, Faltinsen, 2014, Wave-induced response of a floating two-dimensional body with a moonpool*) and the hFLOW solver that we had as a computational tool, we calculated and compared for two different floating-point scenarios (stationary and free-moving) the surface elevation as well as the forces provided by the simulations against to the experiment data in the above publication.

In the first scenario with the stationary body, the free surface was estimated by both linear theory and nonlinear theory the result is compared to the semi-nonlinear method reported in the publication. In contrast to the free floating body scenario, the surface conditions of water were evaluated only by linear theory.

Subsequently, comparisons of the results with related diagrams and calculations are being showed accompanied by their explanations in order to provide a broader analysis of this hydrodynamic phenomenon.

The methods are being converged quite well, especially for the nonlinear theory. The main difference that we come across with during the calculations, it is found nearby the resonance area .This is an expected result as the viscosity is not included in the process of solving.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με το κίνητρο για βιώσιμη ανάπτυξη, η ζήτηση για ανανεώσιμη ενέργεια όλο και αυξάνεται τα τελευταία χρόνια .Οι υπεράκτιες επιπλέουσες κατασκευές με το λεγόμενο "moorpool" στην κεντρική περιοχή τους, δηλαδή ένα άνοιγμα στην επιφάνεια τους, είναι όλο και πιο διαδεδομένες στη θάλασσα και ναυτική χρήση. Η αξιοποίησή τους γίνεται κυρίως σε θαλάσσιες γεωτρήσεις πετρελαίου, σε υποθαλάσσιες κατασκευές ως τρόπος κατάδυσης των φορτίων και των εξαρτημάτων της εκάστοτε εγκατάστασης αλλά ακόμα και σε πλωτές ανεμογεννήτριες. Επιπροσθέτως προτείνονται για χρήση σε παράκτιες εγκαταστάσεις που το ύψος των κυμάτων φτάνει και τα 4.5m,όπως συμβαίνει στη βόρεια θάλασσα.

Αν και οι ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται στην ξηρά αποτελούν μία από τις κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πλέον πολλά υπεράκτια αιολικά πάρκα δημιουργούνται σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο όπως στη Γερμανία ,στη Μεγάλη Βρετανία και στην Ολλανδία ,στη Σουηδία, στην Πορτογαλία αλλά και στις ΗΠΑ και Ασία. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι μια νέα βιομηχανία που ξεκίνησε το 1991 όταν οι πρώτες ανεμογεννήτριες εγκαταστάθηκαν έξω από τις ακτές της Δανίας.

Ο σχεδιασμός τους βασίστηκε κατά πολύ στη μακρά εμπειρία από τα χερσαία πάρκα και από τις θαλάσσιες πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου και αερίου. Μετά από 23 χρόνια ο τομέας αυτός αναπτύσσεται ταχέως. Η τεχνολογική έρευνα είναι εξαιρετικά σημαντική για την επιβεβαίωση των πλεονεκτημάτων των παράκτιων αιολικών πάρκων.

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες προσφέρουν ένα σύνολο δυνητικών πλεονεκτημάτων εξαιτίας της φύσεως του υδάτινου περιβάλλοντος στον οποίο εγκαθίστανται. Ο άνεμος είναι κατά κανόνα ισχυρότερος και σταθερότερος έξω από την ακτή, επιτρέποντας μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή. Εμπόδια όπως βουνά, κτήρια και δένδρα δεν υπάρχουν στη θάλασσα .Οι παράκτιες ανεμογεννήτριες γίνονται όλο και πιο διαδεδομένες λόγω των πολυάριθμων αυτών πλεονεκτημάτων τους όπως είναι:

- Η υψηλότερη ταχύτητα του ανέμου
- Η χαμηλή αναταραχή
- Μεγάλη διαθέσιμη περιοχή που οδηγεί τελικά σε αποτελεσματική απόδοση της ενέργειας



1.Εικόνα-Παράκτια ανεμογεννήτρια σεμοοηροολ πλωτήρα IDEOL.

Η Ευρώπη διαθέτει πάνω από το 90% της παγκόσμιας εγκατεστημένης υπεράκτιας αιολικής ισχύος. Μέχρι σήμερα, όλα σχεδόν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν εγκατασταθεί σε ρηχά νερά, σε μικρή απόσταση από την ακτή. Η επιλογή των περιοχών οδηγείται κυρίως από το βάθος της θάλασσας, διότι η τεχνολογία έχει εστιάσει στη λύση της θεμελίωσης στο βυθό, σε βάθη περιορισμένα στα 40-50 m. Διάφορες βελτιώσεις όπως νέες δομές έδρασης τύπου πλωτήρα, μπορούν να αυξήσουν το όριο θεμελίωσης μέχρι βάθους 120 m, με χρήση συμβατικής τεχνολογίας. Ωστόσο, το 95% περίπου των παράκτιων ζωνών του πλανήτη είναι υπερβολικά βαθιές για ανεμογεννήτριες θεμελιωμένες στο βυθό.

Δεδομένου ότι πολλές από τις μεγαλουπόλεις του κόσμου είναι χτισμένες πάνω σε απότομες ακτές με βαθειά νερά, η τεχνολογία των πλωτών ανεμογεννητριών θα έκανε αυτές τις θαλάσσιες περιοχές κατάλληλες για παραγωγή ηλεκτρισμού, προσφέροντας το πλεονέκτημα μεγάλης παραγωγής ισχύος με τρόπο φιλικό στο περιβάλλον.

Το τεχνικά αξιοποιήσιμο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό είναι τεράστιο. Για την Ιαπωνία είναι ισοδύναμο με την σημερινή εγκατεστημένη ισχύ. Οι ΗΠΑ έχουν μεγάλες δυνατότητες υπεράκτιας αιολικής ενέργειας χάρη στους ισχυρούς και σταθερούς ανέμους κατά μήκος των ακτών. Δεδομένα από τις θαλάσσιες ακτές των ΗΠΑ και τις όχθες των Μεγάλων Λιμνών δείχνουν ότι το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό ξεπερνά τα 4000 GW.

Ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς λόγω ανταγωνιστικών χρήσεων και των περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, το αξιοποιήσιμο δυναμικό φθάνει τα 2400 GW, δηλαδή περισσότερο από δύο φορές τη συνολική ισχύ των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής των ΗΠΑ.

Υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι δυνατόν να εγκατασταθούν κατά μήκος των ακτών του Βόρειου Ατλαντικού και Ειρηνικού, της Μεσογείου και της Ανατολικής Ασίας. Ειδικότερα στον ευρωπαϊκό χώρο υπάρχει ισχυρό ανεκμετάλλευτο αιολικό δυναμικό σε

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

βαθεία νερά της Βόρειας Θάλασσας, του Ατλαντικού και της Μεσογείου. Πολλά από αυτά θα βρίσκονται πέρα από τον ορατό από την ακτή ορίζοντα, θα παράγουν με λογικό οικονομικό κόστος και θα αποτελέσουν μοναδική ευκαιρία για την ικανοποίηση της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης για ηλεκτρισμό, στην προοπτική ενός ασφαλέστερου, εξυπνότερου και πιο πράσινου μέλλοντος.

1.1 ΕΙΔΗ ΔΟΜΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Πλωτές ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν σε νερά βάθους πολλών εκατοντάδων μέτρων. Μελλοντικά οι δυνατότητες πιθανώς θα επεκταθούν σε βάθη μεγαλύτερα των 1000 m. Μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη ανταγωνιστικών πλωτών ανεμογεννητριών σε πολλά μέρη του κόσμου είναι ένα ρεαλιστικό σενάριο για την περίοδο 2030-2050.

Οι τύποι των υπεράκτιων ανεμογεννητριών χαρακτηρίζονται από τον τρόπο έδρασης τους ανάλογα με το βάθος και το είδος του πυθμένα της θάλασσας.

Για ρηγά νερά βάθους 0m-30m χρησιμοποιούνται οι εξής εδράσεις

1. Βάση Βαρύτητας (Gravity base).
2. Μονού πυλώνα (Monopile).
3. Τρίποδα (Tripod).

Για ενδιάμεσου βάθους νερά 30m-50m χρησιμοποιείται είτε έδραση jacket είτε μία τρίποδη κατασκευή.

Για βαθύ νερό με βάθος μεγαλύτερου των 60m

1. Spar buoys (Hywind Demo)
2. Semi submersible (WindFloat)

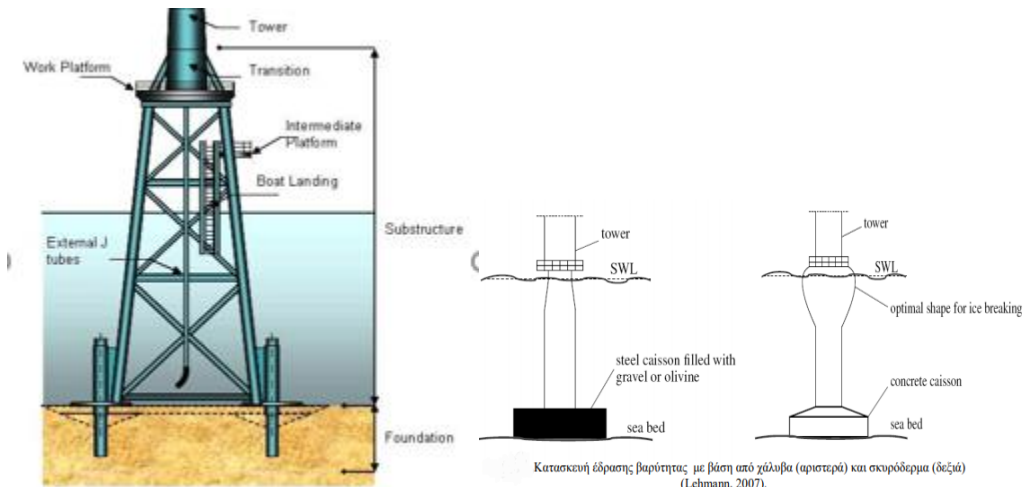
Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες



Bottom-fixed wind turbine Floating wind turbine

2.Εικόνα-Δομές στήριξης παράκτιας ανεμογεννήτριας

Οι τρέχουσες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούν σταθερή δομή στήριξης(δικτύωμα) όπως ο τύπος Jacket και Gravity δομή υποστήριξης, η οποία είναι αποδοτική και οικονομική μόνο για τα βάθη των ρηχών υδάτων(30-50m). Ωστόσο στην εγκατάσταση θαλάσσιων αιολικών πάρκων βαθέων υδάτων, οι σταθερές δομές στήριξης δεν είναι οικονομικά βιώσιμες .



Κατασκευή έδρασης βαρύτητας με βάση από χάλυβα (αριστερά) και σκυρόδεμα (δεξιά) (Lehmann, 2007).

3.Εικόνα-Σταθερή Δομή στήριξης δικτυώματος

4.Εικόνα-Έδραση βαρύτητας

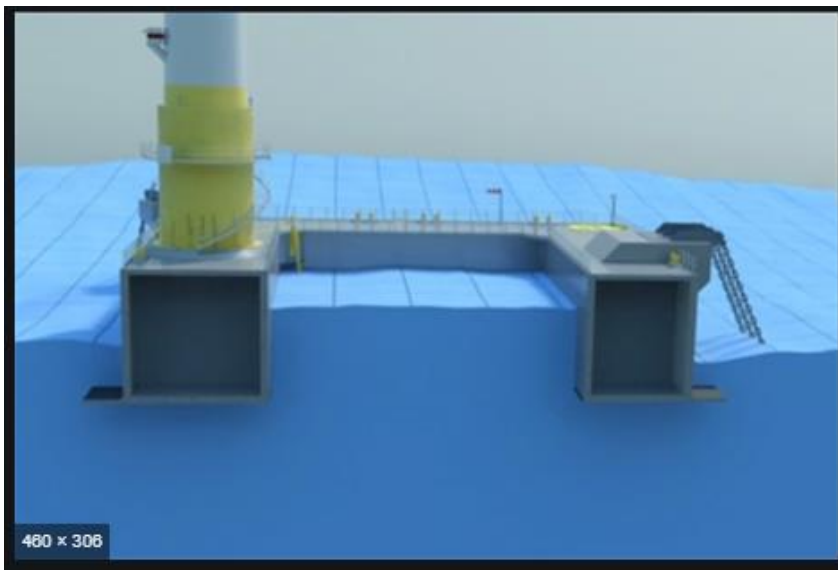
Η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των πλωτήρων αυξάνεται καθώς είναι πιο ευαίσθητοι στον άνεμο και τα φορτία κύματος σε σύγκριση με τις σταθερές δομές στήριξης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλωτήρες ταξινομούνται σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες

- βασισμένες στην πλευστότητα,
- βασισμένες στο έρμα
- βασισμένες σε δομές πρόσδεσης(τένοντες)

1.2 ΔΟΜΗ MOONPOOL



5.Εικόνα-Moonpool πλωτήρας IDEOL σε τομή.

Πολλοί συγγραφείς έχουν μελετήσει το δισδιάστατο υδροδυναμικό πρόβλημα μάζας που εκτίθεται σε κύματα .Μια από τις πρώτες επιστημονικές δημοσιεύσεις σχετικά με το θέμα αυτό γράφηκε από τον Aalbers (1984), που αφορούσε την κατακόρυφη κίνηση ενός συστήματος μάζας-ελατηρίου. Προτάθηκε η ίδια προσέγγιση από το Faltinsen (1990) που υπολόγισε τις φυσικές συχνότητες εστιάζοντας κυρίως στις επιπτώσεις στο πεδίο της ροής εκτός του moonpool αλλά και στην κίνηση του ρευστού ως ακίνητο μπλοκ που κινείται κάθετα προς τα επάνω και προς τα κάτω.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος moonpoolγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

Αργότερα, ο Molin (2001) εισήγαγε μια θεωρία με προσέγγιση γραμμικοποιημένου δυναμικού ροής για να περιγράψει τις φυσικές συχνότητες και τις σχετικές ελεύθερες επιφανειακές κινήσεις μέσα στο moonpool.

Μετέπειτα, ο Fornier (2006) πρότεινε "τη μέθοδο κάλυψης απόσβεσης", η οποία περιορίζει τη ροή του νερού εισάγοντας μία τεχνητή σταθερά απόσβεσης στη γραμμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας.

Άλλες θεωρίες προσεγγίζουν το πρόβλημα με τη χρήση της θεωρίας των ιξωδών ροών και τις εξισώσεις του Navier-Stokes. Ένα παράδειγμα είναι ένα έγγραφο που γράφτηκε από τους Kristiansen και Faltinsen (2008), το οποίο διερευνά τις επιπτώσεις του περιορισμού των κάθετων κινήσεων του ρευστού μέσα στον ανοιχτό περιβάλλοντα χώρο του πλωτήρα.

Μια άλλη μελέτη του Fredriksen (2015), στην οποία πραγματοποιήθηκε μια αριθμητική και πειραματική δοκιμή σε ένα δισδιάστατο moonpool εκτεθειμένο σε κύματα και ρεύματα, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ανύψωσης για συγκεκριμένες εισερχόμενες συχνότητες κύματος.

Οι πλωτήρες κλειστού περιγράμματος χρησιμοποιούνται όπως προαναφέρθηκε σε πλωτές κατασκευές σε μονάδες γεώτρησης αλλά και σε μονάδες εκφόρτωσης και αποθήκευσης. Όλος αυτός ο σημαντικός και βαρύς εξοπλισμός εγκαθίσταται στον πλωτήρα προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική διέγερση των κυμάτων και των έντονων ρευμάτων. Υπάρχουν δύο είδη κινήσεων του νερού μέσα στο moonpool:

- Piston motion (κίνηση στον κατακόρυφο άξονα Z)
- Sloshing motion(κίνηση στον οριζόντιο άξονα X μεταξύ των κάθετων τοιχωμάτων)

Το υδροδυναμικό πρόβλημα που μελετάται λοιπόν, είναι η κίνηση του νερού που λαμβάνει χώρα εντός του πλωτήρα λόγω της πίεσης που προκαλείται από τα διερχόμενα κύματα και αλλά και από την καθεαυτή κίνηση του σώματος.

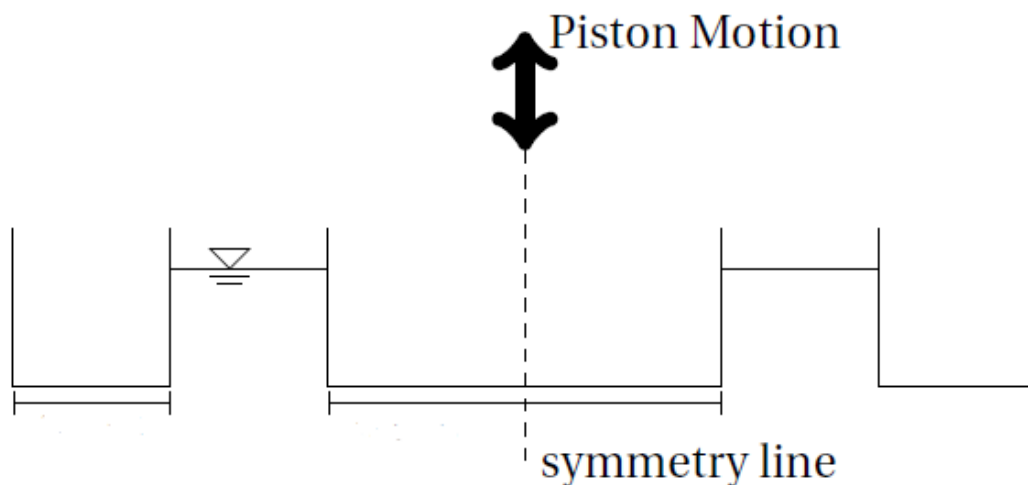
Μέσα από τις εκτενείς αυτές μελέτες διαπιστώθηκε ότι το βάθος του νερού, το πλάτος ανύψωσης του και η διάμετρος-γεωμετρία του πλωτήρα είναι μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που προκαλούν το συνδυασμό αυτών των κινήσεων. Με την εφαρμογή μιας φανταστικής οριακής κατάστασης στον πυθμένα ενός moonpool, ο Molin μελέτησε τις φυσικές συχνότητες και τα σχήματα τροχιάς τόσο της λειτουργίας του piston mode όσο και του τρόπου ανύψωσης του νερού εντός του πλωτήρα κι έλαβε προσεγγιστικά τις φυσικές συχνότητες. Ως εκ τούτου το moonpool μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια αποτελεσματική κατασκευή για τη μείωση της κάθετης κίνησης όπως συμβαίνει και στις στηρίξεις μονού πυλώνα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς έχει αναφερθεί ότι ένα από τα πιο απλά (στο σχεδιασμό ,εφαρμογή και κόστος) μοντέλα πλωτήρα είναι η πλωτή δομή τύπου (barge) αφού επιτυγχάνει τη σταθερότητα μέσω της άνωσης πλέοντας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας ,επιλέγεται ως μοντέλο σώματος και στην επικείμενη ανάλυση.

1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο γενικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει ένα τμήμα διπλού barge και να εξετάσει εάν είναι εφικτή η απόσβεση και μείωση των κινήσεων σε έναν πλωτήρα για παράκτιες ανεμογεννήτριες. Μέσα απ' αυτή τη διερεύνηση τίθενται και ακόλουθα θέματα όπως η κατανόηση του σχεδιασμού και της εφαρμογής των moorpool παράκτιων πλωτήρων ,των φαινομένων συντονισμού και οι επιπτώσεις στις λειτουργικές επιδόσεις του πλωτού στην ελεύθερη επιφάνεια κοντά στη συχνότητα συντονισμού (ιδιοκίνηση εμβόλου-piston motion).



