



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

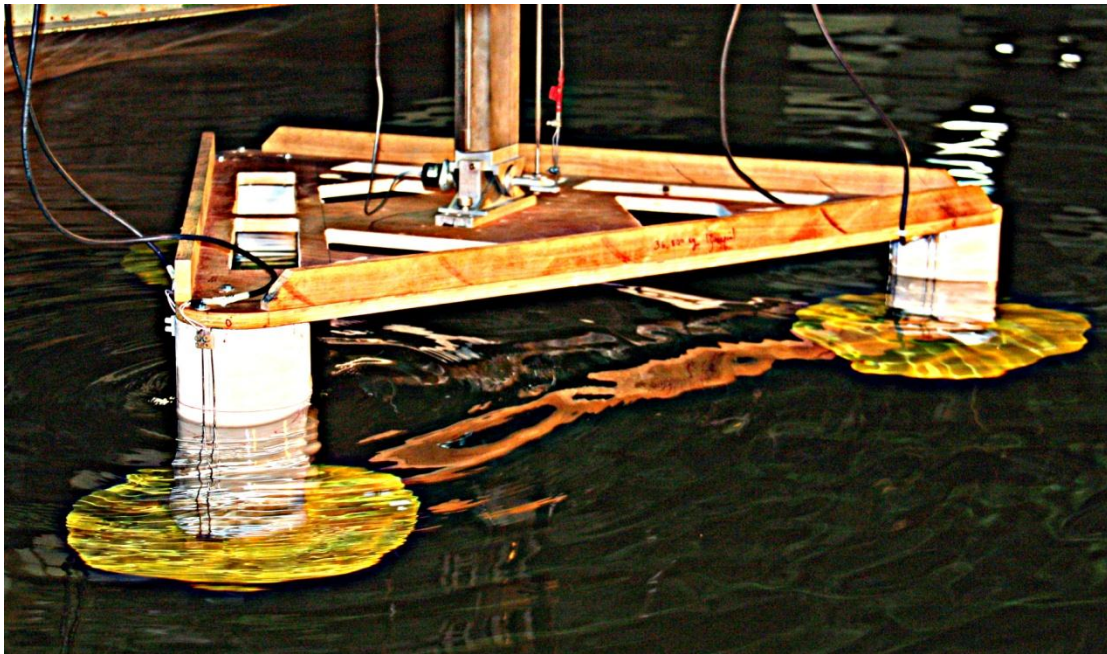


ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των φορτίσεων σε
τριγωνική εξέδρα στήριξης πλωτής ανεμογεννήτριας»*

ΧΡΥΣΑ ΒΛΑΧΟΥ



Επιβλέπων Καθηγητής: Σ. Α. Μαυράκος

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

Στους γονείς μου,

Γεωργία και Νίκο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία στηρίζεται στην αρωγή πολλών ανθρώπων που συνετέλεσαν στην εκπόνησή της από την αρχή μέχρι το τέλος της.

Για το λόγο αυτό, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών **κ. Σπυρίδωνα Μαυράκο**, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος και τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχε αβίαστα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **Θωμά Π. Μαζαράκο**, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Μηχανικό του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, που με ενθουσιασμό με ενέπνευσε να επιλέξω διπλωματική εργασία στον τομέα αυτό, που με την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του συνέβαλε στην κατανόηση και εκπόνηση του θέματος και που υπήρξε αρωγός σε κάθε δύσκολη στιγμή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω δεόντως το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, ιδιαίτερα τους **κ. Γιάννη Τραχανά**, **κ. Δημήτρη Λιαροκάπη**, **κ. Γιώργο Μυλωνά** και **κ. Φώτη Κασάπη** που συνέβαλαν τα μέγιστα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και τον καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών **κ. Γεώργιο Τζαμπίρα**, που παραχώρησε το εργαστήριο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Η βοήθειά τους ήταν πολύτιμη για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στον **κ. Δημήτριο Κονισπολιάτη**, Υ.Δ. του τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών, που συνέβαλε στην θεωρητική προσέγγιση των πειραμάτων.

Ευχαριστώ επίσης τη φίλη και συνάδελφο **Ιωάννα Τσάμη**, για την αμέριστη συμπαράστασή της, και τον φίλο **Γεώργιο Αρβανιτάκη** που βοήθησε σε καίρια σημεία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την φροντίδα, τη στήριξη και υπομονή τους κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου που υπήρξαν δίπλα μου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ολοένα αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός σε συνάρτηση με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αυξήσει κατακόρυφα τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη. Η ταυτόχρονη αλόγιστη χρήση των υπαρχουσών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά και οι βλαβερές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον μας κάνουν να στρεφόμεστε σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Η λεγόμενη πράσινη ενέργεια, που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού κ.α., έχει πολλά οικονομικά και οικολογικά οφέλη.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική στροφή στην αιολική ενέργεια. Τα νεοεμφανιζόμενα αιολικά πάρκα στην Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα είναι γεγονός. Ωστόσο, σημαντικά μειονεκτήματα των χερσαίων αιολικών πάρκων, αλλά και το σημαντικό αιολικό δυναμικό των θαλασσών και δη των ελληνικών, μας κάνουν να στραφούμε στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, παρά το σχετικά μεγάλο κόστος εγκατάστασής τους.

Η υπάρχουσα τεχνολογία για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορεί να εφαρμοσθεί σε βάθος 20-80 m, όπου ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι πακτωμένος στον πυθμένα. Για μεγαλύτερα βάθη η λύση είναι οι πλωτές κατασκευές, οι οποίες είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η Ελλάδα ανήκει στη δεύτερη κατηγορία, λόγω του εξαιρετικού βάθους των θαλασσών της, το οποίο σε σημεία μπορεί να φτάνει και τα 300 m.

Από τους διάφορους τύπους πλωτών ανεμογεννητριών, τελευταία εξέλιξη αποτελούν οι πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές, οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν σε μεγάλα βάθη και να στηρίξουν μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριες (≥ 5 MW). Παρά την ευρεία εφαρμογή των μονοκύλινδρων πλωτών κατασκευών, τελευταία εξέλιξη αποτελεί η μελέτη και κατασκευή τριγωνικών πλωτών κατασκευών τύπου WindFloat.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν πειράματα για μοντέλο μονού κυλίνδρου και συστοιχίας κυλίνδρων σε τριγωνική διάταξη. Μετρήθηκαν φορτίσεις και ανυψωτικές κινήσεις σε συνθήκες αρμονικών κυματισμών.

Σκοπός της διπλωματικής είναι η συλλογή και αριθμητική επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων, τόσο για σύγκριση με αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα, όσο και για λειτουργικά συμπεράσματα των υπό μελέτη κατασκευών. Απώτερος στόχος η διερεύνηση για την κατασκευή μιας πλωτής εξέδρας στήριξης ανεμογεννήτριας με βέλτιστη υδροδυναμική και στατική συμπεριφορά ακόμα και σε έντονες συνθήκες θαλασσών.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1..... | 11 |
| 1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ..... | 11 |
| ΙΣΤΟΡΙΚΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 11 |
| ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 14 |
| 1.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ..... | 17 |
| ΙΣΤΟΡΙΚΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 17 |
| ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 20 |
| ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ | 22 |
| ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΣΤΕΡΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ | 25 |
| 1.3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ | 26 |
| ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ..... | 26 |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ | 29 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2..... | 52 |
| 2.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ..... | 52 |
| 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ | 53 |
| ΠΕΔΙΟ ΑΝΕΜΟΥ | 54 |
| ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ | 55 |
| ΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ..... | 56 |
| 2.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ..... | 64 |
| ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ..... | 64 |
| ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ | 66 |
| 2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ..... | 71 |
| ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ..... | 71 |
| ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΤΙΘΕΝΤΑΙ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ | 80 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3..... | 92 |
| 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ | 92 |
| 3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ | 97 |
| ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 97 |
| ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΩΝ | 100 |
| 3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ..... | 106 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4..... | 110 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 110 |
| 4.1.1 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 111 |
| 4.1.2 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 113 |
| 4.1.3 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη.. | 115 |
| 4.1.4 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη | 117 |
| 4.1.5 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 119 |
| 4.1.6 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 121 |
| 4.1.7 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 123 |
| 4.1.8 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα..... | 125 |
| 4.2 | ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ..... | 127 |
| 4.2.1 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη | 128 |
| 4.2.2 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη | 129 |
| 4.2.3 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 130 |
| 4.2.4 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 131 |
| 4.2.5 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 132 |
| 4.2.6 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 134 |
| 4.2.7 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 135 |
| 4.2.8 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με ελευθερία κατακόρυφης κίνησης..... | 136 |
| 4.3 | ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ | 138 |
| 4.3.1 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 139 |
| 4.3.2 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 141 |
| 4.3.3 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη.. | 145 |
| 4.3.4 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη | 148 |
| 4.3.5 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 154 |
| 4.3.6 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 157 |
| 4.3.7 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη..... | 160 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| 4.3.8 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 166 |
| 4.4 | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 169 |
| 4.4.1 | Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 170 |
| 4.4.2 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη.. | 173 |
| 4.4.3 | Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 175 |
| 4.4.4 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη..... | 178 |
| 4.4.5 | Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα | 180 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | | 183 |
| 5.1 | ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 183 |
| 5.2 | ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 185 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ | | 186 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΙΣΤΟΡΙΚΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη καλύπτονται ως επί το πλείστον από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες. Στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά και ως ορυκτά καύσιμα, καθώς και η πυρηνική ενέργεια. Βέβαια, η φύση δεν σταματά να δημιουργεί ούτε άνθρακα ούτε πετρέλαιο. Αν αναλογισθούμε όμως ότι η ανθρωπότητα καταναλώνει ημερησίως τόση ποσότητα ορυκτών καυσίμων όση μπορεί η φύση να δημιουργήσει σε χίλια περίπου χρόνια, αντιλαμβανόμαστε πλέον την έννοια της ανανεωσιμότητας.^[1]

Η παράγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών αποτελεί ως εκ τούτου επιτακτική ανάγκη. Όταν μιλάμε για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή *ήπιες μορφές ενέργειας*, ή *νέες πηγές ενέργειας*, ή *πράσινη ενέργεια* αναφερόμαστε σε μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως:

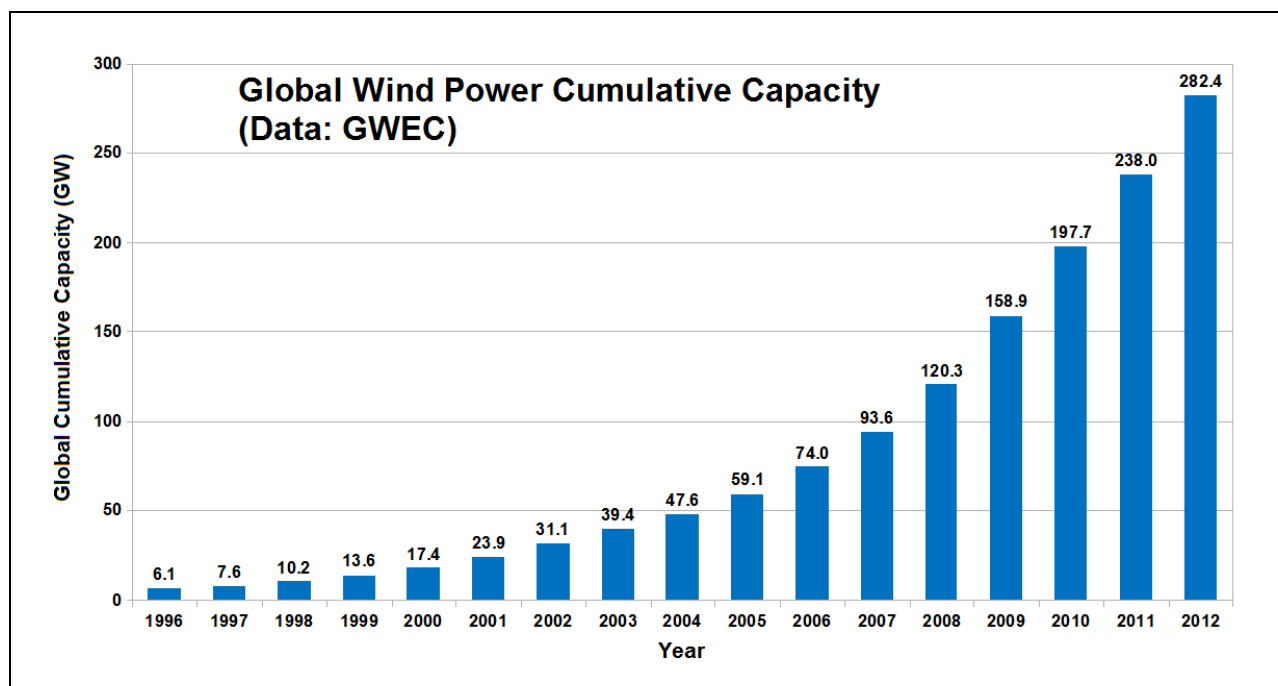
- ο ήλιος - **ηλιακή ενέργεια**, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή,
- ο άνεμος - **αιολική ενέργεια**,
- οι υδατοπτώσεις - **υδραυλική ενέργεια**, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
- η γεωθερμία - **γεωθερμική ενέργεια**: υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας,
- **η βιομάζα**: θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- **οι θάλασσες**: ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Ο όρος «ανανεώσιμες» έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι μορφές ενέργειας αυτές προέρχονται από φυσικούς πόρους οι οποίοι συνεχώς ανανεώνονται. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα

χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.^[2]

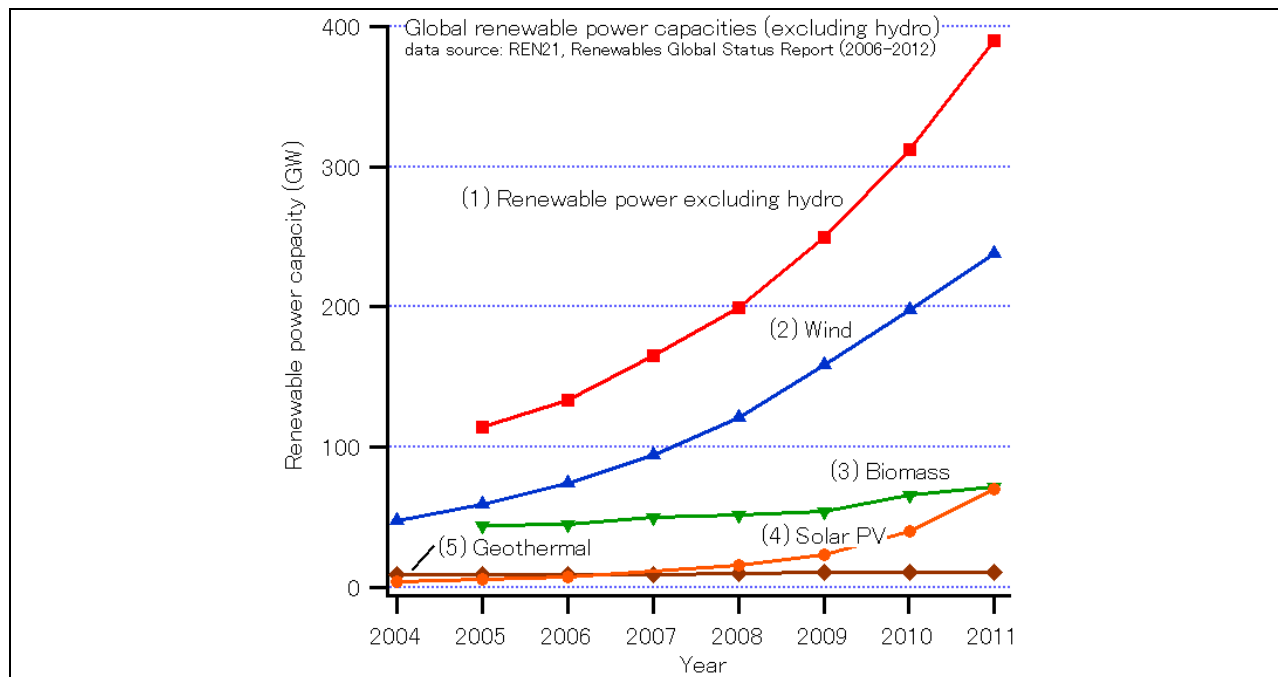
Μια από τις δημοφιλέστερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ειδικά τα τελευταία χρόνια, είναι ο άνεμος. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του πνέοντος ανέμου είναι γεγονός από την αρχαιότητα. Η αιολική ενέργεια, που έχει πάρει το όνομα της από τον Αίολο, το μυθολογικό θεό του ανέμου, είναι πλήρως συνυφασμένη με την Ελλάδα, από τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων, τον ανεμόμυλο του Ήρωνα που σχεδιάστηκε κατά τον 1^ο μ. Χ. αιώνα, μέχρι και την μετέπειτα εκτεταμένη χρήση των ανεμόμυλων στα νησιά του Αιγαίου και όχι μόνο. Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια, πρόκειται για μηχανική και κινητική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική πραγματοποιήθηκε με την πρώτη ηλεκτροπαραγωγή - φόρτισης μπαταριών - ανεμογεννήτρια του σκοτσέζου ακαδημαϊκού James Blyth το 1887 και λίγο αργότερα με την πρώτη αυτοματοποιημένης λειτουργίας ανεμογεννήτρια ισχύος 12 kW που κατασκευάστηκε στο Κλήβελαντ του Οχάιο από τον Αμερικανό εφευρέτη Charles F. Brush.^[3] Με το πέρασμα των χρόνων η αιολική ενέργεια άρχισε να βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στις τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες.

Σήμερα, η αιολική ενέργεια αυξάνεται με ρυθμό 30% ετησίως, με παγκόσμια εγκατεστημένη δυναμικότητα 282.482 μεγαβάτ (MW) στο τέλος του 2012, και χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη, την Ασία και τις Ηνωμένες Πολιτείες.^[5]



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη δυναμικότητα αιολικής ενέργειας μέχρι το 2012 (Πηγή: GWEC- Global Wind Statistics 2012)^[4]

Επίσης, εξαιρουμένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας, η αιολική κατέχει σε παγκόσμια κλίμακα πρωταγωνιστικό ρόλο ανάμεσα στις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Εικόνα 1.2: Παγκόσμιο δυναμικό διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Πηγή: REN21 – Renewables Global Status Report 2012)^[6]

Αλλά και σε Ευρωπαϊκό επίπεδο η αιολική ενέργεια αποτελεί ραγδαία εξελισσόμενο κλάδο. Το μερίδιο της αιολικής ενέργειας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη έχει αυξηθεί πέντε φορές από το 2000, από 2,2% το 2000 σε 11,4% το 2012. Κατά την ίδια περίοδο, το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξήθηκε κατά 51%, από το 22,5% της συνολικής ισχύος το 2000 σε 33,9% το 2012.

FIGURE 2.3 EU POWER MIX 2000

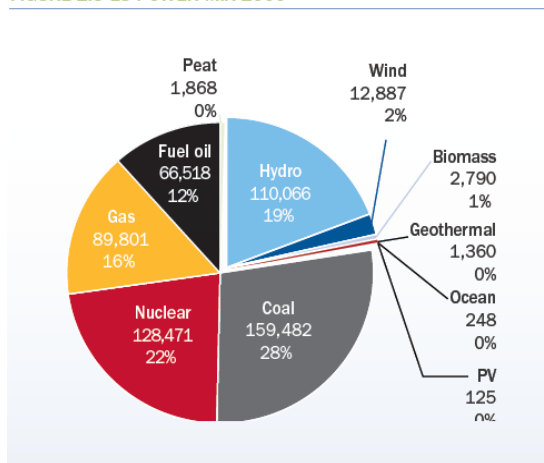
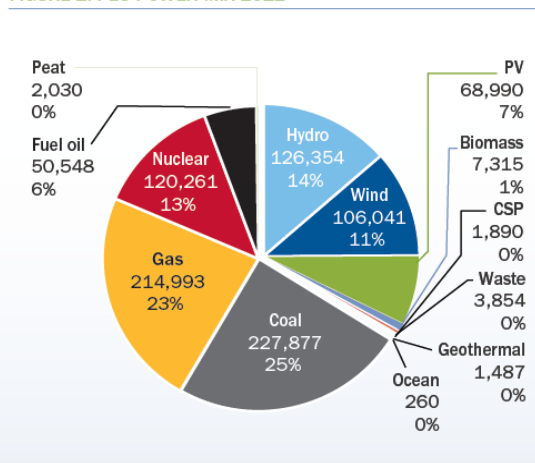


FIGURE 2.4 EU POWER MIX 2012



Εικόνα 1.3: Ποσοστά ενεργειακών πηγών για τα έτη 2000 και 2012. (Πηγή: EWEA – Wind Power Annual Statistics 2012)^[7]

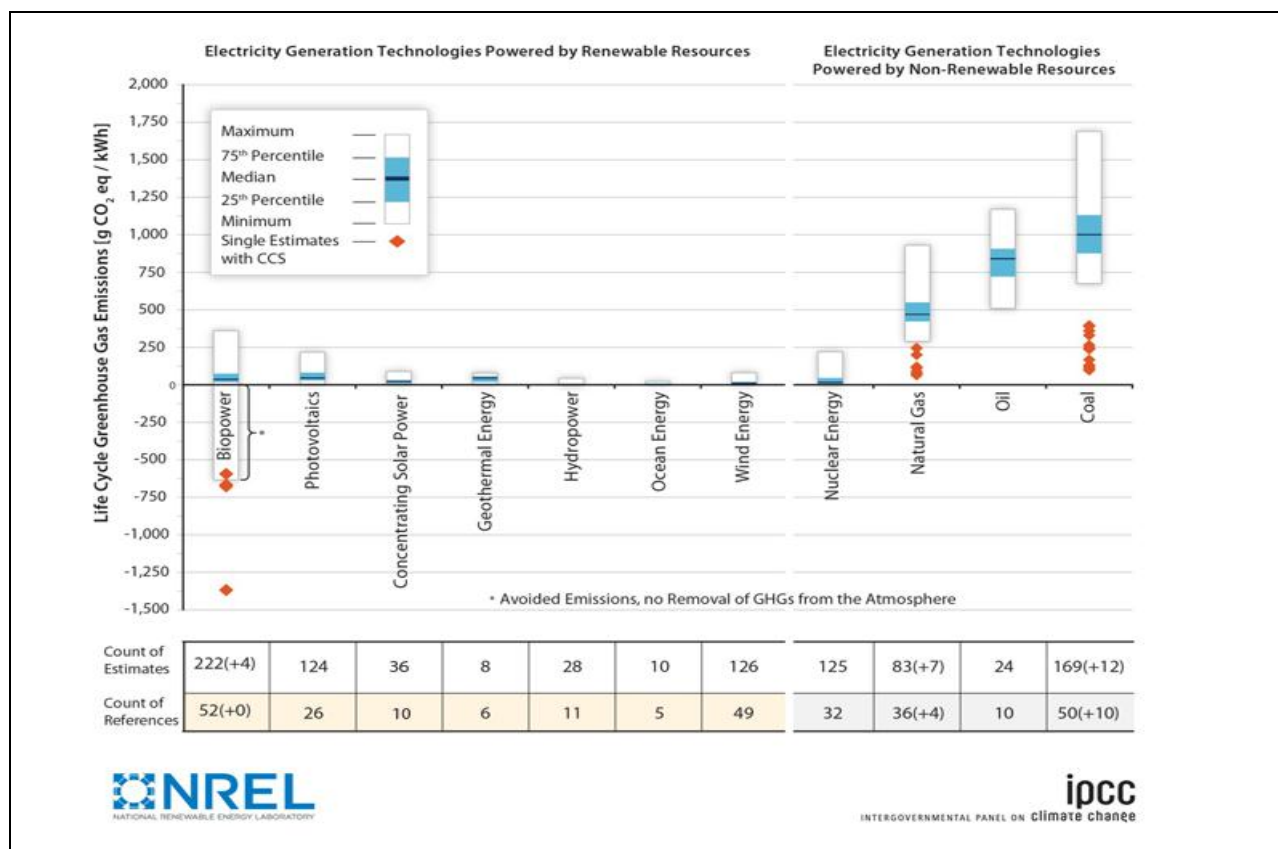
Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Οργάνωσης Αιολικής Ενέργειας ([European Wind Energy Association](#), EWEA) για το **2020** είναι τα **230 GW** εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ευρώπη εκ της οποίας τα 190 GW χερσαίας και τα 40 GW υπεράκτιας. Αν επιτευχθεί ο στόχος, περίπου 14-17% (ανάλογα με τη συνολική ζήτηση) του ηλεκτρισμού στην Ευρώπη θα παράγεται με τη βοήθεια του ανέμου, θα μειωθούν οι εκπομπές του CO₂ κατά 333 εκατομμύρια τόνους ανά έτος και θα μειωθούν τα έξοδα της Ευρώπης κατά €28 δισεκατομμύρια ανά έτος από τις μειωμένες ανάγκες της σε καύσιμα και κατά €8.3 δισεκατομμύρια από την μείωση του CO₂. Για το **2030** ο στόχος είναι τα **400 GW** εγκατεστημένης ισχύος εκ της οποίας τα 250 GW χερσαίας και τα 150 GW υπεράκτιας. Αν επιτευχθεί ο στόχος οι παραπάνω τιμές μεταβάλλονται σε 26-35%, 600 εκατομμύρια τόνους ανά έτος, €56 και €15 δισεκατομμύρια ανά έτος, αντίστοιχα.^[8]

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πλεονεκτήματα

Οι θετικές επιπτώσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γενικά, αφορούν φυσικά και την αιολική ενέργεια. Συγκεκριμένα βέβαια:

- Η αιολική ενέργεια είναι πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Ως μορφή ενέργειας είναι γεωγραφικά διεσπαρμένη και οδηγεί στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 kW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO₂ ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων.^[9] Σε σύγκριση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υπολοίπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας είναι πολύ μικρές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου αν και ελαφρώς υψηλότερες από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας.
- Ενώ ένα αιολικό πάρκο συνήθως καλύπτει μια μεγάλη έκταση γης, παράλληλες χρήσεις της, όπως η γεωργία ή κτηνοτροφία, είναι συμβατές, με μόνο τις περιοχές της θεμελίωσης των ανεμογεννητριών να μην είναι διαθέσιμες για χρήση.



Εικόνα 1.4: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Πηγή: NREL- Greenhouse Gas Emissions)^[10]

Μειονεκτήματα

Βέβαια εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή της:

- Έχει χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζει συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά της (ο άνεμος δεν πνέει σταθερά και διαρκώς με την ίδια ένταση) που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης. ^[9]
- Δημιουργείται ηχητική ρύπανση από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες ωστόσο είναι μηχανές πολύ ήσυχες συγκριτικά με την ισχύ τους και με συνεχείς βελτιώσεις από τους κατασκευαστές γίνονται όλο και πιο αθόρυβες. Επίσης, το επίπεδο του αντιληπτού θορύβου από μία ανεμογεννήτρια σύγχρονων προδιαγραφών σε απόσταση 200 μέτρων, είναι μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος μιας μικρής επαρχιακής πόλης και βεβαίως δεν αποτελεί πηγή ενόχλησης. Με δεδομένη δε τη νομοθετημένη απαίτηση να εγκαθίστανται οι ανεμογεννήτριες σε ελάχιστη απόσταση 500 μέτρων από τους οικισμούς, το επίπεδο

είναι ακόμη χαμηλότερο και αντιστοιχεί πλέον σε αυτό ενός ήσυχου καθιστικού δωματίου. Επιπλέον, στις ταχύτητες ανέμου που λειτουργούν οι ανεμογεννήτριες ο φυσικός θόρυβος (θόρυβος ανέμου σε δένδρα και θάμνους) υπερκαλύπτει οποιοδήποτε θόρυβο που προέρχεται από τις ίδιες.^[11]

- Πιθανά είναι προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που μπορεί να δημιουργηθούν από της ανεμογεννήτριες. Είναι γεγονός ότι η διάδοση των εκπομπών στις συχνότητες της τηλεόρασης ή και του ραδιοφώνου (κυρίως στις συχνότητες εκπομπών FM) επηρεάζεται από εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Το κυριότερο πρόβλημα από τις ανεμογεννήτριες προέρχεται από τα κινούμενα πτερύγια που μπορούν να προκαλέσουν αυξομείωση σήματος λόγω αντανάκλασεων. Αυτό ήταν πολύ εντονότερο στην πρώτη γενιά ανεμογεννητριών που έφερε μεταλλικά πτερύγια. Τα πτερύγια των συγχρόνων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται αποκλειστικά από συνθετικά υλικά, τα οποία έχουν ελάχιστη επίπτωση στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.^[11]
- Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμούς ή θανατώσεις πουλιών, κυρίως αποδημητικών γιατί τα ενδημικά «συνηθίζουν» την παρουσία των μηχανών και τις αποφεύγουν. Γι' αυτό καλύτερα να μην κατασκευάζονται αιολικά πάρκα σε δρόμους μετανάστευσης πουλιών. Βέβαια στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι η επίδραση της αιολικής ενέργειας στα ζώα μιας περιοχής είναι περιορισμένη σε σχέση με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα ποσοστά θνησιμότητας πτηνών είναι πολύ μεγαλύτερα στην περίπτωση θανάτωσης τους από άλλες αιτίες όπως για παράδειγμα σύγκρουση με αυτοκίνητα, ή με παράθυρα υψηλών κτιρίων, παρά από πτερύγια ανεμογεννητριών.^[12]
- Έχουν γίνει αναφορές για ενοχλήσεις κατοίκων από την παρουσία αιολικών πάρκων κοντά στον τόπο διαμονής τους. Η οπτική όχληση βέβαια είναι κάτι υποκειμενικό και δύσκολα μπορούν να τεθούν κοινά αποδεκτοί κανόνες. Από έρευνες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προκύπτει ότι κάποιος που είναι ευνοϊκά διατεθειμένος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται τις ανεμογεννήτριες και οπτικά πολύ πιο εύκολα από κάποιον που είναι αρνητικός εξ αρχής. Από τις ίδιες μελέτες, προκύπτει ότι τα αιολικά πάρκα είναι πιο αποδεκτά από αισθητικής άποψης σε ανθρώπους που είναι ενημερωμένοι για τα οφέλη που προέρχονται από την χρήση τους. Αν κάνουμε μια απλή σύγκριση μεταξύ ενός θερμικού σταθμού παραγωγής (π.χ. λιγνιτικού), και ενός αιολικού πάρκου είναι φανερό ότι η οπτική όχληση που προκύπτει από το πρώτο είναι εμφανώς και αντικειμενικά πολύ μεγαλύτερη. Δεδομένου βεβαίως ότι οι ανεμογεννήτριες είναι κατ' ανάγκη ορατές από απόσταση, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες κάθε τύπου εγκατάστασης και να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης τους στο τοπίο.^[11]
- Επιπλέον, για τη δημιουργία αιολικών πάρκων θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η επιβάρυνση που θα προκληθεί στην τοποθεσία, διότι για να χτιστεί η εγκατάσταση θα πρέπει να κοπούν δέντρα η γενικώς να καταστραφεί μέρος της γης στην οποία θα γίνει το εγχείρημα.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.