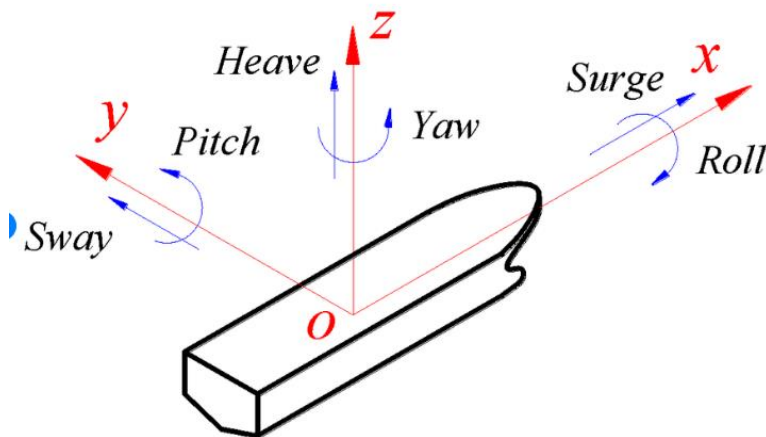
6.Εικόνα- Διπλού τύπου barge με προσομοίωση την κίνησης του ρευστού μέσα στο moorpool.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η σύγκριση των μεθόδων επίλυσης που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τις δύο καταστάσεις κίνησης των πλωτών σωμάτων, αυτών της γραμμικής και μη γραμμικής θεωρίας. Η εστίαση γίνεται τόσο στην κίνηση εμβόλου που παρατηρείται εντός του πλωτήρα λόγω του συντονισμού και στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Πρόκειται για δύο σενάρια μελέτης πλωτήρων, αυτό του κινούμενου σε ελεύθερη επιφάνεια και αυτό του ακίνητου σε ελεύθερη επιφάνεια. Οι πλωτήρες υπόκεινται σε διδιάστατα κύματα. Η προσέγγιση είναι διδιάστατη για την απλούστευση της ανάλυσης αλλά κι εξαιτίας της χρήσης κώδικα που επιλύει 2D προβλήματα.

Το σύστημα ελευθερίας είναι τριών βαθμών-σύστημα επίλυσης εξισώσεων 3x3 (heave,sway,pitch).



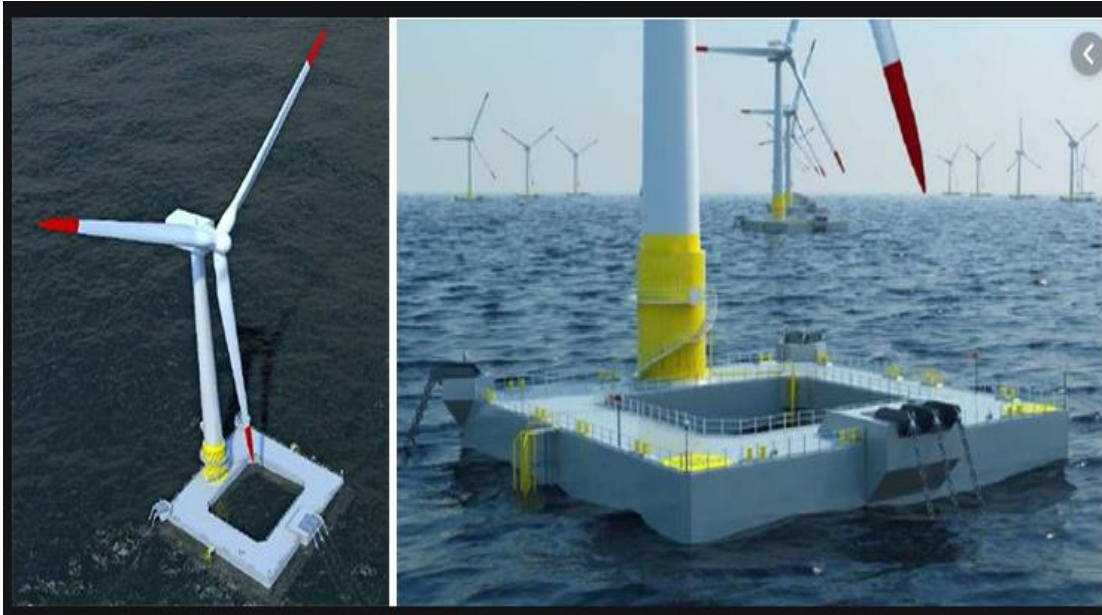
3.4: Roll, pitch, yaw, heave, sway, surge of a ship.

7.Εικόνα- Άξονες συστήματος ελευθερίας κινήσεων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσον αφορά το δισδιάστατο μοντέλο του προβλήματος, υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με την ανύψωση στα σημεία συντονισμού εξαιτίας των ταλαντώσεων που παρατηρούνται ως φαινόμενο. Λίγες μελέτες έχουν γίνει ωστόσο για τυχαία διερχόμενα κύματα σε ένα κινούμενο δισδιάστατο σώμα τύπου moorpool, γι 'αυτό το λόγο θα ακολουθήσει η επαλήθευση του πειράματος και των μεθόδων των Arnt G. Fredriksen, Trygve Kristiansen και Odd M. Faltinsen στην αντίστοιχη δημοσίευσή τους(2014).

Οι αριθμητικές και οι υπολογιστικές μέθοδοι αναπτύσσονται περαιτέρω προκειμένου να μελετηθεί το πρόβλημα καθώς και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά της διακρίβωσης.



8.Εικόνα -Ορθογωνικού τύπου moorpool πλωτήρας με παράκτια ανεμογεννήτρια IDEOL

2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Ο επιλύτης (hFLOW) επιλύει το μη-γραμμικό, μη συνεκτικό, δισδιάστατο πρόβλημα αλληλεπίδρασης κύματος-σώματος-ρεύματος βασιζόμενος στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων και την μεικτή Eulerian-Lagrangian διατύπωση. Το κύμα δημιουργείται είτε προσομοιώνοντας τη φυσική κίνηση του κυματιστήρα, είτε θέτοντας στο σύνορο εισόδου τη λύση από τη stream function θεωρία.

Σχετικά με τη δεύτερη επιλογή η τροποποιημένη υλοποίηση της συναρμογής στο σύνορο εισόδου, επιτρέπει τη δημιουργία και διάδοση ισχυρών μη-γραμμικών περιοδικών κυμάτων (~90% του μέγιστου ύψους) με ή χωρίς σταθερό ρεύμα σε όλα τα βάθη νερού για μεγάλο αριθμό περιόδων. Ο χειρισμός των συνθηκών στο άπειρο πραγματοποιείται εισάγοντας όρους τεχνητής απόσβεσης. Για την προσομοίωση της κίνησης ελεύθερα πλωτών σωμάτων χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού της επιτάχυνσης του σώματος, που προσδιορίζει τις δυνάμεις εκπεσμού με αρκετή συνέπεια. Επιπλέον η μέθοδος προσομοιώνει αναδιπλούμενα κύματα μέχρι το όριο θραύσης όπου η κορυφή του κύματος ακουμπάει την ελεύθερη επιφάνεια. Η πιστοποίηση της μεθόδου έχει γίνει σε σύγκριση με θεωρητικά, αριθμητικά και πειραματικά δεδομένα στο εργαστήριο αεροδυναμικής του ΕΜΠ.

Η ροή νερού συνδέεται με τα κύματα του νερού και τελικά με το ρεύμα της θάλασσας. Το ρεύμα μαζί με τα εισερχόμενα κύματα επιφανείας αποτελούν εξωτερικές διεγέρσεις ενώ η διάχυση των κυμάτων παράγεται από την απόκριση τους στο εσωτερικό μέρος του πλωτήρα. Στην παρούσα ανάλυση της μεθόδου, η ροή του νερού θεωρείται ως ανάλυση της γραμμικής υδροδυναμικής θεωρίας που απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό ολόκληρη τη διατύπωση του προβλήματος.

Πιο συγκεκριμένα, η γραμμική θεωρία επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος στον πεδίο των συχνοτήτων και μέσω αυτού καθορίζει ρητά τους αναγκαίους όρους, όπως αυτοί της μάζας, της απόσβεσης και της ακαμψίας, χωρίς να χρειάζονται επιπλέον βαθμοί ελευθερίας εκτός από αυτούς που καθορίζουν ήδη την κίνηση του πλωτού σώματος. Η επέκταση σε πιθανή μη γραμμική θεωρία θα απαιτούσε επίλυση των αναμενόμενων εξισώσεων της αντίστοιχης ροής. Σε αυτή την περίπτωση, σε ένα τέτοιο περιβάλλον μοντελοποίησης, οι βαθμοί ελευθερίας που απαιτούνται είναι οι κατανομές δυναμικού (επιφανειακών) δυνατοτήτων οι οποίες, όπως στην περίπτωση της ροής αέρα, όπου εμφανίζονται με την εξίσωση Bernoulli που ορίζει το πεδίο πίεσης και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Η εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli στην επιφάνεια του σώματος θα καθορίσει τη φόρτιση, ενώ η εφαρμογή της στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού θα καθορίσει την ανύψωση μαζί με την κινηματική της κατάσταση.

Ο σχεδιασμός των ανοικτών θαλάσσιων δομών και των πλοίων βασίζεται κυρίως στη γραμμική θεωρία. Το τυχαίο κύμα θεωρείται συνήθως ως Gaussian διαδικασία και η δομή του γραμμική. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της 2ης τάξης Runge-Kutta, επεκτείνεται η περιοχή ισχύος της γραμμικοποιημένης προσέγγισης εξακολουθώντας να εισάγονται συντελεστές ασφάλειας προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των μη γραμμικών κυμάτων υψηλότερης τάξης. Προκειμένου να μειωθεί η αβεβαιότητα του σχεδιασμού είναι αναγκαίο να διατυπωθούν προηγμένα αριθμητικά μοντέλα. Γραμμικά αλλά και μη γραμμικά μοντέλα μπορούν να διαμορφωθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κατάστασης της θάλασσας. Η γραμμική μοντελοποίηση είναι καθιερωμένη και εφαρμόζεται σε πολλά παραδείγματα που αφορούν την υπεράκτια πλατφόρμα και το πλοίο. Οι οριακές συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας και πλωτού βασίζονται στη γραμμική θεωρία.

Όσον αφορά τις εφαρμογές υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται ευρέως δύο μέθοδοι για την εκτίμηση της υδροδυναμικής φόρτισης. Η πρώτη βασίζεται στη θεωρία του γραμμικού δυναμικού και η δεύτερη στην εμπειρική εξίσωση του Morison.

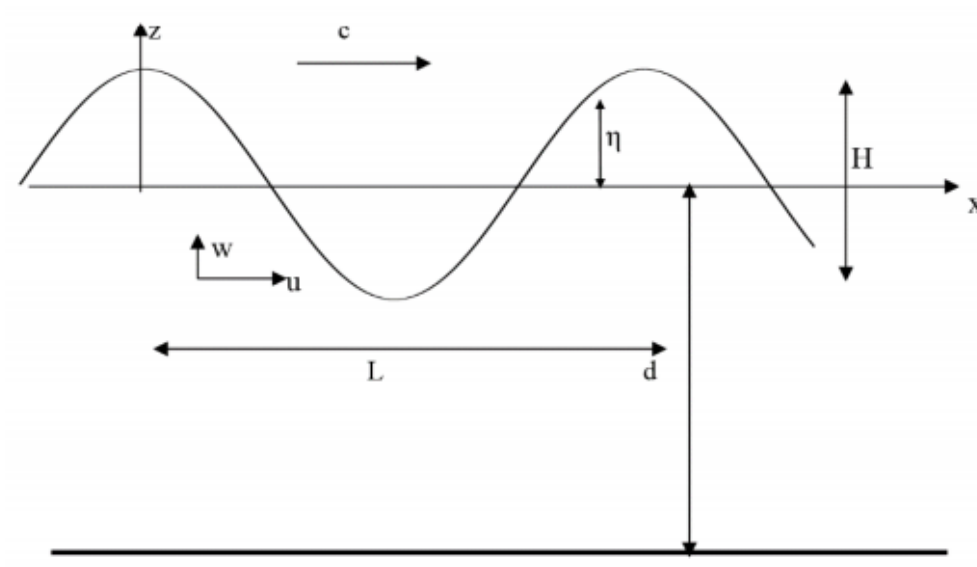
Με βάση την μεικτή σύνθεση Euler-Lagrangian για τη λύση του μη γραμμικού προβλήματος οι οριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας λαμβάνουν υπόψη είτε την πλήρη-Lagrangian είτε την ημι-Lagrangian μορφή .

Για δεδομένο x ή z (ανάλογα με το σχήμα) και φ πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια, η ρητή ενσωμάτωση χρόνου των δύο εξισώσεων εξέλιξης καθορίζει τη νέα θέση και το δυναμικό των σωματιδίων της ελεύθερης επιφάνειας, σχηματίζοντας το Lagrangian τμήμα της σύνθεσης. Στην καθαρώς Lagrangian περιγραφή τα σημειακά στοιχεία επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια παρακολουθούνται ως σωματίδια υλικού σημείου χρησιμοποιώντας την πλήρη ταχύτητά τους, ενώ στην ημι-Lagrangian περιγραφή τα σημειακά στοιχεία επιτρέπεται να κινούνται μόνο στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Εάν δεν υπάρχει μία αρχική λύση για την επίλυση της εξίσωσης του κύματος, θέτουμε μηδενικό δυναμικό πεδίο ροής στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού (απόλυτη ηρεμία). Στη μεικτή αυτή διατύπωση, η εξίσωση Laplace ενεργεί ως ένας περιορισμός και εισάγεται ως η μορφή μιας εξίσωσης ορίων, η οποία συνδέει τα δεδομένα του Neumann και του Dirichlet σε ολόκληρο το πεδίο. Σημειώνεται επίσης ότι οι Lagrange και semi-Lagrangian φόρμες είναι ισοδύναμες, με την προϋπόθεση ότι η συνάρτηση που εκφράζει την ανύψωση της επιφάνειας είναι ένα προς ένα. Αντίθετα, μόνο η Lagrangian διατύπωση χρησιμοποιείται σε προβλήματα ορίου θραύσης των κυμάτων. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον επιλύτη (hFLOW), προσαρμόσαμε το μοντέλο του πειράματος με τις μετρήσεις που δόθηκαν (Πίνακας 1) για να εξετάσουμε δύο διαφορετικά σενάρια υπολογισμών χρησιμοποιώντας τη γραμμική και μη γραμμική θεωρία για δύο διαφορετικά σενάρια ως προς την κίνηση του πλωτού σώματος και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Η παρούσα δοκιμαστική περίπτωση θεωρεί το πρόβλημα περίθλασης ενός ακίνητου πλωτήρα διάτρητης επιφάνειας. Αυτό αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα επαλήθευσης πριν από την επίλυση της ελεύθερα επιπλέουσας διάτρητης επιφάνειας. Έχοντας το σώμα ακίνητο μπορεί να επαληθευτεί ο υπολογισμός των υδροδυναμικών φορτίων.

Στη μηχανική των ρευστών, η θεωρία των κυμάτων Airy (συντά αναφέρεται ως θεωρία γραμμικών κυμάτων) δίνει μια γραμμική περιγραφή της διάδοσης των κυμάτων στην επιφάνεια ενός ομοιογενούς ρευστού στρώματος. Η γραμμική θεωρία κυματισμών βασίζεται στις παραδοχές ότι το ρευστό είναι τέλειο, ο πυθμένας είναι σταθερός, αδιαπέραστος και οριζόντιος (σταθερό βάθος), η ροή είναι αστρόβιλη, η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μηδέν και το ύψος του κύματος H είναι πολύ μικρότερο του βάθους d και του μήκους L .



9.Εικόνα-Μορφή γραμμικών κυμάτων

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροοηγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

Η τελευταία παραδοχή είναι ουσιαστικά η υιοθέτηση της γραμμικής θεωρίας, δηλ. η θεώρηση ότι οι όροι αδράνειας δεύτερης τάξης (δηλ. των μη γραμμικών όρων) μπορούν να απαλειφθούν. Η παραδοχή αυτή ισχύει όταν $H/d \ll 1$ και $H/L \ll 1$

Η γενική μορφή της συνάρτησης δυναμικού $\Phi(x, z, t)$ των ταχυτήτων είναι η ακόλουθη:

$$\Phi(x,z,t)=Z(z)\sin(kx-\omega t) \quad (1)$$

όπου $Z(z)$ είναι άγνωστη συνάρτηση μεταβλητής z .

Η συνάρτηση της πίεσης προκύπτει ως η γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli

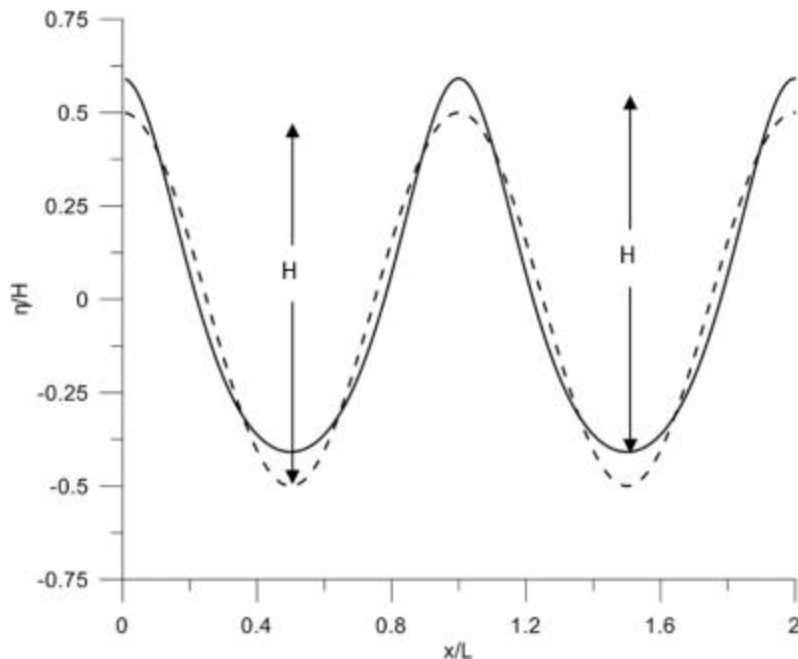
$$p = -\rho g z \frac{\rho g H \cosh(k(d+z))}{2 \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

Είναι φανερό ότι η πίεση συντίθεται από δύο συνιστώσες, την υδροστατική και την δυναμική.

2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Όπως είδαμε στη γραμμική θεωρία η βασικότερη απλοποίηση είναι η απαλοιφή των μη γραμμικών όρων, δηλ. η γραμμικοποίηση των εξισώσεων. Ωστόσο, όταν ο λόγος του ύψους κύματος προς το βάθος (H/d) ή/και ο λόγος του ύψους κύματος προς το μήκος (H/L) λάβει υψηλές τιμές (π.χ. στα ρηχά νερά ή για μεγάλες τιμές του H), οι μη γραμμικοί όροι γίνονται σημαντικοί και η γραμμική θεωρία παύει να ισχύει. Στους μη γραμμικούς κυματισμούς η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας δεν είναι ημιτονοειδής. Οι κυματισμοί παρουσιάζουν οριζόντια ασυμμετρία: οι κορυφές είναι πιο οξείες και η στάθμη τους μεγαλύτερη του $H/2$, ενώ οι κοιλίες είναι πιο πλατιές και η στάθμη τους μικρότερη του $H/2$. Παρόμοια και οι ταχύτητες διαφέρουν από αυτές της γραμμικής θεωρίας: κάτω από τις κορυφές είναι αυξημένες, ενώ κάτω από τις κοιλίες μειωμένες. Επίσης στις οριζόντιες ταχύτητες η κατανομή ως προς το βάθος z ($u(z)$) στα ρηχά νερά είναι πιο ομοιόμορφη στη γραμμική θεωρία από ότι στη μη γραμμική. Στη φύση προφανώς οι κυματισμοί είναι μη γραμμικοί.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ



Κυματισμός γραμμικής (διακεκομμένη γραμμή) και μη γραμμικής θεωρίας (συνεχής γραμμή).

8.Εικόνα-Σύγκριση γραμμικών και μη γραμμικών κυμάτων

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες μη γραμμικών κυματισμών με διαφορετικό πεδίο εφαρμογής (Stokes στα ενδιάμεσα και βαθιά νερά, στα ρηχά νερά, Fourier και Stream Function σε οποιοδήποτε βάθος). Εδώ θα παρουσιαστεί η θεωρία της Ροϊκής Συνάρτησης (Stream Function) η οποία δεν έχει περιορισμούς εφαρμογής και ισχύει για οποιοδήποτε βάθος και ύψος (μη θρανόμενου) κύματος. Το κύμα θεωρείται συμμετρικό και περιοδικό. Λαμβάνεται επίσης υπόψη ένα ρεύμα U_0 ομοιόμορφου βάρους. Υπάρχει μια συνάρτηση ρεύματος ψ που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, για την κινηματική οριακή συνθήκη του τοιχώματος καθώς και τις συνθήκες δυναμικού και κινηματικού ορίου της ελεύθερης επιφάνειας, όλες εφαρμοσμένες στην ακριβή στιγμιαία ελεύθερη επιφάνεια. Ο πυρήνας της μεθόδου είναι η ανάπτυξη της Ψ συνάρτησης σε σειρές Fourier και η σημειακή αναπαράσταση της ελεύθερης επιφάνειας.

Η έλλειψη μεγάλης ακρίβειας της θεωρίας StokesV, σε οριακές καταστάσεις, αλλά κυρίως η μη ενιαία ισχύς της σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογής, οδήγησαν στην ανάπτυξη της θεωρίας αυτής. Η θεωρία, ή μάλλον μέθοδος, βασίζεται στην ανάπτυξη σε σειρές Fourier της ροϊκής συνάρτησης Ψ , και ως εκ τούτου ονομάζεται και Θεωρία της Ροϊκής Συνάρτησης (Stream Function Theory). Η συνάρτηση δυναμικού Φ , πολλές φορές αντικαθίσταται από τη ροϊκή συνάρτηση Ψ , που ορίζεται, σε δύο διαστάσεις x, z :

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad \text{και} \quad w = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (3)$$

Υποθέτοντας αστρόβιλη ροή ισχύει η σχέση

$$\omega = \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 0 \quad (4)$$

Αντικαθιστώντας την (4) στην (3) προκύπτει

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Η οριακή συνθήκη στον πυθμένα και η κινηματική οριακή συνθήκη στην επιφάνεια γράφονται

$$\Psi(x,0) = 0 \quad \text{για } z=0$$

$$\Psi(x,0) = -Q \quad \text{για } z=\zeta$$

Η επίλυση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων που προκύπτει γίνεται με την προσεγγιστική μέθοδο Newton. Η πρώτη προσέγγιση είναι συνήθως το γραμμικό ημιτονοειδές κύμα (Dean, 1965). Η εκλογή της τάξης της θεωρίας εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής της. Μικρές τιμές του N (N = 5) ενδέχεται να δημιουργήσουν στα ρηγά νερά μη ρεαλιστικά μικρού μήκους παρασιτικά κύματα, τα οποία όμως δεν εμφανίζονται για μεγαλύτερες τιμές (N = 18). Οι παραπάνω λύσεις αναφέρονται σε οριζόντιο πυθμένα και σε συμμετρικά προφίλ ελεύθερης επιφάνειας, πράγμα που βέβαια δεν ισχύει στη φύση κυρίως στα ρηγά νερά και λίγο πριν τη θραύση, όπου η ασυμμετρία ως προς την κατακόρυφο είναι πολύ σημαντική. Σε αυτή την περίπτωση ένα αριθμητικό μοντέλο μη γραμμικών κυματισμών (τύπου Boussinesq) μπορεί να δώσει ορθά αποτελέσματα.

2.3 ΗΜΙ-ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Στη δημοσίευση των ArntG. Fredriksen, TrygveKristiansen και OddM. Faltinsen(2014) βάσει της οποίας γίνεται η επαλήθευση των μεθόδων που ορίστηκαν προηγουμένως, συναντάμε και μία επιπλέον μέθοδο με την οποία θα συγκριθούν τα ποιοτικά και τα τελικά αποτελέσματα.

Η ημι-μη γραμμική υβριδική αριθμητική μέθοδος έχει στοιχεία και από τις άλλες δύο μεθόδους, δηλαδή απεικονίζει την ελεύθερη επιφάνεια σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία και τις οριακές συνθήκες κίνησης του σώματος σύμφωνα με τη μη γραμμική θεωρία. Αυτό περιλαμβάνει και έννοιες συνεκτικότητας. Όλες οι οριακές συνθήκες γραμμικοποιούνται γύρω από την αρχική θέση. Το σύστημα συντεταγμένων βασίζεται στο κέντρο της βαρύτητας όλου του τομέα. Το υπολογιστικό πλεονέκτημα είναι ότι η διακριτοποίηση του πλέγματος του τομέα γίνεται με σταθερό χρόνο.

Παρ' όλο που η ημι-μη γραμμική υβριδική μέθοδος καταφέρνει το διάνυσμα πίεσης και ταχύτητας του ρευστού να είναι κάθετα μεταξύ τους, ως εκ τούτου δεν μπορεί να εγγραφεί ότι η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού θα είναι εφαπτόμενη στη γραμμή ροής κατά μήκος της διατομής. Έτσι λοιπόν δεν αποτελεί μια τέλεια προσέγγιση, αλλά αυξάνει τη σταθερότητα της λύσης του.

2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Πριν η εστίαση κινηθεί προς τους υπολογισμούς που έγιναν ,παρατίθενται κάποιες αναφορές σχετικά με τα γραμμικά κύματα. Τα κανονικά κύματα χαρακτηρίζονται από την περίοδο T , το μήκος κύματος λ και το ύψος κύματος h . Η κυκλική συχνότητα δίνεται από τη σχέση $\omega = 2\pi / T$ και ο αριθμός κύματος είναι $k = 2\pi / \lambda$. Ο κυματαριθμός k είναι η χωρική συχνότητα ενός κύματος που μας δείχνει πόσες φορές επαναλαμβάνει κάτι τον εαυτό του μέσα στη μονάδα του μονοδιάστατου χώρου. Για ένα κύμα ο κυματαριθμός ισούται με το πόσα μήκη κύματος ξεδιπλώνονται στο χώρο όταν το κύμα έχει διανύσει απόσταση ίση με ένα μέτρο (ή όποια άλλη μονάδα μήκους ορίσουμε ως μοναδιαία). Κατ' αναλογία με το πώς σχετίζεται η συχνότητα με την έννοια της περιόδου σε μια επανάληψη στο χρόνο, όμοια αντιστοιχίζεται στον κυματαριθμό το μήκος κύματος. Ο κυματαριθμός k δίνεται από τη σχέση

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi v}{u} = \frac{\omega}{u}$$

Μία ακόμη ιδιότητα είναι η κλίση κύματος που είναι η αναλογία μεταξύ H/λ . Θεωρείται ότι για ένα σταθερό βάθος νερού h που εκτείνεται απεριόριστα στην οριζόντια κατεύθυνση, μπορεί να βρεθεί μια αρμονική λύση σταθερής κατάστασης, μέσα από τη γραμμική σχέση διασποράς.

Για έντεκα διαφορετικές φυσικές περιόδους κύματος από $T=0.5s$ έως $T=1.2s$ σε βαθύ νερό όπου η σχέση διασποράς για τα κύματα βαθέων υδάτων είναι συχνά γραμμένη ως $\omega = \sqrt{gk}$ όπου k =κυματαριθμός και g =επιτάχυνση της βαρύτητας.

Πιο συγκεκριμένα για την πρώτη αρμονική η σχέση διασποράς παίρνει τη μορφή

$$2\omega k g h = \tan h$$

Επιλύοντας τη σχέση διασποράς ως προς k και ω^2 προκύπτει

$$k = \frac{\omega^2}{g \tanh(kd)} \Rightarrow \omega^2 = g k \tanh(kd)$$

Έτσι υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις.

1. Πίνακας-Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών γραμμικών κυμάτων

	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)
	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200
ω(rad/s)	12,566	10,472	8,976	7,854	6,981	6,283	5,712	5,236
k (1/m)	16,103	11,182	8,216	6,290	4,970	4,028	3,335	2,816
λ(m)	0,390	0,562	0,765	0,999	1,264	1,560	1,884	2,231

Υπολογίστηκαν επίσης οι περίοδοι γύρω από τη χρονική στιγμή που προκύπτει ο συντονισμός στο $T=0.75$ s για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

2. Πίνακας-Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών γραμμικών κυμάτων στην περιοχή του συντονισμού

	T(s)	T(s)	T(s)
	0,750	0,850	0,950
$\omega(\text{rad/s})$	8,378	7,392	6,614
k (1/m)	7,157	5,572	4,462
$\lambda(\text{m})$	0,878	1,128	1,408

Για τις προσομοιώσεις, η ελεύθερη επιφάνεια συνολικά είναι διακριτοποιημένη σε 400 κόμβους, ο βυθός σε 200 κόμβους, τα κατακόρυφα όρια κατά 30 κόμβους και πλωτά σώματα κατά 100 κόμβους το καθένα δηλαδή 200 μαζί, ενώ το βήμα χρόνου $dt = T / 5000$.

3. Πίνακας-Βήμα χρόνου

T(s)	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,0	110,0	120,0	75,00	85,00	95,00
dt(s)	0,010	0,0120	0,0140	0,0160	0,0180	0,020	0,022	0,024	0,015	0,017	0,019

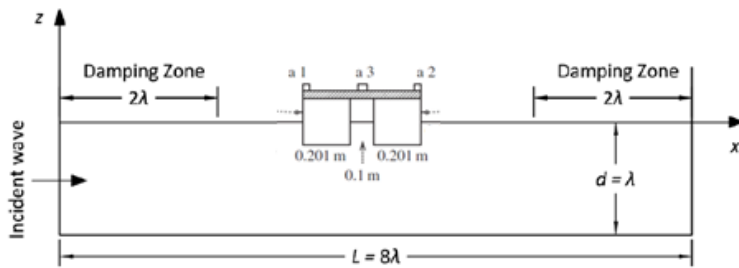
Τέλος υπολογίστηκαν για τις ίδιες περιόδους οι αντίστοιχες κλίσεις κυμάτων (H / λ).

4. Πίνακας-Υπολογισμός κλίσεων κύματος

H/λ	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)
	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	0,750	0,850	0,950	
H60	0,0065	0,0094	0,0127	0,0166	0,0211	0,0260	0,0314	0,0372	0,015	0,019	0,023	
H45	0,0087	0,0125	0,0170	0,0222	0,0281	0,0347	0,0419	0,0496	0,020	0,025	0,031	
H30	0,0130	0,0187	0,0255	0,0333	0,0421	0,0520	0,0628	0,0744	0,029	0,038	0,047	

Οι διαστάσεις που περιγράφονται στο πείραμα προσομοιωθήκαν στον επιλύτη hFLOW και προέκυψε το ακόλουθο μοντέλο πλωτήρα.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροοίγια παράκτιες ανεμογεννήτριες



11.Εικόνα-Περιγραφή του πλέγματος του μοντέλου βάσει του επιλύτη hFLOW

Όπου σε ένα ορθογωνικό πεδίο βάρους $d=1$ m και μήκους $L=13.7$ θεωρείται μια σταθερή επιφάνεια διάτρησης 2 πλωτών, με

- πλάτος βάσης $B = 0.201 * 2 + 0.1 = 0.502$ m,
- ακτίνα στρογγυλής γωνίας $r = 0.18$ m
- $dr = 0.097$ m
- κέντρο μάζας $z_{cm} = -0.006$ m .
- μήκος πλωτού $= 0.586$ m

Το μέσο του σώματος κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας είναι στα 7 m. Ένα περιοδικό κύμα λειτουργίας ροής επιβάλλεται κατά μήκος του ορίου εισροής, με $A = H / 2$ που υποδηλώνει το πλάτος κύματος. Το βάθος και το μήκος της περιοχής ρυθμίζονται προσαρμοστικά για κάθε συχνότητα κύματος έτσι ώστε $d = \lambda$ και $L = 8\lambda$, ενώ το μήκος των στρώσεων απόσβεσης και στις δύο πλευρές είναι $Ld = 2\lambda$. Η μάζα είναι ανηγμένη, στο μήκος του σκάφους και ίση με $m = 22.885 / 0.586 = 39.057$

Θεωρείται επίσης γεννήτρια κυμάτων αριστερά του πλωτήρα πριν από τη ζώνη απόσβεσης μήκους 2λ όπως φαίνεται στο σχήμα καθώς και ζώνη απόσβεσης δεξιά του μήκους 2λ . Για τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος στον πίνακα 2 υπολογίστηκαν οι ακριβείς θέσεις των όρων αυτών κατά το μήκος της ελεύθερης επιφάνειας.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

5. Πίνακας-Υπολογισμός των όρων απόσβεσης

	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)	T(s)
	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200
Xwg(m)	5,18822	4,75248	3,94088	3,00444	1,94357	0,76085	-0,53504	-1,92587
Xwg+2λ(m)	5,96861	5,87624	5,47044	5,00222	4,47179	3,88043	3,23248	2,53706
Xwg-2λ(m)	8,03139	8,12376	8,52956	8,99778	9,52821	10,11957	10,76752	11,46294
Xbe(m)	8,81178	9,24752	10,05912	10,99556	12,05643	13,23915	14,53504	15,92587

Επιπλέον πλωτήρας

Για την περίπτωση του ελεύθερα κινούμενου πλωτήρα χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς τα παραπάνω δεδομένα (1. Πίνακας, 2. Πίνακας, 3. Πίνακας, 4. Πίνακας, 5. Πίνακας) έχοντας ως επιπλέον προσθήκη τη μάζα του σώματος και των στροφικών ελατηρίων πρόσδεσης.

Η παρούσα δοκιμαστική περίπτωση αφορά ένα αγκυροβολημένο, επιφανειακά διάτρητο πλωτό σώμα. Η κατάσταση αυτή είναι παρόμοια με την προηγούμενη, εκτός του ότι το πλωτό σώμα είναι ελεύθερο να κινηθεί κάτω από τη δράση της διέγερσης των κυμάτων και περιορίζεται από την πρόσδεση στην οριζόντια κατεύθυνση. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίο να υπολογιστούν εκτός από την ανύψωση της επιφάνειας και οι δυνάμεις που ασκούνται στο πλωτό σώμα.

Οι υδροστατικές ιδιότητες του πλωτήρα υπολογίζονται ως ολοκληρώματα επιφάνειας χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Gauss.

Η μάζα του σώματος είναι όπως και προηγουμένως ανηγμένη στο μήκος του 39.057.

- η αδράνεια σε σχέση με το κέντρο βάρους είναι $I = r^2 * m = 1.265317 \text{ kgm}^2$
- η πλευστότητα (Buoyancy) $= 1000 * 9,80665 * 0,201 * 0,097 * 2 = 382,401 \text{ N}$
- οι συντελεστές δυσκαμψίας των ελατηρίων για την οριζόντια κατεύθυνση χ προκύπτουν από την επαλληλία των συντελεστών K (ελατήρια παράλληλα ή σε σειρά)

$$K_{11} = K_{22} = \frac{\Pi}{L} N$$

$$K_{33} = \frac{EA}{L} N$$

$$K_{55} = -382,401 * (0,097/2 - 0,006) + 1000 * 9,80665/3 * (0,251^3 - 0,05^3) * 2 = 86,314 \text{ N m}^{-1}$$

$$K_{X12} = K_{X1} + K_{X2} = 43,7 + 42,5 = 86,2 \text{ Nm}^{-1}$$

$$K_{X123} = \frac{1}{K_{X12}} + \frac{1}{K_{X13}} = 74,393 \text{ Nm}^{-1}$$

$$K_{16} = K_{X123} * 0,056 = 4,66 = K_{15}$$

ΠΛΩΤΗΡΑΣ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣΣΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ο πίνακας συνολικής ακαμψίας κατά την ανάλυση της περιστροφικής κίνησης, είναι διαγώνιος επειδή το κέντρο μάζας του σώματος χρησιμοποιείται ως το σημείο ως προς το οποίο αναλύεται κάθε κίνηση ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες, Έτσι προκύπτει ως αποτέλεσμα, ότι δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ των τριών βαθμών ελευθερίας και ακαμψίας.

Από την άλλη πλευρά, η μήτρα μάζας έχει κάποια εκτός διαγωνίου στοιχεία από τις ακόλουθες δυνάμεις αδρανείας (που προσδιορίζονται με i) εξαρτώνται από τις δύο μετατοπίσεις και περιστροφές:

$$F_m = m\ddot{q} + kq$$

Όπου q = ταχύτητα και \ddot{q} = επιτάχυνση

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στο μητρώο μάζας τα εκτός διαγωνίου στοιχεία παραλείπονται καθώς έχουμε μόνο τρεις βαθμούς ελευθερίας.

Έτσι προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τη μάζα:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_p \end{vmatrix}$$

Και για την ακαμψία:

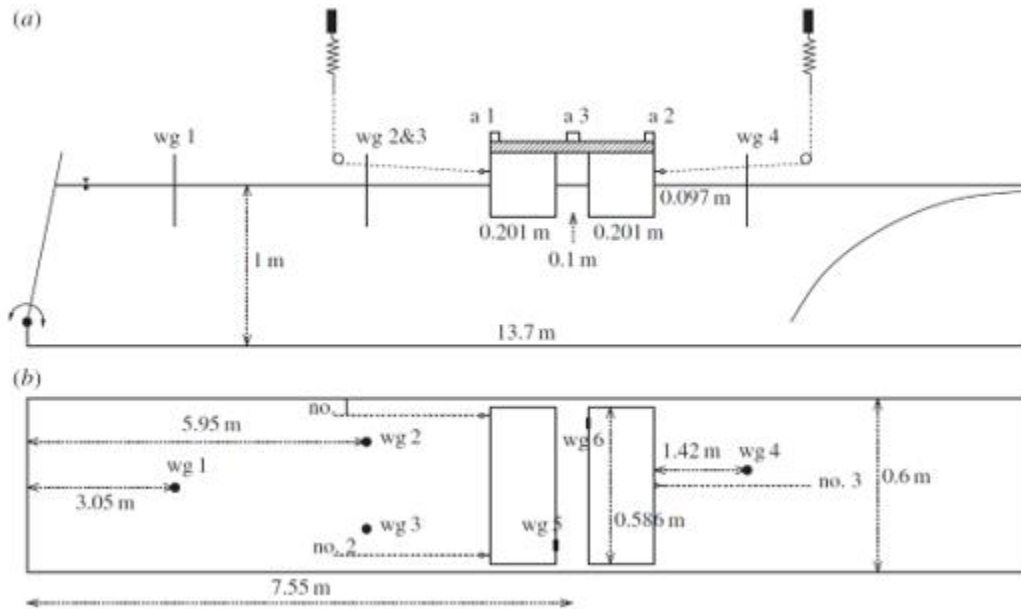
$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} \end{vmatrix}$$

Οι προβλέψεις hFLOW της πρώτης αρμονικής των 3 κινήσεων του άκαμπτου σώματος (heave, sway, pitch) και η ανύψωση συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα. Οι σειρές Fourier υπολογίζονται στις τελευταίες 5 κύριες περιόδους των χρονοσειρών. Για να υποδείξουμε την επίδραση της απότομης κυματομορφής, συμπεριλαμβάνονται επίσης τα αποτελέσματα για το $H = 0,01m$. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μη γραμμική λύση είναι κοντά στην γραμμική λύση.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MOONPOOL

Στο ακόλουθο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η επαλήθευση της μεθόδου του hFLOW επιλύτη, προσαρμόστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι φυσικές ιδιότητες των υλικών και οι αντίστοιχες παράμετροι με αυτές που αναγράφονται αναλυτικά στη δημοσίευση. Στη συνέχεια περιγράφεται το πείραμα καθώς και ο τρόπος που μοντελοποιήθηκαν τα δεδομένα για τους απαραίτητους υπολογισμούς.