Συνοψίζοντας, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι οι οποιοσδήποτε επιπτώσεις από τις ανεμογεννήτριες, αφενός είναι άμεσα «ορατές» και αφετέρου είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθούν με σωστή αντιμετώπιση και προσχεδιασμό. Αντίθετα, οι επιπτώσεις της θερμικής ή πυρηνικής παραγωγής ενέργειας αργούν να φανούν, είναι μακροπρόθεσμες και όση προσπάθεια και κόστος να δαπανηθούν είναι αδύνατον να ελαχιστοποιηθούν. Εν τέλει θα πρέπει να αποφασίσουμε ότι εφόσον πρέπει να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια, είναι σίγουρα προτιμότερο να την παράγουμε με τρόπο που να έχει την μικρότερη δυνατή επιβάρυνση για το περιβάλλον. Από τεχνολογική και οικονομική πλευρά, η πιο ώριμη μορφή ανανεώσιμης και «καθαρής» ενέργειας είναι σήμερα η αιολική. Αυτή μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στην αποτροπή των κλιματικών αλλαγών προσφέροντας συγχρόνως ποικίλα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη. ^[11]

Σε κάθε περίπτωση, πριν τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου ή και οποιασδήποτε εγκατάστασης ΑΠΕ θα πρέπει να έχει προηγηθεί Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ). Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας και την αυστηρότερη επιλογή του τόπου εγκατάστασης (π.χ. πλωτές πλατφόρμες σε ανοικτή θάλασσα) μπορούν να βρεθούν λύσεις στα παραπάνω προβλήματα.

1.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΙΣΤΟΡΙΚΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια («offshore wind power») αναφέρεται στην κατασκευή αιολικών πάρκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, όχι στην ξηρά, αλλά σε υδάτινο περιβάλλον. Σε αντίθεση με την τυπική χρήση του όρου «offshore» στη θαλάσσια βιομηχανία, η υπεράκτια αιολική ενέργεια περιλαμβάνει περιοχές ρηχών υδάτων, όπως λίμνες, φιορδ και προστατευμένες παράκτιες περιοχές, όπου τοποθετούνται πακτωμένες σταθερές κατασκευές στήριξης ανεμογεννητριών, καθώς και περιοχές βαθέων υδάτων, όπου γίνεται χρήση πλωτών σωμάτων στήριξης ανεμογεννητριών. ^[14]

Στη σημερινή εποχή, οι κύριοι λόγοι που έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για δημιουργία θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι:

- Η έλλειψη θέσεων στην ξηρά
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- Η περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια από την θάλασσα ^[15]

Τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα, έκαναν την εμφάνισή τους γύρω στις αρχές της δεκαετίας του '90. Οι λόγοι που εμπόδιζαν την μέχρι τότε κατασκευή τους ήταν:

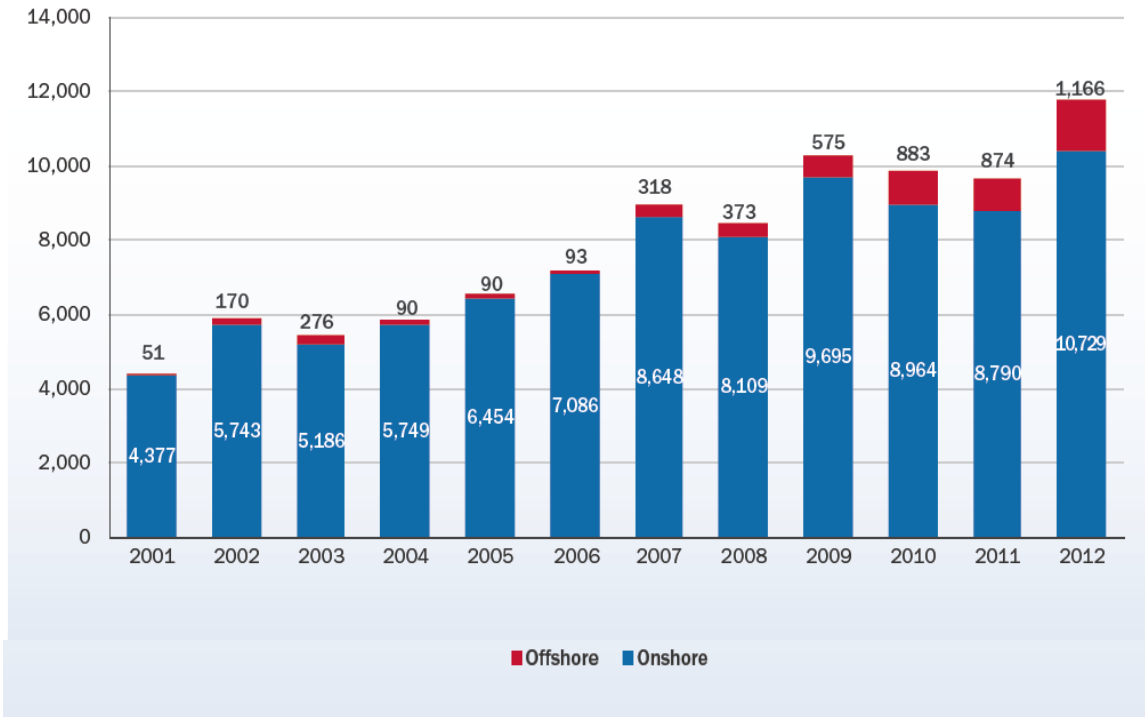
- Το υψηλό κόστος κατασκευής (τοποθέτηση, ηλεκτρική διασύνδεση, χρήση υλικών με αντοχή στο θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον)
- Προστασία του εξοπλισμού
- Ελλιπής τεχνολογία για επαρκή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού

Η Ευρώπη είναι ο παγκόσμιος ηγέτης στην υπεράκτια αιολική ενέργεια, με το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο να εγκαθίσταται στη Δανία το 1991. Μέχρι τον Αύγουστο του 2010, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στα ευρωπαϊκά ύδατα είχε φτάσει 3 GW. Σήμερα, σχεδόν 6 GW υπεράκτιου αιολικού δυναμικού είναι υπό κατασκευή στην Ευρώπη, 17 GW έχουν πάρει έγκριση κρατών μελών της ΕΕ και υπάρχουν μελλοντικά σχέδια για περαιτέρω 114 GW. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας, το δυναμικό υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη θα αυξηθεί κατά δέκα φορές. Η EWEA υπολογίζει ότι μέχρι το 2020, 40 GW της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας θα παράγουν 148 TWh ετησίως, που θα καλύπτουν πάνω από 4% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της Ε.Ε. και θα συμβάλλουν στην αποφυγή 87 εκατομμυρίων τόνων εκπεμπόμενου CO₂.

Μεταξύ 2020 και 2030 επιπλέον 110 GW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας αναμένεται να προστεθούν Ευρωπαϊκά ύδατα. 150 GW της αιολικής ενέργειας θα παράγουν 562 TWh ετησίως, αρκετά για να καλύψουν το 14% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ και ικανά να μειώσουν κατά 315 εκατ. τόνους εκπομπές του CO₂.^[17]

Το 2012 ήταν ένα έτος ρεκόρ για υπεράκτιες εγκαταστάσεις, με 1166 MW νέου δυναμικού. Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας αντιπροσωπεύουν το 10% της ετήσιας αγοράς αιολικής ενέργειας της ΕΕ, από το 9% που ήταν για το 2011. Μέχρι το 2020, η υπεράκτια αναμένεται να αποτελεί το 28% του ετήσιου δυναμικού αιολικής ενέργειας.

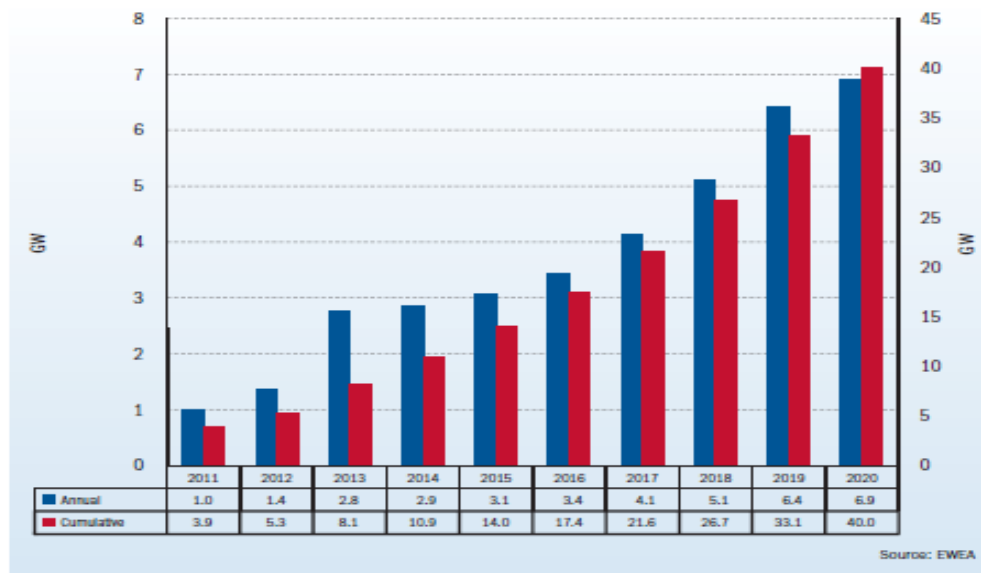
FIGURE 3.3 ANNUAL ONSHORE AND OFFSHORE INSTALLATIONS (MW)



Εικόνα 1.5: Ετήσιο δυναμικό χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων (Πηγή: EWEA – Wind Power Annual Statistics 2012)

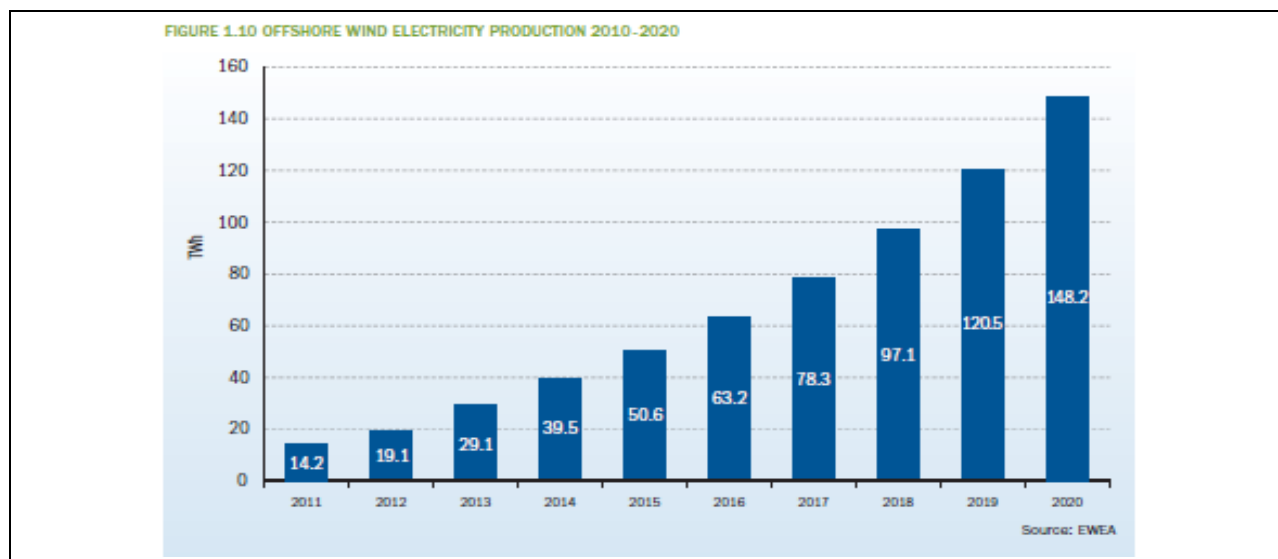
Μεταξύ 2011 και 2020, η EWEA αναμένει ότι το ετήσιο δυναμικό πλωτών ανεμογεννητριών θα αυξάνεται σταθερά, από 1 GW το 2011 σε 6,9 GW το 2020.

FIGURE 1.9 OFFSHORE WIND POWER ANNUAL (LEFT) AND CUMULATIVE (RIGHT) INSTALLATIONS 2010-2020



Εικόνα 1.6: Προβλεπόμενες ετήσιες (μπλε χρώμα) και αθροιστικές (κόκκινο χρώμα) υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις (Πηγή: EWEA – Offshore Report 2011)

Το 40 GW εγκατεστημένης ισχύος το 2020 θα παράγει 148 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, ίση με το 4% και 4,2% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ, ανάλογα με την αύξηση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Περίπου το ένα τέταρτο της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη θα μπορούσε να παραχθεί υπεράκτια έως το 2020, σύμφωνα με τα σενάρια της EWEA. Συμπεριλαμβανομένων και των χερσαίων εγκαταστάσεων, η αιολική ενέργεια θα παράγει 581 TWh, αρκετά για να καλύψουν μεταξύ 15,7% και 16,5% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ έως το 2020.



Εικόνα 1.7: Προβλεπόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων (Πηγή: EWEA – Offshore Report 2011)

ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πλεονεκτήματα

Αν και τα τελευταία χρόνια έχουν εδραιωθεί τα χερσαία αιολικά πάρκα, η υπεράκτια αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη χερσαία:

- Λειτουργικά πλεονεκτήματα:
 - Οι ταχύτητες των ανέμων πάνω από την ανοικτή θάλασσα είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτών της ξηράς. Αυτό συμβαίνει διότι ο άνεμος πνέοντας στη θάλασσα, δεν συναντά εμπόδια και το μόνο μέρος ενέργειας που χάνει είναι λόγω της τριβής με την επιφάνεια της θάλασσας (όπου και δημιουργούνται τα κύματα). Σε αντίθεση, πάνω στην ξηρά συναντά διαρκώς εμπόδια όπως για παράδειγμα βουνά, δάση, κλπ. Η ταχύτητα, άρα και η ενέργεια που περικλείει ο άνεμος είναι μεγαλύτερη όσο απομακρυνόμαστε από την ακτή και αυξάνει σε μέγεθος με την αύξηση του ύψους επάνω από την επιφάνεια του νερού.

- Η θαλάσσια αύρα μπορεί να είναι ισχυρή το απόγευμα, τις ώρες δηλαδή που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν περισσότερο την ηλεκτρική ενέργεια.
- Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:
- Έχουμε απουσία εδαφικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Απέραντες εκτάσεις συνεχούς ανοιχτής θάλασσας είναι διαθέσιμες και οι εγκαταστάσεις δεν καταλαμβάνουν γη, παρεμβαίνοντας στις άλλες χρήσεις της.
 - Αν το αιολικό πάρκο δεν έχει κατασκευαστεί σε δρόμο μεταναστευτικών πουλιών μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι θανατώσεις αυτών. Έρευνες σε Ευρωπαϊκά υπεράκτια αιολικά πάρκα έδειξαν μικρά ποσοστά θνησιμότητας πτηνών και ότι τα ποσοστά είναι εν δυνάμει μικρότερα στις υπεράκτιες απ' ότι στις χερσαίες εγκαταστάσεις. Μελετώντας 1.5 εκατομμύριο μεταναστευτικά πουλιά πάνω από αιολικά πάρκα στη Σουηδία παρατηρήθηκε ποσοστό θνησιμότητας 1 στα 100,000.^[18]
 - Αποφυγή της οπτικής όχλησης και του θορύβου αν το υπεράκτιο αιολικό πάρκο εγκατασταθεί σε επαρκή απόσταση από την ξηρά.
 - Ανάπτυξη βιοποικιλότητας γύρω από τα θεμέλια των Α/Γ τα οποία μπορεί να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι για τα θαλάσσια είδη. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορεί μεν να αποτελέσουν εμπόδιο στον τομέα της αλιείας, ή να προκαλέσουν διαταραχή του υποθαλάσσιου οικοσυστήματος - ειδικά κατά την περίοδο εγκατάστασης τους - αλλά σε μακροπρόθεσμη βάση οδηγούν σε υψηλότερες πυκνότητες ψαριών και βιομάζας στην περιοχή.^{[18],[14]}

Μειονεκτήματα

Το θέμα είναι αν τα πλεονεκτήματα από την λειτουργία υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορούν να αντισταθμίσουν και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν^[19]:

- Το υψηλό επενδυτικό κεφάλαιο που συνδέεται με τη μελέτη σχεδιασμού των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, την περιπλοκότητα κατασκευής, έδρασης/θεμελίωσης, εγκατάστασης και παροπλισμού τους.
- Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις είναι λιγότερο προσβάσιμες από τις χερσαίες, γεγονός που αυξάνει τις εργασίες και τις δαπάνες συντήρησης και ενδεχομένως το χρόνο διακοπής λειτουργίας των μηχανών.
- Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες δεν δέχονται περιβαλλοντική φόρτιση μόνο από τον άνεμο, επομένως, πρέπει να αντέχουν και σε άλλες συνθήκες φόρτισης, όπως η υδροδυναμική φόρτιση από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε δυο βασικούς **στόχους** κατά τη λειτουργία ενός υπερράκτιου αιολικού πάρκου, την βέλτιστη απόδοσή του και τον εν δυνάμει περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, σημαντικό είναι η εγκατάσταση μιας υπερράκτιας κατασκευής με ανεμογεννήτριες ή ενός υπερράκτιου αιολικού πάρκου να μην γίνει αυθαίρετα, αλλά κατόπιν μελέτης και με την προϋπόθεση να λαμβάνονται υπόψη ορισμένα βασικά **κριτήρια**:

- Αιολικό δυναμικό

Ο στόχος της βέλτιστης απόδοσης του έργου αντικατοπτρίζεται στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια είναι περισσότερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, καθώς η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.^[20] Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να εξετάζονται και να αξιολογούνται οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι ανεμολογικές προβλέψεις στην ευρύτερη περιοχή που θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες. Προκειμένου να βρούμε τις βέλτιστες περιοχές για τη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, χρησιμοποιούνται πληροφορίες από χάρτες υπερράκτιου αιολικού δυναμικού, από μετεωρολογικούς ιστούς, δορυφορικά αρχεία ή και δεδομένα από κοντινές περιοχές προσαρμοσμένα κατάλληλα. Είναι επίσης δυνατή η προσομοίωση των χαρακτηριστικών του ανέμου σε κάθε σημείο εγκατάστασης με τη βοήθεια πιθανοθεωρητικών μοντέλων, όπως πχ. το μοντέλο Weibull^[3]. Επομένως είναι σημαντικό να γνωρίζουμε με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, έτσι ώστε με τον κατάλληλο και ορθό σχεδιασμό του αιολικού πάρκου να γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

- Βάθος και μορφολογία πυθμένα

Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου κατασκευής στήριξης πλωτής ανεμογεννήτριας, το βάθος και η φύση του βυθού της θάλασσας είναι παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται. Είτε πρόκειται για σταθερή κατασκευή, η οποία στηρίζεται άμεσα στον πυθμένα της θάλασσας, είτε για πλωτή με κλάδους αγκύρωσης, είναι απαραίτητο να προηγηθεί εδαφική και σεισμική μελέτη.

- Πρόσβαση για συντήρηση

Οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμες για τις εργασίες της συντήρησης και επισκευής. Θα πρέπει λοιπόν, να εξετάζεται η απόσταση από την ακτή και τους σταθμούς εξυπηρέτησης, καθώς και οι συνθήκες των τοπικών θαλασσών, αφού μπορεί να επηρεάσουν τόσο το χρόνο όσο και το κόστος ανέγερσης του αιολικού πάρκου, καθώς και τις εργασίες συντήρησης. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσουν στην ανάγκη κατασκευής πλωτών εγκαταστάσεων συντήρησης, ιδίως για τα μεγάλα αιολικά πάρκα.

- Οπτική όχληση

Αν και δεν είναι τόσο σημαντικός παράγοντας όπως στα χερσαία πάρκα, μπορεί και εδώ να υπολογίζεται η ζώνη του οπτικού αντίκτυπου υπό τη μορφή χάρτη. Η απόσταση που θα έχει η περιοχή εγκατάστασης από την ακτή πρέπει να είναι:

$$L > \sqrt{(2HR)}$$

L: η απόσταση από την ακτή,

R: η ακτίνα της γης

H: το ύψος του δρομέα ^[21]

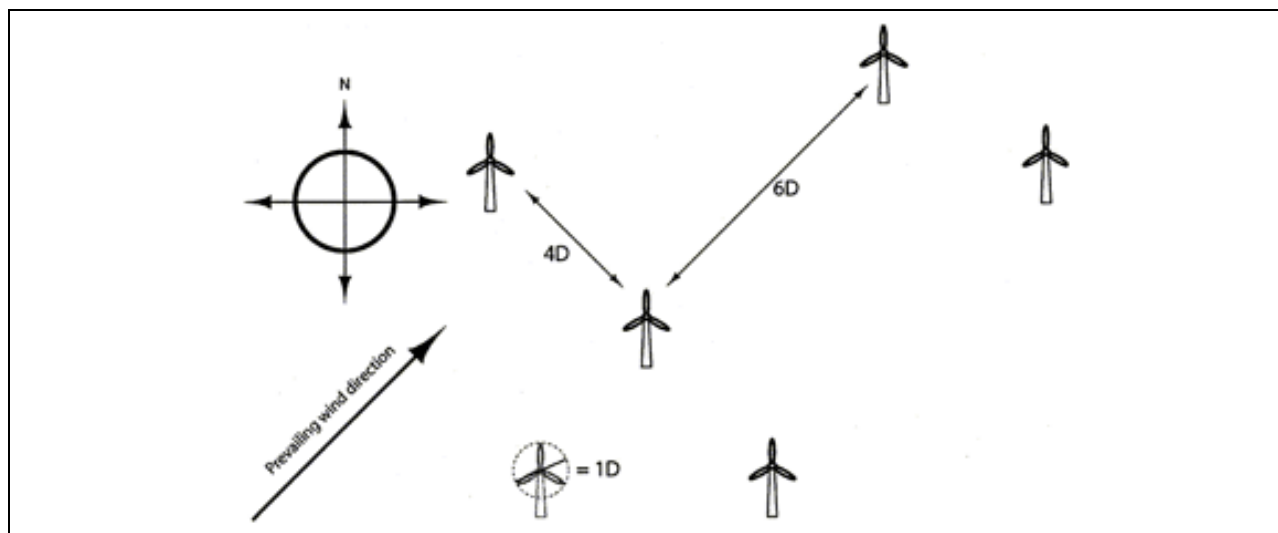
Ένα αιολικό πάρκο με λιγότερες αλλά μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως προτιμότερο από πολλές μικρές.

- Θόρυβος

Αυτός ο παράγοντας δεν είναι σημαντικός, δεδομένου ότι ο θόρυβος που δημιουργείται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί. Τα επίπεδα του θορύβου μπορούν επίσης να υπολογιστούν και να εξεταστούν ώστε το πάρκο να είναι συμβατό με τα αποδεκτά επίπεδα ήχου όπως ορίζονται από την εθνική νομοθεσία, κυρίως για την επιρροή τους στη θαλάσσια ζωή.

- Απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών

Υπάρχει μια ελάχιστη αποδεκτή απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις από τη δημιουργία ομόρρου μεταξύ των ανεμογεννητριών, έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης που έχουν αποτέλεσμα αφενός την ελάττωση της παραγωγής, αφετέρου την ελάττωση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών λόγω αυξημένης φόρτισης τους. Δεδομένου ότι μια ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική, ο άνεμος που έχει προσπεράσει ήδη την ανεμογεννήτρια έχει λιγότερη ενέργεια απ' ότι πριν φτάσει σε αυτή. Κατά συνέπεια, μια ανεμογεννήτρια θα ρίχνει πάντα μια σκιά ανέμου στην υπήνεμη πλευρά της ^[22]. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών λοιπόν καθορίζεται ανάλογα με τη διάμετρο των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, την εκτιμώμενη ή συνήθη κατεύθυνση του ανέμου ή και τις όποιες ιδιαιτερότητες του κάθε αιολικού πάρκου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία η απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών (σε χερσαίο πάρκο) είναι 2.5 φορές η διάμετρος της έλικας ^[23], ενώ παρατίθεται εικόνα με προτεινόμενη διάταξη ανεμογεννητριών συναρτήσει της διαμέτρου των πτερυγίων και την κατεύθυνσης του ανέμου.



Εικόνα 1.8: Παράδειγμα διάταξης ανεμογεννητριών για επικρατούντες ανέμους νοτιοδυτικής κατεύθυνσης. (Πηγή DOE – PPS18, Annex 1) ^[24]

- Επιπτώσεις στο οικοσύστημα

Το αιολικό πάρκο ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στο οικοσύστημα, ιδιαίτερα κατά το χρονικό διάστημα της τοποθέτησης του στην περιοχή λειτουργίας του καθώς μπορεί να ταραξει την μέχρι τώρα ζωή των ψαριών, των θαλάσσιων θηλαστικών και των πτηνών που βρίσκονται στην περιοχή. Θα έπρεπε λοιπόν να γίνει κατάλληλη επιλογή του τόπου και χρόνου εγκατάστασής και να δοθεί προσοχή σε προστατευόμενες ζώνες ευαίσθητων οικοσυστημάτων, περιόδους αναπαραγωγής των ειδών του τοπικού οικοσυστήματος, μεταναστευτικούς δρόμους πουλιών και ψαριών. ^[18]

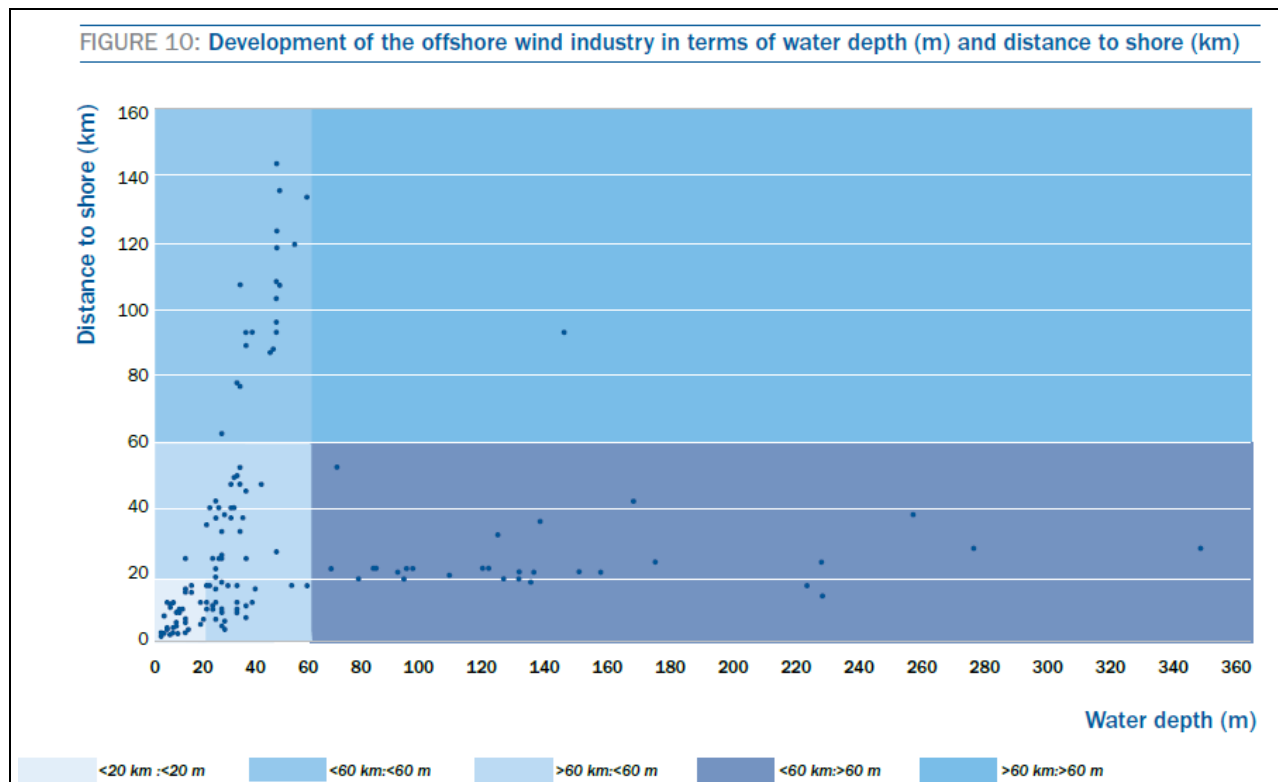
- Θεσμικοί περιορισμοί

Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ναυσιπλοΐα, η αλιεία και οι δρόμοι του θαλάσσιου εμπορίου. Ανάλογα με το μέγεθος του αιολικού πάρκου, είναι πιθανό να επηρεάζονται τα δρομολόγια των εμπορικών πλοίων. Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί, που διαφοροποιούνται από χώρα σε χώρα, στην τοποθέτηση των υπεράκτιων κατασκευών, που συνοψίζονται στους παρακάτω τίτλους:

- εμπορική ναυτιλία
- αλιεία και αναπαραγωγή ψαριών
- βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου
- προστατευόμενες περιοχές
- εθνική άμυνα
- αισθητική παρέμβαση

ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ – ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΣΤΕΡΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ

Γενικά όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό – την απόδοση δηλαδή των ανεμογεννητριών -, το θόρυβο, την οπτική όχληση, αλλά και τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα, η τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου μακριά από τη στεριά και σε βαθύτερα νερά, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, η υπεράκτια αιολική βιομηχανία προχωρά σε μεγαλύτερο βάθος νερού και μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή. Λαμβάνοντας υπόψη ερευνητικά, προτεινόμενα και προσεχώς εφαρμόσιμα σχέδια για τα αιολικά πάρκα, η βιομηχανία αιολικής ενέργειας θα ξεπεράσει σταδιακά το λεγόμενο πλαίσιο 20:20 (20m βάθος του νερού, 20 χλμ. από την ακτή). Αυτό το γράφημα διασποράς δείχνει την πιθανή μελλοντική ανάπτυξη της υπεράκτιας βιομηχανίας έως το 2025 (περίπου).^[17]



Εικόνα 1.9: Γράφημα που απεικονίζει την τάση ανάπτυξης της υπεράκτιας αιολικής βιομηχανίας συναρτήσει βάθους νερού και απόστασης από τη στεριά. (Πηγή: EWEA – Offshore Report 2011)^[17]

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια ως αναπτυσσόμενος κλάδος, που βρίσκεται συνεχώς σε εξέλιξη και βελτιστοποίηση με απώτερο σκοπό και την οικονομική βιωσιμότητά του, έχει αρκετά πεδία έρευνας:

1. Βελτίωση σχεδίασης και διάταξης αιολικών πάρκων
2. Ορθή επιλογή της τοποθεσίας εγκαταστάσεων
3. Βελτιστοποίηση κατασκευών στήριξης υπεράκτιων Α/Γ
4. Αύξηση αξιοπιστίας και αποδοτικότητας των Α/Γ
5. Διερεύνηση εφικτότητας μεγαλύτερων Α/Γ και μεγάλων διασυνδεδεμένων αιολικών πάρκων
6. Βελτίωση και σχεδιασμός συνδυασμένου ηλεκτρικού δικτύου
7. Οικονομική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του κόστους του συνολικού συστήματος ενός αιολικού πάρκου, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησής του. ^{[12]. [14]}

1.3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Δύο είναι τα βασικά τεχνικά μέρη μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας:

1. Η ίδια η ανεμογεννήτρια
2. Η κατασκευή στήριξης της ανεμογεννήτριας

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

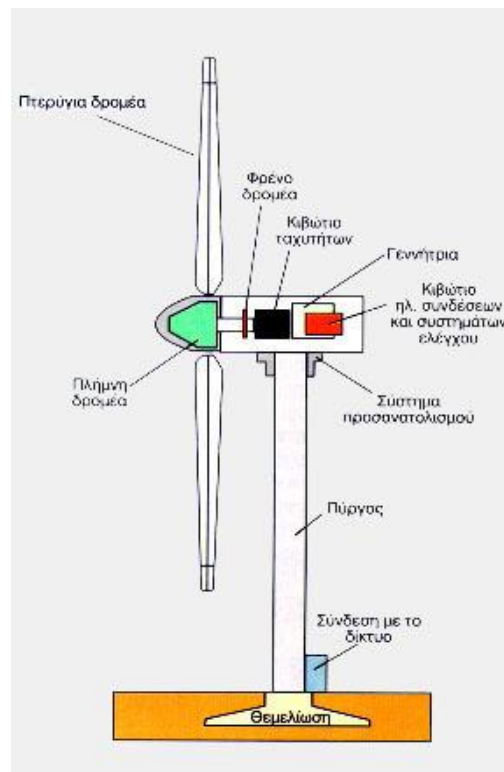
Μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) είναι μια συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άνεμου σε μηχανική. Τα κύρια μέρη μιας οριζοντίου άξονα Α/Γ είναι τα εξής:

1. Ο **πύργος**, ο οποίος είναι κυλινδρικής ή δικτυωτής μορφής, συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα, αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα και στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.
2. Η **άτρακτος**, αποτελούμενη από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
3. Η **ηλεκτρογεννήτρια**, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο

της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

4. Ο **δρομέας**, ο οποίος αποτελείται από πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα τους.
5. Ο **ηλεκτρονικός πίνακας** και ο **πίνακας ελέγχου**, που παρακολουθούν, συντονίζουν και ελέγχουν όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Πιο συγκεκριμένα, ο αέρας που κινείται πάνω από τις λεπίδες του στροβίλου δημιουργεί αεροδυναμική ώθηση, η οποία με κάνει τα πτερύγια του δρομέα να περιστρέφονται. Μπορεί να υπάρχουν αισθητήρες ανέμου, οι οποίοι εντοπίζουν το βέλτιστο σημείο προσανατολισμού της Α/Γ, επιτρέποντας σε ένα ρυθμιστή περιστροφής της Α/Γ να στρέψει τα πτερύγια προς ή αντίθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Έτσι, ο άνεμος περιστρέφει τον δρομέα που με τη σειρά του περιστρέφει τον κύριο άξονα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην πλήμνη του δρομέα. Μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων η κίνηση του άξονα του δρομέα μεταδίδεται στη γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρισμό. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας είναι τουλάχιστον 20 χρόνια. ^[18]



Εικόνα 1.10: Τυπική οριζόντιου άξονα Α/Γ (Πηγή: ΚΑΠΕ)^[25]

Αεροδυναμική μοντελοποίηση των Α/Γ χρησιμοποιείται για να καθορίσει το βέλτιστο ύψος πύργου, τα συστήματα ελέγχου, τον αριθμό και το σχήμα των πτερυγίων του δρομέα.