12.Εικόνα-Μοντέλο πειράματος διπλούbarge

Η παρούσα δοκιμαστική περίπτωση αφορά 2 αγκυροβολημένα, επιφανειακά διάτρητα πλωτά σώματα. Ρυθμίστηκε η φυσική περίοδος στροφής του πλωτού να είναι μεγαλύτερη από τη φυσική περίοδο της piston-mode μέσα στο moonpool. Σχεδόν οριζόντιες γραμμές πρόσδεσης με γωνία 3° συνδέθηκαν σε κάθε πλευρά του σκάφους για να εμποδίσει το μοντέλο να παρασύρεται. Αυτή η γωνία έδωσε μια μικρή, αλλά αμελητέα, σύζευξη μεταξύ της ανύψωσης και των άλλων βαθμών ελευθερίας. Στο άκρο αυτών των γραμμών, συνδέθηκαν ελατήρια, έτσι ώστε το μοντέλο είναι ελεύθερο να κινείται σε οριζόντια κίνηση, ανύψωση και στροφή. Μεταξύ του σώματος και των ελατηρίων κάθε γραμμή πρόσδεσης πέρασε από μια τροχαλία, ώστε τα ελατήρια να συνδεθούν κατακόρυφα στην οροφή με έναν μετρητή δύναμης. Λόγω της ακαμψίας του ελατηρίου, η φυσική περίοδος ήταν $3,2s$ (sway natural period) και $T=1.2$ (heave natural

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος moonpoolγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

period). Το πειραματικό πρόγραμμα εκτελέστηκε για 11 διαφορετικές περιόδους κύματος και τρεις διαφορετικούς λόγους, αυτούς του ύψους κύματος προς μήκος κύματος (απότομες κυματομορφές): $H / \lambda = 1/60, 1/45, 1/30$ όπου το H είναι το ύψος κύματος και λ είναι το μήκος κύματος από τη γραμμική σχέση διασποράς.

6. Πίνακας- Διαστάσεις και ιδιότητες του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστηριακό πείραμα

modeldraft(m)				0.097
width of each side hull (m)				0.201
moonpoolgapwidth (m)				0.100
model length in transverse tank direction (m)				0.586
mass (kg)				22.885
radius of gyration r_{xx} (m) in roll about the COG				0.18
COG from the hull bottom (m)				0.091
no. 1	no. 2	no. 3		
.....				
spring constants (N m ⁻¹)		43.7	42.5	88.2
.....				
		no. 1	no. 2	no. 3
.....				
pre-tensions (N)		7.5	7.5	15
.....				
line connection height above the calm water surface on the hull (m)				0.05
lineangle (°)				~3
length between hull and left pulley (m)				2.1
length between hull and right pulley (m)				2.0

Τα διαγράμματα των κινήσεων και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας που παρουσιάστηκαν στη συγκεκριμένη δημοσίευση συγκρίνονται με τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν με τις μεθόδους επίλυσης που χρησιμοποιήσαμε εμείς. Παρακάτω παρουσιάζονται και τα δύο κι ελέγχεται κατά πόσο επαληθεύεται η μέθοδος αυτή.

Οι υπολογισμοί μας στηρίχθηκαν στις δύο ακραίες τιμές των κλίσεων του κύματος για $H/30$ και $H/60$ και παρουσιάζονται αναλυτικά στα ακόλουθα αποτελέσματα.

Μετά τους υπολογισμούς ,σημαντικό ενδιαφέρον έχει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ο σχολιασμός τους ,η σύγκριση των δύο μεθόδων μεταξύ τους καθώς και η σύγκρισή τους με το πείραμα και την ημι-γραμμικοποιημένη μέθοδο που παρουσιάζεται στη δημοσίευση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.2 ΑΚΙΝΗΤΟ ΣΩΜΑ

Η ανύψωση (z) της ελεύθερης επιφάνειας κατά την πάροδο των τριών αρμονικών(δείκτες 0,1,2,3) για τις θέσεις στο μέσον(M) του ποσορρο,στο αριστερό(L)και δεξί(R) τοίχωμα παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα.

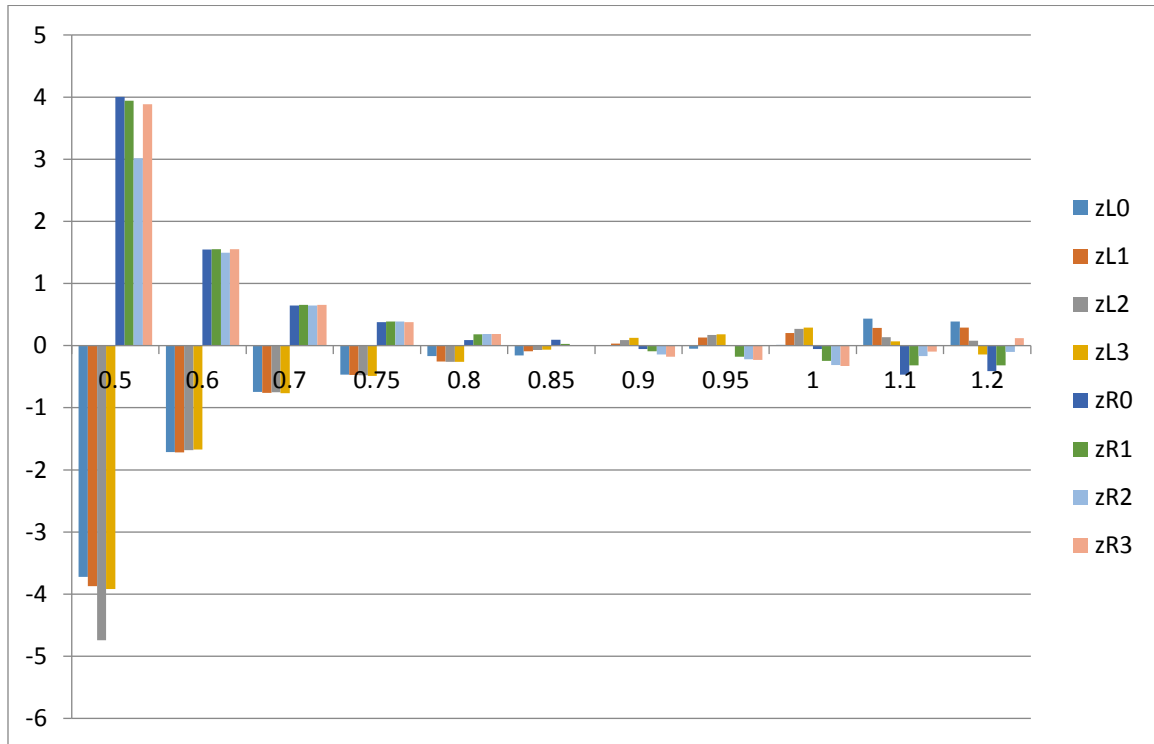
Υπολογισμοί Γραμμικής θεωρίας:

1.Πίνακας-Υπολογισμός κατακόρυφης ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας για τις αρμονικές(0,1,2,3)

$H = \frac{1}{30}$													
A	T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,0065	0,5	2,22 E-07	1,76 E-04	9,07 E-07	5,00 E-07	2,14 E-07	1,69 E-04	8,64 E-07	4,80 E-07	2,31 E-07	1,83 E-04	9,34 E-07	5,19 E-07
0,0094	0,6	- 3,81 E-06	9,61 E-04	2,60 E-06	9,92 E-07	- 3,74 E-06	9,45 E-04	2,56 E-06	9,75 E-07	- 3,87 E-06	9,76 E-04	2,64 E-06	1,01 E-06
0,0127	0,7	- 6,46 E-06	4,23 E-03	2,13 E-05	1,17 E-05	- 6,41 E-06	4,20 E-03	2,11 E-05	1,16 E-05	- 6,50 E-06	4,26 E-03	2,14 E-05	1,18 E-05
0,0146	0,7 5	1,83 E-05	9,04 E-03	4,33 E-05	2,36 E-05	1,83 E-05	9,00 E-03	4,31 E-05	2,35 E-05	1,84 E-05	9,08 E-03	4,35 E-05	2,37 E-05
0,0166	0,8	2,10 E-05	2,25 E-02	1,17 E-04	6,52 E-05	2,09 E-05	2,24 E-02	1,17 E-04	6,51 E-05	2,10 E-05	2,25 E-02	1,18 E-04	6,54 E-05
0,0188	0,8 5	- 1,89 E-04	8,28 E-02	3,83 E-04	2,07 E-04	- 1,89 E-04	8,27 E-02	3,83 E-04	2,07 E-04	- 1,89 E-04	8,28 E-02	3,83 E-04	2,07 E-04
0,0211	0,9	- 2,81 E-04	7,80 E-02	2,58 E-04	1,21 E-04	- 2,81 E-04	7,80 E-02	2,58 E-04	1,21 E-04	- 2,81 E-04	7,79 E-02	2,58 E-04	1,21 E-04
0,0235	0,9 5	9,28 E-05	4,70 E-02	2,27 E-04	1,24 E-04	9,28 E-05	4,71 E-02	2,27 E-04	1,24 E-04	9,28 E-05	4,69 E-02	2,26 E-04	1,23 E-04
0,0260	1	- 9,18 E-05	3,86 E-02	1,77 E-04	9,51 E-05	- 9,18 E-05	3,87 E-02	1,77 E-04	9,54 E-05	- 9,17 E-05	3,86 E-02	1,76 E-04	9,48 E-05
0,0314	1,1	- 1,15 E-04	3,53 E-02	1,33 E-04	6,68 E-05	- 1,16 E-04	3,54 E-02	1,33 E-04	6,68 E-05	- 1,15 E-04	3,52 E-02	1,33 E-04	6,67 E-05
0,0372	1,2	1,27 E-04	3,33 E-02	9,88 E-05	4,21 E-05	1,28 E-04	3,34 E-02	9,88 E-05	4,21 E-05	1,27 E-04	3,32 E-02	9,87 E-05	4,22 E-05

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοσχορολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

7.1 Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των σημειακών θέσεων R,L ως προς το μέσο M κατά την πάροδο των αρμονικών.



Για καλύτερη εποπτεία των υπολογισμών οι μετρήσεις είναι ανηγμένες στο πλάτος A του κύματος.

2. Πίνακας- Ανηγμένη μορφή των υπολογισμών βάσει του πλάτους κύματος

T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,5	3,42 E-05	2,70E- 02	1,39 E-04	7,68 E-05	3,29 E-05	2,60E- 02	1,33 E-04	7,38 E-05	3,56 E-05	2,81E- 02	1,44 E-04	7,98 E-05
0,6	- 4,07 E-04	1,03E- 01	2,78 E-04	1,06 E-04	- 4,00 E-04	1,01E- 01	2,73 E-04	1,04 E-04	- 4,13 E-04	1,04E- 01	2,82 E-04	1,08 E-04
0,7	- 5,07 E-04	3,32E- 01	1,67 E-03	9,21 E-04	- 5,03 E-04	3,29E- 01	1,66 E-03	9,14 E-04	- 5,10 E-04	3,34E- 01	1,68 E-03	9,27 E-04
0,7	1,25	6,18E-	2,96	1,61	1,25	6,15E-	2,95	1,61	1,26	6,20E-	2,97	1,62

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5	E-03	01	E-03	E-03	E-03	01	E-03	E-03	E-03	01	E-03	E-03
0,8	1,26 E-03	1,35E+ 00	7,05 E-03	3,92 E-03	1,26 E-03	1,35E+ 00	7,03 E-03	3,91 E-03	1,26 E-03	1,35E+ 00	7,07 E-03	3,93 E-03
0,8 5	- 1,01 E-02	4,40E+ 00	2,04 E-02	1,10 E-02	- 1,01 E-02	4,40E+ 00	2,04 E-02	1,10 E-02	- 1,01 E-02	4,41E+ 00	2,04 E-02	1,10 E-02
0,9	- 1,33 E-02	3,70E+ 00	1,23 E-02	5,74 E-03	- 1,33 E-02	3,70E+ 00	1,23 E-02	5,74 E-03	- 1,33 E-02	3,70E+ 00	1,22 E-02	5,73 E-03
0,9 5	3,96 E-03	2,00E+ 00	9,66 E-03	5,27 E-03	3,95 E-03	2,01E+ 00	9,67 E-03	5,28 E-03	3,96 E-03	2,00E+ 00	9,64 E-03	5,26 E-03
1	- 3,53 E-03	1,49E+ 00	6,79 E-03	3,66 E-03	- 3,53 E-03	1,49E+ 00	6,81 E-03	3,67 E-03	- 3,53 E-03	1,48E+ 00	6,77 E-03	3,65 E-03
1,1	- 3,67 E-03	1,12E+ 00	4,23 E-03	2,13 E-03	- 3,68 E-03	1,13E+ 00	4,24 E-03	2,13 E-03	- 3,65 E-03	1,12E+ 00	4,22 E-03	2,12 E-03
1,2	3,43 E-03	8,96E- 01	2,66 E-03	1,13 E-03	3,44 E-03	8,99E- 01	2,66 E-03	1,13 E-03	3,41 E-03	8,94E- 01	2,65 E-03	1,13 E-03

Η τελική μορφή των υπολογισμών για την ανύψωση z της ελεύθερης επιφάνειας για ακίνητο πλωτήρα βάσει της γραμμικής θεωρίας(IFS0) είναι η ακόλουθη.

3. Πίνακας- Αποτελέσματα ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας(δεξιά, αριστερά κι εντός του ακίνητου πλωτήρα)

T	A	IFS0-zM1	IFS0-zL1	IFS0-zR1
0,5	0,0065	0,03	0,03	0,03
0,6	0,0094	0,10	0,10	0,10
0,7	0,0127	0,33	0,33	0,33
0,75	0,0146	0,62	0,62	0,62
0,8	0,0166	1,35	1,35	1,35
0,85	0,0188	4,40	4,40	4,41
0,9	0,0211	3,70	3,70	3,70
0,95	0,0235	2,00	2,01	2,00

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροοηγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

1	0,0260	1,49	1,49	1,48
1,1	0,0314	1,12	1,13	1,12
1,2	0,0372	0,90	0,90	0,89

3.2.1 Υπολογισμοί Μη Γραμμικής θεωρίας:

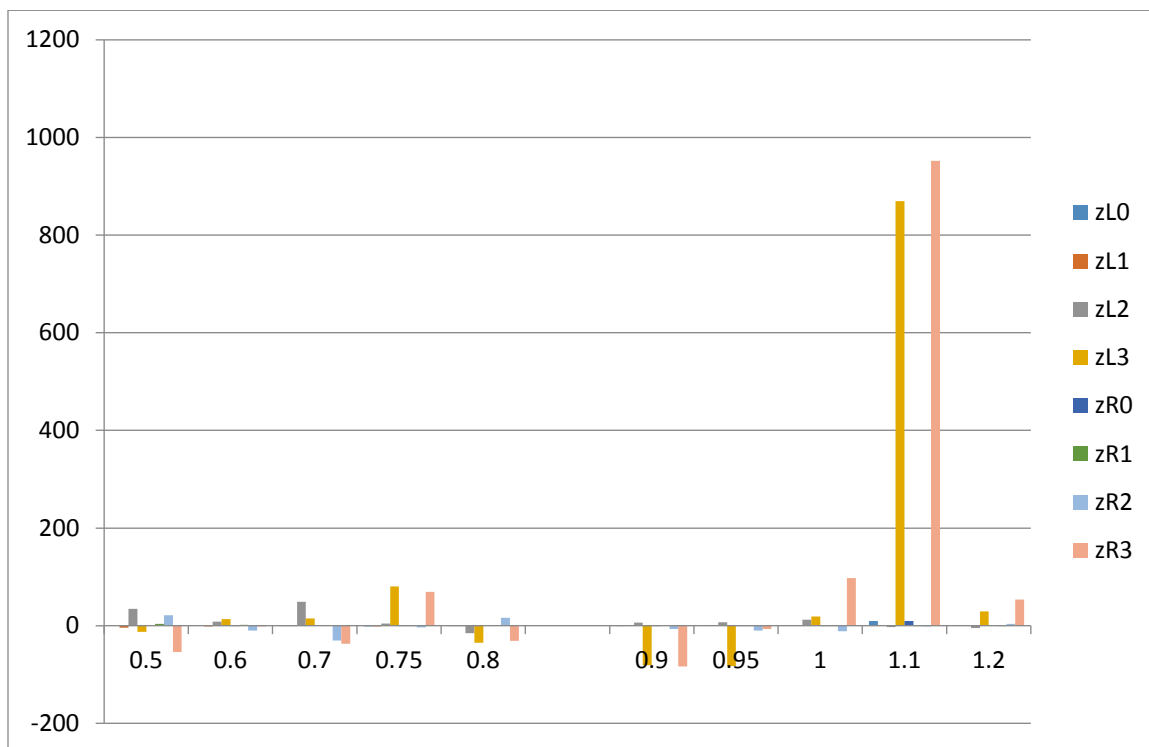
Όμοια έγιναν οι υπολογισμοί βάσεις της μη γραμμικής θεωρίας (IFS2) και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

4. Πίνακας-Υπολογισμός ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας βάσει της μη γραμμικής θεωρίας για τις αρμονικές(0,1,2,3)

IFS2												
T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,5	4,58E-05	1,73E-04	4,90E-05	1,80E-07	4,59E-05	1,66E-04	6,58E-05	1,58E-07	4,59E-05	1,79E-04	5,96E-05	8,24E-08
0,6	6,42E-05	9,47E-04	1,25E-04	1,08E-06	6,43E-05	9,30E-04	1,36E-04	1,23E-06	6,41E-05	9,61E-04	1,13E-04	1,07E-06
0,7	1,20E-04	4,17E-03	2,42E-04	1,03E-05	1,19E-04	4,15E-03	3,61E-04	1,18E-05	1,22E-04	4,20E-03	1,69E-04	6,51E-06
0,75	3,20E-04	1,03E-02	1,93E-04	2,23E-05	3,16E-04	1,02E-02	2,02E-04	4,02E-05	3,19E-04	1,03E-02	1,86E-04	3,79E-05
0,8	9,02E-04	2,19E-02	1,84E-04	7,70E-05	8,98E-04	2,19E-02	1,56E-04	5,02E-05	9,05E-04	2,20E-02	2,13E-04	5,32E-05
0,9	6,15E-03	6,95E-02	5,68E-03	1,78E-03	6,14E-03	6,95E-02	6,05E-03	3,37E-04	6,10E-03	6,95E-02	5,28E-03	2,97E-04
0,95	2,65E-03	4,62E-02	2,48E-03	4,18E-04	2,66E-03	4,62E-02	2,66E-03	7,07E-05	2,64E-03	4,61E-02	2,23E-03	3,89E-04
1	1,61E-03	3,86E-02	1,24E-03	2,09E-04	1,62E-03	3,87E-02	1,39E-03	2,48E-04	1,60E-03	3,85E-02	1,10E-03	4,11E-04
1,1	1,10E-03	3,55E-02	1,50E-03	2,35E-04	1,21E-03	3,56E-02	1,46E-03	2,28E-03	1,21E-03	3,53E-02	1,48E-03	2,47E-03
1,2	1,37E-03	3,71E-02	2,61E-03	4,37E-04	1,39E-03	3,72E-02	2,48E-03	5,64E-04	1,38E-03	3,69E-02	2,71E-03	6,71E-04

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

10.1 Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των σημειακών θέσεων R,L ως προς το μέσο M κατά την πάροδο των αρμονικών.