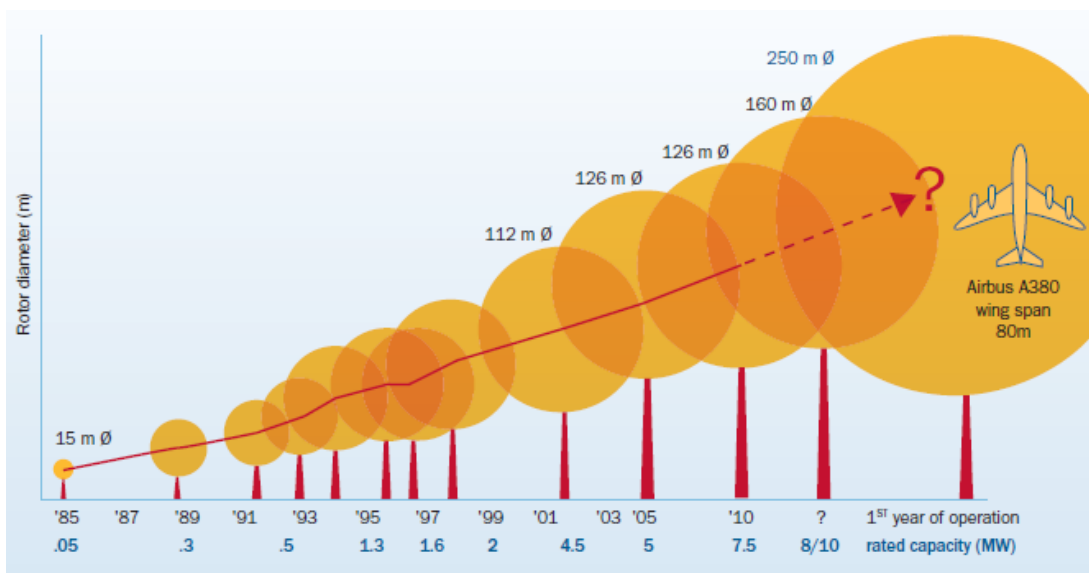
Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

- Οριζοντίου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους
- Κατακόρυφου άξονα, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους

Η απόδοση των ανεμογεννητριών εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάταξή τους και από την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt. Οι υπερράκιες ανεμογεννήτριες συνήθως παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά ώρα από ό, τι οι χερσαίες, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους και των υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου στη θάλασσα.

Μέχρι σήμερα, στην παγκόσμια αγορά, έχουν επικρατήσει οι Α/Γ οριζόντιου άξονα για την ηλεκτροπαραγωγή σε ποσοστό 90%. Η ισχύς τους φτάνει τα 5 MW, η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ 40 και 120 m, το ύψος του πύργου φτάνει έως και τα 120 m και λειτουργούν σε ένα πεδίο ταχυτήτων ανέμου από 3 έως 30 m/s. ^{[18], [26]}

Η τάση είναι οι Α/Γ να είναι όλο και μεγαλύτερης ισχύος, διότι έτσι αυξάνεται η ηλεκτροπαραγωγή και η απόδοσή τους.



Εικόνα 1.11: Χρονολογική αύξηση ισχύος-μεγέθους Α/Γ (Πηγή: UpWind – Report, March 2011)^[27]

ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Με τον όρο κατασκευή στήριξης, εννοούμε τον πύργο και την έδραση μαζί που στηρίζουν την άτρακτο και τα πτερύγια της Α/Γ. Ο πύργος συγκρατεί το δρομέα στον άνεμο και μεταφέρει επίσης όλα τα φορτία στην έδραση. Αυτή είναι που στηρίζει με τη σειρά της τον πύργο, την άτρακτο και τα πτερύγια και αντιστέκεται στη φόρτιση από τον άνεμο και τα κύματα. Η έδραση είναι η κύρια διαφορά μεταξύ των υπεράκτιων και των χερσαίων Α/Γ. Η εκτίμηση των φορτίων του ανέμου και των θαλασσίων κυμάτων και ρευμάτων είναι το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό των εδράσεων.

Για τη στήριξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες κατασκευές, κάθε μια από τις οποίες πληροί διαφορετικές προδιαγραφές και απαιτήσεις. Αρχικά, θα μπορούσαμε να τις κατηγοριοποιήσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο στήριξής τους και τη δυνατότητα μετακίνησής τους, στις **σταθερές κατασκευές** και στις **πλωτές – αγκυρωμένες κατασκευές**.

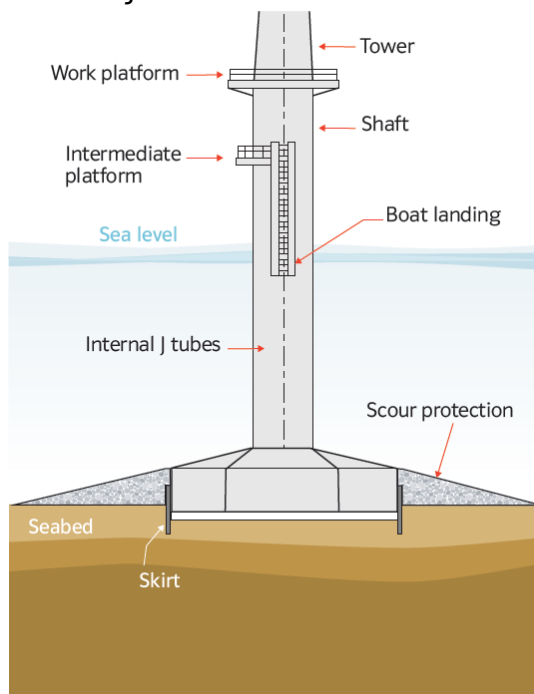
ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι σταθερές κατασκευές είναι αυτές οι οποίες στηρίζονται στον πυθμένα της θάλασσας . Ως εκ τούτου απαιτείται προσδιορισμός της σχετικής αλληλεπίδρασης μεταξύ κατασκευής, θαλάσσιου περιβάλλοντος και εδάφους. Η θεμελίωσή τους γίνεται με:

- Εδράσεις βαρύτητας (Gravity-based foundation)
- Εισχώρηση πασσάλων στο έδαφος (Piled)
- Αναρρόφηση (Suction/Bucket)

• Βαρύτητας - Gravity based

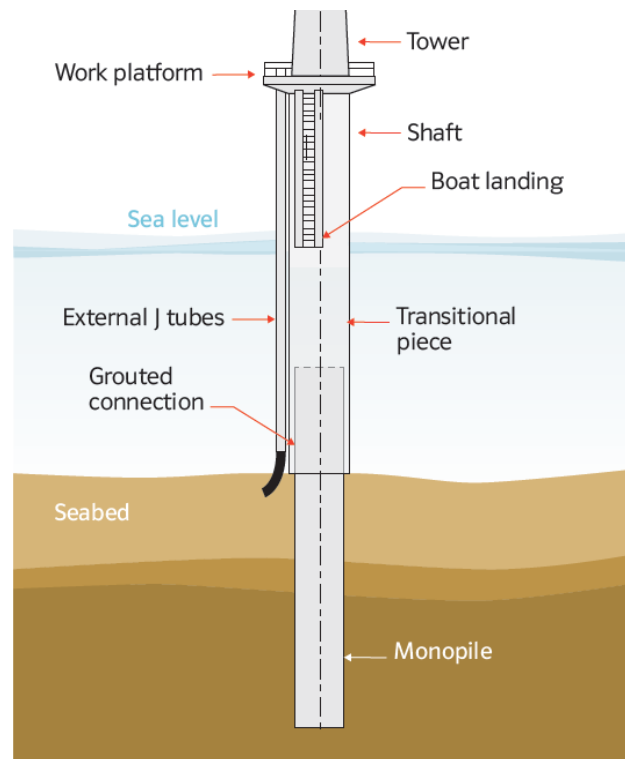
Αυτού του είδους οι κατασκευές εδράζονται μέσω θεμελίωσης πάνω στον πυθμένα της θάλασσας και λόγω του μεγάλου βάρους και της δομής τους εξασφαλίζεται η ευστάθειά τους. Έχουν ένα κεντρικό άξονα, είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα, στον οποίο στηρίζεται ο πύργος της Α/Γ, και αυτός με τη σειρά του στηρίζεται σε μια μεγάλη επίπεδη βάση από σκυρόδεμα και ασφάλι, ικανή να αντιστέκεται στα φορτία που επιβάλλονται από τον άνεμο και τα κύματα. Η μορφή της εξαρτάται από την τοποθεσία εγκατάστασης της Α/Γ . Δεν χρειάζεται να γίνει διάτρηση του εδάφους, όμως αυτό θα πρέπει πρώτα να έχει προετοιμαστεί κατάλληλα. Εγκαθίστανται σε βάθη έως 25m και μπορούν να υποστηρίξουν Α/Γ έως και 5MW.



Εικόνα 1.12: Κατασκευή στήριξης τύπου βαρύτητας - Gravity based ^[28]

- **Μονού πυλώνα – Monopile**

Πρόκειται για κατασκευές απλές στο σχεδιασμό τους, στις οποίες ο πύργος της Α/Γ στηρίζεται είτε απευθείας, είτε μέσω ενός μεταβατικού τμήματος σε ένα συνήθως κυλινδρικό χαλύβδινο πάσσαλο, ο οποίος εισχωρεί στον πυθμένα της θάλασσας. Το ενδιάμεσο μεταβατικό κομμάτι που υπάρχει μεταξύ του πύργου και της έδρασης, χρησιμεύει ώστε να αφομοιώνει τις ανοχές από την κλίση του πυλώνα και να μειώσει το χρόνο συναρμολόγησης του πύργου στο υπεράκτιο περιβάλλον. Ο χαλύβδινος σωλήνας μεταφέρει με τη βοήθεια της κάθετης και παράπλευρης γήινης πίεσης όλα τα φορτία στο έδαφος. Οι κατασκευές μονού πυλώνα τοποθετούνται σε βάθη έως 30m και μπορούν να υποστηρίξουν Α/Γ 1MW έως 2MW.



Εικόνα 1.13: Κατασκευή στήριξης μονού πυλώνα – Monopile ^[28]

- **Τριπλού πυλώνα – Tripile**

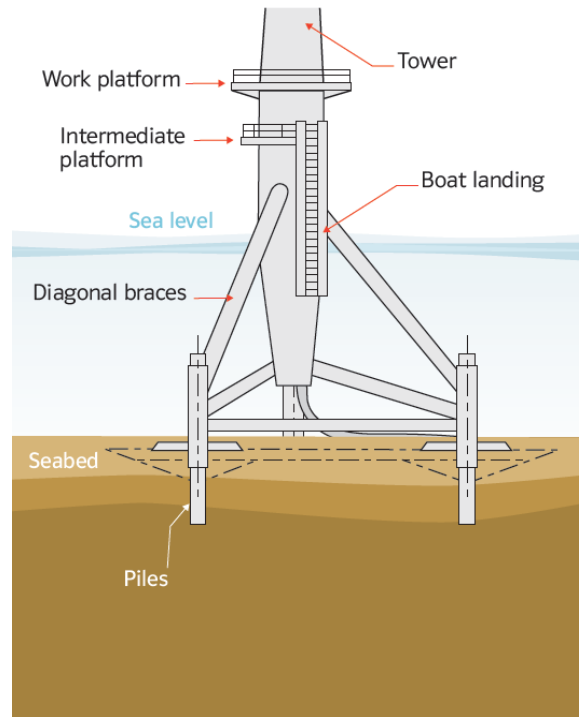
Ακολουθούν τη λογική σχεδίασης των κατασκευών μονού πυλώνα, με τη διαφορά ότι ο πύργος στηρίζεται, όχι σε ένα, αλλά σε τρεις πασσάλους που εισχωρούν κάθετα στον πυθμένα της θάλασσας. Πάνω από το νερό υπάρχει ένα μεταβατικό κομμάτι που συνδέει τους τρεις πυλώνες και πάνω σε αυτό τοποθετείται ο πύργος της Α/Γ. Αυτού του είδους η κατασκευή δίνει μεγαλύτερη σταθερότητα στην Α/Γ και μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερα φορτία και γρηγορότερα στον πυθμένα. Τοποθετούνται από 20m έως 40m βάθος. ^[31]



Εικόνα 1.14: Κατασκευή στήριξης τριπλού πυλώνα – Tripile^[29]

- **Τριπόδου-Tripod**

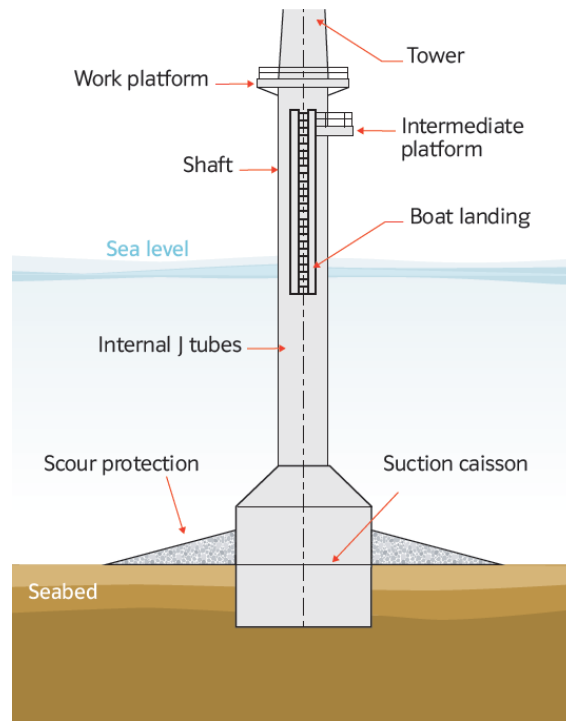
Το τρίποδο αποτελείται από ένα κύριο άξονα ο οποίος υποστηρίζεται από τρεις διαγώνιους συνδέσμους καθένας από τους οποίους οδηγεί και σε ένα πυλώνα που εισχωρεί στον πυθμένα της θάλασσας. Η κατασκευή αυτή δίνει καλή ευστάθεια και ακαμψία στην Α/Γ. Είναι κατάλληλη για βάθη από 20m έως 50m.



Εικόνα 1.15: Κατασκευή στήριξης τριπόδου-Tripod^[28]

- **Με εδράσεις κενού/αναρροφήσεως- Suction/bucket**

Οι κατασκευές αυτές συγκαταλέγονται στην κατηγορία του μονού πυλώνα, αλλά διαφέρει ο τρόπος θεμελίωσής τους. Αποτελούνται από ένα κύριο, χαλύβδινο άξονα κωνικής μορφής, με το κάτω μέρος του να αποτελείται από κοιλότητες, δημιουργώντας διαμερίσματα περιμετρικά του άξονα. Όταν εγκαθίσταται, και το κάτω άκρο του κωνικού άξονα ακουμπά τον πυθμένα, αντλείται το νερό από την εσωτερική κοιλότητα προς τα έξω. Έτσι, εμφανίζεται μια διαφορά πίεσης η οποία δημιουργεί μια δύναμη προς τα κάτω. Μόλις γίνει η εγκατάσταση της κατασκευής αφαιρούνται οι αντλίες και κάθε έξοδος σφραγίζεται με βαλβίδες. Η συμπεριφορά αυτών των κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός βάσης βαρύτητας και θεμελίωσης πασσάλων. Η διαφορά αυτών των κατασκευών από όλες τις υπόλοιπες είναι πως δεν χρειάζεται να γίνει διάτρηση ή κάποια ειδική προετοιμασία του εδάφους. Επίσης, μπορεί να μετακινηθεί ή να αφαιρεθεί εύκολα αφήνοντας νερό να κατακλύσει τα διαμερίσματα δημιουργώντας διαφορά πίεσης που έχει σαν αποτέλεσμα την ανωστική δύναμη. Τοποθετείται σε βάθος έως 25m.

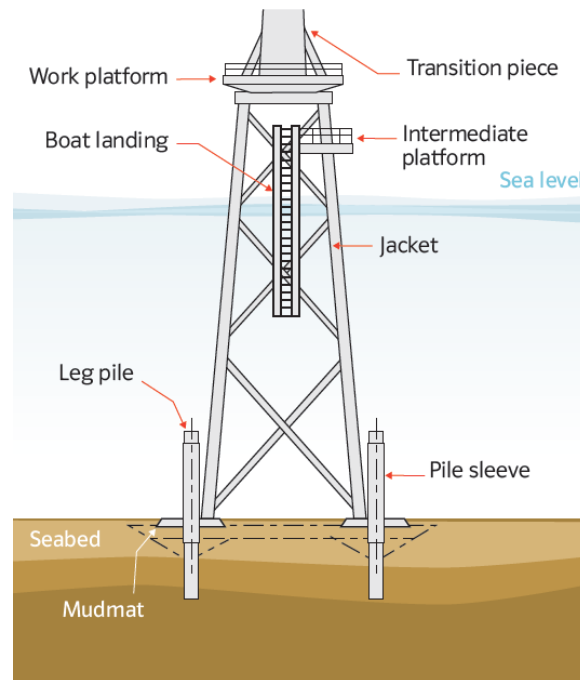


Εικόνα 1.16: Κατασκευή στήριξης με εδράσεις κενού/αναρροφήσεως- Suction/bucket ^[28]

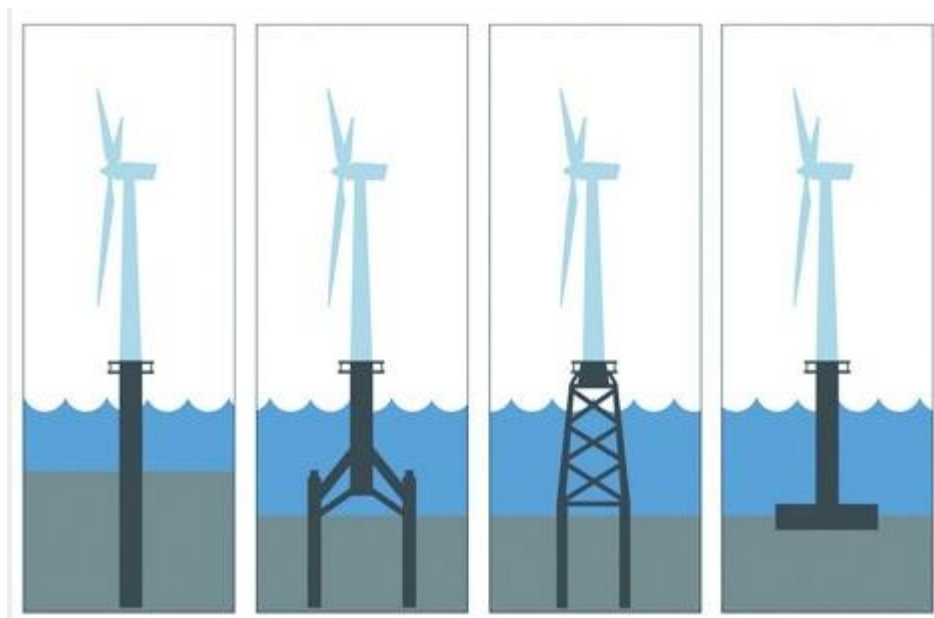
- **Μεταλλικοί πύργοι- Jacket**

Πρόκειται για μεταλλικούς πύργους (χωροδικτύωματα), οι οποίοι προκατασκευάζονται, ρυμουλκούνται, ποντίζονται και θεμελιώνονται στον θαλάσσιο πυθμένα με συστήματα βαρύτητας ή με πασσάλους σε περιπτώσεις δυσμενών γεωτεχνικών συνθηκών. Αποτελούνται από κύρια κοίλα μέλη τα οποία συνθέτουν έναν πλαισιακό φορέα και από ενδιάμεσα δευτερεύοντα στοιχεία. Χρησιμοποιούνται για βάθη από 20m έως και 50m και μπορούν να υποστηρίξουν Α/Γ 2MW έως 5MW.

Επίσης για περαιτέρω ευστάθεια και παραλαβή φορτίων, έχουν σχεδιαστεί και συνδυαστικά πύργοι με δικτύωματα (Combined Jacket and Tower), όπου το χωροδικτύωμα δεν είναι μόνο στο υποθαλάσσιο μέρος της κατασκευής αλλά φτάνει μέχρι την άτρακτο.



Εικόνα 1.17: Κατασκευή στήριξης μεταλλικού πύργου- Jacket^[28]



Εικόνα 1.18: Συγκριτική απεικόνιση των βασικών τύπων σταθερών κατασκευών στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών.^[32]

ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η ιδέα για ένα μεγάλης κλίμακας πλωτό αιολικό πάρκο εισήχθη το 1972 από τον καθηγητή του *M.I.T. William E. Heronemus*. Δεν ήταν μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990, όταν η αιολική ενέργεια άρχισε πλέον να βιομηχανοποιείται, όπου το θέμα συζητήθηκε και πάλι από την ερευνητική κοινότητα. Και ενώ μέχρι το 2003 οι υπάρχουσες υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις περιορίζονταν σε σταθερές εξέδρες και βάθη μέχρι και 30 μ, η ανάγκη για εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού και σε περιοχές με μεγαλύτερα βάθη θαλασσών, έθεσε τις πλωτές κατασκευές στήριξης ανεμογεννητριών και πάλι στο προσκήνιο.^[33]

Μια πλωτή κατασκευή στήριξης ανεμογεννητριών διαφέρει από μια σταθερή, λόγω του ότι η στήριξη προέρχεται από το νερό και όχι από το έδαφος. Αποτελείται από μια επιπλέουσα πλατφόρμα και η επαφή με το έδαφος γίνεται μέσω γραμμών αγκύρωσης που κρατούν την πλατφόρμα προσδεμένη στην θέση της. Ο πλωτήρας πρέπει να παρέχει άνωση που θα μπορεί να υποστηρίξει το βάρος της ανεμογεννήτριας και να καταστέλλει σε ικανοποιητικό βαθμό τις κινήσεις προνευασμού (pitch), περιστροφής (roll), και κατακόρυφης ταλάντωσης (heave).

Κύρια πλεονεκτήματα των πλωτών κατασκευών έναντι των σταθερών είναι ότι:

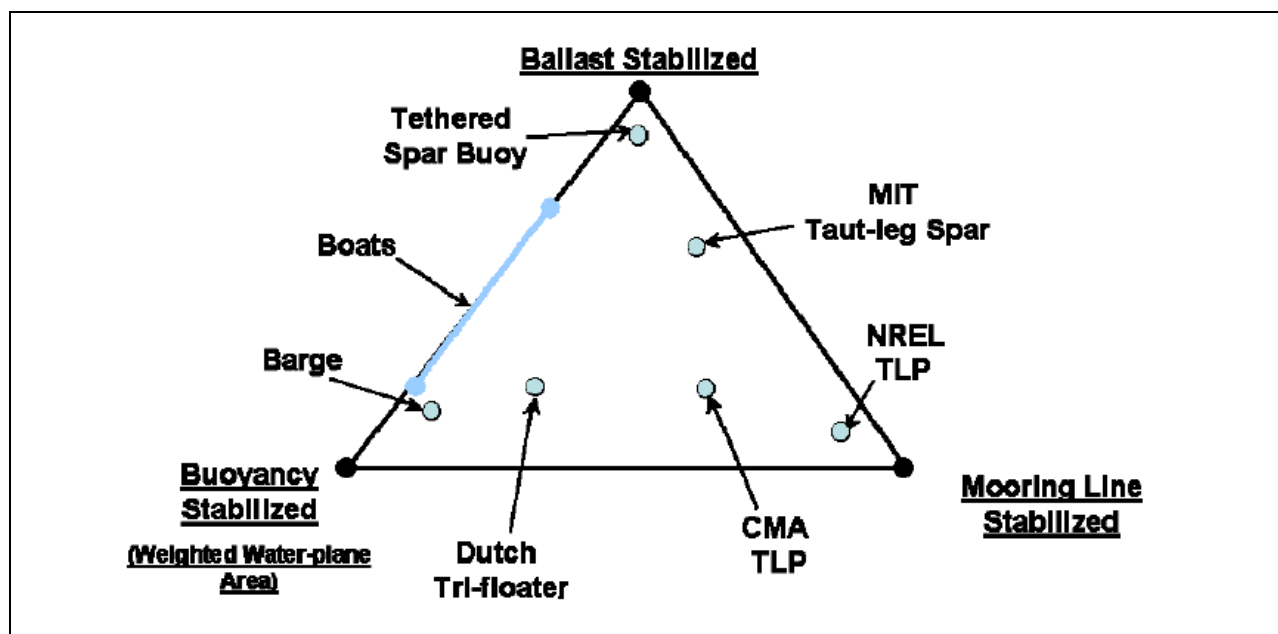
- Έχουν σημαντικά μικρότερο βάρος κατασκευής (άρα και κόστους)
- Μπορούν να συναρμολογηθούν επί ξηράς και να ρυμουλκηθούν μακριά από την ακτή, ενώ επιπλέον μπορεί να απομακρυνθούν και να αποσυναρμολογηθούν χωρίς να αφήσουν κανένα κατάλοιπο στην περιοχή τοποθέτησής τους
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε βάθη μεγαλύτερα των 50m
- Επιτρέπουν τοποθέτηση μακριά από τις ακτές ώστε να επωφελούνται ισχυρότερων και σταθερότερων ανέμων
- Δέχονται μικρότερα φορτία από την επίδραση των κυμάτων
- Έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης εκμετάλλευσης κι άλλων μορφών ενέργειας, όπως αυτή των κυμάτων ή των θαλάσσιων ρευμάτων.
- Λόγω της ευελιξίας τοποθέτησής τους, δεν εμποδίζουν θαλάσσιους δρόμους, δεν δυσχεράνουν την αλιεία ή τον τουρισμό και αποφεύγεται η οπτική όχληση.

Υπάρχουν ωστόσο και κάποιοι περιορισμοί:

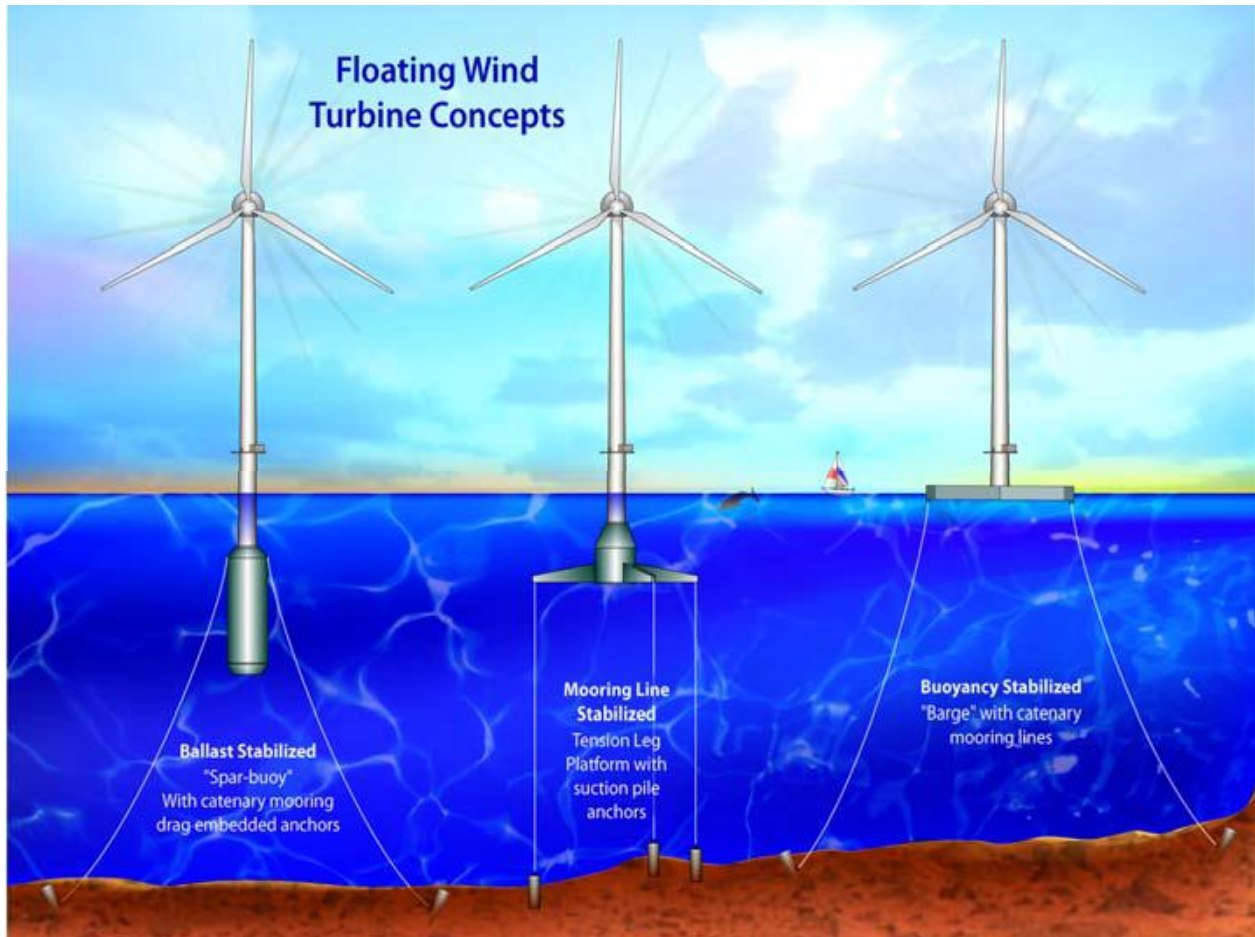
- Η ενέργεια βρίσκεται μακριά από τη στεριά άρα μακριά από τον καταναλωτή
- Λόγω των πιθανών δυσμενών θαλάσσιων συνθηκών και της μεγάλης απόστασής από τη στεριά, η βελτιστοποίηση και αξιοπιστία των πλωτών κατασκευών είναι μείζον ζήτημα
- Η προσβασιμότητα, πχ. για τις εργασίες συντήρησης ή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες
- Οι φορτίσεις που δέχονται οι κατασκευές αυτές είναι πολύ μεγάλες και άρα θα πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά πριν κατασκευαστούν
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη θαλάσσια πανίδα και χλωρίδα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν μπορούν να αναφερθούν με σιγουριά, μιας και πειραματικές τιμές δεν έχουν προλάβει να ληφθούν από τις προσφάτως εγκατεστημένες πλωτές Α/Γ.^[34]

Το βασικό χαρακτηριστικό των πλωτών κατασκευών είναι η δυνατότητα εγκατάστασής τους σε νερά μεγάλων βαθών. Υπάρχουν διαφορετικού τύπου πλωτές κατασκευές, η προέλευση των οποίων πηγάζει από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες κατασκευής και το περιβάλλον εγκατάστασής της. Έχει επικρατήσει η ομαδοποίηση τους σε τρεις κατηγορίες με βάση το είδος της προσφερόμενης ευστάθειάς τους: ^[37]

- Ευστάθεια μέσω έρματος (Ballast stabilized), κατασκευές Spar Buoy
- Ευστάθεια μέσω αγκυρώσεων (Mooring stabilized), κατασκευές Tension Leg Platform (TLP)
- Ευστάθεια μέσω άντωσης ή ισάλου επιφάνειας (Buoyancy or water-plane stabilized), κατασκευές Semi-submersible



Εικόνα 1-19: Τριγωνική απεικόνιση των διαφόρων μεθόδων προσφερόμενης ευστάθειας για πλωτές κατασκευές στήριξης ανεμογεννητριών. ^[36]



Εικόνα 1.20: Οι τρεις βασικοί τύποι πλωτών κατασκευών στήριξης ανεμογεννητριών. [36]

Φυσικά οι παραπάνω τύποι πλωτών κατασκευών μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για βέλτιστη απόδοση και εξυπηρέτηση των εκάστοτε αναγκών και συνθηκών λειτουργίας της πλωτής ανεμογεννήτριας.