5. Πίνακας-Ανηγμένη μορφή υπολογισμών ανύψωσης επιφάνειας

T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,5	7,04E-03	2,66E-02	7,54E-03	2,77E-05	7,06E-03	2,55E-02	1,01E-02	2,42E-05	7,06E-03	2,76E-02	9,16E-03	1,27E-05
0,6	6,85E-03	1,01E-01	1,34E-02	1,16E-04	6,86E-03	9,93E-02	1,45E-02	1,31E-04	6,85E-03	1,03E-01	1,20E-02	1,14E-04
0,7	9,43E-03	3,27E-01	1,90E-02	8,10E-04	9,36E-03	3,25E-01	2,83E-02	9,28E-04	9,55E-03	3,29E-01	1,33E-02	5,11E-04
0,75	2,19E-02	7,06E-01	1,32E-02	1,53E-03	2,16E-02	6,97E-01	1,38E-02	2,75E-03	2,18E-02	7,04E-01	1,27E-02	2,59E-03
0,8	5,42E-02	1,32E+00	1,10E-02	4,63E-03	5,39E-02	1,31E+00	9,35E-03	3,02E-03	5,43E-02	1,32E+00	1,28E-02	3,19E-03
0,9	2,92E-01	3,30E+00	2,69E-01	8,44E-02	2,91E-01	3,30E+00	2,87E-01	1,60E-02	2,89E-01	3,30E+00	2,50E-01	1,41E-02
0,95	1,13E-01	1,97E+00	1,06E-01	1,78E-02	1,13E-01	1,97E+00	1,13E-01	3,01E-03	1,12E-01	1,97E+00	9,50E-02	1,66E-02
1	6,18E-02	1,49E+00	4,76E-02	8,02E-03	6,21E-02	1,49E+00	5,33E-02	9,54E-03	6,16E-02	1,48E+00	4,22E-02	1,58E-02
1,1	3,51E-02	1,13E+00	4,79E-02	7,47E-03	3,84E-02	1,13E+00	4,65E-02	7,25E-02	3,84E-02	1,12E+00	4,72E-02	7,86E-02
1,2	3,69E-02	9,97E-02	7,02E-02	1,17E-02	3,73E-02	1,00E+00	6,68E-02	1,52E-02	3,70E-02	9,93E-02	7,28E-02	1,80E-02

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

	-02	01	-02	-02	-02	0	-02	-02	-02	01	-02	-02
--	-----	----	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----	----	-----	-----

6. Πίνακας- Αποτελέσματα ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας(δεξιά, αριστερά και στη μέση της επιφάνειας)

T	A	IFS2-zM1	IFS2-zL1	IFS2-zR1
0,5	0,0065	0,03	0,03	0,03
0,6	0,0094	0,10	0,10	0,10
0,7	0,0127	0,33	0,33	0,33
0,75	0,0146	0,71	0,70	0,70
0,8	0,0166	1,32	1,31	1,32
0,9	0,0211	3,30	3,30	3,30
0,95	0,0235	1,97	1,97	1,97
1	0,0260	1,49	1,49	1,48
1,1	0,0314	1,13	1,13	1,12
1,2	0,0372	1,00	1,00	0,99

Όμοιοι υπολογισμοί έγιναν και για H/60 ενδεικτικά με τη μη γραμμική θεωρία (IFS2).

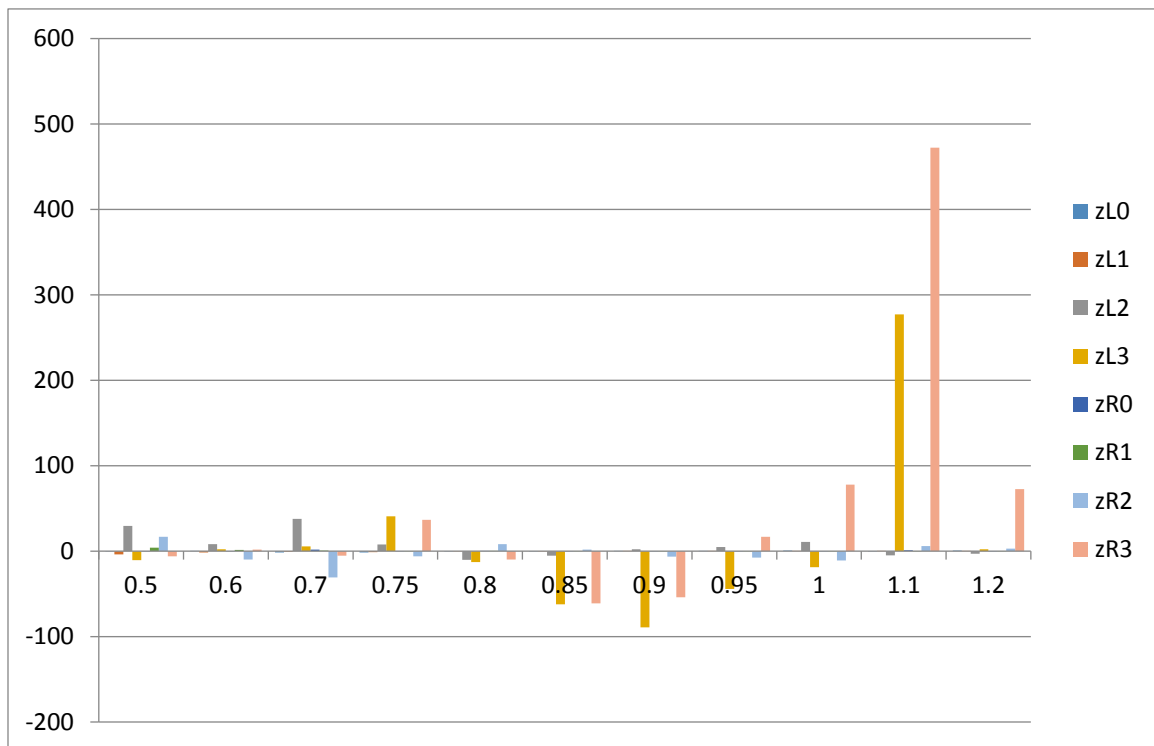
7. Πίνακας- Υπολογισμοί ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας για κλίση κύματος H/60 βάσει της μη-γραμμικής θεωρίας

$H = \frac{1}{60}$													
H	T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,0065	0,5	1,17E-05	8,79E-05	1,21E-05	2,94E-07	1,17E-05	8,44E-05	1,57E-05	2,63E-07	1,17E-05	9,14E-05	1,41E-05	2,77E-07
0,0094	0,6	1,54E-05	4,83E-04	3,17E-05	3,84E-07	1,54E-05	4,75E-04	3,43E-05	3,92E-07	1,54E-05	4,91E-04	2,86E-05	3,92E-07
0,0127	0,7	2,81E-05	2,11E-03	6,31E-05	5,54E-06	2,77E-05	2,09E-03	8,69E-05	5,83E-06	2,86E-05	2,12E-03	4,37E-05	5,25E-06
0,0150	0,75	9,35E-05	5,43E-03	4,11E-05	1,13E-05	9,22E-05	5,36E-03	4,44E-05	1,59E-05	9,31E-05	5,42E-03	3,87E-05	1,54E-05
0,0166	0,8	2,39E-04	1,12E-02	8,03E-05	3,46E-05	2,38E-04	1,12E-02	7,20E-05	3,01E-05	2,39E-04	1,12E-02	8,70E-05	3,11E-05
0,0190	0,85	2,56E-03	4,30E-02	2,01E-03	3,83E-04	2,56E-03	4,30E-02	1,90E-03	1,45E-04	2,56E-03	4,30E-02	2,05E-03	1,49E-04

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

0,021 1	0,9	1,66E -03	3,75E -02	1,62E -03	1,35E -04	1,67E -03	3,75E -02	1,65E -03	1,48E -05	1,66E -03	3,75E -02	1,51E -03	6,22E -05
0,023 5	0,95	6,94E -04	2,33E -02	6,88E -04	7,37E -05	6,97E -04	2,33E -02	7,21E -04	4,11E -05	6,92E -04	2,33E -02	6,37E -04	8,62E -05
0,026 0	1	3,75E -04	1,93E -02	2,71E -04	4,24E -05	3,77E -04	1,93E -02	3,00E -04	3,44E -05	3,73E -04	1,92E -02	2,41E -04	7,54E -05
0,031 4	1,1	2,56E -04	1,77E -02	3,74E -04	4,62E -05	2,55E -04	1,77E -02	3,55E -04	1,74E -04	2,59E -04	1,76E -02	3,97E -04	2,64E -04
0,037 2	1,2	3,77E -04	1,85E -02	6,62E -04	5,22E -05	3,79E -04	1,86E -02	6,41E -04	5,34E -05	3,76E -04	1,85E -02	6,83E -04	9,02E -05

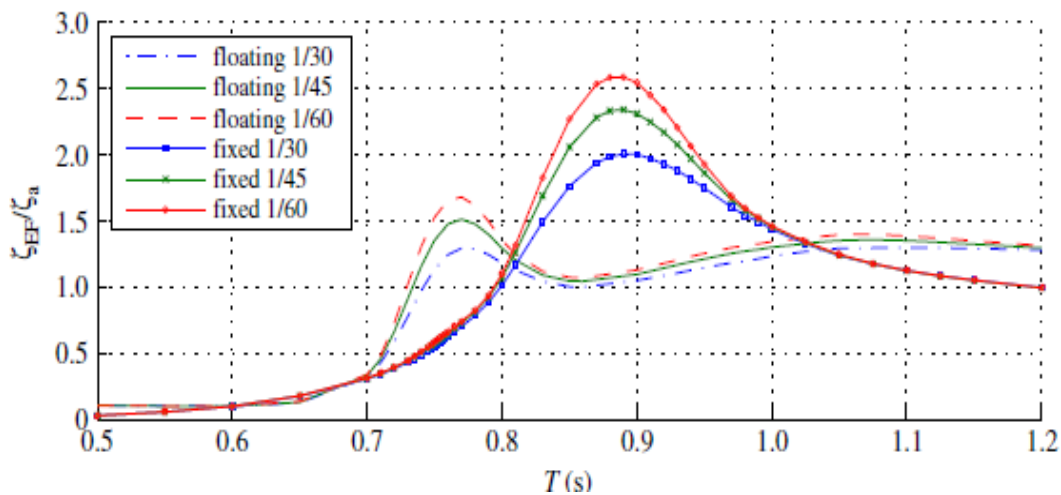
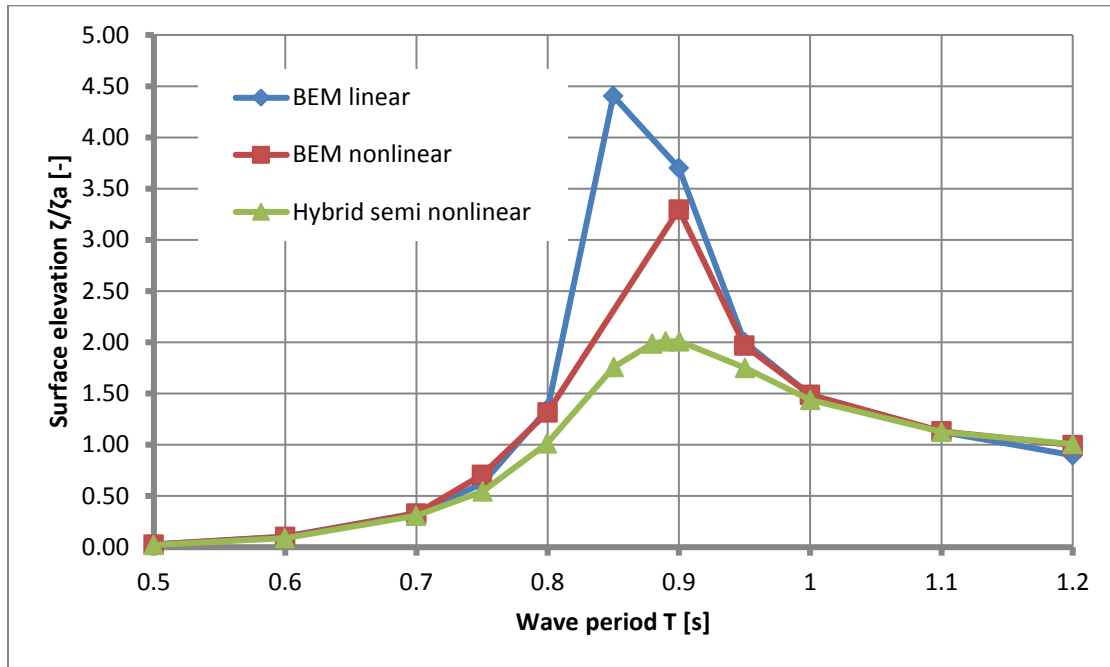
13.1 Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των σημειακών θέσεων R,L ως προς το μέσο M κατά την πάροδο των αρμονικών.



Σύγκριση μεθόδων για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοπροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

1.Διάγραμμα-Σύγκριση γραμμικής, μη γραμμικής και ημι-μη γραμμικής θεωρίας για κλίση κύματος $H/30$, ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ακίνητο σώμα για τις αντίστοιχες περιόδους κύματος.

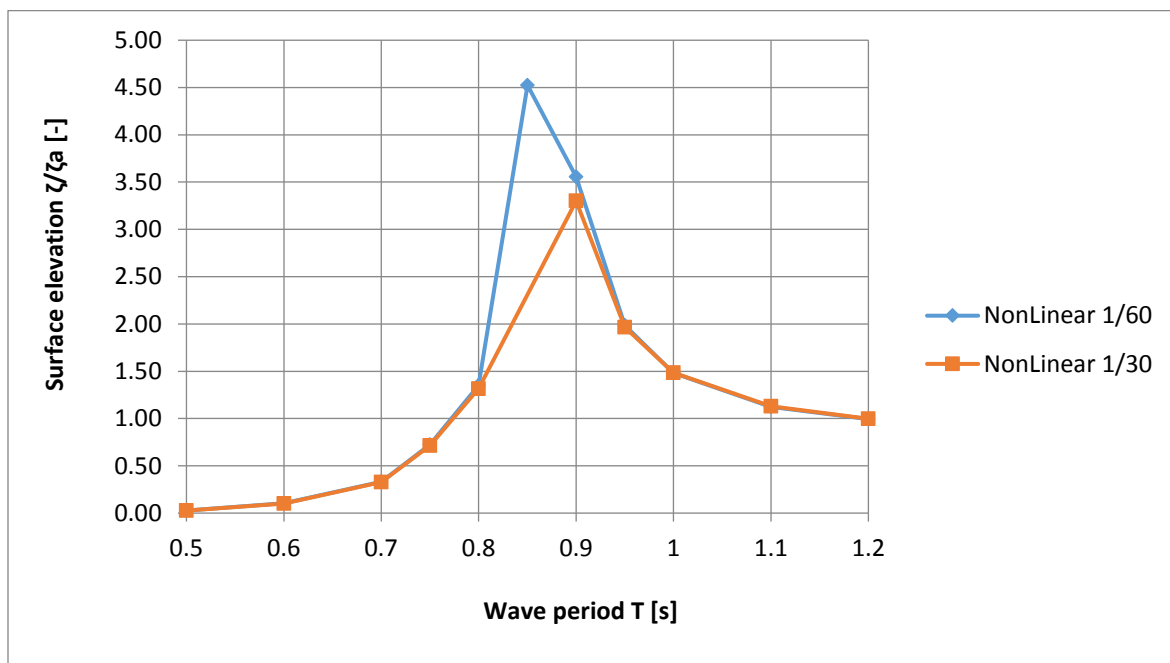


13.Εικόνα-Σύγκριση γραμμικής, μη γραμμικής και ημι-μη γραμμικής θεωρίας για κλίσεις κύματος $H/30, H/40, H/60$, ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ακίνητο και πλωτό σώμα για τις αντίστοιχες περιόδους κύματος (δημοσίευσης).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως παρατηρείται από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων οι μέθοδοι επαληθεύονται αρκετά και οι καμπύλες έχουν μια παρόμοια μορφή μεταξύ τους με τιμές ανύψωσης πολύ κοντινές σε αυτές της δημοσίευσης καθώς επίσης ο συντονισμός εμφανίζεται στις ίδιες χρονικές στιγμές.

1.1.1. Διάγραμμα-Σύγκριση μη γραμμικής θεωρίας για κλίση κύματος $H/30$ και $H/60$, ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ακίνητο σώμα για τις αντίστοιχες περιόδους κύματος.



Στην κλίση κύματος $H/60$ παρατηρείται μεγαλύτερη ανύψωση επιφάνειας και παράλληλα ταχύτερη είσοδος στην περιοχή του συντονισμού. Αντίθετα στην κλίση $H/30$ παρατηρείται χαμηλότερη ανύψωση και πιο αργή είσοδος στην περιοχή του συντονισμού.