1. Ευστάθεια μέσω έρματος - Ballast stabilized

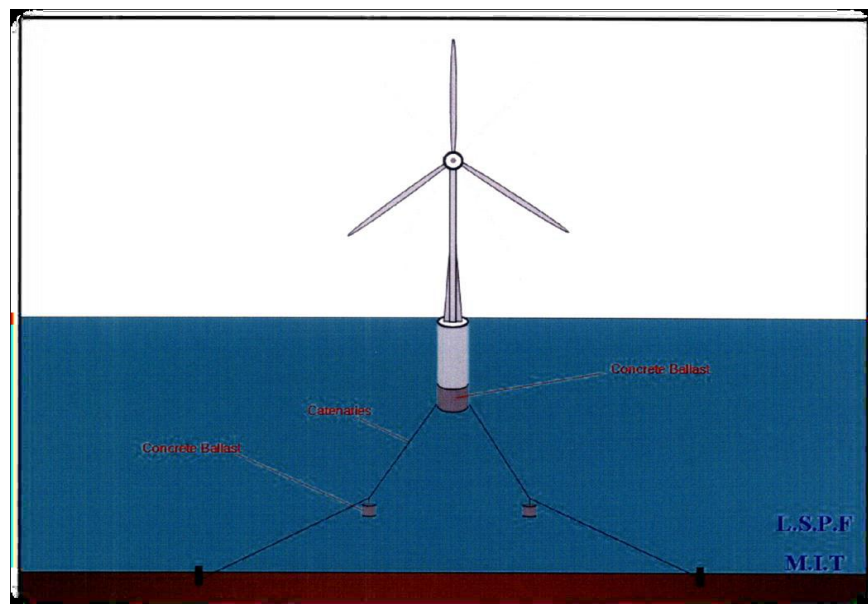
Στις κατασκευές αυτές επιτυγχάνεται ευστάθεια με τη βοήθεια κατάλληλης ποσότητας και σωστά τοποθετημένου έρματος (σκυρόδεμα, στέρεο σιδηρομέταλλευμα, χαλίκι) ώστε το κέντρο βάρους να είναι χαμηλότερα από το κέντρο άντωσης. Το έρμα προσδίδει στο σύστημα υψηλή ροπή αντίστασης και μοχλοβραχίονα επαναφοράς που αποσβένει τον προνευτασμό και τον διατοιχισμό. Παράλληλα, λόγω του σχετικά μεγάλου βυθίσματος της συγκεκριμένης διάταξης, δεν είναι τόσο έντονες οι κατακόρυφες ταλαντώσεις.

- **Spar-buoy**

Τυπικό παράδειγμα σε αυτήν την κατηγορία αποτελεί ο τύπος spar-buoy (λεπτόγραμμος κατακόρυφος κύλινδρος - ανωστικό σώμα) . Η τεχνολογία spar-buoy στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1996 για το Oryx Neptune. Αυτού του είδους οι κατασκευές, εύκολες ως προς την κατασκευή και εγκατάστασή τους, αποτελούνται από ένα μεγάλο κυλινδρικό σωλήνα ο οποίος βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση. Στο επάνω μέρος του κυλινδρικού σωλήνα υπάρχουν υδατοστεγείς δεξαμενές, χωρητικότητας μεγάλων ποσοτήτων αέρα, ενώ στο κάτω μέρος του βρίσκονται δεξαμενές έρματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται:

- χαμηλότερο κέντρο βάρους,
- καλύτερος έλεγχος άντωσης και ευστάθειας,
- εξισορρόπηση των πιέσεων και
- μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής.

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ευστάθεια το βύθισμα του κυλινδρικού σώματος είναι μεγαλύτερο από το ύψος εξάλων. Η μεγάλη διάμετρος των πτερυγίων της φέρουσας ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητη για την ικανοποιητική απόδοση της ανεμογεννήτριας και καθιστά ευνοϊκότερη την τοποθέτηση της κατασκευής σε βαθύτερα νερά. Οι αγκυροβολούνται είτε με γραμμές αγκύρωσης αλυσοειδούς καμπύλης (catenary moorings) είτε με κατακόρυφα τεντωμένα συρματόσχοινα (taught leg moorings).^[37]

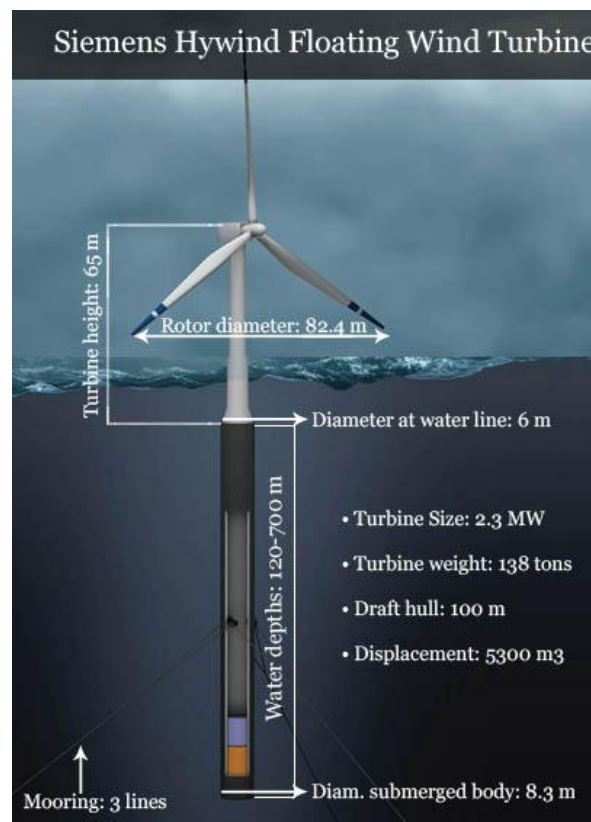


Εικόνα 1.21: Πλωτή κατασκευή στήριξης ανεμογεννήτριας τύπου spar-buoy .^[38]

- Παράδειγμα: Hywind

Στη Βόρεια Θάλασσα στα ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας εγκαταστάθηκε το 2009 η πλωτή κατασκευή Hywind, τύπου spar-buoy, της εταιρίας Statoil . Είναι παγκοσμίως η πρώτη σε λειτουργία μεγάλης δυναμικότητας και βαθέων υδάτων υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Το πλωτό μέρος της κατασκευής αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο ερματισμένο με νερό και πλάκες. Εκτείνεται 100 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και είναι συνδεδεμένο στον πυθμένα της με ένα σύστημα ακύρωσης τριών κλάδων. Φέρει ανεμογεννήτρια Siemens 2,3 MW.

Η κατασκευή Hywind είναι ιδανικά προσαρμοσμένη για εγκατάσταση σε ύδατα μεγάλων βαθών, που όμως δεν είναι τόσο απομακρυσμένα από περιοχές μεγάλων απαιτήσεων ενέργειας, ενώ παρέχει σημαντική ευελιξία ως προς την τοποθέτηση της. Ο πρωταρχικός σκοπός της τεχνολογίας Hywind, δεν ήταν τόσο ο έλεγχος της απόδοσης της όσων αφορά στην ικανότητα παραγωγής ενέργειας, όσο η εξέταση της συμπεριφοράς της πλωτής κατασκευής σε φορτίσεις ανέμου και κυμάτων. Από τη έναρξη λειτουργίας της έως το 2010, η Hywind είχε αποδώσει 15 MWh παραγόμενης ενέργειας.^[39]



Εικόνα 1.22: Απεικόνιση και περιγραφή χαρακτηριστικών της κατασκευής Hywind.^[40]



Εικόνα 1.23: Ρυμούλκηση της κατασκευής Hywind^[41]

2. Ευστάθεια μέσω αγκυρώσεων - Mooring stabilized

Σε αυτήν την περίπτωση η κατασκευή εξασφαλίζει ευστάθεια χάρη στις τεντωμένες κατακόρυφες γραμμές αγκυρωσης. Κατά την εγκατάσταση της διάταξης εφαρμόζεται προένταση στα συρματόσχοινα. Επιπλέον, το βύθισμα στο οποίο γίνεται η πρόσδεση του πλωτήρα είναι μεγαλύτερο από αυτό στο οποίο θα ισορροπούσαν οι δυνάμεις βαρύτητας και άντωσης, εξασφαλίζοντας έτσι μια περίσσεια άντωσης, η οποία ουσιαστικά αυξάνει περαιτέρω την προένταση. Τυπικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής είναι οι πλατφόρμες υπό υψηλή τάση στο σημείο πρόσδεσης (Tension Leg Platforms, **TLP**).

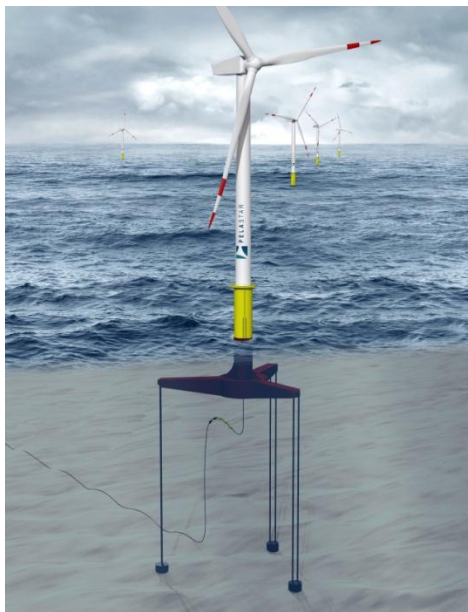
• **Κατασκευές TLP (Tension Leg Platforms)**

Οι TLP είναι πλωτές κατασκευές αγκυρωμένες υπό κατακόρυφη προένταση, με ήδη υπάρχουσες εφαρμογές στον τομέα της υπεράκτιας εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου και πλέον με εφαρμογές στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Η πλατφόρμα είναι μόνιμα αγκυρωμένη με κλάδους αγκύρωσης μεμονωμένα ή ομαδοποιημένα προσδεδεδμένους στα άκρα της κατασκευής, οι οποίοι ονομάζονται «πόδια» προέντασης (tension leg). Χαρακτηριστικό του σχεδιασμού αυτών των κλάδων αγκύρωσης είναι ότι έχουν σχετικά υψηλή αξονική ακαμψία (χαμηλή ελαστικότητα), ώστε να περιορίζονται κατά το δυνατόν οι κατακόρυφες κινήσεις της κατασκευής. Ο κυρίως όγκος της κατασκευής σταθεροποιείται χαμηλότερα της ισάλου επιφάνειας ώστε να περιορίζονται τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται από τα κύματα.

Στον τομέα των πλωτών ανεμογεννητριών μελέτες έχουν δείξει ότι οι TLP κατασκευές παρουσιάζουν καλή υδροδυναμική συμπεριφορά και είναι αποτελεσματικές ως προς τον περιορισμό έντονων κινήσεων προνευατισμού και διατοιχισμού της πλωτής ανεμογεννήτριας, ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες θαλασσών. ^[37] Μπορούν να φέρουν ανεμογεννήτρια ισχύος έως και 5 MW, ενώ είναι δυνατή η τοποθέτησή τους σε νερό βάθους έως και 200 μέτρων. ^{[42], [43]}

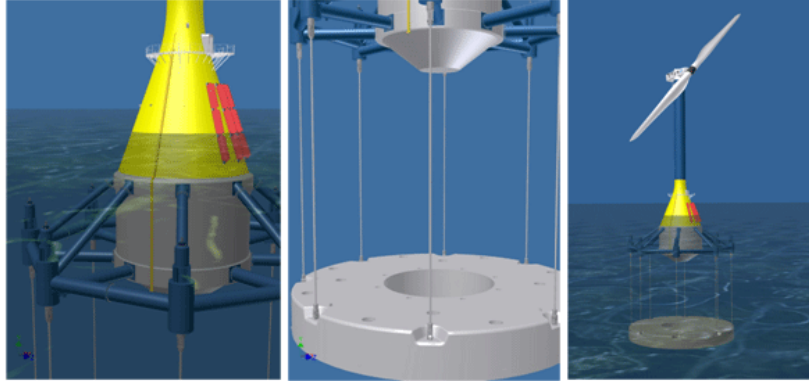
Όπως σε κάθε περίπτωση έτσι κι εδώ η κατασκευή θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη με αρκετά μεγάλη προσοχή. Σε αντίθετη περίπτωση, οι κλάδοι αγκύρωσης της TLP ενδέχεται να υποστούν απώλεια προέντασης με αποτέλεσμα να ανατραπεί η γάστρα. Η τυχόν διαγωγή της κατασκευής ή η τάση περιστροφής της λόγω μεταβολών της κατεύθυνσης του ανέμου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας διάταξης τύπου TLP. ^[44]



Εικόνα 1.24: Πλωτή κατασκευή τύπου TLP ^[45]

- **Παράδειγμα: Blue H**

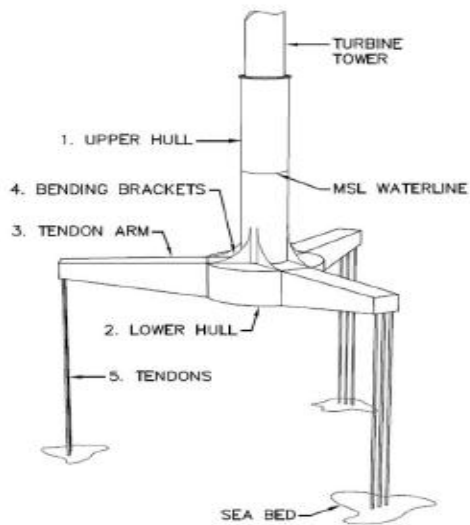
Ένας τρόπος για τη μείωση των περιορισμών βλάβης είναι η κατασκευή μιας TLP πλατφόρμας με ικανοποιητική επάρκεια εκτοπίσματος. Μια τέτοια κατασκευή είναι η Submerged Deepwater Platform (SDP) της Blue H. Η SDP αποτελείται από ένα κοίλο σώμα το οποίο είναι προσδεμένο μέσω κλάδων αγκύρωσης σε ένα αντίβαρο τοποθετημένο στον πυθμένα, που λειτουργεί ως θεμέλιο. Διατηρώντας το ανωστικό σώμα ημιβυθισμένο στο νερό, επιτυγχάνεται η απαραίτητη ανωστική δύναμη η οποία και εξασφαλίζει την μόνιμη προένταση των γραμμών αγκύρωσης.



Εικόνα 1.25: Απεικόνιση της διάταξης της κατασκευής SDP της Blue H^[37]

- Παράδειγμα: TLTP

Άλλη μια υποκατηγορία των κατασκευών TLP στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι η Tension Leg Turbine Platform (TLTP). Το κύριο μέρος της γάστρας φέρει τον πύργο της ανεμογεννήτριας και τα τρία ποντόνια ή οι βραχίονες στηρίζουν τις δύσκαμπτες αλυσίδες του συστήματος αγκύρωσης. Οι γραμμές αγκύρωσης είναι κατασκευασμένες από αλυσιδωτούς κλάδους, ενώ ενδέχεται στο μέλλον να αποτελούνται είτε από χάλυβα είτε από συνθετικά υλικά. Η μεγάλη διαφοροποίηση στις γραμμές αγκύρωσης οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν επαρκείς ροπές επαναφοράς στην εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας. Σε αντίθεση με τις κατασκευές TLP όπου η ελαχιστοποίηση της κατακόρυφης κίνησης είναι απαραίτητα για λόγους ασφαλείας και προστασίας των αγωγών (risers), η TLTP έχει βελτιστοποιηθεί για την αποφυγή ή τη μείωση συντονισμού των συχνοτήτων των κυματισμών με τις φυσικές συχνότητες κίνησης της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 1.26: Απεικόνιση της διάταξης της κατασκευής Tension Leg Turbine Platform (TLTP).^[37]

3. Ευστάθεια μέσω άντωσης ή ισάλου επιφάνειας - Buoyancy or water-plane stabilized

Στην τρίτη κατηγορία η κατασκευή επιτυγχάνει ευστάθεια εκμεταλλευόμενη το μέγεθος της ισάλου επιφάνειας και την κατανομή άντωσης, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται γραμμές αγκύρωσης αλυσοειδούς καμπύλης (catenary moorings). Τυπικό παράδειγμα είναι οι φορηγίδες (barges) και οι πλωτές ημι-βυθισμένες κατασκευές (semi-submersibles).



Εικόνα 1.27: Πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή στήριξης ανεμογεννήτριας

- **Semi-submersibles**

Πρόκειται για τις πλωτές ημιβυθισμένες εξέδρες, κατασκευές ήδη εφαρμοσμένες στην τεχνολογία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Μια πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή εξασφαλίζει την άντσή της μέσω υδατοστεγών ερματισμένων ποντοινιών (οριζόντιας ή συνηθέστερα κατακόρυφης διάταξης) τα οποία βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το ανώτερο κατάστρωμα, αν υπάρχει, μπορεί να απέχει αρκετά από την ίσαλο επιφάνεια χάριν σχεδιασμού για επαρκή ευστάθεια, επομένως και να περιορίζεται η διαβροχή του από τα κύματα. Τα ποντόνια καθώς και το κατάστρωμα ή το σημείο στήριξης της ανεμογεννήτριας συνδέονται μεταξύ τους με κατασκευαστικές δοκούς (μπρακέτα).

Με τον κυρίως όγκο της κατασκευής βυθισμένο όσο το δυνατόν περισσότερο, η πλωτή ημιβυθισμένη κατασκευή επηρεάζεται λιγότερο από τις φορτίσεις λόγω κυματισμών. Λόγω της μικρής ισάλου επιφάνειας ωστόσο είναι επιρρεπής σε εναλλαγές φορτίσεων οπότε και θα πρέπει να είναι κατάλληλα μελετημένα ο ερματισμός και η διαγωγή της για τη διατήρηση της ευστάθειάς της.

Όπως εξάλλου δηλώνει και το όνομα της, μια semi-submersible κατασκευή δεν μπορεί να είναι ποτέ πλήρως βυθισμένη. Τα ύφαλα της μεταβάλλονται μέσω ερματισμού και αφερματισμού της, διαδικασία που πραγματοποιείται για τον καθορισμό της απαραίτητης άντωσης και διαγωγής

καθώς και για τη ρυμούλκηση και μεταφορά της στο επιθυμητό σημείο εγκατάστασης. Ένα από τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι πως κατασκευάζονται και συναρμολογούνται πλήρως στην ξηρά και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο εγκατάστασής τους.^[46]

- Παράδειγμα: Windfloat

Μια πρόσφατη εφαρμογή της τεχνολογίας πλωτών ημιβυθισμένων κατασκευών στήριξης ανεμογεννητριών είναι η Windfloat της εταιρείας Principle Power, με την εγκατεστημένη ισχύος 2MW ανεμογεννήτρια της να βρίσκεται σε λειτουργία από το 2011 στα ανοιχτά των ακτών της Πορτογαλίας. Σημαντικό το πλεονέκτημα της να μπορεί να συναρμολογηθεί εξ' ολοκλήρου στη στεριά και μετά τον δεξαμενισμό της να ρυμουλκηθεί στο επιθυμητό σημείο εγκατάστασης, αλλά και το γεγονός ότι ακόμα και η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν τον δεξαμενισμό, μειώνοντας έτσι το επιπλέον κόστος λόγω σκαφών ρυμούλκησης και βαρέας ανυψωτικής ικανότητας σκαφών εγκατάστασης^[47]. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της WindFloat αμβλύνουν την επίδραση των κυματισμών και της τυρβώδους ροής, καθιστώντας δυνατή την εγκατάστασή της σε νερά που ξεπερνούν τα 50 μέτρα βάθος, σε σημεία δηλαδή μη ορατά από τη στεριά και όπου υπάρχει αυξημένο αιολικό δυναμικό.

Η WindFloat είναι εφοδιασμένη με οκταγωνικές πλάκες στη βάση του κάθε κυλίνδρου. Οι πλάκες βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση κίνησης του συστήματος διότι προσθέτουν αδρανειακή αντίσταση και αποσβένουν την τυρβώδη ροή. Επιπλέον, με τον έλεγχο διαγωγής της WindFloat μετριάζεται η επίδραση των δυνάμεων ώσης από τον άνεμο και εξασφαλίζεται έτσι η βελτιστοποίηση της απόδοσης παραγωγής ενέργειας μετά από αλλαγές στην ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου.

Για την αγκύρωση χρησιμοποιούνται συμβατικοί κλάδοι, αλυσιδωτοί ή πολυεστερικοί για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος.

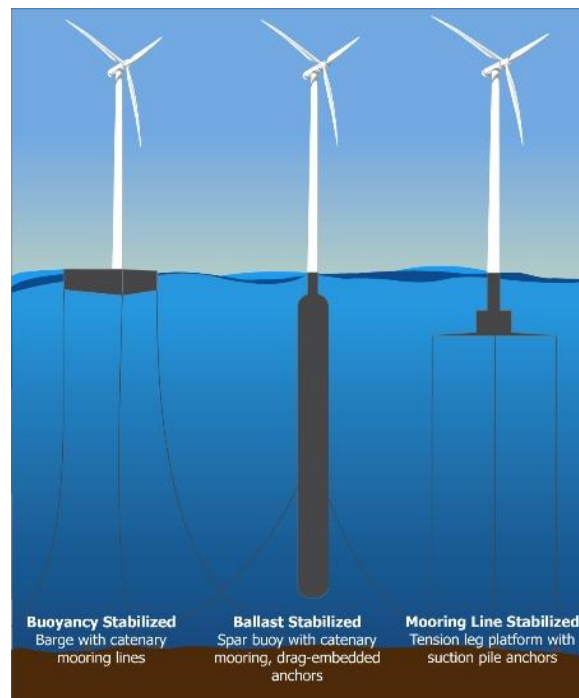
Η εξέδρα Windfloat, είναι περίπου κατά 60% ελαφρύτερη από μια αντίστοιχη τύπου spar και το βύθισμά της κυμαίνεται στα 17 μέτρα συγκριτικά με τα 120 μέτρα μιας spar. Ωστόσο, η υδροδυναμική συμπεριφορά της spar είναι ελαφρώς καλύτερη από αυτή της πλωτής ημιβυθισμένης.^{[37], [48]}

Προδιαγραφές WindFloat

- Ονομαστική ισχύς \approx 3.0-10MW
- Διάμετρος πτερυγίων \approx 120-170m
- Ύψος πύργου ανεμογεννήτριας \approx 80-100 m
- Βύθισμα < 20 m
- Βάθος Νερού > 40 m
- Συμβατικές γραμμές αγκύρωσης (4 κλάδοι)



Εικόνα 1.28: Απεικόνιση της πλατφόρμας WindFloat ^[48]



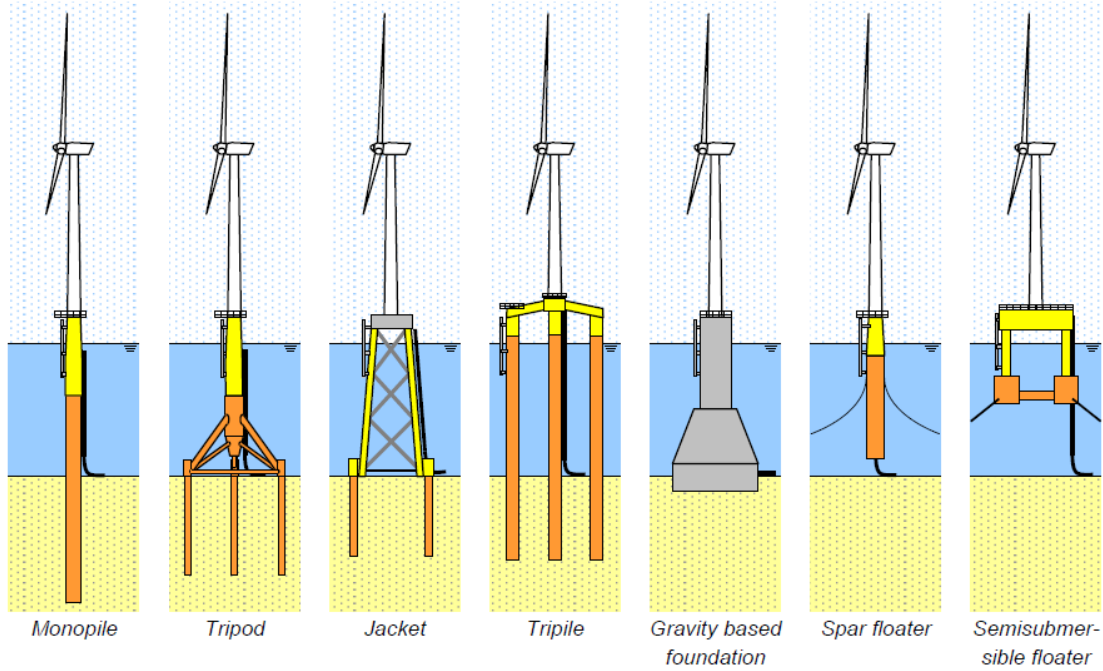
Εικόνα 1-29: Συγκριτική απεικόνιση των βασικών τύπων πλωτών κατασκευών στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών. ^[49]

| A/A | Όνομα έργου | Χώρα | Τεχνολογία | Ελάχιστο απαιτούμενο βάθος νερού (σε μέτρα) | Στάδιο παρούσας ανάπτυξης | Στάδιο εγκατάστασης |
|-----|-------------------------------------|-----------------------|------------|---|--|--|
| 1 | Statoil HyWind | Νορβηγία | Spar | 120-700m | Πειράματα σε φυσική κλίμακα από το Σεπτέμβριο του 2009 | Σε εξέλιξη η νέα γενιά. Ολοκλήρωση κατασκευής το 2015/2016 |
| 2 | Principle Power WindFloat | ΗΠΑ | Semi Sub | 50m | Πειράματα σε φυσική κλίμακα από τον Οκτώβριο του 2011 | Έναρξη λειτουργίας προτύπου υπό φυσική κλίμακα τον Οκτώβριο του 2011(Πορτογαλία).Επιπλέον εγκαταστάσεις στην ΕΕ και τις ΗΠΑ |
| 3 | Toda Construction et.al.Hybrid Spar | Ιαπωνία | Spar | 100m | Πρότυπο σε κλίμακα 1:2 με ανεμογεννήτρια 100kW από τον Ιούνιο του 2012. Περαιτωμένος σχεδιασμός. | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 2MW Hitachi/JSW για τα μέσα του 2013 (νησί Kabashima, Japan) |
| 4 | Japan Marine United Advanced Spar | Ιαπωνία | Spar | 50m | Ολοκλήρωση πειραμάτων σε κλίμακα 1:50 | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα για χρήση με υποσταθμό. Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 7MW Mitsubishi 2014/2015 (Fukushima) |
| 5 | Mitsui SemiSub | Ιαπωνία | Semi Sub | Μη διαθέσιμο | Τελικός σχεδιασμός | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 2MW Mitsubishi 2013/2014 (Fukushima) |
| 6 | MODEC (Mitsui) Skwid | Ιαπωνία | Floater | Μη διαθέσιμο | Κατασκευή του προτύπου υπό κλίμακα | Πρότυπο υπό κλίμακα προγραμματισμένος για το φθινόπωρο του 2013 (Saga,Japan) |
| 7 | DeepCwind | ΗΠΑ | Semi Sub | Μη διαθέσιμο | Πρότυπο υπό κλίμακα | Πρότυπο σε κλίμακα 1:8 με ανεμογεννήτρια 6MW, Maine (USA). Πρότυπο σε φυσική κλίμακα προγραμματισμένο για το 2016 |
| 8 | HiPR Wind | ΕΥ-(Ισπανία-Γερμανία) | Semi Sub | 80m, βύθισμα λειτουργίας στα 24m για γεννήτρια 10MW | Στάδιο σχεδιασμού | Πρωτότυπο σε κλίμακα 1:10 με ανεμογεννήτρια 1.5MW που θα εγκατασταθεί στις ακτές του Bilbao το 2013 |
| 9 | Nass et Wind WinFlo | Γαλλία | Floater | 50m | Προετοιμασία κατασκευής | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 1MW Vergnet 2014 (Γαλλία) |

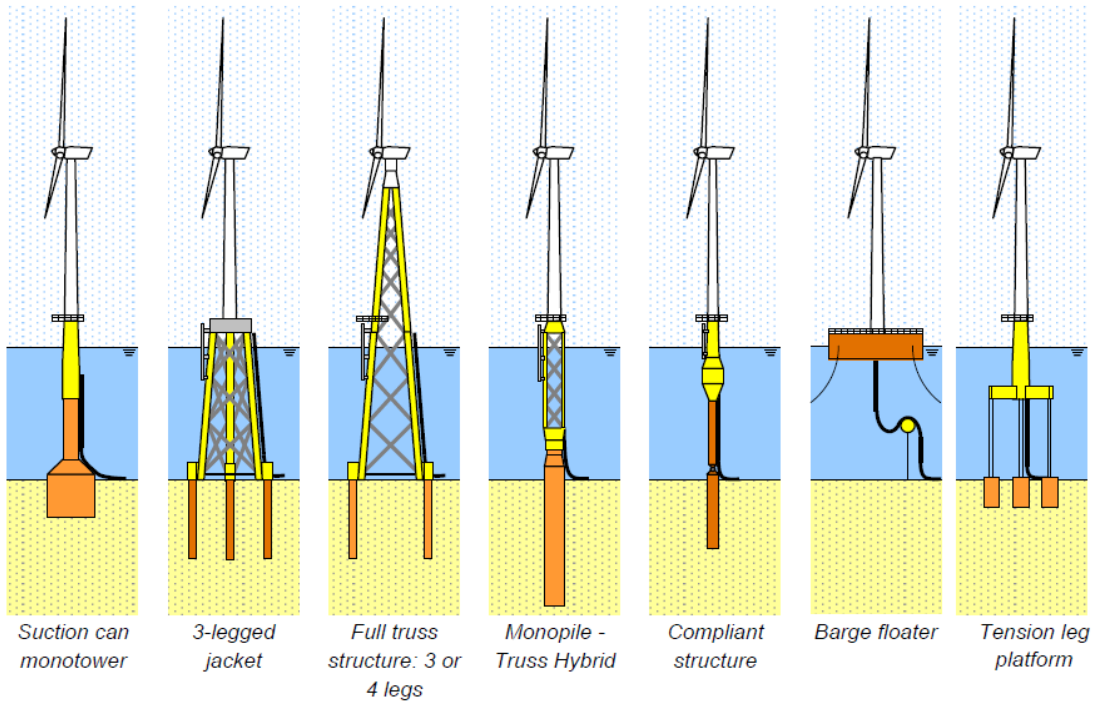
| A/A | Όνομα έργου | Χώρα | Τεχνολογία | Ελάχιστο απαιτούμενο βάθος νερού (σε μέτρα) | Στάδιο παρούσας ανάπτυξης | Στάδιο εγκατάστασης |
|-----|---------------------------|----------|------------|---|--|--|
| 10 | GICON | Γερμανία | TLP | 25m | Ολοκλήρωση πειραμάτων σε κλίμακα 1:25 - Κατασκευαστική μελέτη | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα για το 2014 στη Γερμανική Βαλτική Θάλασσα |
| 11 | Technip Vertiwind | Γαλλία | Floater | Μη διαθέσιμο | Πειράματα σε κλίμακα 1:2 με ανεμογεννήτρια 35kW | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 2MW 2014 (Γαλλία) |
| 12 | Pelagic Power | Νορβηγία | Floater | Μη διαθέσιμο | Μη διαθέσιμο | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα για το 2014 στις Ισπανικές ακτές |
| 13 | Mitsubishi | Ιαπωνία | Semi Sub | Μη διαθέσιμο | Στάδιο τελικής μελέτης | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 7MW Mitsubishi 2014/2015 (Fukushima) |
| 14 | Blue H TLP | Ολλανδία | TLP | 50m | Το πρώτο στάδιο πειραμάτων μοντέλου υπό κλίμακα πραγματοποιήθηκε 2008. Το δεύτερο στάδιο σε φυσική κλίμακα πραγματοποιήθηκε το 2012. | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 5MW το 2014/2015 |
| 15 | Poseidon Floating Power | Δανία | Floater | 40m | Πρότυπο υπό κλίμακα | Νέος Πρότυπο σχεδιασμένος για το 2014/2015 |
| 16 | Nautica AFT | ΗΠΑ | Spar | Μη διαθέσιμο | Προσομοιώσεις σε εξέλιξη | Φυσική κλίμακα προγραμματισμένη για το 2014 |
| 17 | IDEOL Floater (Floatgen) | Γαλλία | Floater | 35m | Πρωτότυπο το 2013 | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 2MW Gamesa και 3MW (Acciona) στην Ισπανία |
| 18 | Technip INFLOW Floater | Γαλλία | Floater | Μη διαθέσιμο | Μη διαθέσιμο | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα με ανεμογεννήτρια 2MW στη Γαλλία |
| 19 | Pelastar TLP | ΗΠΑ | TLP | 65m | Ολοκλήρωση σχεδιασμού, κοστολόγησης και πειραμάτων σε δεξαμενή | Πρότυπο σε φυσική κλίμακα μέχρι το 2015 στο Ηνωμένο Βασίλειο εάν χρηματοδοτηθεί από το ETI |
| 20 | DIWET Semisub | Γαλλία | Semi Sub | Μη διαθέσιμο | Στάδιο σχεδιασμού | Μη διαθέσιμο |
| 21 | Iberdrola ETORGAI FLOTTEK | Ισπανία | TLP | Μη διαθέσιμο | Πειράματα σε δεξαμενή το Δεκέμβριο του 2012 | Μη διαθέσιμο |

| A/A | Όνομα έργου | Χώρα | Τεχνολογία | Ελάχιστο απαιτούμενο βάθος νερού (σε μέτρα) | Στάδιο παρούσας ανάπτυξης | Στάδιο εγκατάστασης |
|-----|--------------------------|------------------|------------|---|--|---------------------|
| 22 | Gusto TriFloater Semisub | Ολλανδία | Semi Sub | 50m | Ολοκλήρωση πειραμάτων σε δεξαμενή | Μη διαθέσιμο |
| 23 | Hexicon Floater | Σουηδία | Floater | 26m | Στάδιο σχεδιασμού | Μη διαθέσιμο |
| 24 | Hitachi Semisub | Ιαπωνία | N/A | Μη διαθέσιμο | Μη διαθέσιμο | Μη διαθέσιμο |
| 25 | Mitsui TLP | Ιαπωνία | TLP | 60m | Σχεδιασμός για χρήση ανεμογεννητριών 5MW σε εξέλιξη | Μη διαθέσιμο |
| 26 | Ocean Breeze | Ηνωμένο Βασίλειο | TLP | 60m | Μη διαθέσιμο | Μη διαθέσιμο |
| 27 | Sea Twirl | Σουηδία | Spar | Μη διαθέσιμο | Πρότυπο υπό κλίμακα | Μη διαθέσιμο |
| 28 | Shimizu Tower | Ιαπωνία | Semi Sub | 25m | Ολοκλήρωση προσομοιώσεων | Μη διαθέσιμο |
| 29 | Sway Floating Tower | Νορβηγία | Spar | 55-400m | Πειράματα σε μοντέλα υπό κλίμακα σε εξέλιξη | Μη διαθέσιμο |
| 30 | Wind Lens Floater | Ιαπωνία | Semi Sub | Μη διαθέσιμο | Πειράματα σε μοντέλα υπό κλίμακα το Δεκέμβριο του 2011 | Μη διαθέσιμο |
| 31 | Wind Sea Floater | Νορβηγία | Floater | 25-30m | Ολοκλήρωση πειραμάτων σε δεξαμενή και προσομοιώσεων | Μη διαθέσιμο |

Πινάκας 1.1: Εφαρμογές υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε εξέλιξη (Πηγή: Floating offshore Wind Foundations: Industry Consortia and projects in the United States, Europe and Japan – Main(e) International Consulting LLC , May 2013) ^[50]

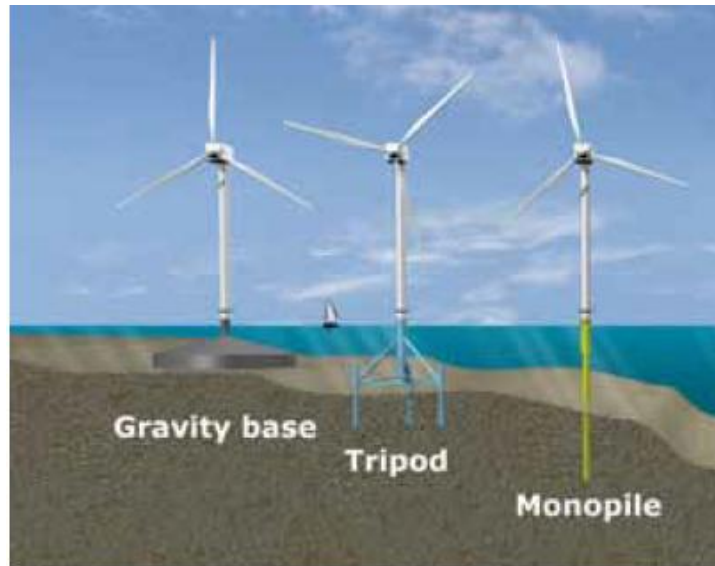


Εικόνα 1.30: Συνηθέστεροι τύποι κατασκευών στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Πηγή: UpWind Executive Summary, January 2011)^[51]



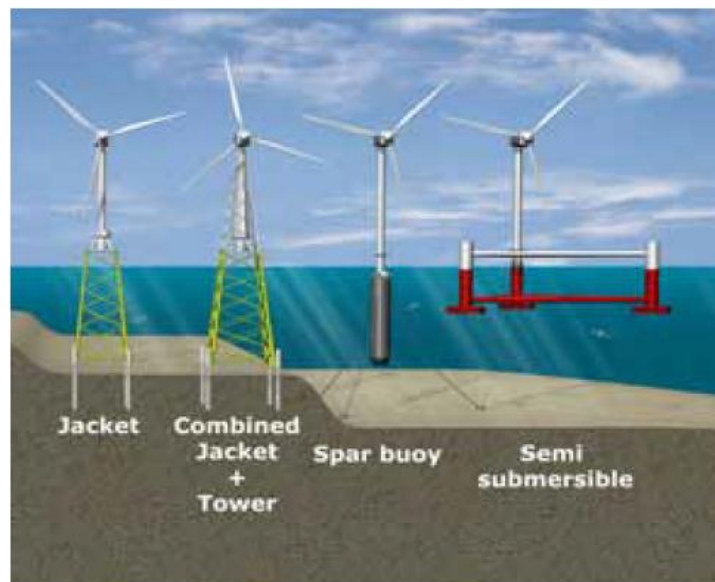
Εικόνα 1.31: Προτεινόμενοι – σε εξέλιξη τύποι κατασκευών στήριξης υπεράκτιων Α/Γ (Πηγή: UpWind–Executive Summary, January 2011)^[51]

Μια υποδιαίρεση των εξεδρών μπορεί να γίνει και με βάση το βάθος εγκατάστασής τους. Οι σταθερές κατασκευές ενδείκνυνται για μικρού ή μεσαίου βάθους θάλασσες, ενώ οι πλωτές για μεγαλύτερα βάθη θαλασσών:



SOURCE: Carbon Trust as published in Recharge 26/06/09.

Εικόνα 1.32: Μικρών και μεσαίων βαθών εδράσεις υπερράκτιων Α/Γ (Πηγή: EWEA – Offshore Report 2009)



SOURCE: Carbon Trust as published In Recharge 26/06/09.

Εικόνα 1.33: Μεσαίων και μεγάλων βαθών εδράσεις υπερράκτιων Α/Γ (Πηγή: EWEA – Offshore Report 2009)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η πλειονότητα των πλωτών κατασκευών, και ιδιαίτερα οι διάφορες μορφές και τα είδη που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σύνθετες κατασκευές με αποτέλεσμα η διαστασιολόγησή τους, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης της κατασκευής, να εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες.

Η ασφάλεια της κατασκευής μπορεί να εξασφαλισθεί όταν προσδιορισθεί με επαρκή αξιοπιστία η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής και του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο λειτουργεί καθ' όλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της. Ο αλληλεπίδραση αυτή προσδιορίζεται με υπολογισμό των εκτιμηθέντων φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή, με μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόκρισης της (κινήσεις, παραμορφώσεις, τάσεις) και με κατάλληλα κριτήρια σχεδίασης. Η συμπεριφορά της κατασκευής τόσο σε συνθήκες λειτουργίας όσο και στις ακραίες αναμενόμενες περιβαλλοντολογικές συνθήκες είναι καθοριστική για τη συνολική μελέτη.

Οι αρχές σχεδίασης για τις πλωτές θαλάσσιες κατασκευές περιγράφονται με επάρκεια στις προδιαγραφές των διάφορων νηογνωμόνων, τις υποδείξεις των οργανισμών και συναφών φορέων καθώς και στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία.

Για την εξέταση των οικονομικών απαιτήσεων μιας κατασκευής είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί τόσο γενικός όσο και λεπτομερής υπολογισμός για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της πλατφόρμας, ώστε να προσομοιάζεται ικανοποιητικά η συμπεριφορά της πραγματικής κατασκευής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται πειράματα σε πρότυπο κατασκευής τύπου «semi-submersible». Η κατασκευαστική αρχή που διέπει τις πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές και στην οποία οφείλεται η ιδιαίτερη μορφολογία τους, καθορίζεται από την προσπάθεια βελτίωσης της δυναμικής τους συμπεριφοράς, με μετάθεση του μεγαλύτερου τμήματος του ανωστικού όγκου σε μεγαλύτερα βυθίσματα.

Στα πλαίσια μιας αξιόπιστης μελέτης πλωτών ημιβυθισμένων κατασκευών θα πρέπει να δοθεί προσοχή σε τάσεις, παραμορφώσεις και ισχυρά δυναμικά φαινόμενα, ιδιαίτερα όσον αφορά στην καταπόνηση των πυλώνων που δέχονται συνδυασμένη επίδραση διατμητικών δυνάμεων και υδροδυναμικών πιέσεων.

Τα κύρια βήματα κατά τη διαδικασία μελέτης και σχεδίασης μιας offshore εγκατάστασης μπορούν να ταξινομηθούν γενικά ως εξής:

- Προσδιορισμός των περιβαλλοντολογικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας
- Προσδιορισμός των φορτίων που επάγονται στην κατασκευή από το περιβάλλον και της απόκρισής της σε αυτά
- Εκλογή και εφαρμογή μεθόδου για στατική και δυναμική αντοχή της κατασκευής
- Εκλογή των κριτηρίων σχεδίασης

- Εκλογή υλικού
- Λεπτομερής κατασκευαστική σχεδίαση που θα περιλαμβάνει και τη διαδικασία παραγωγής
- Καθορισμός των απαιτήσεων συντήρησης και ελέγχου

Στο σχέδιο της τελικής σχεδίασης η κατασκευή πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για ασφάλεια και λειτουργικότητα με τρόπο που να είναι οικονομικά αποδεκτός.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η αξιόπιστη σχεδίαση μιας πλωτής κατασκευής προϋποθέτει γνώση από τα πρώτα ήδη στάδια της μελέτης των περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της. Κύρια στοιχεία που επάγουν στην κατασκευή δυνάμεις ή επιδρούν στην εν γένει λειτουργία της είναι:

- ο άνεμος
- τα θαλάσσια ρεύματα
- οι θαλάσσιοι κυματισμοί

Επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η γεωμορφολογία του πυθμένα ή σε σπανιότερες περιπτώσεις η σεισμογένεια της περιοχής λειτουργίας εφόσον πρόκειται για σταθερές θαλάσσιες κατασκευές.

Για την αξιόπιστη σχεδίαση μιας θαλάσσιας πλωτής κατασκευής απαιτούνται στοιχεία τόσο για τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που θα επικρατούν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας της (operational condition) όσο και για εκείνες τις ακραίες καταστάσεις που αναμένονται να εμφανισθούν στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής και που θα προκαλέσουν τις μεγαλύτερες καταπονήσεις ή θα επιδράσουν αρνητικά στη λειτουργία της. Η σχεδίαση της πλατφόρμας θα πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει και στην επενέργεια των ακραίων αυτών περιβαλλοντολογικών καταστάσεων (survival conditions).

Οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες περιγράφονται κυρίως με τη βοήθεια στοιχείων που προκύπτουν μετά από μακροχρόνιες μετρήσεις ή παρατηρήσεις στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της κατασκευής. Παρακάτω θα αναφερθούν εν συντομία οι κυριότερες μέθοδοι για την περιγραφή του ανέμου, των θαλασσίων ρευμάτων και των θαλασσίων κυματισμών.

ΠΕΔΙΟ ΑΝΕΜΟΥ

Για τον προσδιορισμό των φορτίων που επάγονται σε μια θαλάσσια κατασκευή από τον άνεμο πρέπει να γνωρίζουμε την καθ' ύψος κατανομή της μέσης ταχύτητας του \bar{V}_{tz} . Συνέπεια της πνοής (gust) του ανέμου γίνεται η ακόλουθη παραδοχή για τη στιγμιαία τιμή της :

$$V = \bar{V}_{tz} + v' \quad (2.2.1)$$

όπου \bar{V}_{tz} : η μέση τιμή της ταχύτητας

v' : η στατιστική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής V .

Το μέγεθος \bar{V}_{tz} είναι συνάρτηση της καθ' ύψος απόστασης του θεωρούμενου σημείου από την επιφάνεια της θάλασσας και του χρονικού διαστήματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της μέσης τιμής.

Εφ' όσον δεν υπάρχουν για την περιοχή λειτουργίας της κατασκευής αξιόπιστες μετρήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος εκθετικός νόμος :

$$\bar{V}_{tz} = a \bar{V}_{1hr10} \left(\frac{z}{10} \right)^\beta \quad (2.2.2)$$

όπου \bar{V}_{tz} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος z και για χρονικό διάστημα t

\bar{V}_{1hr10} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1hr

α, β : σταθερές που δίνονται στον πίνακα 2.1. Μ' αυτές λαμβάνονται υπόψη αποκλίσεις που προκύπτουν στη μέση τιμή όταν ο μέσος χρόνος μέτρησης δεν συμπίπτει με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της \bar{V}_{1hr10} .

| Συντελεστής | Μέσος χρόνος μέτρησης | | | | | |
|-------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1hr | 10min | 1min | 15sec | 5sec | 3sec |
| α | 1.000 | 1.060 | 1.180 | 1.260 | 1.310 | 1.330 |
| β | 0.150 | 0.130 | 0.113 | 0.106 | 0.102 | 0.100 |

Πίνακας 2.1 : Συντελεστές α, β της σχέσης (2.2)

Όταν χρησιμοποιείται η στοχαστική διαδικασία προσδιορισμού των φορτίων από τον άνεμο θα πρέπει να γνωρίζουμε το φάσμα της κατανομής του. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, που ισχύουν και για τους θαλάσσιους κυματισμούς, ο άνεμος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διαδικασία κατά Gauss. Στο πεδίο των συχνοτήτων μια τέτοια διαδικασία περιγράφεται πλήρως όταν είναι γνωστό το φάσμα κανονικής κατανομής της ενέργειάς της. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Νορβηγικού Νηογνώμονα το τελευταίο δίνεται από τη σχέση :

$$fS(f) = 4k\bar{V}_{1hr10} \frac{\tilde{f}}{(2 + \tilde{f})^{\frac{5}{6}}} \quad (2.2.3)$$

όπου \tilde{f} : αδιάστατη συχνότητα ($\tilde{f} = f \cdot L / \bar{V}_{1hr10}$)

S: πυκνότητα φάσματος (m^2 / Hz)

f: συχνότητα (Hz)

L: μέγεθος κλίμακας (m). Συνήθως λαμβάνουμε $L=1800m$

k: συντελεστής τριβής που εξαρτάται από την κατάσταση της θάλασσας και ισούται με 0.0020 ή 0.0015 για κυματώδη ή ταραγμένη κατάσταση της αντίστοιχα

\bar{V}_{1hr10} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1hr

ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Για τον προσδιορισμό της καθ' ύψος διανομής της ταχύτητας των θαλασσίων ρευμάτων τα θεωρούμε συνήθως σαν υπέρθεση ρεύματος που δημιουργείται από το πεδίο ανέμου και ρεύματος που προκαλείται από παλίρροιες. Για τα πρώτα, τα ρεύματα αέρα, θεωρούμε γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας τους από το βάθος ενώ για τα δεύτερα, τα ρεύματα παλίρροιας, αποδεχόμαστε αντίστοιχα εκθετική εξάρτηση. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε:

$$V_{\rho\epsilon\upsilon\mu}(z) = V_{\pi\alpha\lambda}(z) + V_{\alpha\nu\epsilon\mu}(z) \quad (2.2.4)$$

Και

$$V_{\pi\alpha\lambda}(z) = V_{\pi\alpha\lambda}(z) \left(\frac{d+z}{d} \right)^{1/7}, z \leq 0 \quad (2.2.5)$$

$$V_{\alpha\nu\epsilon\mu}(z) = V_{\alpha\nu\epsilon\mu}(z) \left(\frac{d_0+z}{d_0} \right)^{1/7}, -d_0 \leq z \leq 0 \quad (2.2.6)$$

$$V_{\alpha\nu\epsilon\mu}(z) = 0, z < -d_0 \quad (2.2.7)$$

Όπου $V_{\text{ρευμ}}(z)$: η συνολική ταχύτητα του ρεύματος σε απόσταση z από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας

$V_{\text{παλ}}(z)$: η ταχύτητα του ρεύματος παλίρροιας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας

$V_{\text{ανεμ}}(z)$: ταχύτητα ρεύματος προκαλούμενου από τον άνεμο στην ελεύθερη επιφάνεια

d : το βάθος του νερού μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια

d_0 : βάθος αναφοράς για ρεύματα προκαλούμενα από τον άνεμο ($d_0 = 50m$). Κάτω από το βάθος αυτό θεωρείται μηδενική η ταχύτητά τους (2.2.7)

z : απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια, θετική με κατεύθυνση προς τα πάνω

Για της διάφορες περιοχές της Γης υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των ταχυτήτων των ρευμάτων που προκαλούνται από παλίρροιας. Αντίθετα σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων για τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκαλούνται από τον άνεμο δεχόμαστε ότι στην επιφάνεια της ανοικτής θάλασσας ισχύει η σχέση :

$$V_{\text{ανεμ}} = 0.02\bar{V}_{1hr10} \quad (2.2.8), \text{ όπου τα μεγέθη } V_{\text{ανεμ}} \text{ και } \bar{V}_{1hr10} \text{ ορίσθηκαν προηγουμένως.}$$

ΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η ταυτόχρονη δράση δυνάμεων απομακρύνσεως των σωματιδίων της θάλασσας από τη θέση ηρεμίας και δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές τους θέσεις, σε συνδυασμό με την μεγάλη κινητικότητα των σωματιδίων, προκαλεί κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλαντώσεως στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό.

Ένα σύστημα από μάζες και ελατήρια εμφανίζει ιδιοσυχνότητες τόσες όσοι είναι και οι βαθμοί ελευθερίας του. Η επιφάνεια της θάλασσας είναι συνεχές μέσο με άπειρους βαθμούς ελευθερίας και ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Πάνω στην επιφάνεια του νερού μπορούμε κατά συνέπεια να βρούμε κυματισμούς οποιασδήποτε συχνότητας (αν εξαιρέσουμε την περίπτωση όπου το ρευστό δεν είναι απέρατο, οπότε και οι οριακές συνθήκες θέτουν περιορισμούς στη μορφή των κυμάτων).

Ο λόγος για τον οποίο βρίσκουμε επιφανειακά κύματα μέσα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων οφείλεται αφ' ενός μεν στο ότι και οι δυνάμεις που τα προκαλούν βρίσκονται σε ορισμένο εύρος αφ' ετέρου δε στο γεγονός ότι η ταχύτητα απορρόφησης ενεργείας λόγω συνεκτικότητας είναι πολύ μεγαλύτερη σε κύματα υψηλών συχνοτήτων απ' ότι σε αντίστοιχα χαμηλών.

Βασικές εξισώσεις κατά την εξέταση της κίνησης ασυμπίεστου ρευστού είναι:

- Εξισώσεις Navier-Stokes

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (2.2.9)$$

Όπου \vec{V} το διάνυσμα της ταχύτητας (u,v,w)

p: η πίεση

μ : συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας

ρ : η πυκνότητα και

\vec{F} : οι εξωτερικά επιβεβλημένες δυνάμεις (ανά μονάδα μάζας)

- Η εξίσωση συνέχειας:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.2.10)$$

Θα πρέπει να τονισθεί εδώ ότι στη διατύπωση του γενικού οριακού προβλήματος για τα κύματα βαρύτητας παραλήφθηκαν οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Οι δυνάμεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία σε δύο περιπτώσεις:

(α) κατά τον σχηματισμό των κυμάτων λόγω του ανέμου, δεδομένου ότι τα πρώτα κύματα που εμφανίζονται είναι κύματα επιφανειακής τάσης και

(β) κατά την εκτέλεση πειραμάτων. Στην περίπτωση αυτή για κύματα μικρού μήκους τα αποτελέσματα μπορεί να μην ισχύουν λόγω ύπαρξης των δυνάμεων επιφανειακής τάσης, που δεν εμφανίζονται στο φυσικό πρότυπο.

Αν θεωρήσουμε υγρό χωρίς συνεκτικότητα τότε οι εξισώσεις κίνησης του Navier-Stokes (2.2.9) ανάγονται σε αυτές του Euler. Εφ' όσον δε η κίνηση του ρευστού είναι και αστρόβιλη τότε υπάρχει δυναμικό ροής Φ τέτοιο, ώστε :

$$\vec{V} = \nabla \Phi \quad (2.2.11)$$

Οπότε η εξίσωση συνέχειας (2.2.10) μετασχηματίζεται στην εξίσωση του Laplace:

$$\Delta \Phi = 0 \Leftrightarrow \nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.2.12)$$

Στην περίπτωση αυτή η ολοκλήρωση των εξισώσεων του Euler οδηγεί στην εξίσωση του Bernoulli :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{p}{\rho} = \text{σταθ.} (2.2.13)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να θέσουμε τις οριακές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί το ζητούμενο δυναμικό της ροής Φ . Αυτές θα είναι:

- Κινηματική συνθήκη του πυθμένα (Κ.Σ.Π.)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{n} = 0 (2.2.14)$$

όπου \vec{n} : το κάθετο διάνυσμα στο θεωρούμενο σημείο του πυθμένα.

Η συνθήκη αυτή εκφράζει το αδιαπέρατο του πυθμένα από τα μόρια του ρευστού

- Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Κ.Σ.Ε.Ε.)

Αν θεωρήσουμε ότι η άγνωστη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται από τη σχέση $z = \zeta(x, y, t)$ τότε η μαθηματική διατύπωση της Κ.Σ.Ε.Ε. είναι:

$$\frac{D}{Dt} (z - \zeta) = 0 (2.2.15)$$

ή επειδή

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} (2.2.16)$$

προκύπτει

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 (2.2.17) \text{ για } z = \zeta(x, y, t)$$

Και σημαίνει ότι το μόριο του ρευστού στην επιφάνεια παραμένει σε αυτή καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησής της.

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Δ.Σ.Ε.Ε.)

Η συνθήκη αυτή εκφράζει μαθηματικά το γεγονός ότι η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = \sigma \tau \alpha \theta. (2.2.18)$$

για $z = \zeta(x, y, t)$

και αν εκλέξουμε σταθερά ίση με το μηδέν (χωρίς να χάσουμε από τη γενικότητα) τότε η (2.2.18) γίνεται :

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g \zeta = 0 (2.2.19)$$

για $z = \zeta(x, y, t)$

Παρατηρήσεις:

- Οι οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μη γραμμικές.
- Είναι άγνωστο το όριο $z = \zeta(x, y, t)$ στο οποίο ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες.
- Το πρόβλημα δεν επιδέχεται κλειστή λύση.
- Πρέπει να ακολουθηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι για τη γραμμικοποίηση των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια.

Για τη γραμμικοποίηση θεωρούμε ότι το ύψος του κύματος H είναι συνήθως μικρό σε σχέση με το μήκος λ . Κατά συνέπεια και ο λόγος $\frac{H}{2\lambda} = \varepsilon \ll 1$. Η παράμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη σε σειρές διαταραχών όλων των μεγεθών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα.

Σειρές για το δυναμικό:

$$\Phi(x, y, z; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \Phi^{(n)}(x, y, z, t) (2.2.20)$$

Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta(x, y; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \zeta^{(n)}(x, y; t) (2.2.21)$$

όπου $\Phi^{(n)}$ και $\zeta^{(n)}$ οι n-οστοί όροι της ανάπτυξης.

Ο όρος μηδενικής τάξης για το δυναμικό ισούται με μηδέν, ενώ για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δεν υφίσταται όπως θα επεξηγηθεί στη συνέχεια. Θεωρώντας τους n πρώτους όρους των αναπτύξεων αυτών έχουμε τη λύση του προβλήματος n -στης τάξης.

Για να αποφύγουμε τη δυσκολία ικανοποίησης των οριακών συνθηκών (2.2.17) και (2.2.19) στο άγνωστο όριο $z=\zeta(x,y,t)$ αναπτύσσουμε τα εμφανιζόμενα στις συνθήκες αυτές μεγέθη του δυναμικού των παραγώγων του σε σειρές Taylor περί τη θέση $z=0$ που αντιστοιχεί στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού, θεωρώντας ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\zeta(x,y;t)$ είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος.

Έτσι έχουμε :

$$\Phi|_{z=\zeta} = \Phi|_{z=0} + \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots (2.2.22)$$

Και τις παραγώγους:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots (2.2.23)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots (2.2.24)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial z^3} \Big|_{z=0} + \dots (2.2.25)$$

Με τον τρόπο αυτό:

-λαμβάνουμε υπόψη μας κατά τη διατύπωση των οριακών συνθηκών τη μη γραμμικότητα

-εμφανιζόμενα μεγέθη υπολογίζονται στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού.

Εισάγοντας τις (2.2.20) έως (2.2.25) στις μη γραμμικές οριακές συνθήκες (2.2.17) και (2.2.19) και διατάσσοντας τους εμφανιζόμενους όρους κατά δυνάμεις του ε αντίστοιχα, έχουμε:

- Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Κ.Σ.Ε.Ε.)

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y} \right] + O(\varepsilon^3) = 0$$

(2.2.26)

για $z=0$

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (Δ.Σ.Ε.Ε.)

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g \zeta^{(1)} \right] \varepsilon^2 \left[g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial z^2} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] + 0(\varepsilon^3) = 0$$

(2.2.27)

για $z=0$

Επειδή οι εξισώσεις αυτές θα πρέπει να ισχύουν για όλα τα ε πρέπει όλοι οι συντελεστές των δυνάμεων του ε να ισούνται με μηδέν. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν η κινηματική και δυναμική n -τάξης που θα ικανοποιούν οι n -στοί όροι της ανάπτυξης (2.2.20) στην ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι προκύπτουν:

Πρόβλημα 1^{ης} τάξης ($n=1$)

- Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} = 0 \quad (2.2.28) \quad \text{για } z=0$$

- Δυναμική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g \zeta^{(1)} = 0 \quad (2.2.29)$$

Πρόβλημα 2^{ης} τάξης ($n=2$)

- Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y} \quad (2.2.30) \quad \text{για } z=0$$

- Δυναμική συνθήκη

$$g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial z^2} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0 \quad (2.2.31)$$

για $z=0$

Από τη διατύπωση των οριακών συνθηκών (2.2.30) και (2.2.31) είναι προφανές ότι για την εύρεση της προσεγγιστικής λύσης 2^{ης} τάξης απαιτείται η προηγούμενη γνώση, εκείνη της 1^{ης} τάξης. Γενικά οι σχέσεις (2.2.30) και (2.2.31) για τη n-στη τάξη μπορούν να γραφούν στη μορφή:

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(n)}}{\partial t} = G^{(n-1)} \quad \text{για } z=0$$

και

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial t} + g\zeta^{(n)} = F^{(n-1)} \quad \text{για } z=0$$

Όπου οι συναρτήσεις $G^{(n-1)}$ και $F^{(n-1)}$ είναι συνδυασμός των λύσεων 1^{ης}, 2^{ης}, (n-1) τάξης.

Οι συναρτήσεις $\Phi^{(n)}$ που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του ζητούμενου δυναμικού της ροής Φ με σειρά διαταραχών θα πρέπει να ικανοποιούν:

- τις οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια (2.2.32) και (2.2.33)
- τη συνθήκη στον πυθμένα (2.2.14) καθώς και
- την εξ. του Laplace (2.2.12)

δηλαδή για τον n-στο όρο της σειράς (2.2.20) θα πρέπει:

$$\Delta \Phi^{(n)} = 0 \quad \text{στο πεδίο ροής} \quad (2.2.34)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial \bar{n}} = \bar{\nabla} \Phi^{(n)} \bar{n} = 0 \quad \text{στον πυθμένα} \quad (2.2.35)$$

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ – ΑΠΛΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σα λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις εξ. (2.2.28), (2.2.29), (2.2.34) και (2.2.35) για n=1. Η λύση του προβλήματος μας δίνει τα εξής αποτελέσματα για πεπερασμένο βάθος νερού:

- Για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta^{(1)}(x; y; t) = \frac{H}{2} \cos[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t] \quad (2.2.36)$$

- Για το δυναμικό του πεδίου ροής:

$$\Phi^{(1)}(x; y; z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t] \quad (2.2.37)$$

Όπου **k**: ο αριθμός κύματος που ισούται με $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

λ: το μήκος κύματος

ω: η κυκλική συχνότητα του κύματος που συνδυάζεται με τον αριθμό κύματος **k** μέσω της σχέσης $\omega^2 = kg \tanh(kd)$

d: το βάθος του νερού

θ: η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση προχώρησης του μετώπου κυματισμού με τον άξονα **x**.