3.3 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΣΩΜΑ

3.3.1 Υπολογισμοί Γραμμικής Θεωρίας

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για τις διάφορες θέσεις των σημειακών στοιχείων γύρω από τα τοιχώματα του πλωτήρα προκύπτουν στον ακόλουθο πίνακα όπου

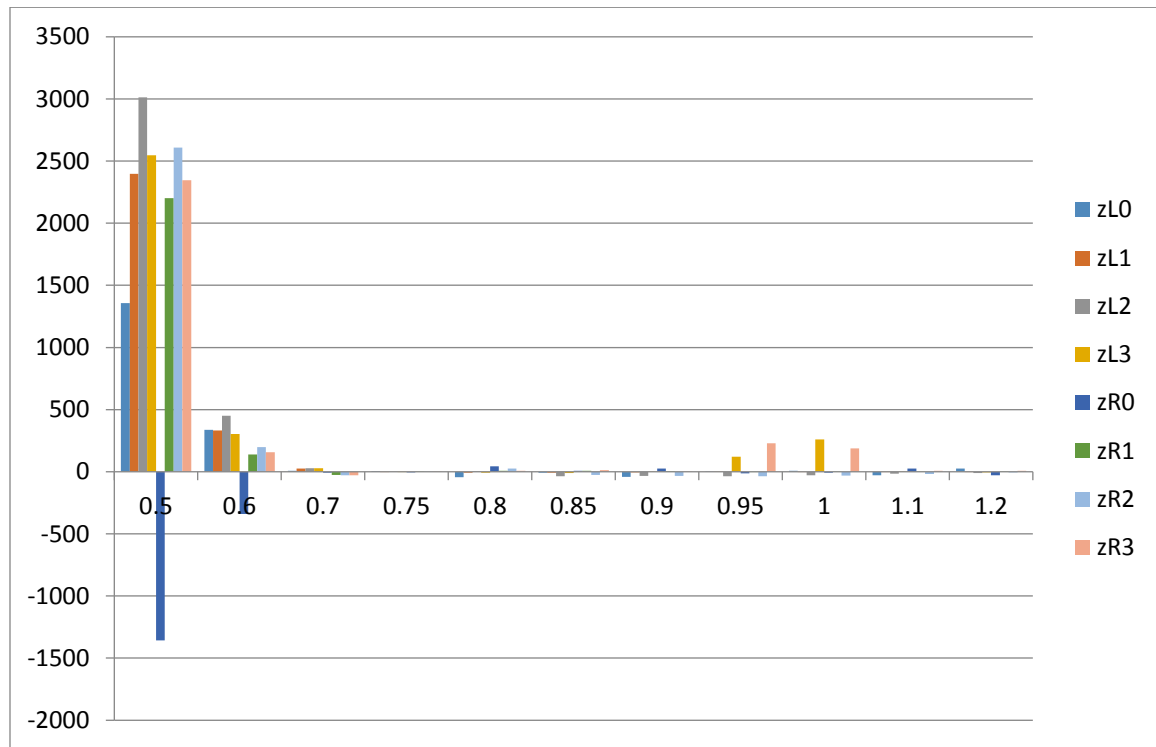
- ZM0, ZM1, ZM2, ZM3 είναι οι αρμονικές των σημείων στο κέντρο της επιφάνειας
- ZL0, ZL1, ZL2, ZL3 είναι οι αρμονικές των σημείων δεξιά από το τοίχωμα του πλωτού
- ZR0, ZR1, ZR2, ZR3 είναι οι αρμονικές των σημείων αριστερά από το τοίχωμα του πλωτού

14. Πίνακας-Υπολογισμός ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας κινούμενου πλωτήρα βάσει της γραμμικής θεωρίας

T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,5	- 8,16E-08	4,59E-05	1,97E-07	1,25E-07	- 1,19E-06	1,14E-03	6,13E-06	3,30E-06	1,03E-06	1,06E-03	5,33E-06	3,05E-06
0,6	1,75E-06	4,44E-04	9,71E-07	4,86E-07	7,66E-06	1,92E-03	5,34E-06	1,96E-06	4,17E-06	1,07E-03	2,91E-06	1,25E-06
0,7	9,18E-06	6,88E-03	3,51E-05	1,94E-05	9,99E-06	8,73E-03	4,49E-05	2,50E-05	8,38E-06	5,05E-03	2,53E-05	1,38E-05
0,75	- 1,08E-04	9,17E-02	4,65E-04	2,62E-04	- 1,14E-04	9,09E-02	4,65E-04	2,59E-04	- 1,01E-04	9,25E-02	4,78E-04	2,66E-04
0,8	1,02E-05	2,33E-02	9,90E-05	6,92E-05	5,79E-06	2,14E-02	1,05E-04	6,35E-05	1,46E-05	2,53E-02	1,25E-04	7,46E-05
0,85	- 8,40E-05	2,36E-02	1,74E-04	3,71E-05	- 7,82E-05	2,16E-02	1,12E-04	3,29E-05	- 8,97E-05	2,56E-02	1,30E-04	4,22E-05
0,9	- 7,64E-06	2,84E-02	6,16E-04	8,09E-05	- 4,47E-06	2,69E-02	4,02E-04	8,18E-05	- 9,67E-06	2,98E-02	4,14E-04	8,38E-05
0,95	9,95E-05	3,56E-02	3,75E-03	1,04E-04	1,02E-04	3,67E-02	2,44E-03	2,29E-04	8,75E-05	3,46E-02	2,43E-03	3,43E-04
1	- 1,18E-04	4,23E-02	3,23E-03	1,27E-04	- 1,27E-04	4,14E-02	2,31E-03	4,57E-04	- 1,08E-04	4,37E-02	2,27E-03	3,68E-04
1,1	6,79E-05	4,89E-02	1,03E-03	1,39E-04	4,86E-05	4,77E-02	8,74E-04	1,41E-04	8,58E-05	5,06E-02	8,48E-04	1,47E-04
1,2	5,35E-05	4,66E-02	8,17E-04	1,29E-04	6,78E-05	4,59E-02	7,39E-04	1,21E-04	3,88E-05	4,76E-02	7,69E-04	1,38E-04

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

14.1 Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των σημειακών θέσεων R,L ως προς το μέσο M κατά την πάροδο των αρμονικών.



Για καλύτερη εποπτεία των υπολογισμών τα μεγέθη είναι ανηγμένα στο πλάτος A του κύματος.

15. Πίνακας-Αδιαστατοποιημένη μορφή υπολογισμών της ανύψωσης του κινούμενου σώματος ως προς το πλάτος κύματος

T	zM0	zM1	zM2	zM3	zL0	zL1	zL2	zL3	zR0	zR1	zR2	zR3
0,5	-1,25E-05	7,05E-03	3,03E-05	1,92E-05	1,83E-04	1,76E-01	9,42E-04	5,08E-04	1,58E-04	1,62E-01	8,19E-04	4,69E-04
0,6	1,86E-04	4,74E-02	1,04E-04	5,19E-05	8,18E-04	2,05E-01	5,70E-04	2,10E-04	4,46E-04	1,14E-01	3,11E-04	1,33E-04
0,7	7,20E-04	5,39E-01	2,76E-03	1,52E-03	7,84E-04	6,85E-01	3,52E-03	1,96E-03	6,57E-04	3,96E-01	1,98E-03	1,08E-03

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

0,7	-	7,36E	6,27E+0	3,17E	1,79E	7,78E	6,21E+0	3,18E	1,77E	-	6,93E	6,32E+0	3,27E	1,82E
5	-	-03	0	-02	-02	-03	0	-02	-02	-03	0	-02	-02	
0,8	-	6,11E	1,40E+0	5,95E	4,16E	3,48E	1,28E+0	6,29E	3,82E	8,79E	1,52E+0	7,50E	4,48E	
0,8	-	-04	0	-03	-03	-04	0	-03	-03	-04	0	-03	-03	
5	-	4,47E	1,26E+0	9,26E	1,97E	4,16E	1,15E+0	5,97E	1,75E	4,77E	1,36E+0	6,93E	2,25E	
5	-	-03	0	-03	-03	-03	0	-03	-03	-03	0	-03	-03	
0,9	-	3,63E	1,35E+0	2,92E	3,84E	2,12E	1,28E+0	1,91E	3,88E	4,59E	1,42E+0	1,96E	3,98E	
0,9	-	-04	0	-02	-03	-04	0	-02	-03	-04	0	-02	-03	
5	-	4,24E	1,52E+0	1,60E	4,43E	4,34E	1,56E+0	1,04E	9,74E	3,73E	1,47E+0	1,04E	1,46E	
5	-	-03	0	-01	-03	-03	0	-01	-03	-03	0	-01	-02	
1	-	4,54E	1,63E+0	1,24E	4,90E	4,88E	1,59E+0	8,87E	1,76E	4,16E	1,68E+0	8,74E	1,41E	
1	-	-03	0	-01	-03	-03	0	-02	-02	-03	0	-02	-02	
1,1	-	2,16E	1,56E+0	3,28E	4,41E	1,55E	1,52E+0	2,78E	4,51E	2,73E	1,61E+0	2,70E	4,70E	
1,1	-	-03	0	-02	-03	-03	0	-02	-03	-03	0	-02	-03	
1,2	-	1,44E	1,25E+0	2,20E	3,46E	1,82E	1,23E+0	1,99E	3,26E	1,04E	1,28E+0	2,07E	3,71E	
1,2	-	-03	0	-02	-03	-03	0	-02	-03	-03	0	-02	-03	

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η τελική μορφή των υπολογισμών για την ανύψωση z της ελεύθερης επιφάνειας για κινούμενο πλωτήρα βάσει της γραμμικής θεωρίας είναι η ακόλουθη:

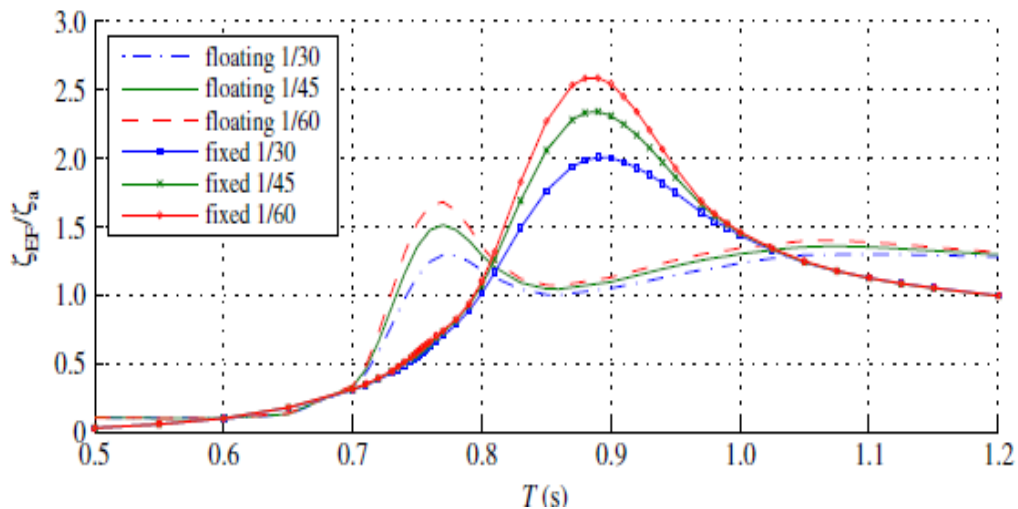
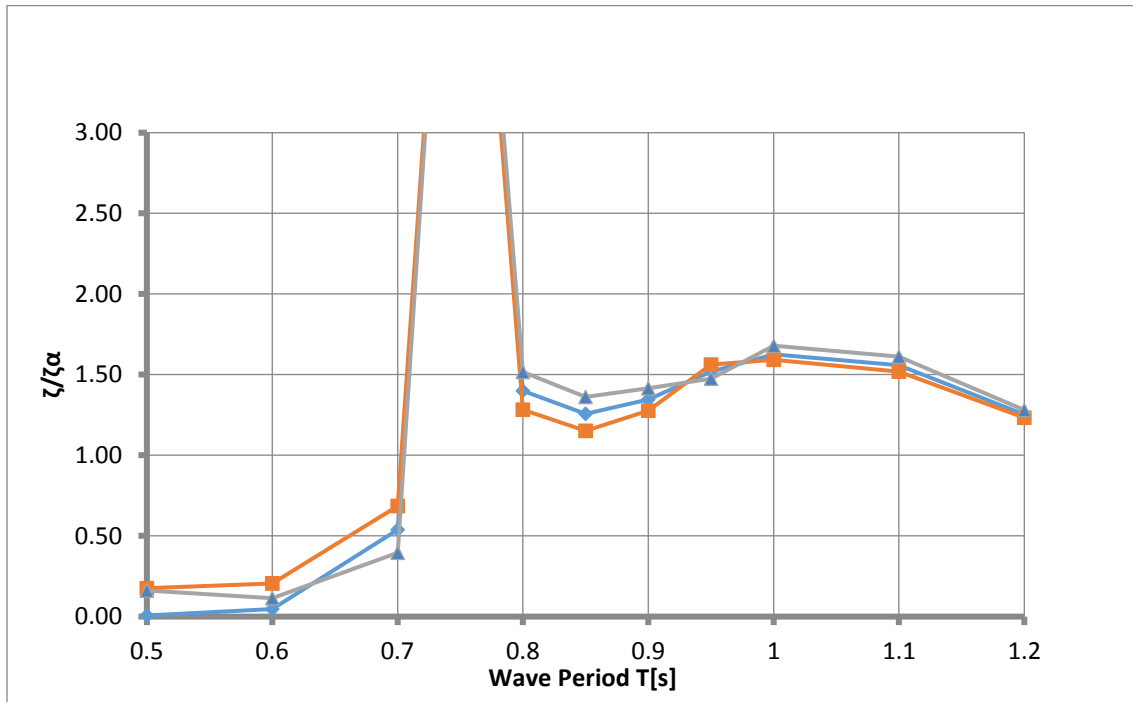
16. Πίνακας-Αποτελέσματα υπολογισμών ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας με κινούμενο πλωτήρα (γραμμική θεωρία)

T	IFS0-zM1	IFS0-zL1	IFS0-zR1
	[m/m]	[m/m]	[m/m]
0,5	0,01	0,18	0,16
0,6	0,05	0,21	0,11
0,7	0,54	0,68	0,40
0,75	6,27	6,21	6,32
0,8	1,40	1,28	1,52
0,85	1,26	1,15	1,36
0,9	1,35	1,28	1,42
0,95	1,52	1,56	1,47
1	1,63	1,59	1,68
1,1	1,56	1,52	1,61
1,2	1,25	1,23	1,28

Διάγραμμα ανύψωσης επιφάνειας πλωτού σώματος

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

2.Διάγραμμα-Σύγκριση της ανύψωσης των τριών θέσεων(δεξιά, αριστερά, κέντρο) της ελεύθερης επιφάνειας στη γραμμική θεωρία για το πλωτό σώμα(ZM1=ανύψωση στο μέσον της επιφάνειας, ZL1=ανύψωση αριστερά, ZR1=ανύψωση δεξιά).



13.Εικόνα-Σύγκριση γραμμικής, μη γραμμικής και ημι-μη γραμμικής θεωρίας για κλίσεις κύματος H/30,H/40,H/60,ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε ακίνητο και πλωτό σώμα για τις αντίστοιχες περιόδους κύματος(δημοσίευσης).

Εδώ περιγράφεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε τρεις διαφορετικές θέσεις μέσα στο μοοηροολ,στο αριστερό τοίχωμα, στο μέσον της επιφάνειας και στο δεξί. Όπως

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

φαίνεται η γραμμική μέθοδος του hFLOW επαληθεύεται αρκετά καλά ιδιαίτερα στις περιοχές γύρω από τον συντονισμό.

3.3.2 Υπολογισμός κινήσεων πλωτού σώματος

Υπολογισμός κινήσεων πλωτήρα με κλίση κύματος H/30

- κατακόρυφο άξονα($q(z)$)
- οριζόντιο άξονα ($q(x)$)
- περιστροφικό άξονα($q(\theta_y)=r(y)$)

17. Πίνακας-Υπολογισμός των κινήσεων του ελεύθερα κινούμενου πλωτήρα στις 3 διευθύνσεις($q(x),q(z),r(y)$).

A	qx0	qx1	qx2	qx3	qz0	qz1	qz2	qz3	ry0	ry1	ry2	ry3
0,0065	- 1,70E- 06	7,78E- 04	3,66E- 06	1,99E- 06	- 3,80E- 04	1,67E- 04	8,31E- 07	4,56E- 07	- 5,52E- 07	0,00	3,05E- 06	1,69E- 06
0,0094	- 1,50E- 05	1,97E- 03	5,35E- 06	2,03E- 06	- 3,83E- 04	8,88E- 04	2,30E- 06	9,71E- 07	1,32E- 05	0,00	9,10E- 06	3,52E- 06
0,0127	- 3,80E- 06	3,96E- 03	2,09E- 05	1,16E- 05	- 3,87E- 04	5,02E- 03	2,56E- 05	1,42E- 05	5,23E- 06	0,01	6,58E- 05	3,67E- 05
0,0146	2,74E- 05	5,23E- 03	2,13E- 05	1,10E- 05	- 3,46E- 04	2,89E- 02	1,41E- 04	8,26E- 05	- 6,72E- 05	0,02	8,95E- 05	4,62E- 05
0,0166	9,17E- 06	6,74E- 03	3,08E- 05	1,66E- 05	- 3,80E- 04	1,77E- 04	2,68E- 05	7,56E- 07	- 8,28E- 05	0,04	1,92E- 04	1,05E- 04
0,0188	- 2,54E- 05	8,30E- 03	3,48E- 05	1,83E- 05	- 3,98E- 04	5,18E- 03	8,71E- 05	9,10E- 06	2,05E- 04	0,08	3,28E- 04	1,71E- 04
0,0211	- 2,49E- 05	9,02E- 03	4,54E- 05	2,50E- 05	- 3,81E- 04	1,10E- 02	3,86E- 04	3,55E- 05	2,53E- 04	0,16	7,86E- 04	4,70E- 04
0,0235	5,00E- 06	2,98E- 03	9,41E- 06	2,11E- 07	- 3,48E- 04	1,83E- 02	3,12E- 03	3,57E- 05	- 1,68E- 03	0,42	1,13E- 03	1,01E- 03

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

0,0260	3,80E-05	1,40E-02	6,81E-05	3,54E-05	-4,47E-04	2,58E-02	2,68E-03	3,52E-05	8,44E-04	0,38	1,79E-03	1,48E-03
0,0314	8,21E-05	2,22E-02	6,01E-05	2,02E-05	-3,35E-04	3,62E-02	6,79E-04	1,04E-04	7,46E-04	0,19	5,03E-04	5,85E-05
0,0372	-8,70E-05	2,51E-02	9,02E-05	4,26E-05	-3,30E-04	3,82E-02	3,12E-04	1,10E-04	-4,27E-04	0,12	4,37E-04	1,86E-04

Για καλύτερη εποπτεία των υπολογισμών οι μετρήσεις είναι ανηγμένες στο πλάτος A του κύματος.

18. Πίνακας-Αδιαστατοποιημένη μορφή υπολογισμού των κινήσεων ως προς το πλάτος A του κύματος

qx0	qx1	qx2	qx3	qz0	qz1	qz2	qz3	ry0	ry1	ry2	ry3
-2,61E-04	1,20E-01	5,62E-04	3,05E-04	-5,84E-02	2,57E-02	1,28E-04	7,01E-05	-8,49E-05	0,09	4,68E-04	2,60E-04
-1,60E-03	2,11E-01	5,71E-04	2,17E-04	-4,09E-02	9,48E-02	2,45E-04	1,04E-04	1,41E-03	0,36	9,72E-04	3,76E-04
-2,98E-04	3,11E-01	1,64E-03	9,10E-04	-3,03E-02	3,94E-01	2,01E-03	1,11E-03	4,10E-04	0,97	5,16E-03	2,88E-03
1,87E-03	3,58E-01	1,45E-03	7,54E-04	-2,37E-02	1,97E+00	9,63E-03	5,65E-03	-4,59E-03	1,52	6,12E-03	3,16E-03
5,51E-04	4,05E-01	1,85E-03	9,99E-04	-2,28E-02	1,06E-02	1,61E-03	4,54E-05	-4,97E-03	2,42	1,16E-02	6,30E-03
-1,35E-03	4,42E-01	1,85E-03	9,75E-04	-2,12E-02	2,75E-01	4,64E-03	4,84E-04	1,09E-02	4,05	1,75E-02	9,12E-03
-1,18E-03	4,28E-01	2,16E-03	1,19E-03	-1,81E-02	5,22E-01	1,83E-02	1,69E-03	1,20E-02	7,45	3,73E-02	2,23E-02
2,13E-04	1,27E-01	4,01E-04	9,00E-06	-1,48E-02	7,79E-01	1,33E-01	1,52E-03	7,16E-02	18,06	4,83E-02	4,31E-02
1,46E-03	5,37E-01	2,62E-03	1,36E-03	-1,72E-02	9,91E-01	1,03E-01	1,36E-03	3,25E-02	14,73	6,89E-02	5,69E-02

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2,62 E-03	7,08 E-01	1,91 E-03	6,42 E-04	- 1,07 E-02	1,15E+ 00	2,16 E-02	3,31 E-03	2,38 E-02	5,9 8	1,60 E-02	1,86 E-03
- 2,34 E-03	6,74 E-01	2,42 E-03	1,14 E-03	- 8,86 E-03	1,03E+ 00	8,39 E-03	2,96 E-03	- 1,15 E-02	3,3 6	1,17 E-02	5,01 E-03

Η τελική μορφή των υπολογισμών για τις κινήσεις που ασκούνται στο σώμα βάσει της γραμμικής θεωρίας είναι η ακόλουθη.

19. Πίνακας-Αποτελέσματα των τριών κινήσεων

IFS0-qx1	IFS0-qz1	IFS0-ry1
[m/m]	[m/m]	[rad/m]
0,12	0,03	0,09
0,21	0,09	0,36
0,31	0,39	0,97
0,36	1,97	1,52
0,40	0,01	2,42
0,44	0,28	4,05
0,43	0,52	7,45
0,13	0,78	18,06
0,54	0,99	14,73
0,71	1,15	5,98
0,67	1,03	3,36

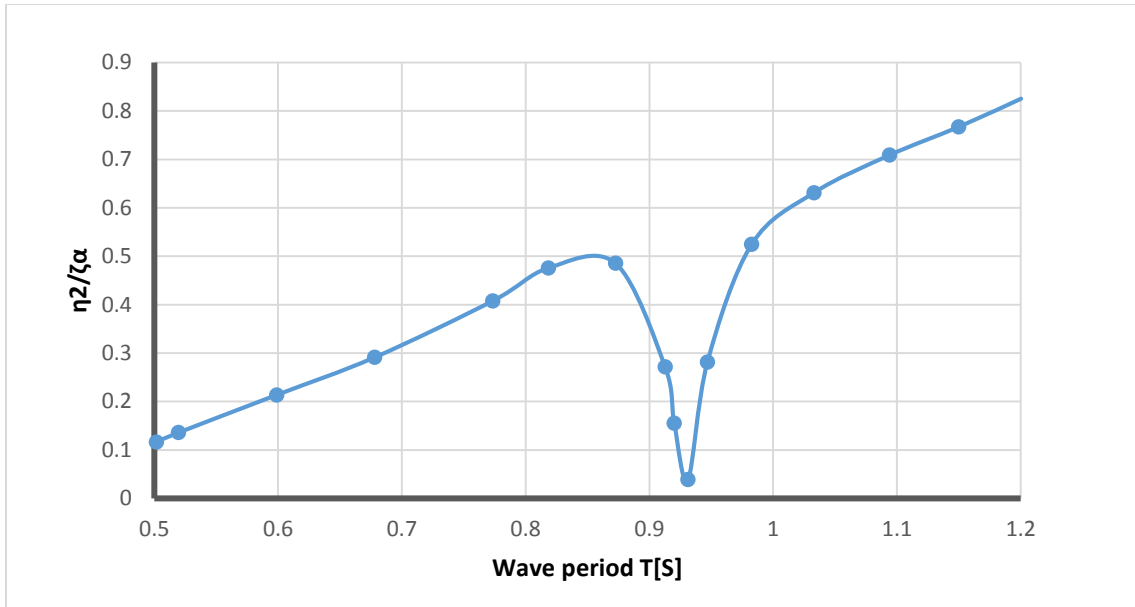
Παρατίθενται τα διαγράμματα των τριών κινήσεων του σώματος ως προς την ελεύθερη επιφάνεια, βάσει της γραμμικής θεωρίας όπως παρουσιάστηκαν στη δημοσίευση για κλίση κύματος H/30 όπου :

- η_2 οριζόντια μεταφορική κίνηση(sway)
- η_3 κατακόρυφη κίνηση (heave)
- η_4 περιστροφική κίνηση(pitch)

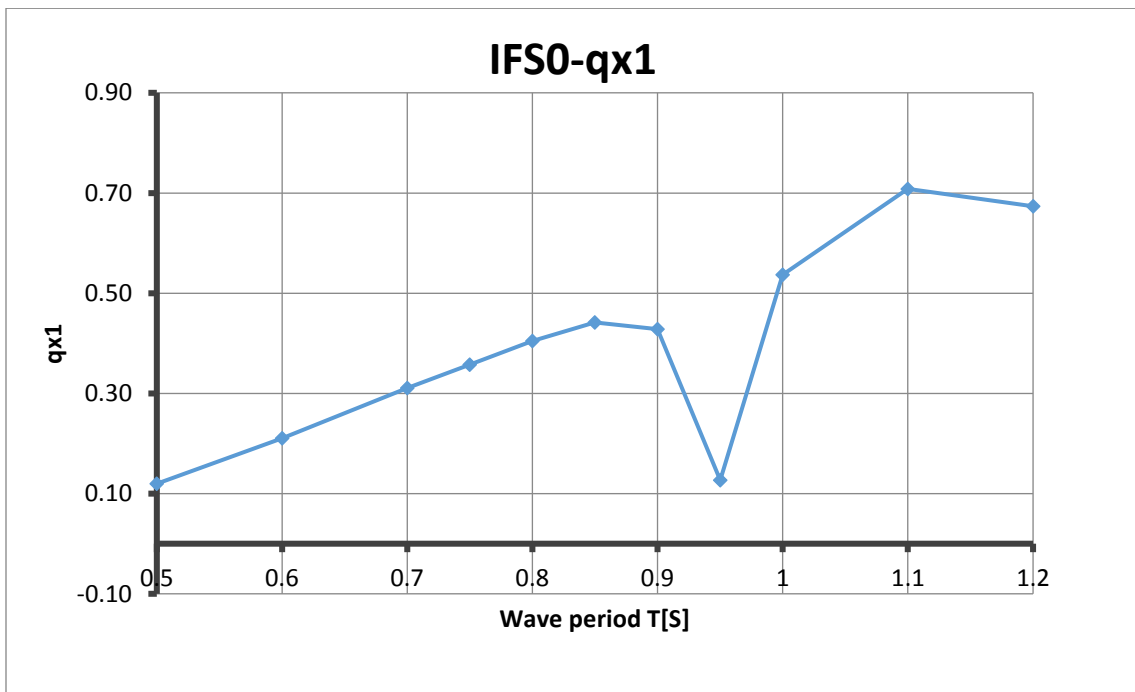
Τα διαγράμματα προέκυψαν μέσα από τις εικόνες της δημοσίευσης χρησιμοποιώντας πρόγραμμα digitizing και ακολουθεί η σύγκριση με τα διαγράμματα που προέκυψαν από τους υπολογισμούς του hFLOW.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον οριζόντιο άξονα x ως προς τις ω προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος



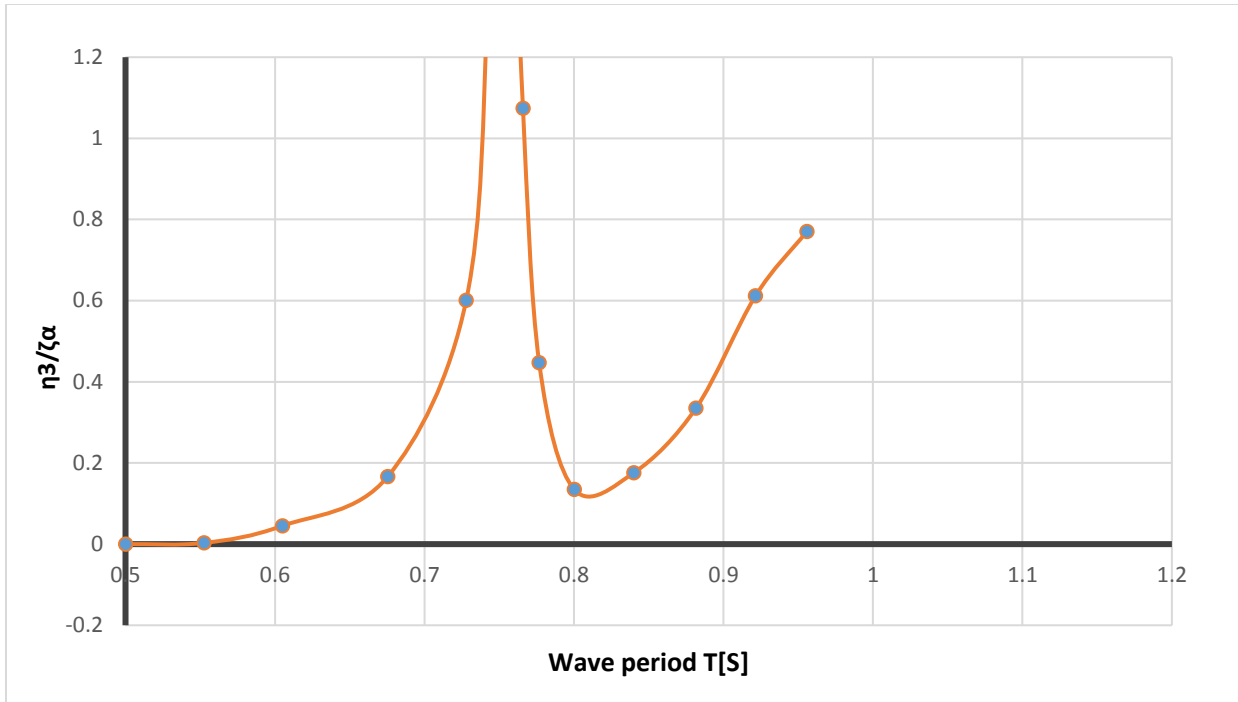
4. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον οριζόντιο άξονα x ως προς τις ω προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος (hFLOW)



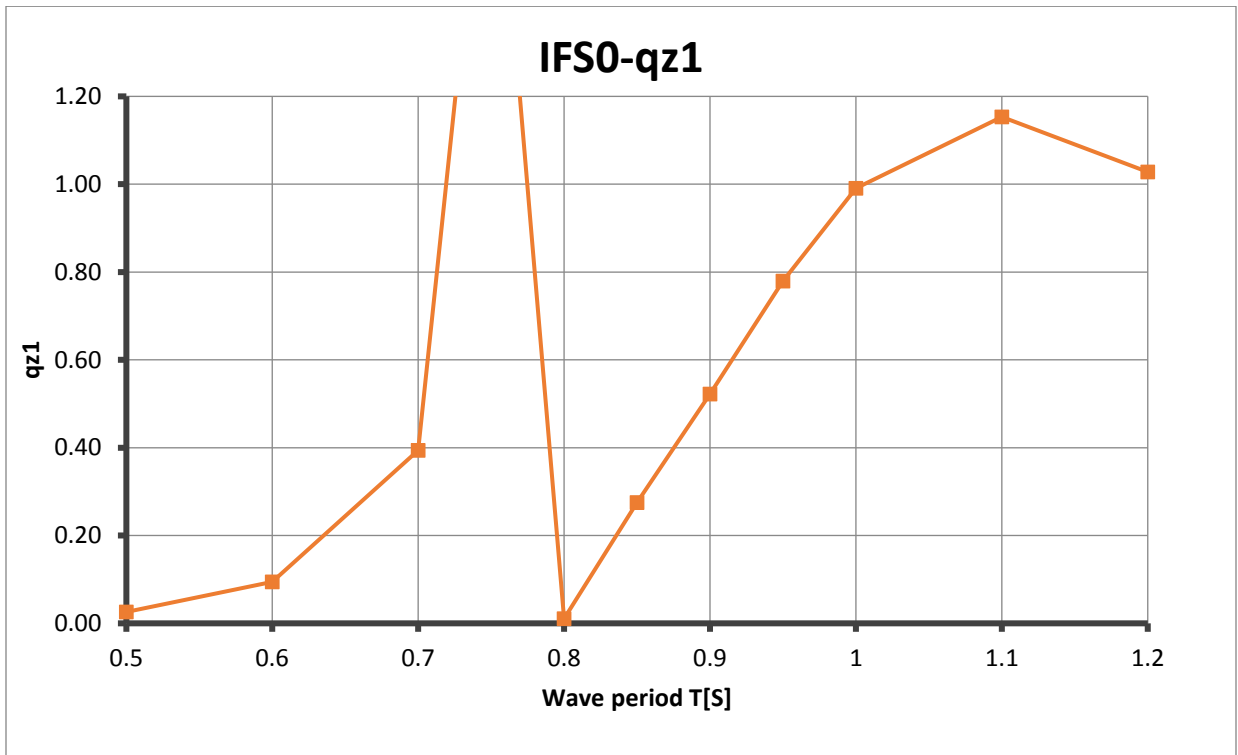
Για την οριζόντια κίνηση όπως φαίνεται και στα διαγράμματα οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα γύρω από την περιοχή συντονισμού.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

5. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον οριζόντιο άξονα z ως προς τις ως προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος



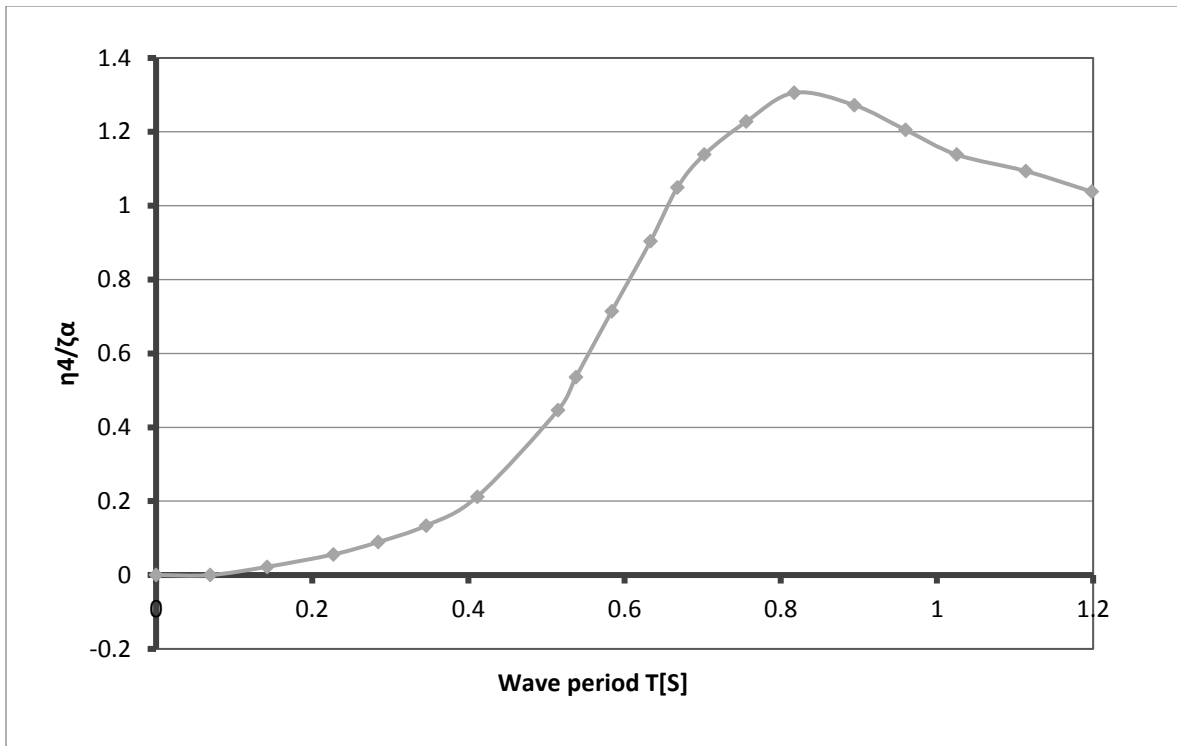
6. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα z ως προς τις ως προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος (hFLOW)



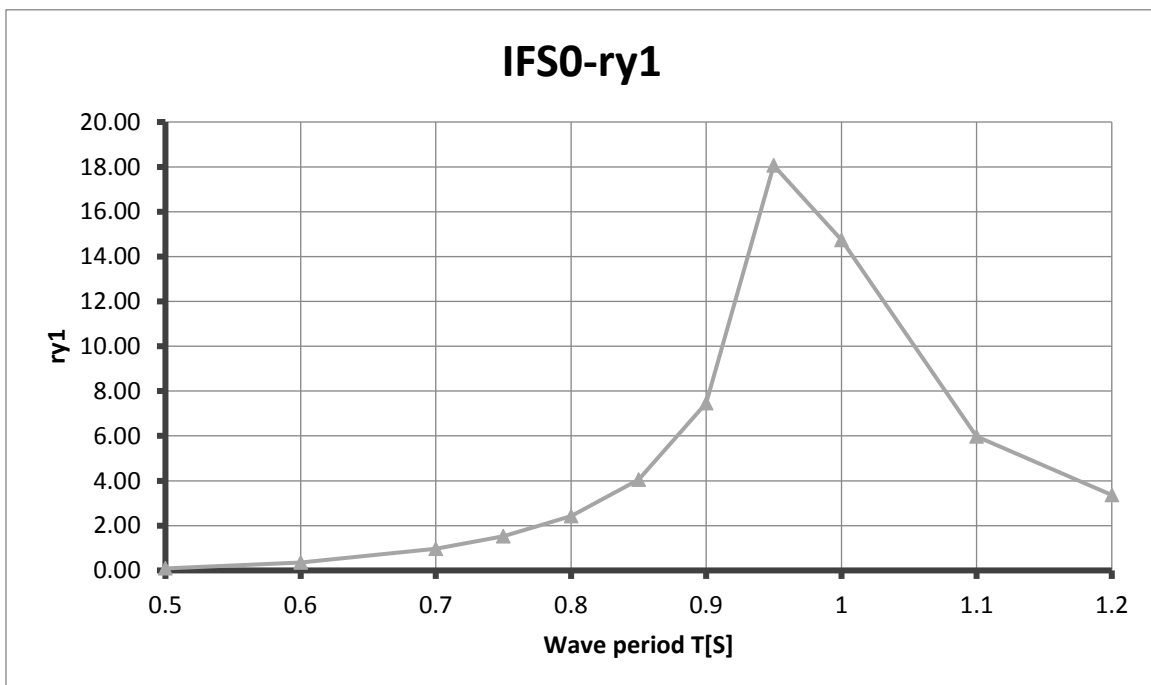
Ακόμα καλύτερη προσέγγιση παρατηρείται στην κατακόρυφη κίνηση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7. Διάγραμμα- Κίνηση κατά τον περιστροφικό άξονα γ ως προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος



8. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον περιστροφικό άξονα γ ως προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος

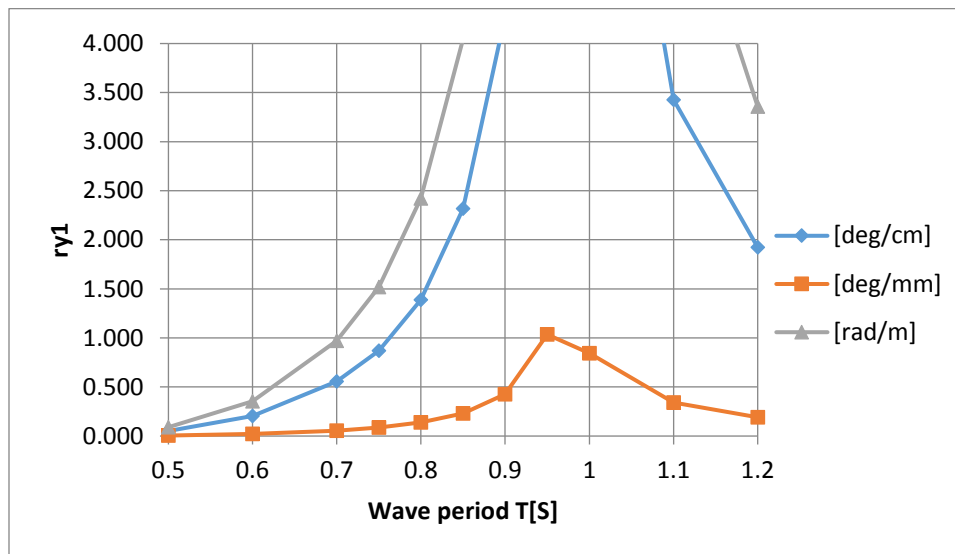


Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοοηροολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

Στο διάγραμμα περιστροφικής κίνησης οι τιμές διαφέρουν σημαντικά παρόλο που η μορφή της καμπύλης είναι αρκετά όμοια.