Σε περίπτωση σύμπτωσης των δύο διευθύνσεων οι εξ. (2.2.36) και (2.2.37) που θα περιγράψουν απλό αρμονικό κυματισμό κινούμενο κατά τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα **x**, γίνονται :

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.2.38)$$

$$\Phi^{(1)}(x; z; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.2.39)$$

Αναφέρουμε και τη μιγαδική παράσταση των μεγεθών $\zeta^{(1)}$ και $\phi^{(1)}$ που είναι πολύ συνηθισμένη σε προβλήματα ναυτικής υδροδυναμικής.

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \operatorname{Re} \left[\frac{H}{2} e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]} \right] \quad (2.2.40)$$

$$\Phi^{(1)}(x; z; t) = \operatorname{Re} \left[-i \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]} \right] \quad (2.2.41)$$

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ακόμη ότι στην περίπτωση απλού αρμονικού κύματος οι τροχιές των μορίων του ρευστού είναι κλειστές και κατά συνέπεια δεν εμφανίζεται μεταφορά μάζας.

2.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Μετά τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών παραμέτρων της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας της πλωτής κατασκευής, θα πρέπει να υπολογιστούν τα φορτία που ασκούνται πάνω της. Σε ένα γενικό πλαίσιο τα φορτία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν εξής:

- Λειτουργικά φορτία (functional loads):
 - o Ίδιο βάρος
 - o Βάρος εξοπλισμού
 - o Στατικά/δυναμικά φορτία από εκτέλεση εργασιών
 - o Δυνάμεις άντωσης

- Φορτία από τη δράση του περιβάλλοντος (environmental loads):
 - o Άμεση δράση:
 - Άνεμος
 - Θαλάσσια ρεύματα
 - Θαλάσσιοι κυματισμοί
 - Σεισμοί

 - o Έμμεση δράση:
 - Δυνάμεις αγκυρώσεων
 - Δυνάμεις λόγω κινήσεων της κατασκευής
 - Φορτία λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

Από άποψη διαστασιολόγησης και μελέτης τα σημαντικότερα φορτία που επάγονται στην κατασκευή είναι αυτά από τους θαλάσσιους κυματισμούς τα οποία και θα αναλυθούν παρακάτω.

ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Τα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή παρουσία θαλάσσιων κυματισμών έχουν να κάνουν με:

- Φαινόμενα αντίστασης (drag): οφείλονται σε αποκόλληση της ροής
- Αδρανειακά φαινόμενα (inertia): οφείλονται σε μεταβολή της πίεσης του περιβάλλοντος ρευστού που είναι συνυφασμένη με την επιτάχυνση της ροής.
- Φαινόμενα περίθλασης (diffraction): οφείλονται σε παραμόρφωση του πεδίου ροής λόγω παρουσίας του σώματος

Οι δυνάμεις που προκαλούνται από τους διάφορους μηχανισμούς και δρουν στην κατασκευή, διακρίνονται αντίστοιχα σε:

- **Δυνάμεις αντίστασης (drag forces)**

Οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας.

- **Αδρανειακές δυνάμεις (fluid inertia forces)**

Ως αδρανειακές δυνάμεις αναφέρονται οι:

• **Δυνάμεις Froude-Kryloff**

Ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Κύρια θεώρηση για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία της κατασκευής δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής. Για τον υπολογισμό τους, γίνεται ολοκλήρωση της πίεσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κυματισμού στη βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής.

• **Δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation forces)**

Εάν θεωρηθεί πως η κατασκευή είναι κινούμενη, τότε το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία κυματισμών και κατ' επέκταση η δημιουργία ενός δυναμικού ροής που επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στις δυνάμεις Froude-Kryloff και περίθλασης.

- **Δυνάμεις περίθλασης (diffraction forces)**

Σε αυτή την περίπτωση δυνάμεων, λαμβάνεται υπόψη η παρουσία της κατασκευής και η παραμόρφωση που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής. Εάν θεωρηθεί πως το σώμα είναι ακίνητο, τότε στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού προστίθεται και το δυναμικό περίθλασης, το οποίο οφείλεται στην παραμόρφωση της ροής. Το άθροισμα αυτών, δίνει τις δυνάμεις περίθλασης.

- **Άλλες δυνάμεις**

Όλες οι προηγούμενες περιπτώσεις δυνάμεων θεωρούν την ύπαρξη απλού αρμονικού κυματισμού. Στην πραγματικότητα όμως, οι δυνάμεις λόγω των θαλάσσιων κυματισμών είναι μη γραμμικές από τη φύση τους. Μπορούμε να τις υποδιαιρέσουμε σε δυνάμεις 1^{ης} τάξης, σαν λύση του γραμμικού προβλήματος και σε δυνάμεις 2^{ης} και ανώτερης τάξης όταν λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικοί όροι του προβλήματος (πχ. υπολογισμός αγκυρώσεων).

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Εξαιτίας των πολλών και διαφορετικών γεωμετριών και διαστάσεων των θαλάσσιων κατασκευών καθώς και των διαφορετικών συνθηκών εγκατάστασης τους, δεν μπορεί να γίνει ενιαία υδροδυναμική ανάλυση. Για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να γίνει ενδεικτική υποδιαίρεση των κατασκευών σε κατηγορίες, ώστε να ακολουθηθεί ενιαία αντιμετώπιση για κάθε μια από αυτές. Η κατάταξή τους μπορεί να γίνει με κριτήριο το μέγεθος της κατασκευής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του κύματος.

Σε μια πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τη σχετική βαρύτητα των δυνάμεων που προαναφέρθηκαν και εύρεσης των περιοχών καθοριστικής σημασίας έκαστης, εξετάζεται στα πλαίσια της διαστατικής ανάλυσης η περίπτωση κατακόρυφου κυλίνδρου, εδραζόμενου στον πυθμένα.

Υποθέτοντας ότι προσπίπτει αρμονικό κύμα στον κύλινδρο, η δύναμη που ασκείται πάνω σε αυτόν μπορεί να εκφραστεί με μια συναρτησιακή σχέση που αφ' ενός μεν να λαμβάνει υπόψη της τα χαρακτηριστικά του αρμονικού κύματος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλίνδρου, αφ' ετέρου τα αδρανειακά φαινόμενα καθώς και φαινόμενα τριβής και βαρύτητας.

Αν το κύμα περιγράφεται πλήρως από τριάδες τιμών, ας πούμε την (H, λ, d) , τότε η δύναμη που ασκείται σε κυλινδρικό σώμα θα δίνεται από τη συναρτησιακή σχέση:

$$F = f(D, d, \rho, g, H, \lambda, \mu) \quad (2.3.1)$$

όπου D : η διάμετρος του κυλίνδρου

d : το βάθος του νερού

ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H : το ύψος του κύματος

λ : το μήκος του κύματος

μ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού.

Εφαρμόζοντας το θεώρημα π της μηχανικής ομοιότητας, η σχέση αδιαστατοποιείται ως εξής:

$$\frac{F}{\rho g \pi H \frac{D^2}{8}} = f \left(\frac{2\pi D}{\lambda}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{g D^3}} \right) \quad (2.3.2)$$

Παρατηρούμε πως ο λόγος $\frac{\mu}{\rho\sqrt{gD^3}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}}$ (ν: κινηματική συνεκτικότητα) ισούται με τον λόγο του αριθμού Froude προς τον αριθμό Reynolds.

Ο αριθμός Froude προσδιορίζεται ως:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{c}{\sqrt{gD}} \quad (2.3.3)$$

Ο αριθμός Reynolds προσδιορίζεται ως:

$$Re = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Τριβής}} = \frac{cD}{\nu} \quad (2.3.4)$$

Διαιρώντας μεταξύ τους, τους συντελεστές:

$$\frac{Fr}{Re} = \frac{\text{Δυνάμεις Τριβής}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}} \quad (2.3.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχει συνδυασμένη επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, τριβής και των αδρανειακών δυνάμεων. Από την εξίσωση (2.3.5) προκύπτει ότι αυξανόμενης της διαμέτρου του κυλίνδρου, αυξάνει και η σχετική σημασία των δυνάμεων βαρύτητας έναντι εκείνων της τριβής.

Αντικαθιστώντας την τιμή της ταχύτητας μετατόπισης c του απλού αρμονικού κύματος,

$c = \sqrt{\frac{g \tanh(kd)}{k}}$ στην έκφραση για τον αριθμό Froude, προκύπτει:

$$Fr = \left[\frac{g \tanh(kd)}{k D g} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{\tanh(kd)}{kD}}$$

- Για νερό απείρου βάθους, όπου $\tanh(kd) \equiv 1$

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} \equiv \frac{1}{\sqrt{kD}}$$

Παρατήρηση:

Όσο η διάμετρος του σώματος D είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος λ , τα αδρανειακά φαινόμενα είναι σημαντικότερα έναντι των φαινομένων βαρύτητας. Άρα, για μικρές τιμές του kD μπορούν να παραβλεφθούν οι δυνάμεις περίθλασης. Όταν όμως το kD είναι μεγάλο, τα φαινόμενα βαρύτητας είναι πιο σημαντικά από τα αδρανειακά φαινόμενα.

- Για ρηχό νερό, όπου $\tanh = (kd) \equiv kd$

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} \equiv \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Παρατηρήσεις:

- Τα φαινόμενα βαρύτητας αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για μεγάλες τιμές της διαμέτρου D , ή για μικρές τιμές του βάθους του νερού d , ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ .
- Οι οριακές τιμές των παραμέτρων kd ή αντίστοιχα και $\frac{d}{D}$, πέρα από τις οποίες θα λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα της παραμόρφωσης της ροής θα αναφερθούν στη συνέχεια. Η δε θεωρητική τους κάλυψη απαιτεί προσδιορισμό του πεδίου ροής στα πλαίσια της θεωρίας δυναμικού.

Αν χρησιμοποιήσουμε σαν τριάδα περιγραφής του αρμονικού κύματος ($u(z)$, T , d), με $\bar{u}(z) = \omega \left(\frac{H}{2} \right)$ τότε η συναρτησιακή σχέση για τη δύναμη είναι:

$$F = f(D, d, \rho, \bar{u}(z), T, \mu)$$

$$\left(\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2(z) D d} \right) = f \left(\frac{\bar{u}(z) T}{D}, \frac{\bar{u}(z) D}{\frac{\mu}{\rho}}, \frac{d}{D} \right)$$

όπου

$N_{KC} = \frac{\bar{u} T}{D}$ είναι αδιάστατο μέγεθος και ονομάζεται σταθερά του Keulegan- Carpenter

$Re = \frac{\bar{u}(z) T}{\nu}$ είναι ο αριθμός Reynolds

οπότε: $\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 D d} = f(N_{KC}, Re, \frac{d}{D})$

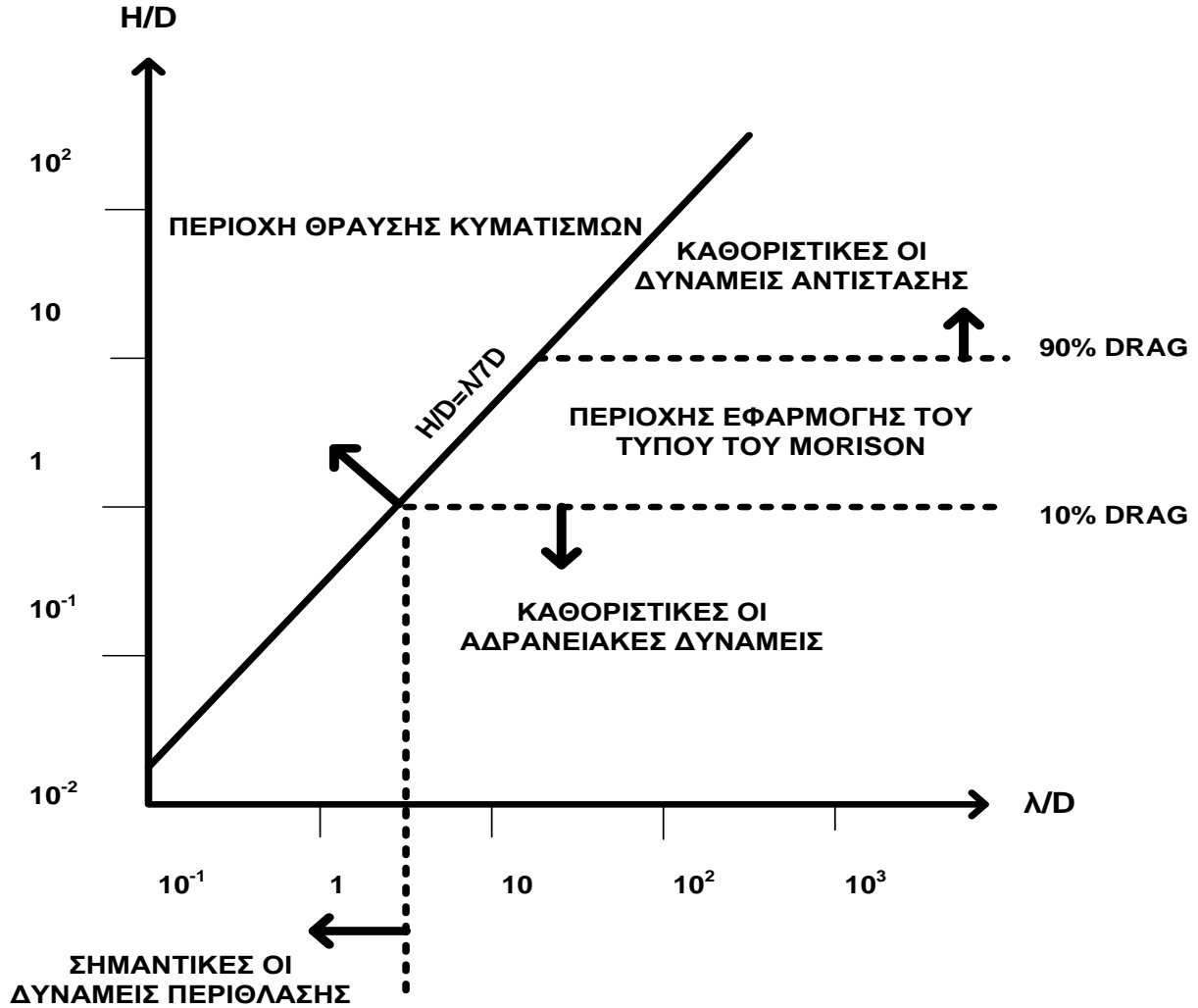
Αν θελήσουμε να εισάγουμε και την τραχύτητα k του κυλίνδρου, φθάνουμε σε άλλη συναρτησιακή σχέση που είναι απαραίτητη για μη λείους κυλίνδρους:

$$\frac{F}{\frac{1}{2}\rho u^2 D d} = f(N_{KC}, Re, \frac{d}{D}, \frac{k}{D})$$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται κατά περιοχές η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων (αδρανειακών, βαρύτητας, αντίστασης) για την περίπτωση του κατακόρυφου κυλίνδρου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα για τιμές του $\frac{H}{D} > 10$ το φορτίο που δέχεται η κατασκευή οφείλεται κατά 90% τουλάχιστον σε δυνάμεις αντίστασης και το πολύ 10% σε αδρανειακές δυνάμεις, ενώ αντίστοιχα στο κάτω όριο που βρίσκεται για $\frac{H}{D} < 1$ οι ποσότητες αυτές αντιστρέφονται και συγκεκριμένα ένα 10% το πολύ είναι δυνάμεις αντίστασης ενώ το υπόλοιπο 90% τουλάχιστον είναι από αδρανειακές δυνάμεις.

Πάντως είναι πολύ δύσκολο να πούμε πότε για την κατασκευή οι δυνάμεις αντίστασης γίνονται καθοριστικές σε σχέση με τις αντίστοιχες αδρανειακές. Στο ίδιο σχήμα επίσης φαίνεται και το όριο του Michell- Havelock, το γνωστό $\frac{H}{\lambda} = \frac{1}{7}$ πέρα από το οποίο εμφανίζεται θραύση κυματισμών για βαθύ νερό.



Εικόνα 2-1: Η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων σε διάφορες περιοχές

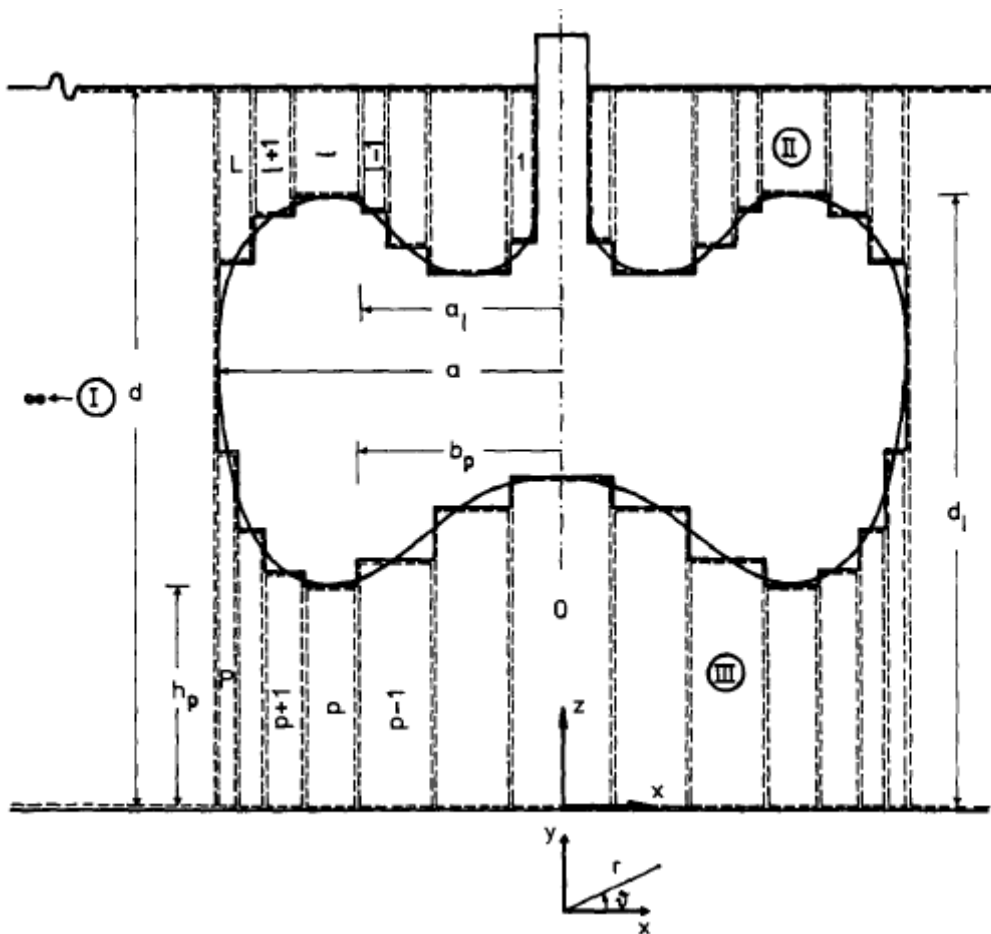
Στο όριο $\frac{\lambda}{D} < 5$ που εμφανίζεται στο παραπάνω σχήμα, γίνεται ο διαχωρισμός των κατασκευών σε υδροδυναμικά «ογκώδεις» και «λεπτές» .

2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Η θεωρητική προσέγγιση των πειραμάτων βασίζεται αρχικά στην μελέτη της συμπεριφοράς κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς. Παρακάτω παρουσιάζεται μια ημι-αναλυτική προσέγγιση για την υδροδυναμική ανάλυση μεγάλων κατακόρυφων σωμάτων σε νερό πεπερασμένου βάθους.

Η μέθοδος βασίζεται στην διακριτοποίηση του πεδίου ροής γύρω από το σώμα, με χρήση ομοαξονικών δακτυλίων, οι οποίοι δημιουργούνται από την προσέγγιση των γραμμών του σώματος με βαθμιδωτή καμπύλη, (Σχ. 2.3).



Σχήμα 2.3: Διακριτοποίηση του πεδίου ροής γύρω από αξονοσυμμετρικό σώμα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας

Στο σχέδιο διακριτοποίησης γίνεται διάκριση μεταξύ των "πεπερασμένων" στοιχείων, τα οποία αφορούν οριοθετημένες περιοχές του ρευστού, και των «άπειρων» στοιχείων, τα οποία εκτείνονται οριζοντίως στο άπειρο, (Σχ. 2.3). Υπάρχουν δύο τύποι "πεπερασμένων" στοιχείων ανάλογα με το αν αυτά εκτείνονται προς την ελεύθερη επιφάνεια, (τύπος II), ή μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας, (τύπος III). Για το "άπειρο" στοιχείο δακτυλίου, (τύπος I), οι επιλεγμένες συναρτήσεις για την προσέγγιση του δυναμικού ταχύτητας πρέπει να πληρούν τη συνθήκη ακτινοβολίας.

Για κάθε τύπο στοιχείου, η εξίσωση του Laplace έχει διατυπωθεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες και έχει γίνει ιδιοσυναρτησιακή ανάλυση για το δυναμικό ταχύτητας. Οι απαιτήσεις για συνέχεια της συνάρτησης δυναμικού και της πρώτης παραγώγου της (υδροδυναμική πίεση και ταχύτητα) στα όρια των γειτονικών δακτυλιοειδών μακροστοιχείων ικανοποιούνται μέσω της μεθόδου Galerkin.

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Θεωρούμε ένα πλωτό στερεό σώμα που εκτείνεται κατά τον κατακόρυφο άξονα και που εκτίθεται σε απλό αρμονικό κυματισμό, (Σχ. 2.3). Για αυτόν τον τύπο κατασκευής επιλέγεται κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, z) και στην περίπτωση μας ορίζεται η αρχή των αξόνων του στον πυθμένα της θάλασσας. Το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο και μη συνεκτικό. Το πεπερασμένο βάθος νερού, d , είναι σταθερό και η ελεύθερη επιφάνεια είναι άπειρη σε όλες τις κατευθύνσεις. Οι κινήσεις του σώματος και του ρευστού θεωρούνται μικρές, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα γραμμικοποιημένα προβλήματα οριακών τιμών για την περίθλαση και την ακτινοβολία. Με την παραδοχή συμμετρικής κατανομής μάζας, στο κατακόρυφο σώμα επιδρούν αρμονικά κύματα τριών βαθμών ελευθερίας κίνησης κατά το επίπεδο διάδοσης των κυμάτων, δηλαδή, έχουμε δύο μετατοπίσεις (surge x_1 , heave x_3) και μία περιστροφή (pitch x_5). Το πρώτης τάξης ολικό δυναμικό ταχύτητας για σταθερή κατάσταση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \varphi_0(r, \theta, z)e^{-i\omega t} + \varphi_7(r, \theta, z)e^{-i\omega t} + \sum_{j=1,3,5} \dot{x}_{j0}\varphi_j(r, \theta, z)e^{-i\omega t} \quad (2.4.1)$$

Όπου $\varphi_0 e^{-i\omega t}$ είναι το δυναμικό ταχύτητας του αρμονικού κυματισμού πρόσπτωσης,

$\varphi_7 e^{-i\omega t}$ είναι το δυναμικό περίθλασης για σώμα σταθερό ως προς τον κυματισμό,

$\varphi_j e^{-i\omega t}$, ($j = 1, 3, 5$), είναι το δυναμικό ακτινοβολίας που προκύπτει από την εξαναγκασμένη ταλάντωση του σώματος στη j κίνηση με μοναδιαίο πλάτος ταχύτητας και

\dot{x}_{j0} είναι το πλάτος ταχύτητας λόγω κίνησης του σώματος κατά την κατεύθυνση j .

Το πρόβλημα περιθλάσης είναι εκφρασμένο από το δυναμικό ταχύτητας:

$$\Phi_D(r, \vartheta, z, t) = \varphi_D^{-i\omega t} = (\varphi_0 + \varphi_7)e^{-i\omega t} \quad (2.4.2)$$

Το δυναμικό ταχύτητας του αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας την έκφραση του Jacobi ως εξής:

$$\varphi_0(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H \cosh(kz)}{2 k \sinh(kd)} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_j i^m J_m(kr) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (2.4.3)$$

όπου J_m υποδηλώνει την m τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και ϵ_j το σύμβολο του Neumann όπου:

$$\epsilon_0 = 1, \epsilon_m = 2(m \geq 1) \quad (2.4.4)$$

Η συχνότητα ω και αριθμός κύματος k συνδέονται με την εξίσωση διασποράς

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.4.5)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (3) το ολικό δυναμικό ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από τη σταθερή κατασκευή μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\varphi_D e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_j i^m \Psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (2.4.6)$$

Η ροή του ρευστού που προκαλείται από την εξαναγκασμένη ταλάντωση του σώματος στο κατά τα άλλα ήρεμο νερό, είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο $\vartheta = 0^\circ$ και αντισυμμετρική ως προς το επίπεδο $\vartheta = \pi/2$ για τα surge, ($j = 1$) και pitch, ($j = 5$), ενώ είναι συμμετρική ως προς και τα δύο αυτά επίπεδα για το heave, ($j = 3$). Έτσι, τα αντίστοιχα δυναμικά ταχύτητας για αυτούς τους τύπους της κίνησης μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\varphi_1 e^{-i\omega t} = \Psi_{11}(r, z) \cos(\vartheta) e^{-i\omega t} \quad (2.4.7)$$

$$\varphi_3 e^{-i\omega t} = \Psi_{30}(r, z) e^{-i\omega t} \quad (2.4.8)$$

$$\varphi_5 e^{-i\omega t} = \Psi_{51}(r, z) \cos(\vartheta) e^{-i\omega t} \quad (2.4.9)$$

Στις συναρτήσεις Ψ_{jm} των εξισώσεων (2.4.6)- 2.4.9) ο πρώτος δείκτης $j=D,1,3,5$ υποδηλώνει το σχετικό πρόβλημα οριακών τιμών, ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στις τιμές του m που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος. Έτσι, οι συναρτήσεις Ψ_{Dm} , ($m = 0,1,2 \dots$), Ψ_{11} , Ψ_{30} και Ψ_{51} παραμένουν οι κύριοι άγνωστοι του προβλήματος.

Τα σύνθετα δυναμικά ταχύτητας φ_j ($j = 0,1,3,5,7$) πρέπει να πληρούν τις εξής συνθήκες:

$$\Delta\varphi_j = \frac{\partial^2\varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\varphi_j}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\varphi_j}{\partial z^2} = 0 \text{ σε ολόκληρο το πεδίο του ρευστού} \quad (2.4.10)$$

$$-\omega^2\varphi_j + g\frac{\partial\varphi_j}{\partial z^2} = 0 \text{ για } z = d \quad (2.4.11)$$

$$\frac{\partial\varphi_j}{\partial r^2} = 0 \text{ για } z = 0 \quad (2.4.12)$$

Επιπλέον, τα δυναμικά φ_j με $j = 1,3,5,7$ πρέπει να πληρούν την συνθήκη ακτινοβολίας

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial\varphi_j}{\partial z^2} - ik\varphi_j \right) = 0 \quad (2.4.13)$$

Τέλος, πρέπει να ικανοποιούνται οι κινηματικές συνθήκες της βρεχόμενης επιφανείας S_0 στη μέση θέση του σώματος, δηλαδή

$$\left. \frac{\partial\varphi_j}{\partial n} \right|_{s_0} = - \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial n} \right|_{s_0} \quad \text{ή} \quad \left. \frac{\partial\varphi_D}{\partial r} \right|_{s_0} = 0 \quad (2.4.14)$$

και

$$\left. \frac{\partial\varphi_j}{\partial n} \right|_{s_0} = n_j, \quad (j = 1,3,5) \quad (2.4.15)$$

Στις εξισώσεις (2.4.14) και (2.4.15), η $\frac{\partial}{\partial n}$ υποδηλώνει την παράγωγο του μοναδιαίου διανύσματος n , που κείται προς την επιφάνεια S_0 του σώματος και το n_j ορίζεται ως εξής:

$$(n_1, n_2, n_3) = n, \quad (n_4, n_5, n_6) = r \times n \quad (2.4.16)$$

όπου r είναι το διάνυσμα θέσης σε σχέση με την αρχή του συστήματος συντεταγμένων.

Θεωρώντας τώρα την επιμέρους γεωμετρία της πραγματικής (ιδεατής) αξονοσυμμετρικής κατασκευής (Σχ. 2.3), η συνθήκη για τη στεγανότητα επί της βρεχόμενης επιφάνειας του σώματος, όπως εκφράζεται στις εξισώσεις (2.4.14) και (2.4.15), μπορεί να διαμορφωθεί ξεχωριστά για τα προβλήματα περιθλασης ($j = D$) και ακτινοβολίας ($j = 1,3,5$) ως εξής:

- Οριζόντιες οριακές συνθήκες:

για $l = 1, 2, \dots, L$ και $P = 0, 1, \dots, P(b_0 = 0, a_{L+1} = b_{p+1} = a)$:

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = V_j, \quad \text{όταν } z = d_l \text{ για } a_l \leq r \leq a_{l+1} \quad (2.4.17)$$

$$\text{όταν } z = h_p \text{ για } b_p \leq r \leq b_{p+1}$$

$$\text{όπου } V_D = V_l = 0, V_3 = l \text{ και } V_5 = -r \quad (2.4.18)$$

- Κατακόρυφες οριακές συνθήκες:

για $l = 1, 2, \dots, L$ και $p = 1, \dots, P(d_0 = d)$:

$$\text{όταν } r = a \text{ για } h_p \leq z \leq d_L$$

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = U_j, \quad \text{όταν } r = a_l \text{ για } \min\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq \max\{d_l, d_{l-1}\} \quad (2.4.19)$$

$$\text{όταν } r = b_p \text{ για } \min\{h_p, h_{p-1}\} \leq z \leq \max\{h_p, h_{p-1}\}$$

$$\text{όπου } U_D = U_3 = 0, U_1 = 1, U_5 = (z - e) \quad (2.4.20)$$

Η εξαναγκασμένη κίνηση pitch, ($j = 5$), της κατασκευής θεωρείται ότι πραγματοποιείται γύρω από οριζόντιο άξονα που βρίσκεται σε τυχαία απόσταση $z=e$ από τον πυθμένα της θάλασσας. Επιπλέον, τόσο το δυναμικό ταχύτητας και η παράγωγός του $\frac{\partial \phi_j}{\partial r}$ ($j = D, 1, 3, 5$), πρέπει να είναι συνεχείς στα κατακόρυφα όρια των γειτονικών μακροστοιχείων, (Σχ. 2.3). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

$$\psi_{jm}^1(a, z) = \psi_{jm}^{(L)}(a, z), \text{ για } d_L \leq z \leq d \quad (2.4.21)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \infty} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(L)}}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} \quad (2.4.22)$$

$$\psi_{jm}^1(a, z) = \psi_{jm}^{(P)}(a, z), \text{ για } 0 \leq z \leq h_p \quad (2.4.23)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(P)}}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} \quad (2.4.24)$$

$$\psi_{jm}^1(a_l, z) = \psi_{jm}^{(l-1)}(a_{l-1}, z), \text{ για } \begin{matrix} \max\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq d \\ l = 2, 3, \dots, L \end{matrix} \quad (2.4.25)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r=a_l} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(l-1)}}{\partial r} \right|_{r=a_{l-1}}, \text{ για } \begin{matrix} \max\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq d \\ l = 2, 3, \dots, L \end{matrix} \quad (2.4.26)$$

$$\psi_{jm}^{(p)}(b_p, z) = \psi_{jm}^{(p-1)}(b_p, z), \text{ για } \begin{matrix} 0 \leq z \leq \min\{h_p, h_{p-1}\} \\ p = 1, 2, \dots, P \end{matrix} \quad (2.4.27)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p-1)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} \quad (2.4.28)$$

Στο συμβολισμό που χρησιμοποιούμε, οι δείκτες l και p ορίζουν ποσότητες που αντιστοιχούν στα l και p μακροστοιχεία των τύπων II και III, αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης l συνδέεται με ποσότητες του άπειρου δακτυλιοειδούς στοιχείου.