Παρατίθεται κι ένα διάγραμμα της περιστροφικής κίνησης της ίδιας καμπύλης με τρεις διαφορετικές μετατροπές μονάδων.

9. Διάγραμμα-Κίνηση κατά τον περιστροφικό άξονα γ ως προς το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος



Στα διαγράμματα γίνεται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων ώστε να γίνει η αντίστοιχη σύγκριση με αυτά που αναγράφονται στη δημοσίευση. Τα μεγέθη είναι ανηγμένα στο πλάτος του εισερχόμενου κύματος σε σύστημα τριών βαθμών ελευθερίας.

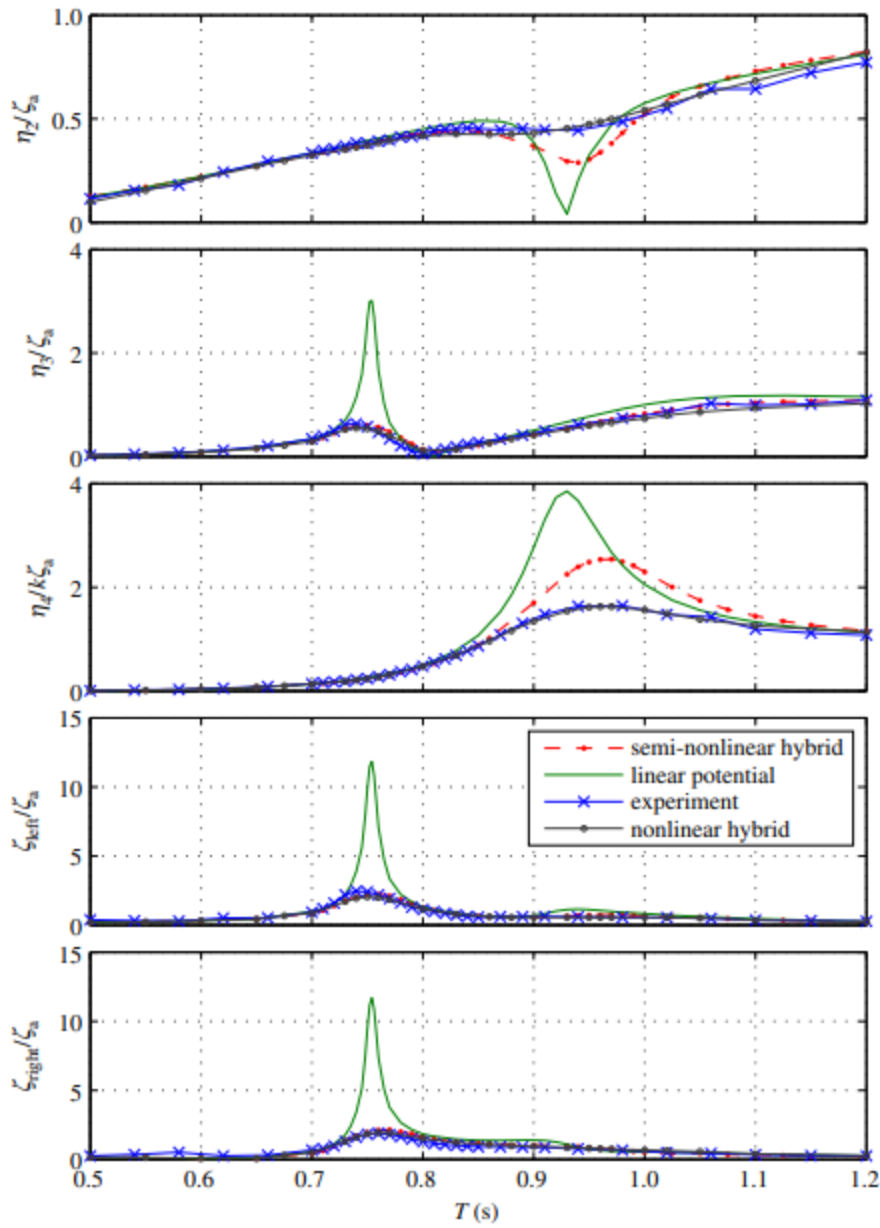
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα πλάτη της μεταφορικής κίνησης (η_2) και της κατακόρυφης (η_3) είναι ως προς το COG του σώματος. Τα εύρη των κυματισμών καθορίζονται ως προς το ακίνητο σώμα (body-fixed) και οι μεταφορικές κινήσεις του άκαμπτου σώματος δίδονται ως προς το σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο της Γης. Επιπλέον, παρουσιάζονται και τα πλάτη των περιστροφικών κινήσεων.

Όπως αναφέρεται στη δημοσίευση αλλά και όπως καταδεικνύουν οι υπολογισμοί της γραμμικής και μη γραμμικής θεωρίας, η συμφωνία μεταξύ πειραμάτων και αριθμητικών υπολογισμών είναι καλή ιδιαίτερα για τη μη γραμμική μέθοδο.

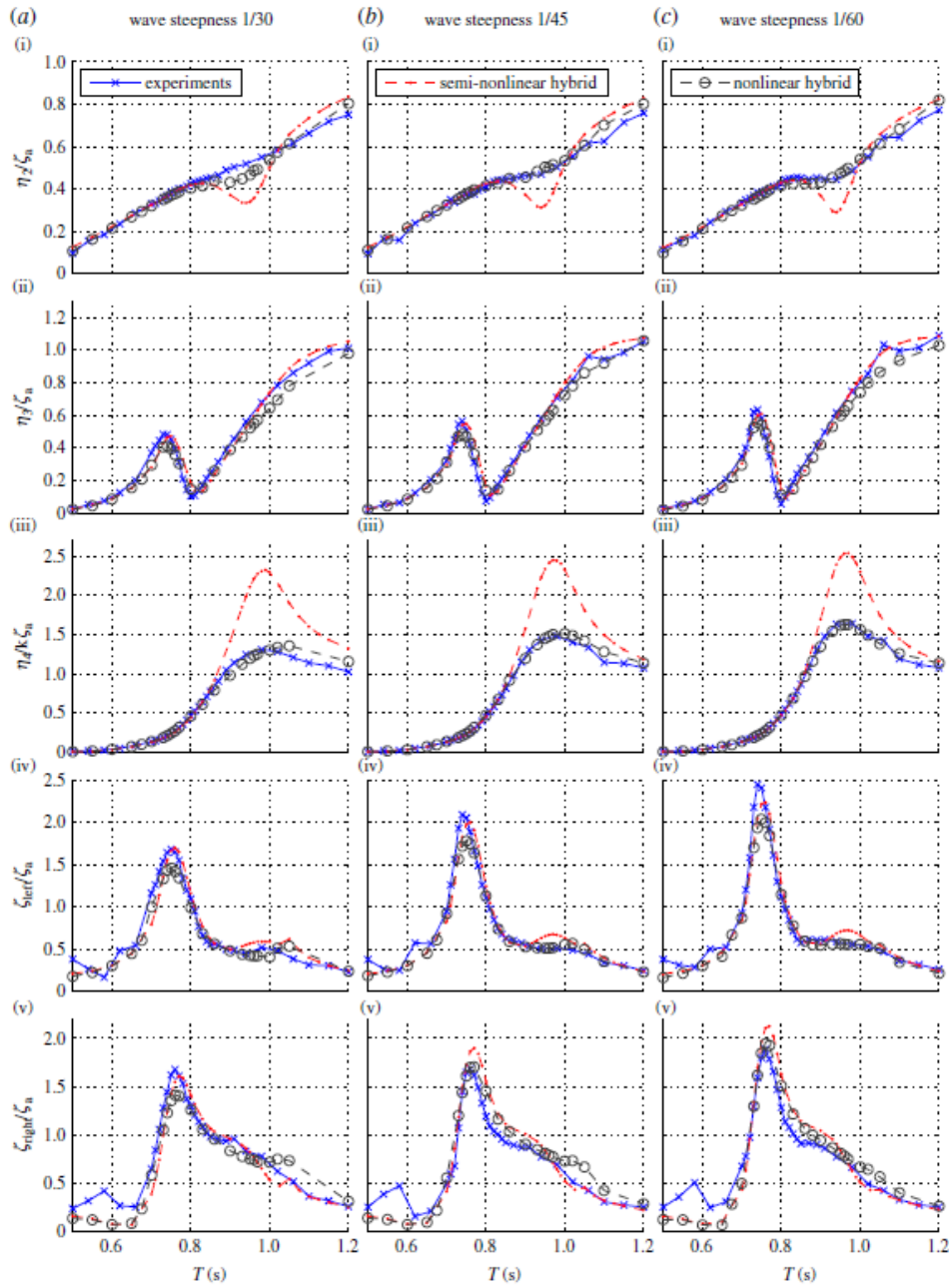
Το πλάτος της περιστροφικής κίνησης στο συντονισμό είναι υπέρ του προβλεπόμενου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σαφής εικόνα των αποτελεσμάτων μιας και χρησιμοποιήθηκε και η μετατροπή από ακτίνια σε μοίρες και αντίστροφα, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα στην απεικόνιση της γραφικής παράστασης. Στη δημοσίευση δεν αναφέρεται με ποιες μονάδες μέτρησης προέκυψαν οι υπολογισμοί.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος μοσχορολγια παράκτιες ανεμογεννήτριες



9.Εικόνα – Σύγκριση γραμμικής θεωρίας, μη γραμμικής ,πειραματικών αποτελεσμάτων και ημι-μη γραμμικής θεωρίας

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



10.Εικόνα - Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων εύρους κίνησης άκαμπτου σώματος (η_2 , η_3 και η_4) και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας δεξιά κι αριστερά του σώματος για τρεις διαφορετικές αποκλίσεις κύματος σε σχέση με την περίοδο κύματος.

4 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην εργασία αυτή έγινε μια 2D αναπαράσταση moonpool πλωτήρα για παράκτιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιώντας τον επιλύτη hFLOW εργαστηρίου. Οι μέθοδοι επίλυσης βασίστηκαν στη γραμμική και μη γραμμική θεωρία και συγκρίθηκαν με δημοσιευμένα αποτελέσματα επιστημονικών ερευνητικών δοκιμών.

Η συγκεκριμένη δημοσίευση των Arnt G. Fredriksen, Trygve Kristiansen και Odd M. Faltinsen: *Wave-induced response of a floating two-dimensional body with a moonpool*, περιγράφει και ακόμη μία υβριδική μέθοδο επίλυσης της ημι-μη γραμμική που βασίζεται και στη συνεκτικότητα του ρευστού γύρω από το σώμα.

Γνωρίζοντας εξ αρχής ότι τα αποτελέσματα του hFLOW δεν θα είναι ακριβώς όμοια στην περιοχή του συντονισμού με αυτά της δημοσίευσης, έγιναν κάποιες δοκιμές για δύο διαφορετικά σενάρια κίνησης του moonpool, στηριζόμενοι στο μοντέλο της δημοσίευσης.

Στο πρώτο σενάριο το σώμα ήταν ακίνητο και η επίλυση έγινε και με τις δύο μεθόδους. Όπως παρατηρείται από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η προσέγγιση είναι αρκετά καλή για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εντός του moonpool στις περιοχές γύρω από το συντονισμό, αλλά και κοντά σε αυτόν, όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα της δημοσίευσης.

Στη γραμμική μέθοδο κατά τον συντονισμό η ανύψωση λαμβάνει μεγάλες τιμές, κάτι που συνεπάγεται και μεγάλα φορτία στην περιοχή αυτή καθώς και απότομες κορυφές στα διαγράμματα.

Η μη γραμμική μέθοδος συμπεριφέρεται πιο ομαλά σε όλο το εύρος συχνοτήτων, εκτός από το συντονισμό, στον οποίο παρατηρούνται πιο έντονα φαινόμενα.

Καμία από τις δύο μεθόδους δεν μπορεί να επιτύχει ίδια αποτελέσματα με την ημι-μη γραμμική μέθοδο μιας και απουσιάζουν οι όροι της συνεκτικής ροής.

Στο δεύτερο σενάριο το σώμα ήταν ελεύθερο να κινηθεί έχοντας θεωρήσει μια ενιαία ισοδύναμη αγκυροβόληση κατά τον οριζόντιο άξονα ελάχιστα πάνω από το σώμα. Ως επιπλέον όρος συμπεριλήφθηκε και η μάζα του.

Εκτός από την ανύψωση της επιφάνειας προκύπτει και η ανάγκη ανάλυσης των κινήσεων του πλωτού σώματος στις τρεις κατευθύνσεις των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

Ανάλυση πλωτήρα κλειστού περιγράμματος moosepoolγια παράκτιες ανεμογεννήτριες

Έχοντας κατανοήσει και από το προηγούμενο σενάριο πώς συμπεριφέρονται οι δύο μέθοδοι, στην περίπτωση του ελεύθερα κινούμενου σώματος η επίλυση έγινε μόνο για τη γραμμική θεωρία μιας και το υπολογιστικό κέρδος ήταν σημαντικός παράγοντας.

Η σύγκριση με τη δημοσίευση είναι και πάλι ικανοποιητική για τις περιοχές εκτός του συντονισμού, όπου πάλι στο σημείο αυτό προκύπτει διαφορά λόγω της συνεκτικότητας.

Όσον αφορά τις κινήσεις του πλωτού, η σύγκριση είναι αρκετά πλήρης στην οριζόντια μεταφορική κίνηση και κατακόρυφη κίνηση. Στην περιστροφική κίνηση παρόλο που η καμπύλη έχει μορφή παρόμοια με την αντίστοιχη της δημοσίευσης, υπάρχει διαφορά στο εύρος των τιμών.

Η δομή του moosepool είναι μια ιδιαίτερη υδροδυναμική κατασκευή και σε σύγκριση με ένα απλό σκάφος εισάγει επιπλέον παραμέτρους ως προς τη συμπεριφορά του κύματος στην ελεύθερη επιφάνεια. Τα δύο βασικά φαινόμενα που παρατηρούνται ως προς το moosepool είναι το σημείο συντονισμού του διερχόμενου κύματος ως προς την κατακόρυφη κίνηση του και η απόσβεση του έξω από αυτό.

Με την κλιμάκωση της συχνότητας συντονισμού και τη μελέτη αναγκαστικής ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά την κίνηση εμβόλου, με βάσει τις διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν εδώ, παίρνουμε $T=0.88$ s (πρόβλημα της ακτινοβολίας). Η ίδια τιμή περιόδου λαμβάνεται και όταν εξετάζουμε τα εισερχόμενα κύματα σε σταθερή-ακίνητη δομή moosepool (πρόβλημα περίθλασης).

Ωστόσο, για το ελεύθερο-κινούμενο σώμα πρόβλημα στα κύματα δεν υπάρχει κανένα σημάδι συντονισμού της κίνησης εμβόλου για $T=0,88$ δευτερόλεπτα. Αυτή η παρατήρηση συμβαδίζει με τις θεωρητικές εκτιμήσεις από τον McIver, ο οποίος διαπίστωσε ότι στο πλαίσιο της γραμμικής θεωρίας για το δυναμικό της ροής, οι κύριες συνεισφορές για την περίθλαση και τη διάδοση των κυμάτων είναι 180° εκτός φάσης, γύρω από την περιοχή φυσικής περιόδου για ένα ελεύθερα κινούμενο σώμα. Το τελευταίο αυτό γεγονός επιβεβαιώθηκε αριθμητικά και στην περίπτωση αυτή καθώς ο συντονισμός παρατηρείται για $T=0,75$.

Πολλοί ερευνητές έχουν δείξει προηγουμένως ότι οι συντελεστές προστιθέμενης μάζας και αποσβέσεως δυναμικού ροής κατά την ανύψωση του moosepool, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα του συντονισμού στην ιδιοκίνηση εμβόλου (piston mode).

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη φυσική περίοδο του εμβόλου για να υπολογίσουμε ποια περίοδος προκαλεί τη μέγιστη απόκριση του εμβόλου σε ένα ελεύθερο-κινούμενο σώμα σε διερχόμενα κύματα. Η απόκριση γραμμικής ροής από το φαινόμενο ακτινοβολίας και διάθλασης είναι 180° εκτός φάσης σε σχέση με τη φυσική περίοδο του εμβόλου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συντονισμός.

4.1 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μεθόδων επίλυσης σε ένα υπαρκτό πρόβλημα, όπως αυτό του πλωτήρα για παράκτιες ανεμογεννήτριες, δημιούργησε και την ανάγκη για περαιτέρω εμβάθυνση της έρευνας αυτού του υδροδυναμικού φαινομένου.

Οι απαντήσεις που δόθηκαν σχετικά με τις δυναμικές θεωρίες καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος των ερωτημάτων που έχουν τεθεί ως προς τη λειτουργία της moosepool δομής ωστόσο δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση οι όροι της συνεκτικότητας του ρευστού και των φαινομένων που δημιουργούνται γύρω από το πλωτό σώμα.

Μία ενδιαφέρουσα πρόταση έρευνας είναι να χρησιμοποιηθεί κι ένας κώδικας επίλυσης cfd εργαστηριακού τύπου ,για τις περιοχές αυτές του ρευστού που χρήζουν διαφορετική αντιμετώπιση ως προς τον τρόπο λύσης.

Ακόμα ένα σενάριο διερεύνησης σε πιο επιστημονικό επίπεδο είναι η ανάλυσης ενός παρόμοιου πειραματικού 3Dμοντέλου όπως προγραμματίζει να κάνει στο εγγύς μέλλον η εταιρεία IDEOL.

Τέλος στην υπάρχουσα διερεύνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, υπάρχουν σημεία όπως αυτό της περιστροφικής κίνησης του πλωτού σώματος που η τροποποίηση ή η παραλλαγή κάποιων αρχικών δεδομένων να επιφέρουν μια σαφέστερη εικόνα για τα αριθμητικά μεγέθη.

5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1. Wave-induced response of a floating two-dimensional body with a moonpool: Arnt G. Fredriksen, Trygve Kristiansen και Odd M. Faltinsen
2. Hydro-Aero-Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines: Dimitris Manolas
3. Investigation of Moonpool Resonance as Vessel Damping Device: Lars M. Utnes Reiersen
4. Experimental study on moonpool resonance of offshore floating structure: Seung-Ho Yang and Sun-Hong Kwon
5. On the piston and sloshing modes in moonpools: B. MOLIN
6. Μηχανική των Ρευστών: Σ. Τσαγγάρης