Δυναμικά ταχύτητας περίθλασης και ακτινοβολίας για τους διάφορους τύπους μακροστοιχείων

Για κάθε τύπο μακροστοιχείου προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις για τις συναρτήσεις Ψ_{Dm} , ($m = 0, 1, 2, \dots$), Ψ_{11} , Ψ_{30} και Ψ_{51} όπως ορίζονται στις εξισώσεις (2.4.6) - (2.4.9).

(α) Τύπος I ($r \geq a, 0 \leq z \leq d$)

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^1(r, z) = g_{jm}^1(r, z) + \sum F_{j,ma} \frac{K_m(ar)}{K_m(aa)} Z_a(z) \quad (2.4.29)$$

όπου

$$g_{Dm}^l(r, z) = \left\{ J_m(kr) - \frac{J_m(ka)}{H_m(ka)} H_m(kr) \right\} \frac{Z_k(z)}{dZ_k'(z)} \quad (2.4.30)$$

$$g_{ll}^l(t, z) = g_{30}^l(r, z) = g_{51}^l(r, z) = 0 \quad (2.4.31)$$

$$\delta_D = \delta_1 = \delta_3 = d, \quad \delta_5 = d^2 \quad (2.4.32)$$

όπου H_m και K_m είναι η m -τάξης συνάρτηση Hankel πρώτου είδους και η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερου είδους, αντίστοιχα. Επιπλέον, οι $Z_a(z)$ είναι ορθοκανονικές συναρτήσεις στο $[0, d]$ που ορίζονται ως εξής:

$$Z_k(z) = N_k^{-1/2} \cosh(kz) \quad (2.4.33)$$

$$Z_a(z) = N_a^{-1/2} \cosh(az), a: \text{πραγματικός} \quad (2.4.34)$$

όπου:

$$N_k = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \quad (2.4.35)$$

$$N_a = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2ad)}{2ad} \right], a: \text{πραγματικός} \quad (2.4.36)$$

και α είναι οι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης:

$$\frac{\omega^2}{g} + a \tan(ad) = 0 \quad (2.4.37)$$

Η εξίσωση (2.4.37) έχει μια φανταστική και άπειρες πραγματικές ρίζες. Εδώ λαμβάνονται υπόψη η φανταστική ρίζα $a = -ik$, $k > 0$, και οι θετικές πραγματικές ρίζες. Αντικαθιστώντας το $a = -ik$ στις εξισώσεις (2.4.36) και (2.4.34), προκύπτουν άμεσα οι εξισώσεις (2.4.35) και (2.4.33).

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Οι δυνάμεις διέγερσης F_1 και F_3 και η ροπή F_5 μπορούν να εκφραστούν μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$\begin{aligned} F_k(t) &= -\iint_{S_0} p n_k dS = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \phi_D n_k dS = \\ &= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\theta) n_k dS \end{aligned}$$

για $k=1,3$

$$\text{και: } F_5(t) = M_1(t) + M_3(t)$$

όπου:

$$\begin{aligned} M_k(t) &= -\iint_{S_0} p(r \times n_k) dS = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \phi_D (r \times n_k) dS = \\ &= -\omega^2 \rho \frac{H}{2} e^{-i\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^m \iint_{S_0} \psi_{Dm}(r, z) \cos(m\theta) (r \times n_k) dS \end{aligned}$$

Επιπλέον, οι υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης $F_1'(t)$ και $F_3'(t)$ και οι συνιστώσες $M_1'(t)$ και $M_3'(t)$ της υδροδυναμικής ροπής αντίδρασης $F_5'(t)$ δίνονται από τους τύπους:

$$F'_k(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5} x_{j0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r,z) \cos(m\vartheta) n_k dS, \quad \text{για } k=1,3$$

και: $F'_5(t) = M'_1(t) + M'_3(t)$

$$\text{όπου: } F'_k(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5} x_{j0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r,z) \cos(m\vartheta) n_k dS$$

$$M'_k(t) = -\omega^2 \rho e^{-i\omega t} \sum_{j=1,3,5} x_{j0} \iint_{S_0} \psi_{jm}(r,z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS$$

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ροπών, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός των τιμών των ακόλουθων ολοκληρωμάτων:

$$F_{kj}(t) = \iint_{S_0} \psi_{jm}(r,z) \cos(m\vartheta) n_k dS \quad (2.4.38)$$

$$M_{kj}(t) = \iint_{S_0} \psi_{jm}(r,z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS, \quad \text{για } D=1,3,5 \quad (2.4.39)$$

Εισάγοντας τις αντίστοιχες σχέσεις για τις συναρτήσεις δυναμικού στα ανωτέρω ολοκληρώματα, προκύπτουν οι εξισώσεις (2.4.38) και (2.4.39), κατόπιν ολοκληρώσεως ως προς τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες μαθηματικές εκφράσεις:

$$\begin{aligned} F_{1j} &= \pi \delta_j \left\{ \alpha \sum_{\alpha} \frac{1}{\alpha} N_{\alpha}^{-1/2} F_{j,1\alpha} (\sin(ah_L) - \sin(ah_p)) + \right. \\ &+ \sum_{l=1}^l \left[f_{1,j}^{(l)} + (\mu - \lambda) \alpha_l \sum_{\alpha_{\mu}} \frac{1}{\alpha_{\mu}} N_{\alpha_{\mu}}^{-1/2} F_{j,1\alpha_{\mu}} \sin(a_{\mu}(d_{\lambda} - d_{\mu})) \right] + \\ &+ \left. \sum_{p=1}^p \left[f_{1,j}^{(p)} + (\mu - \lambda) b_p F_{j,10_{\mu}} (h_{\mu} - h_{\lambda}) - 2b_p (\mu - \lambda) \sum_{n_{\mu}=1}^{n_{\mu}} \frac{h_{\mu}}{n_{\mu} \pi} F_{j,1n_{\mu}} \sin\left(\frac{n_{\mu} \pi h_{\lambda}}{h_{\mu}}\right) \right] \right\} \\ M_{1j} &= \pi \delta_j \left\{ \alpha \sum_{\alpha} \frac{1}{\alpha} N_{\alpha}^{-1/2} F_{j,1\alpha} \left[\frac{1}{a} \cos(ah_L) + h_L \sin(ah_L) - \frac{1}{a} \cos(ah_p) - h_p \sin(ah_p) \right] + \right. \\ &+ \sum_{l=1}^l \left\{ m_{1,j}^{(l)} + \alpha_l (\mu - \lambda) \sum_{\alpha_{\mu}} \frac{1}{\alpha_{\mu}} N_{\alpha_{\mu}}^{-1/2} F_{j,1\alpha_{\mu}} \left[\frac{1}{a_{\mu}} \cos(a_{\mu}(d_{\lambda} - d_{\mu})) + d_{\lambda} \sin(a_{\mu}(d_{\lambda} - d_{\mu})) - \frac{1}{a_{\mu}} \right] \right\} + \\ &+ \sum_{p=1}^p \left\{ m_{1,j}^{(p)} + \frac{1}{2} (h_{\mu}^2 - h_{\lambda}^2) b_p (\mu - \lambda) F_{j,10_{\mu}} + 2b_p (\mu - \lambda) \sum_{n_{\mu}=1}^{n_{\mu}} \frac{h_{\mu}}{n_{\mu} \pi} F_{j,n_{\mu}} \right. \\ &\times \left. \left[\frac{h_{\mu}}{n_{\mu} \pi} \left((-1)^{n_{\mu}} - \cos\left(\frac{n_{\mu} \pi h_{\lambda}}{h_{\mu}}\right) - h_{\lambda} \sin\left(\frac{n_{\mu} \pi h_{\lambda}}{h_{\mu}}\right) \right) \right] \right\} \left. \right\} - e F_{1j} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{1j} = & 2\pi\delta_j \left\{ \sum_{l=1}^l \left\{ f_{3,j}^{(l)} + \sum_{a_l} \frac{1}{a_l^2} N_{a_l}^{-1/2} \left[F_{j,0al} (A_{0al} + A_{0a}^*) - F_{j,0al}^* (D_{0al} + D_{0a}^*) \right] \right\} \right. \\
& - \sum_{l=1}^l \left\{ f_{3,j}^{(p)} + \frac{1}{2} D_{00p} [F_{j,00p} \left\{ b_{p+l}^2 \left(\ln \left(\frac{b_{(p+1)}}{b_p} \right) - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} b_p^2 \right\} \right. \\
& \left. \left. + F_{j,00p}^* \left\{ \frac{1}{2} b_{p+1}^2 + b_p^2 \left(\ln \left(\frac{b_p}{b_{p+1}} \right) - 1/2 \right) \right\} \right] \right\} \\
& + 2 \sum_{n_p+1} (-1)^{n_p} \frac{h_p^2}{n_p^2 \pi^2} \left[F_{j,0npl} (A_{0n_p} + A_{0n_p}^*) - F_{j,0n_p}^* (D_{0n_p} + D_{0n_p}^*) \right] \\
& \left. - f_{3,j}^{(0)} - \frac{1}{2} b_l^2 F_{j,00_0} - 2 \sum_{n_0=1} (-1)^{n_0} \frac{h_0^2}{n_0^2 \pi^2} A_{0n_0} F_{j,0n_0} \right\}
\end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned}
M_{3j} = & \pi\delta_j \left\{ \sum_{l=1}^L \left\{ m_{3,j}^{(l)} + \sum_{a_l} \frac{1}{a_l^2} N_{a_l}^{-1/2} [F_{j,1aj} (a_{l+1} A_{1aj} - a_{l+1} - a_l D_{1aj}) \right. \right. \\
& \left. \left. + F_{j,1aj}^* (a_{l+1} A_{1aj}^* + a_l - a_l D_{1aj}^*) \right] \right\} \\
& + \sum_{p=1}^p m_{3,j}^{(p)} + \frac{1}{4} b_p b_{p+1} (b_{p+1}^2 - b_p^2) \left[\frac{1}{b_p} F_{j,10p} + \frac{1}{b_{p+1}} F_{j,10p}^* \right] \\
& + 2 \sum_{n_p=1} (-1)^{n_p} \frac{h_p^2}{n_p^2 \pi^2} \left[F_{j,1n_p} (b_{p+1} A_{1n_p} - b_{p+1} - b_p D_{1n_p}) \right. \\
& \left. + F_{j,1n_p}^* (b_{p+1} A_{1n_p}^* + b_p - b_p D_{1n_p}^*) \right] \\
& \left. + m_{3,j}^{(0)} + \frac{1}{4} b_1^3 F_{j,10_0} + 2 \sum_{n_0=1} (-1)^{n_0} \frac{h_0^2}{n_0^2 \pi^2} b_1 (A_{1n_0} - 1) F_{j,1n_0} \right\}
\end{aligned}$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί οι ακόλουθοι ορισμοί:

$$f_{k,j}^{(s)} = \iint_{S_0} g_{jm}^{(s)}(r, z) n_k dS$$

και

$$\begin{aligned}
& j = 1, 3, 5 \\
& \text{για } S = 0, 1, 2, \dots, P \text{ ή} \\
& S = 1, 2, \dots, L
\end{aligned}$$

$$m_{k,j}^{(s)} = \iint_{S_0} g_{jm}^{(s)}(r, z)(r \times n_k) dS, \text{ όπου οι συναρτήσεις } g_{jm}^{(s)} \text{ έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 3.}$$

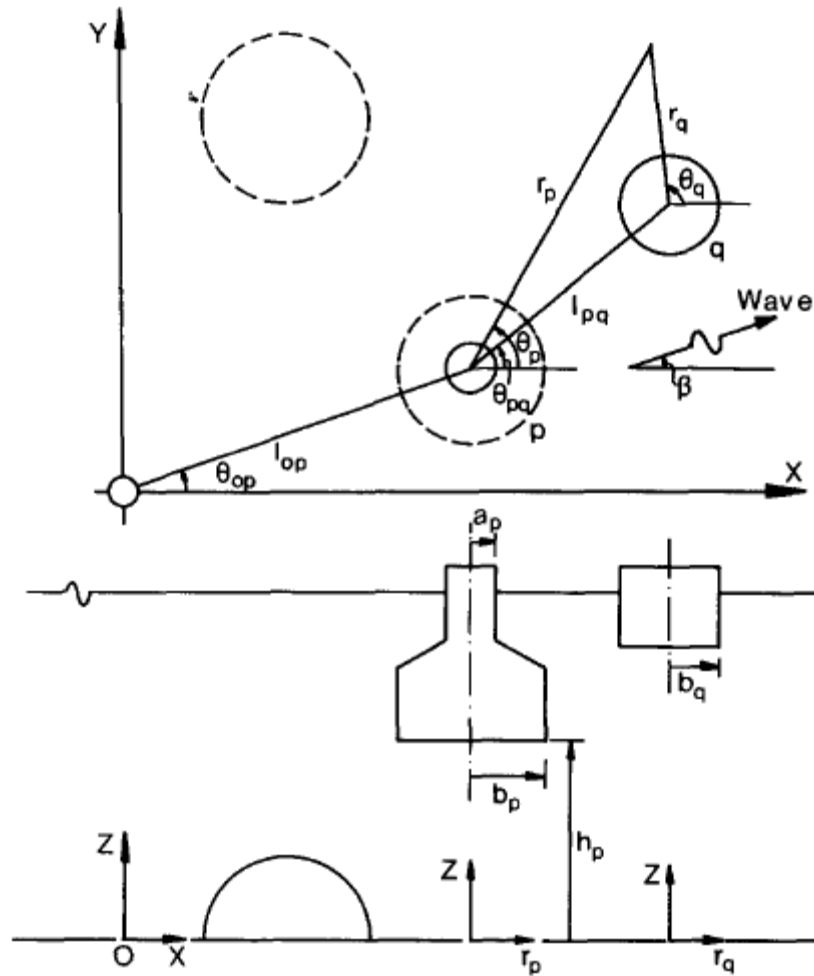
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΤΙΘΕΝΤΑΙ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μεταξύ επιπλεόντων σωμάτων είναι ιδιαίτερης σημασίας για τον σχεδιασμό υπερράκιων κατασκευών σύνθετης μορφής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων της εξεταζόμενης κατασκευής επηρεάζονται από την παρουσία των γειτονικών σωμάτων. Κάθε σώμα ανακλά κυματισμούς που δρουν στα υπόλοιπα σώματα, τα οποία με τη σειρά τους ανταποκρίνονται σε αυτή τη διέγερση και προσδίδουν επιπρόσθετους κυματισμούς οι οποίοι συμβάλλουν στην διέγερση του αρχικού σώματος και ούτω καθεξής.

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

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

Ένας αρμονικός κυματισμός πλάτους $H/2$, συχνότητας ω και αριθμού κύματος k , που διαδίδεται σε νερό βάθους d , προσπίπτει σε ομάδα N σταθερών και τυχαίας μορφής κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων, καθένα εκ των οποίων μπορεί να είναι είτε μερικώς ή ολικώς βυθισμένο, είτε πακτωμένο στον πυθμένα. Υποθέτουμε μικρό πλάτος κυματισμών, μη συνεκτική, ασυμπίεστη και αστρόβιλη ροή ώστε να ισχύει η γραμμική θεωρία. Χρησιμοποιείται καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων Ο-XYZ με αρχή των αξόνων στον πυθμένα και τη φορά του κατακόρυφου άξονα Oz προς τα πάνω (Σχήμα 2.1). Τα επιμέρους N κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων (r_p, θ_p, z) , $p = 1, 2, \dots, N$ ορίζονται επίσης με την αρχή των αξόνων τους στον πυθμένα.



Σχήμα 2.1: Επεξηγηματικό σκαρίφημα διαφόρων διατάξεων

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

$$\Phi(x, y, z; t) = \text{Re}[\phi(x, y, z)e^{-i\omega t}] \quad (2.4.41)$$

όπου το σύνθετο δυναμικό λειτουργίας $\phi(x, y, z)$, μπορεί να εκφραστεί, βάσει του της γραμμικής θεώρησης ως υπέρθεση του δυναμικού πρόσπτωσης ϕ_I και του δυναμικού διάθλασης ϕ_B του πεδίου κυματισμών:

$$\phi = \phi_I + \phi_B \quad (2.4.42)$$

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

$$\omega^2 \Phi - g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{στην ελεύθερη επιφάνεια, } z = d \quad (2.4.43)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0 \quad \text{στον πυθμένα, } z = 0 \quad (2.4.44)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n^{(p)}} = 0, \quad p = 1, 2, \dots, N \quad \text{στο } S^{(p)}, p = 1, 2, \dots, N \quad (2.4.45)$$

όπου $\frac{\partial}{\partial n^{(p)}}$ υποδηλώνει την παράγωγο στην κατεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος $n^{(p)}$, το οποίο έχει φορά προς τα έξω ως προς τη μέση βρεχόμενη επιφάνεια $S^{(p)}$ του p -στού σώματος.

Το δυναμικό διάθλασης Φ_B πρέπει να ικανοποιεί μια κατάλληλη συνθήκη ακτινοβολίας (radiation) του κύματος προς το άπειρο και η οποία έχει την εξής μορφή:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \Phi_B = 0 \quad (2.4.46)$$

$$\text{όπου } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Το δυναμικό της ταχύτητας του αδιατάρακτου συστήματος προσπιπτόντων κυματισμών, Φ_I , που διαδίδεται με γωνία β ως προς τον θετικό άξονα των x , μπορεί να εκφραστεί με κυλινδρικές συντεταγμένες για το p -στο σώμα ως εξής:

$$\Phi_I(r_p, \theta_p, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{I,m}(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad (2.4.47)$$

με

$$\frac{1}{d} \Psi_{I,m}(r_p, z) = \frac{e^{ikl_{op} \cos(\theta_{op} - \beta)} Z_0(z)}{dZ'_0(d)} J_m(kr_p) e^{-im\beta} \quad (2.4.48)$$

Όπου

$$- J_m(kr_p) : \text{η } m\text{-στης τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους} \quad (2.4.49)$$

$$- Z_0(z) = N_0^{-1/2} \cosh(kz) \quad (2.4.49)$$

$$- N_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \quad (2.4.50)$$

$$- Z'_0(d) \text{ η παράγωγος για } z = d.$$

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

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.4.51)$$

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

$$\Phi(r_p, \theta_p, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_m(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad (2.4.52)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} {}^s\Phi_j^{(p)} &= \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq}) {}^{s-1}\Phi_B^{(q)}(r_p, \theta_p, z), \quad s \geq 2 \\ {}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z), \quad {}^s\Phi^{(p)} &= {}^s\Phi_I^{(p)} + {}^s\Phi_B^{(p)} \end{aligned} \quad (2.4.53)$$

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

- το περιθλώμενο κύμα από το p -στο σώμα:

$$\Phi_B^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) \quad (2.4.54)$$

- το προσπίπτον στο p -στο σώμα κύμα:

$$\Phi_I^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi_I^{(p)} = {}^1\Phi_I^{(p)}(r_p, \theta_p, z) + \sum_{s=2}^{\infty} \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq})^{s-1} \Phi_B^{(q)}(r_p, \theta_p, z) \quad (2.4.55)$$

- το ολικό πεδίο κύματος γύρω από το p -στο σώμα:

$$\begin{aligned} \Phi^{(p)} &= \Phi_I^{(p)} + \Phi_B^{(p)} = {}^1\Phi_I^{(p)} + \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi_B^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq})^{s-1} \Phi_B^{(q)} \\ &= {}^1\Phi_B^{(p)} + {}^1\Phi_I^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \left[{}^s\Phi_B^{(p)} + \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq})^{s-1} \Phi_B^{(q)} \right] \\ &= {}^1\Phi^{(p)} + \sum_{s=2}^{\infty} \left[{}^s\Phi_B^{(p)} + {}^s\Phi_I^{(p)} \right] = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s\Phi^{(p)} \end{aligned} \quad (2.4.56)$$

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

:

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m {}^s\Psi_{B,m}^{(p)}(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad (2.4.57)$$

με

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_{B,m}^{(p)}(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} {}^sF_{j,m}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)} Z_j(z) \quad (2.4.58)$$

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

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

$$Z_j(z) = N_j^{-1/2} \cos(a_j z) \quad (2.4.59)$$

$$N_j = \left[1 + \frac{\sin(2a_j d)}{2a_j d} \right] \quad (2.4.60)$$

a_j : είναι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης

$$\frac{\omega^2}{g} + a_j \tan(a_j d) = 0 \quad (2.4.61)$$

η οποία έχει δύο φανταστικές και άπειρες πραγματικές ρίζες.

Εδώ λαμβάνονται υπόψη η φανταστική $a_0 = -ik$, $k > 0$, και οι πραγματικές θετικές ρίζες. Αντικαθιστώντας $a_0 = -ik$ στις εξισώσεις (2.4.59) και (2.4.60), προκύπτουν άμεσα οι εξισώσεις (2.4.9) και (2.4.50).

Επιπλέον, για $a_0 = -ik$, έχουμε:

$$K_m(-ikr_p) = \frac{\pi}{2} i^{m+1} H_m(kr_p) \quad (2.4.62)$$

όπου H_m εκφράζει την συνάρτηση Hankel, που ικανοποιεί την συνθήκη ακτινοβολίας του Sommerfeld (εξίσωση (6)).

Οι συντελεστές περίθλασης s-τάξης στην εξίσωση (2.4.58) θα λαμβάνονται μέσω της επίλυσης του προβλήματος περίθλασης της αντίστοιχης τάξης, που περιγράφεται από το δυναμικό ταχύτητας ${}^s\Phi^{(p)}$ – στο σύστημα συντεταγμένων του σώματος ρ . Μόλις οι συντελεστές αυτοί έχουν προσδιορισθεί, το δυναμικό ${}^s\Phi^{(p)}$ γύρω από το σώμα ρ , ($\rho = 1, 2, \dots, N$), της διάταξης μπορεί να βρεθεί με κατάλληλη αντικατάσταση της εξίσωσης (2.4.57) στην (2.4.53).

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

$$K_\nu(a_j r_q) e^{i\nu\theta_q} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} (-1)^m K_{\nu-m}(a_j I_{qp}) I_m(a_j r_p) e^{i(\nu-m)\theta_{qp}} e^{im\theta_p} \quad (2.4.63)$$

με τον περιορισμό ότι $r_q < I_{qp}$.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, όλοι οι όροι του δυναμικού ταχύτητας ${}^s\Phi^{(p)}$, που περιγράφονται στην εξίσωση (2.4.53) μπορούν τώρα να εκφραστούν στα πλαίσια του συστήματος συντεταγμένων του ρ-στου σώματος, για παράδειγμα:

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m {}^s\Psi_m^{(p)}(r_p, z) e^{im\theta_p} \quad (2.4.64)$$

με

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_m^{(p)}(r_p, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[{}^sQ_{j,m}^{(p)} \frac{I_m(a_j r_p)}{I_m(a_j b_p)} + {}^sF_{mj}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)} \right] Z_j(z) \quad (2.4.65)$$

όπου I_m : δηλώνει την μετασχηματισμένη συνάρτηση Bessel m-τάξης

και

$${}^s Q_{j,m}^{(p)} = \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{qp}) \sum_{v=-\infty}^{\infty} i^{m+v} \frac{K_{m-v}(a_j I_{qp})}{K_v(a_j b_p)} I_m(a_j b_p) \times {}^{s-1} F_v^{(q)} e^{i(v-m)\theta_{qp}}, \quad s \geq 2 \quad (2.4.66)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (2.4.65) αντιπροσωπεύει την συμβολή του προσπίπτοντος κύματος s-της τάξης, ${}^s \phi_l^{(p)}$, στο δυναμικό ${}^s \phi^{(p)}$. Ειδικά για την αλληλεπίδραση 1^{ης} τάξης, $s = 1$, το δυναμικό αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού, ${}^1 \phi_l^{(p)}$, δίνεται από την εξίσωση (2.4.47). Ωστόσο, προκειμένου να υπάρχει ενιαίος τρόπος έκφρασης για τα δυναμικά ταχύτητας ${}^s \phi^{(p)}$ για όλες τις τάξεις αλληλεπίδρασης, χρησιμοποιείται η εξής έκφραση:

$${}^1 Q_{j,m}^{(p)} = i^m \frac{e^{ikl_{op} \cos(\theta_{op} - \beta)} e^{-im\beta}}{dZ'_0(d)} I_m(a_j b_p) \delta_{0j} \quad (2.4.67)$$

Η σχέση (27) προκύπτει εύκολα από την (8) αν ληφθεί υπόψη ότι :

$$J_m(kr_p) = i^m I_m(-ikr_p) = i^m I_m(a_0 r_p) \quad (2.4.68)$$

Πλέον, με τις εκφράσεις (2.4.64), (2.4.65) το ολικό δυναμικό $\phi^{(p)}$ όπως δίνεται στην εξίσωση (2.4.56), μπορεί να γραφεί μέσω της εξίσωσης (2.4.52) ως εξής:

$$\frac{1}{d} \Psi_m(r_p, z) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[Q_{j,m}^{(p)} \frac{I_m(a_j r_p)}{I_m(a_j b_p)} + F_{j,m}^{(p)} \frac{K_m(a_j r_p)}{K_m(a_j b_p)} \right] Z_j(z) \quad (2.4.69)$$

με

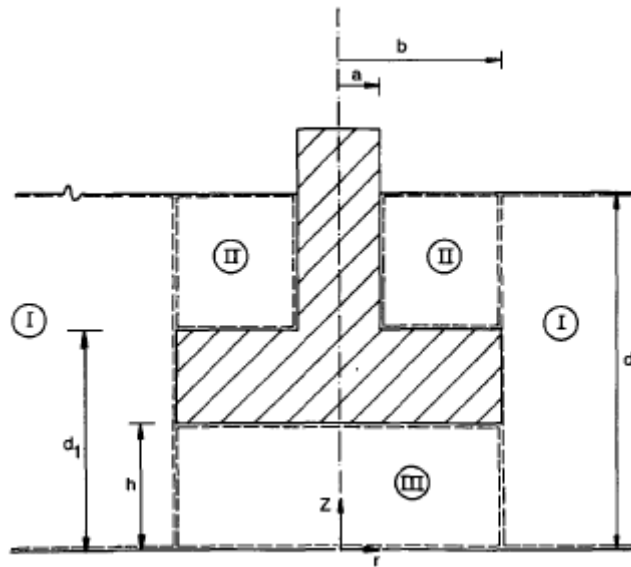
$$Q_{j,m}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s Q_{j,m}^{(p)}, \quad F_{j,m}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\infty} {}^s F_{j,m}^{(p)} \quad (2.4.70)$$

Έτσι, το ολικό δυναμικό ταχύτητας γύρω από το ρ-στο σώμα της διάταξης προκύπτει από την υπέρθεση του αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού με τις περιθλάσεις διαφόρων τάξεων, οι οποίες οφείλονται στο ρ σώμα καθώς και τα υπόλοιπα της διάταξης. Με τον τρόπο αυτό, η σχέση (2.4.69) μας επιτρέπει να μελετήσουμε το ρ-στο σώμα, ($\rho = 1, 2, \dots, N$), ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των γειτονικών σωμάτων μέσω της επίδρασής τους στο δυναμικό ροής του ρ-στού σώματος

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ S^{HΣ} ΤΑΞΗΣ

Από την επίλυση του προβλήματος περίθλασης s-τάξης για κάθε επιμέρους σώμα της σύνθετης διάταξης προκύπτουν οι άγνωστοι συντελεστές ${}^s F_{mj}^{(p)}$, ($p = 1, 2, \dots, N$), που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (2.4.58) και (2.4.70).

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια ημι-αναλυτική προσέγγιση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη γεωμετρία του κατακόρυφου σύνθετου κυλινδρικού σώματος (Σχήμα 2.2) που μελετάται στην παρούσα ανάλυση.



*Σχήμα 2.2: Κατακόρυφο σύνθετο κυλινδρικό σώμα.
Καθορισμός περιοχών ροής ρευστού.*

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

$${}^s \Phi(r, \theta, z) = -\frac{i\omega H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m {}^s \Psi_m(r_p, z) e^{im\theta} \quad (2.4.71)$$

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της κατασκευής (Σχ. 2.2), η εξίσωση (2.4.45), στην βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος μπορεί να διατυπωθεί ξεχωριστά για τα οριζόντια και για τα κάθετα όρια του εξεταζόμενου σώματος:

$$\frac{\partial {}^s\psi_m}{\partial z} = 0, \quad z = h, 0 \leq r \leq b \quad (2.4.72)$$

$$\frac{\partial {}^s\psi_m}{\partial z} = 0, \quad z = d_1, a \leq r \leq b \quad (2.4.73)$$

$$\frac{\partial {}^s\psi_m}{\partial r} = 0, \quad r = a, d_1 \leq r \leq d \quad (2.4.74)$$

$$\frac{\partial {}^s\psi_m}{\partial r} = 0, \quad r = b, h \leq r \leq d_1 \quad (2.4.75)$$

Επιπλέον, τόσο το δυναμικό ταχύτητας όσο και η παράγωγός του, $\frac{\partial {}^s\phi}{\partial z}$ πρέπει να είναι συνεχή όσον αφορά στις κατακόρυφες οριακές συνθήκες των γειτονικών περιοχών του ρευστού όπως φαίνονται στο Σχ. 2.2. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

$${}^s\psi_m^{II}(b, z) = {}^s\psi_m^I(b, z), \quad d_1 \leq r \leq d \quad (2.4.76)$$

$$\left. \frac{\partial {}^s\psi_m^{II}}{\partial r} \right|_{r=b} = \left. \frac{\partial {}^s\psi_m^I}{\partial r} \right|_{r=b} \quad (2.4.77)$$

$${}^s\psi_m^{III}(b, z) = {}^s\psi_m^I(b, z), \quad 0 \leq z \leq h \quad (2.4.78)$$

$$\left. \frac{\partial {}^s\psi_m^{III}}{\partial r} \right|_{r=b} = \left. \frac{\partial {}^s\psi_m^I}{\partial r} \right|_{r=b} \quad (2.4.79)$$

Οι εκθέτες I, II, III υποδηλώνουν ποσότητες που αντιστοιχούν στην σχετική περιοχή του ρευστού. Επιλύοντας την εξίσωση Laplace, με τη μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών, επαληθεύονται κατάλληλες παραστάσεις για τις συναρτήσεις ${}^s\psi_m$ σε κάθε 'ring-element'. Αυτές οι παραστάσεις - με τη μορφή σειρών Fourier - ικανοποιούν τις αντίστοιχες οριζόντιες οριακές συνθήκες του κάθε στοιχείου, π.χ. τις εξισώσεις (2.4.43) και (2.4.44) για $0 \leq z \leq d$, $r \geq b$, τις εξισώσεις (2.4.43) και (2.4.73) για $d_1 \leq z \leq d$, $a \leq r \leq b$, όπως και τις εξισώσεις (4) και (32) για $0 \leq z \leq d$, $0 \leq r \leq b$.

Η κατάλληλη έκφραση για την ${}^s\Psi_m^I$ στο μακρο-στοιχείο τύπου I (βλέπε Σχ. 2.2) δίνεται στην προηγούμενη ενότητα από την εξίσωση (2.4.65). Οι s-τάξης συντελεστές διάθλασης ${}^sF_{mj}^{(p)}$ όπως δόθηκαν στη σχέση (2.4.65) παριστούν, τους άγνωστους συντελεστές Fourier ${}^sF_{mj}^I$ στην εξωτερική περιοχή του ρ-στου σώματος.

Για τους άλλους δύο τύπους μακρο-στοιχείων δίνονται οι ακόλουθες εκφράσεις των συναρτήσεων ${}^s\Psi_m^{II}$, ${}^s\Psi_m^{III}$.

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_m^{II}(r, z) = \sum_{l=0}^{\infty} {}^sF_{ml}^{II} R_{ml}(r) Y_l(z), \quad a \leq r \leq b, \quad d_1 \leq z \leq d \quad (2.4.80)$$

$$\frac{1}{d} {}^s\Psi_m^{III}(r, z) = \sum_{l=0}^{\infty} \epsilon_n {}^sF_{ml}^{III} \frac{I_m\left(\frac{n\pi r}{h}\right)}{I_m\left(\frac{n\pi b}{h}\right)} \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right), \quad 0 \leq r \leq b, \quad 0 \leq z \leq h \quad (2.4.81)$$

Όπου

$$R_{ml}(r) = \frac{I_m(\mu_l r) - \frac{I'_m(\mu_l a)}{K'_m(\mu_l a)} K_m(\mu_l r)}{I_m(\mu_l b) - \frac{I'_m(\mu_l a)}{K'_m(\mu_l a)} K_m(\mu_l b)} \quad (2.4.82)$$

$Y_l(z)$ είναι ορθοκανονικές συναρτήσεις για $[d - d_1, d]$ που ορίζονται ως εξής:

$$Y_0(z) = M_0^{-1/2} \cosh[k_{II}(z - d_1)] \quad (2.4.83)$$

$$Y_l(z) = M_l^{-1/2} \cos[\mu_l(z - d_1)], \quad l \geq 1 \quad (2.4.84)$$

$$M_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh[2k_{II}(d - d_1)]}{2k_{II}(d - d_1)} \right] \quad (2.4.85)$$

$$M_l = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin[2\mu_l(d - d_1)]}{2\mu_l(d - d_1)} \right], \quad l \geq 1 \quad (2.4.86)$$

Επιπλέον, μ_l είναι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης:

$$\frac{\omega^2}{g} + \mu_l \tan[\mu_l(d - d_1)] = 0 \quad (2.4.87)$$

Θεωρώντας ως αρχική την $\mu_0 = -ik_{II}$.

ϵ_n είναι το σύμβολο του Neumann:

$$\epsilon_0 = 1, \quad \epsilon_n = 2 \quad n \geq 1$$

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η μορφή των επιλεγμένων λύσεων των συναρτήσεων ${}^s\psi_m$ είναι τέτοια ώστε οι οριακές συνθήκες σε όλα τα οριζόντια όρια των «μακρο-στοιχείων» καθώς και στο $r = a$ να ικανοποιούνται *a priori*. Η κινηματική συνθήκη, εξίσωση (2.4.75), καθώς και οι απαιτήσεις για συνέχεια της συνάρτησης δυναμικού και των πρώτων παραγώγων της, εξισώσεις (2.4.76) - (2.4.79), στις κατακόρυφες οριακές συνθήκες των γειτονικών περιοχών ρευστού, ικανοποιούνται. Εκφράζοντας αυτές τις συνθήκες, προκύπτει ένα σύστημα άπειρων γραμμικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών διάθλασης s -τάξης ${}^sF_{mj}^I$ στην περιοχή I του ρευστού (Σχ. 2.2) για κάθε επιμέρους σώμα. Το σύστημα αυτό μετά την περικοπή των διαφόρων σειρών, εξισώσεις (2.4.65), (2.4.80) και (2.4.81), μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη πινακοποιημένη μορφή:

$$\{ {}^sF^I \} = [E]^{-1}[M]\{ {}^sQ \} \quad (2.4.88)$$

Εδώ ο όρος $\{ {}^sQ \}$ δηλώνει ένα σύνθετο διάνυσμα, τα στοιχεία του οποίου δίδονται από τις εξισώσεις (2.4.67) και (2.4.66) για $s = 1$ και $s \geq 2$ αντιστοίχως. $[E]$ και $[M]$ είναι τετραγωνικοί πίνακες. Τα στοιχεία τους βασίζονται αποκλειστικά στις ρίζες των εξισώσεων (2.4.61), (2.4.87) και για τη εκάστοτε γεωμετρία της εξεταζόμενης αξονοσυμμετρικής γεωμετρίας. Συνεπώς, για κάθε σώμα οι πίνακες $[E]$ και $[M]$ παραμένουν ίδιοι για όλες τις τάξεις της περίθλασης.

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το σύστημα των εξισώσεων (2.4.68) πρέπει να δημιουργηθεί για όλες τις τιμές του m , που λαμβάνονται υπόψη για την αναπαράσταση του δυναμικού ταχύτητας στην εξωτερική περιοχή του ρευστού κάθε σώματος, βλέπε εξίσωση (2.4.64).

Λαμβάνοντας τώρα υπόψη την (2.4.62), η εξίσωση (2.4.88) παρέχει για $s \geq 2$ μία αναδρομική σχέση, μέσω της οποίας οι συντελεστές διάθλασης s -τάξης μπορούν να εκφραστούν σε όρους $(s - 1)$ -τάξης. Οι συντελεστές της πρώτης τάξης ($s = 1$), οι οποίοι συνδέονται με την αλληλεπίδραση μεμονωμένου σώματος-κύματος, μπορούν επίσης να υπολογιστούν μέσω της εξίσωσης (2.4.88), όπου $\{ {}^sQ \}$ δίνεται από την (2.4.67).

Τώρα, προσθέτοντας τις διάφορες τάξεις των συντελεστών Fourier ${}^sF_{mj}^I$, το ολικό δυναμικό ταχύτητας στην πρώτη περιοχή του ρευστού κάθε σώματος, Φ^I , μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση (2.4.69). Στη συνέχεια, μπορούμε να υπολογίσουμε τους άγνωστους συντελεστές ${}^sF_{ml}^{II}$ και ${}^sF_{ml}^{III}$, που απαιτούνται για τις απεικονίσεις σειρών των συναρτήσεων δυναμικού για την δεύτερη και τρίτη περιοχή του ρευστού αντίστοιχα, όπως στην περίπτωση του μεμονωμένου σώματος. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτουν τα παρακάτω συστήματα εξισώσεων:

$$F_{ml}^{II} = \sum_{j=0} L_{lj}(Q_{mj} + F_{mj}^I) \quad (2.4.89)$$

και

$$F_{mn}^{III} = \sum_{j=0} L_{nj}(Q_{mj} + F_{mj}^I) \quad (2.4.90)$$

όπου Q_{mj} και F_{mj}^I ορίζονται από την εξίσωση (2.4.70). Οι συντελεστές L_{lj} και L_{nj} δίνονται στο Παράρτημα Β.

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

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \rho \Phi e^{-i\omega t} \quad (2.4.91)$$

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

$$\mathbf{F} = - \iint_{S_p} p \mathbf{n} dS \quad (2.4.92)$$

και

$$\mathbf{M} = - \iint_{S_p} p (\mathbf{r} \times \mathbf{n}) dS \quad (2.4.93)$$

όπου το r υποδηλώνει ένα διάνυσμα θέσης που εκτείνεται από το σημείο αναφοράς των δυνάμεων και ροπών σε ένα τοπικό σημείο στο S_p . Ολοκλήρωση των (2.4.92) και (2.4.93) οδηγεί σε αναλυτικές εκφράσεις για τις διεγείρουσες φορτίσεις των κυματισμών που δρουν σε κάθε «βαθμίδα» της κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

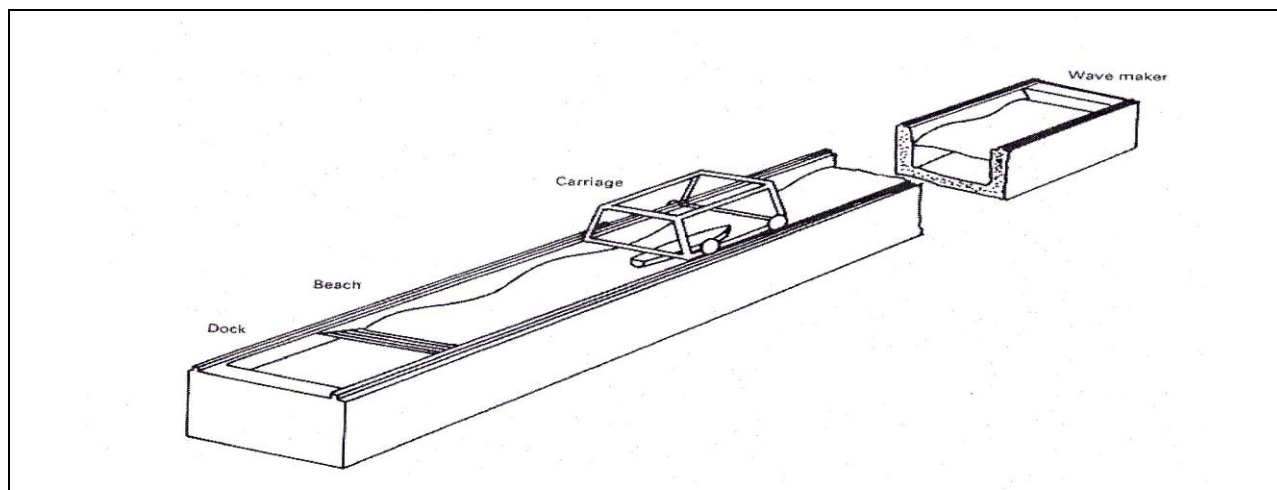
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Τα εργαστηριακά πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην ειδική δεξαμενή (Towing Tank) που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και διήρκησαν τρεις εβδομάδες, από τις 10-09-2012 έως τις 28-09-2012. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν :

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Το ονομαστικό μήκος της δεξαμενής του ΕΝΘΥ είναι 100 μέτρα εκ των οποίων τα 90 περίπου μέτρα είναι διαθέσιμα για την εκπόνηση πειραμάτων. Το πλάτος της είναι 4.56 μέτρα και το βάθος της μπορεί να φτάσει έως και τα 3.5 μέτρα. Στο ένα άκρο της δεξαμενής είναι εγκατεστημένος ένας μηχανισμός παραγωγής κυμάτων (κυματιστήρας), ενώ στο άλλο άκρο είναι εγκατεστημένη μία ειδική ξύλινη διάταξη απόσβεσης κυμάτων (αποσβεστήρας). Στα πλευρικά τοιχώματα της πειραματικής δεξαμενής μπορούν να τοποθετηθούν ειδικές διατάξεις απόσβεσης κυματισμών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος. Στο άνω μέρος των πλευρικών τοιχωμάτων της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος ράγες, κατάλληλες να κινείται το φορείο στο οποίο αναρτώνται τα πρότυπα. Περί το μέσο της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί παράθυρα παρατηρήσεων τα οποία καλύπτουν 18 μέτρα.

Η δεξαμενή γεμίζει με νερό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης το οποίο αντλείται από γεώτρηση. Βασική απαίτηση είναι η αποφυγή δημιουργίας μικροβιολογικού φόρτου στο νερό. Για το λόγο αυτό, ο χώρος στον οποίο είναι εγκατεστημένη η πειραματική δεξαμενή είναι πλήρως απομονωμένος από το ηλιακό φως ενώ, παράλληλα, διατίθεται ειδικό φίλτρο μέσω του οποίου γίνεται ανακύκλωση του νερού της δεξαμενής. Τέλος, ανάλογα με τις ανάγκες του εργαστηρίου, η δεξαμενή αδειάζει κάθε τρία χρόνια περίπου οπότε και πραγματοποιείται καθαρισμός της. Στη συνέχεια γεμίζει και πάλι με νερό έτσι, ώστε να ανταποκρίνεται στο λειτουργικό της ρόλο.



Εικόνα 3.1: Σκαρίφημα της πειραματικής δεξαμενής



Εικόνα 3.2: Άποψη της πειραματικής δεξαμενής του ΕΝΘΥ

Ο ΚΥΜΑΤΙΣΤΗΡΑΣ

Το σύστημα παραγωγής κυματισμών βρίσκεται ένα μέτρο πριν το τέλος της δεξαμενής και αποτελείται από ένα πτερύγιο (flap) από ανοξείδωτο χάλυβα, που καταλαμβάνει όλο το πλάτος της δεξαμενής. Το πτερύγιο αυτό εδράζεται με άρθρωση σε ύψος 1.3 μέτρα πάνω από τον πυθμένα και φτάνει μέχρι το χείλος της δεξαμενής. Για τη λειτουργία του, αντλείται το νερό από το χώρο πίσω από το πτερύγιο, το οποίο στη συνέχεια κινείται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος. Το σύστημα του κυματιστήρα, είναι τύπου πτερυγίου (flap type) και μπορεί να δημιουργήσει κανονικούς αρμονικούς κυματισμούς με μήκη από 0.5 μέτρα έως και 13 μέτρα και συχνότητες από 0.3 Hz έως 1.4 Hz. Επίσης, μπορεί να δημιουργήσει και πρότυπα θαλασσίων κυματισμών με προκαθορισμένο φάσμα ενέργειας.



Εικόνα 3.3: Αποψη του συστήματος παραγωγής κυματισμών

ΤΟ ΦΟΡΕΙΟ

Το φορείο είναι αναπόσπαστο κομμάτι της πειραματικής δεξαμενής και φέρει το μετρητικό εξοπλισμό, όπως τα δυναμόμετρα πάνω στα οποία δένονται τα πρότυπα και τους Η/Υ που ψηφιοποιούν τα αποτελέσματα των μετρητικών οργάνων.

Το βάρος του φορείου είναι 5.5 τόνοι και κινείται πάνω σε σιδηροτροχιές κατά μήκος της δεξαμενής με ταχύτητα έως και 5.5 m/s. Η κίνησή του είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και μπορεί να δουλέψει χωρίς οδηγό, εάν και αυτό για λόγους ασφαλείας απαγορεύεται. Η ταχύτητά του μετριέται με έναν αισθητήρα φωτεινών παλμών, οι οποίοι δημιουργούνται από ένα ειδικό σύστημα που φωτίζει ένα βαθμονομημένο τροχό σε επαφή με τις σιδηροτροχιές. Η ακρίβεια μέτρησης της ταχύτητας είναι της τάξεως του 0.1 mm/s.

Τέλος, στο πίσω μέρος του φορείου ακολουθεί ένας μηχανισμός βίαιης απόσβεσης υψηλών κυματισμών που δημιουργεί το πρότυπο (σιδερώστρα). Η απόσβεση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της σιδερώστρας εφαπτομενικά της επιφάνειας του νερού κατά την επιστροφή του φορείου στη θέση εκκίνησης.

ΤΑ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΑ

Για τη μέτρηση των δυνάμεων και των κινήσεων της πειραματικής πλωτής εξέδρας χρησιμοποιήθηκαν 2 δυναμόμετρα.

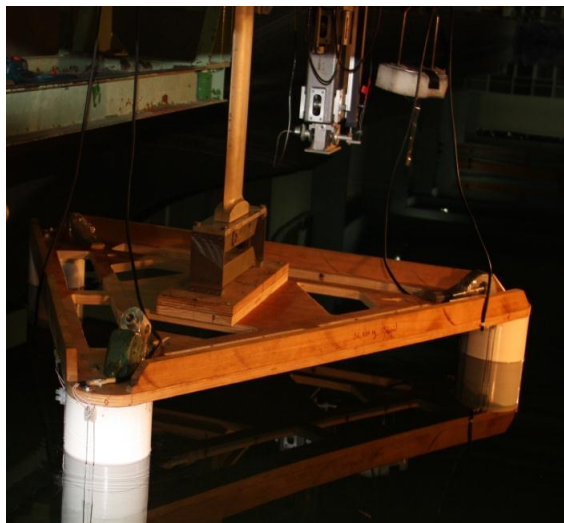
Το πρώτο δυναμόμετρο (R35) περιορίζει τους βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου και χρησιμοποιήθηκε για τα σταθερά πειράματα, κατά τα οποία το μοντέλο είναι πακτωμένο πάνω στο δυναμόμετρο. Στην προκείμενη περίπτωση μετρήθηκαν μόνο οι δυνάμεις αντίστασης της εξέδρας σε κυματισμούς. Για τη μέτρηση της αντίστασης το δυναμόμετρο φέρει παραμορφωσιόμετρα (strain gages) που μετατρέπουν τις οριζόντιες δυνάμεις σε τάση. Μέσω

της κατάλληλης βαθμονόμησης μετατρέπεται η χρονική ιστορία του σήματος σε μετρούμενη αντίσταση.

Το δεύτερο δυναμόμετρο (R47) διαθέτει 3 άξονες ελευθερίας (κίνηση κατά το διάμηκες, κίνηση κατά το κατακόρυφο και περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα) και χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα, όπου το μοντέλο έχει και ελευθερία κατακόρυφης κίνησης. Το δυναμόμετρο αυτό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντίστασης καθώς και για τη μέτρηση του προνευτασμού (δεν αφορά τα εν λόγω πειράματα) και της κατακόρυφης ανύψωσης του μοντέλου.

Το δυναμόμετρο αυτό αποτελείται από τρία μέρη· ένα μόνιμα σταθερό, ένα εν δυνάμει σταθερό που κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παραμένει σταθερό και ένα κινούμενο μέρος. Η μέτρηση της αντίστασης πραγματοποιείται μέσω μιας γέφυρας Wheatstone, η οποία αποτελείται από τέσσερα strain gages που συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν κύκλωμα. Το σταθερό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μέρος του δυναμόμετρου μπορεί να εκτελεί απειροστά μικρές κινήσεις ως προς το μόνιμα σταθερό μέρος του δυναμόμετρου κατά το διαμήκη άξονα της δεξαμενής που οφείλονται στην αντίσταση που συναντά το μοντέλο κατά τη κίνηση του στο νερό. Οι μικρές αυτές κινήσεις μεταφέρονται στον αισθητήρα και με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η μέτρηση της αντίστασης.

Η μέτρηση της ανύψωσης του κέντρου πρόσδεσης του σώματος πραγματοποιείται με τη χρήση ενός αισθητήρα (γραμμικού ποτενσιόμετρου), το οποίο είναι ένα αναλογικό ηλεκτρονικό εξάρτημα που χρησιμεύει στα κυκλώματα ως μεταβλητή αντίσταση. Συγκεκριμένα, το ποτενσιόμετρο λαμβάνοντας την σχετική κατακόρυφη κίνηση μεταξύ του κινούμενου μέρους του δυναμόμετρου και του σταθερού στα πειράματα μέρους του δυναμόμετρου μεταβάλλει την αντίσταση του με αποτέλεσμα και τη μεταβολή του διαρρέοντος σε αυτό ρεύματος. Η μεταβολή του ρεύματος στη συνέχεια μεταφράζεται σε μεταβολή τάσης και είναι αυτή που μετρά ο ενισχυτής. Σημειώνεται επίσης πως το εύρος της μετρούμενης τάσης κυμαίνεται από 0 έως 10 V.



Εικόνα 3.4: Το μοντέλο δεμένο στο δυναμόμετρο R35



Εικόνα 3.5: Το μοντέλο δεμένο στο δυναμόμετρο R47

ΤΑ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Τα μετρητικά ύψους κύματος (wave probes) αποτελούν μία από τις βασικές μετρητικές διατάξεις με τα οποία διεξάγονται πειράματα καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας και δυναμικής συμπεριφοράς των κυμάτων που παράγονται από τον κυματιστήρα (seakeeping).

Το καθένα από αυτά αποτελείται από δύο παράλληλα τοποθετημένα λεπτά σύρματα κάθετα στην επιφάνεια του νερού με μήκος 40 εκατοστά. Τα σύρματα ενώνονται στο άνω άκρο τους μέσω ενός κυκλώματος ενώ στο κάτω άκρο τους υπάρχει ασυνέχεια. Το κύκλωμα κλείνει μέσω της επιφάνειας του νερού. Βυθίζοντας το όργανο μεταβάλλεται το ποσοστό του βρεχόμενου σύρματος και του σύρματος που είναι πάνω από την επιφάνεια του νερού. Μεταβάλλεται έτσι η ολική αντίσταση του κυκλώματος και κατ' επέκταση η μετρούμενη τάση, η οποία μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης μεταφράζεται σε ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Wave probes είναι τοποθετημένα στο τοιχίο της δεξαμενής σε μικρή απόσταση από τον κυματιστήρα για τη μέτρηση του παραγόμενου κύματος και λειτουργούν και ως επαλήθευση θεωρητικού (input) και πραγματικά παραγόμενου κύματος (output).

Επίσης wave probes τοποθετήθηκαν στους κυλίνδρους του πρότυπου μοντέλου, καθ' όλο το ύψος τους (50 cm) για την μέτρηση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Και αυτά τα wave probes έχουν την προαναφερθείσα αρχή λειτουργίας.



Εικόνα 3-6: Wave probes τοποθετημένα στον απλό κύλινδρο

ΟΙ ΓΕΡΑΝΟΙ

Το εργαστήριο έχει στη διάθεσή του δύο γερανούς που βοηθούν στην εγκατάσταση του βαρέως εξοπλισμού και την τοποθέτηση των δυναμόμετρων και των προτύπων. Ο ένας βρίσκεται πλησίον του αποσβεστήρα ενώ ο δεύτερος, ο οποίος έχει και μεγαλύτερη ανυψωτική ικανότητα, βρίσκεται περίπου στο μέσον της δεξαμενής πλησιέστερα στον κυματιστήρα.

3.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Τροποποίηση μοντέλου

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης (κλίμακα 1:50) πλωτής εξέδρας τριγωνικής μορφής, κατασκευασμένο για προηγούμενα πειράματα πλωτών κατασκευών του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Ακύρωσης, το οποίο έπρεπε να προσαρμοστεί στις ανάγκες και τα δεδομένα των πειραμάτων για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το αρχικό μοντέλο αποτελούνταν από τρεις συμπαγείς ξύλινους κυλίνδρους προσαρμοσμένους στις κορυφές μιας ξύλινης τριγωνικής πλάκας. Στη βάση κάθε κυλίνδρου ήταν συνδεδεμένο ένα μεγαλύτερης διαμέτρου κυλινδρικό τμήμα συμπαγούς ξύλου («σκαλοπάτι»).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής απομακρύνθηκαν τα προαναφερθέντα «σκαλοπάτια» για να τοποθετηθούν αντίστοιχοι κυκλικοί δίσκοι από υλικό Plexiglas, μεγαλύτερης διαμέτρου αλλά σημαντικά μικρότερου πάχους, αναφερόμενοι και ως «ποδιές». Η τροποποίηση αυτή επέφερε σημαντική απώλεια άντωσης, λόγω της αφαίρεσης του σχετικά μεγάλου όγκου των «σκαλοπατιών». Κατέστη λοιπόν αναγκαία η αφαίρεση βάρους, δηλαδή υλικού, από το μοντέλο για να επιτευχθούν τα επιθυμητά βυθίσματα, η οποία πραγματοποιήθηκε με:

1. Διάτρηση των συμπαγών ξύλινων κυλίνδρων με μηχανουργικό τόρνο. Στον κύλινδρο διαστάσεων 16×50 cm δημιουργήθηκε σπή διαμέτρου 10.8 cm και βάθους 40 cm. Η αναλυτική αφαίρεση των βαρών έχει ως εξής:

| Κύλινδρος | Αρχικό βάρος κυλίνδρου [kg] | Αφαιρούμενο βάρος [kg] | Τελικό βάρος κυλίνδρου [kg] |
|-----------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| I. | 4.290 | 1.580 | 2.710 |
| II. | 4.330 | 1.540 | 2.790 |
| III. | 4.200 | 1.540 | 2.660 |

Συνολικό αφαιρούμενο βάρος 4.660 kg.

2. Δημιουργία συμμετρικών οπών στην τριγωνική πλάκα συγκράτησης των κυλίνδρων. Αφαιρέθηκε 1.5kg.

Στη συνέχεια οι κύλινδροι λειάνθηκαν, στοκαρίστηκαν και χρωματίστηκαν με ειδικό αδιάβροχο χρώμα στο προτοτυποποιείο του ΕΝΘΥ, ειδικά στα σημεία πρόσδεσης του τόρνου καθώς και στην βάση και τις ακμές τους.

Οι κυκλικοί δίσκοι προστέθηκαν μόνο για τη διεξαγωγή του αντίστοιχο μέρους των πειραμάτων. Η τοποθέτησή τους έγινε κοχλιωτά (3 βίδες περιμετρικά) στη βάση κάθε κυλινδρικού ποδιού, με χρήση σιλικόνης ανάμεσα σε δίσκο και πόδι καθώς και περιμετρικά του ποδιού στην ένωση του με το δίσκο, για πλήρη αδιαβροχοποίηση. Τέλος απαραίτητος ήταν ο χρωματισμός τους, διότι η διαφάνεια του υλικού δεν τους καθιστούσε ορατούς κάτω από το νερό.



Εικόνα 3.7: Διάτρηση κυλίνδρου



Εικόνα 3.8: Προσάρτηση κυκλικών δίσκων

Χάραξη βυθισμάτων

Απαραίτητα στη συνέχεια ήταν ο υπολογισμός και η χάραξη των επιθυμητών βυθισμάτων, δηλαδή των ισάλων γραμμών του πρότυπου μοντέλου. Η χάραξη πραγματοποιήθηκε στο προτυποποιείο του ΕΝΘΥ με χρήση ενός ειδικού χαρακτηριστικού οργάνου, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-9. Η χάραξη έγινε για κάθε κύλινδρο ξεχωριστά. Ο κάθε κύλινδρος, καθώς και η ακίδα του οργάνου τοποθετούνταν πάνω στην επιφάνεια εργασίας, η οποία λειτούργησε ως επίπεδο αναφοράς. Στη συνέχεια, για κάθε βύθισμα η ακίδα ανέβαινε μηχανικά έως ότου υποδείξει με ηλεκτρονική ένδειξη - ακρίβειας εκατοστού του χιλιοστού - το κατάλληλο σημείο όπου και χαρασσόταν μικρής έκτασης ευθύγραμμο τμήμα. Κατόπιν, τοποθετώντας τον κύλινδρο σε οριζόντια θέση πάνω στην επιφάνεια εργασίας, σχεδιαζόταν συνεχής ίσαλος γραμμή με ένωση των ήδη χαραχθέντων επιμέρους τμημάτων.

Για τα πειράματα του μονού κυλίνδρου πραγματοποιήθηκε χάραξη βυθίσματος στα 33 cm, ενώ για την συστοιχία των τριών κυλίνδρων στα 40 cm.



Εικόνα 3.9: Διαδικασία χάραξης ισάλων γραμμών

Σημείωση: Η ύπαρξη διαγωγής, κυρίως όσον αφορά στη συστοιχία των τριών κυλίνδρων, ήταν αναπόφευκτη διότι δεν ήταν δυνατή η ισοκατανομή του βάρους στο εσωτερικό των κυλίνδρων, ωστόσο θεωρήθηκε αμελητέα ή διορθώθηκε με κατάλληλη προσθήκη βαρών στις κορυφές της τριγωνικής πλωτής εξέδρας. Η προσθήκη βαρών προσομοιάζει τον ερματισμό της πλωτής κατασκευής.

Λοιπές εργασίες

Πριν την τοποθέτηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή:

- Πραγματοποιήθηκε έλεγχος για τυχόν ατέλειες του ξύλου και αποφυγή της διαβροχής του. Σε ορισμένα σημεία κρίθηκε απαραίτητη η επικόλληση αδιάβροχων ταινιών.
- Στερεώθηκαν τα wave probes στα κατάλληλα σημεία με τη βοήθεια σιλικόνης και βιδών, καθώς και τα καλώδια για τη μετέπειτα σύνδεση των wave probes με τα αντίστοιχα μετρητικά όργανα.
- Τοποθετήθηκαν αποσβεστήρες κυμάτων («φελλοί») μέχρι τα μέσα της δεξαμενής για ταχύτερη απόσβεση των κυμάτων και μείωση του χρόνου αναμονής ανάμεσα στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Επίσης πριν την τοποθέτηση του μοντέλου στην δεξαμενή, γινόταν καταγραφή του βάρους του με την ηλεκτρονική ζυγαριά του εργαστηρίου, αφού πρώτα είχε αφαιρεθεί το βάρος των ιμάντων με τους οποίους ο γερανός σήκωνε το μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο υπολογιζόταν το επιπλέον βάρος που έπρεπε να προστεθεί στο μοντέλο ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό εκτόπισμα. Να σημειωθεί επίσης πως στην περίπτωση των πειραμάτων με ελευθερία κατακόρυφης κίνησης, σε αυτό το βάρος συνυπολογιζόταν και το βάρος του κινητού μέρους του δυναμόμετρου (7.360 kg).

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΩΝ

Για τη σωστή λήψη των πειραματικών μετρήσεων είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση των μετρητικών αισθητήρων και οργάνων της πειραματικής διάταξης.

Σε γενικές γραμμές, οι φυσικές μεταβολές κάθε μετρούμενου μεγέθους που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων γίνονται αντιληπτές από το αντίστοιχο όργανο ως μεταβολές ρεύματος που στη συνέχεια μεταφράζονται σε διαφορά τάσης και μετριοούνται σε Volt. Οι μετρούμενες αυτές τάσεις σε Volt για να βρουν αντιστοιχία στις πραγματικές μονάδες στο σύστημα S.I που εκφράζουν χρειάζονται μια συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή μια συνάρτηση όπου εισάγοντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή τα Volt που λαμβάνονται από τον αισθητήρα του εκάστοτε οργάνου θα προκύπτει ως εξαρτημένη μεταβλητή το μετρούμενο μέγεθος σε πραγματικές φυσικές μονάδες στο σύστημα S.I. Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι γραμμικές συναρτήσεις της μορφής $y = a \cdot x + b$ και προκύπτουν από τις βαθμονομήσεις των αισθητήρων, όπου αυτοί μετρώντας πρότυπα φυσικά μεγέθη δίνουν αποτελέσματα σε Volt και μέσω αυτών των ζευγών τιμών προκύπτουν οι αντίστοιχες συναρτήσεις.

Μετά τον προσδιορισμό των εξισώσεων μεταφοράς και πριν την πραγματοποίηση κάθε ομάδας τρεξιμάτων του μοντέλου στην δεξαμενή, λαμβανόταν μια μηδενική μέτρηση σε πλήρη κατάσταση ηρεμίας, ώστε να ληφθούν οι αποκρίσεις των αισθητήρων των οργάνων στην κατάσταση αυτή και στη συνέχεια εισάγονταν οι τιμές των Volt που λαμβάνονταν από τους αισθητήρες στις κατάλληλες εξισώσεις μεταφοράς ώστε να καταγραφούν οι μηδενικές φυσικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Είναι αναγκαίος ο συνεχής έλεγχος των οργάνων για τη διασφάλιση της γραμμικότητας των μετρούμενων τιμών.

- Βαθμονόμηση wave probes

Η βαθμονόμηση των wave probes πραγματοποιούταν καθημερινά πριν την έναρξη των πειραμάτων και ενώ το νερό της πειραματικής δεξαμενής ήταν ήρεμο. Για τα wave probes της δεξαμενής υπάρχει ένας αποστάτης ο οποίος έχει οπές σε σταθερή απόσταση 2 εκατοστών που επιτρέπουν την σταδιακή κατακόρυφη μετατόπιση του αισθητήρα σε συγκεκριμένα βυθίσματα,. Από τις διαδοχικές αυτές μετακινήσεις, λαμβάνονταν μετρήσεις προκειμένου να κατασκευαστεί η συνάρτηση μεταφοράς, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν γραμμικό.

Αντίστοιχα βαθμονομήθηκαν και τα προσαρτημένα στο μοντέλο wave probes, με τη διαφορά ότι η κατακόρυφη μετατόπιση τους γινόταν με βύθιση και ανύψωση όλης της πρότυπης κατασκευής χειροκίνητα και προσεγγιστικά. Συγκεκριμένα το δυναμόμετρο, με αρχική μηδενική θέση αναφοράς αυτή στην οποία αντιστοιχούσε το επιθυμητό βύθισμα του μοντέλου, μετακινούταν κατακόρυφα (βύθιση και ανύψωση) και σταθεροποιούνταν στις επιμέρους θέσεις όπου και λαμβάνονταν μετρήσεις για την κατασκευή των συναρτήσεων μεταφοράς.

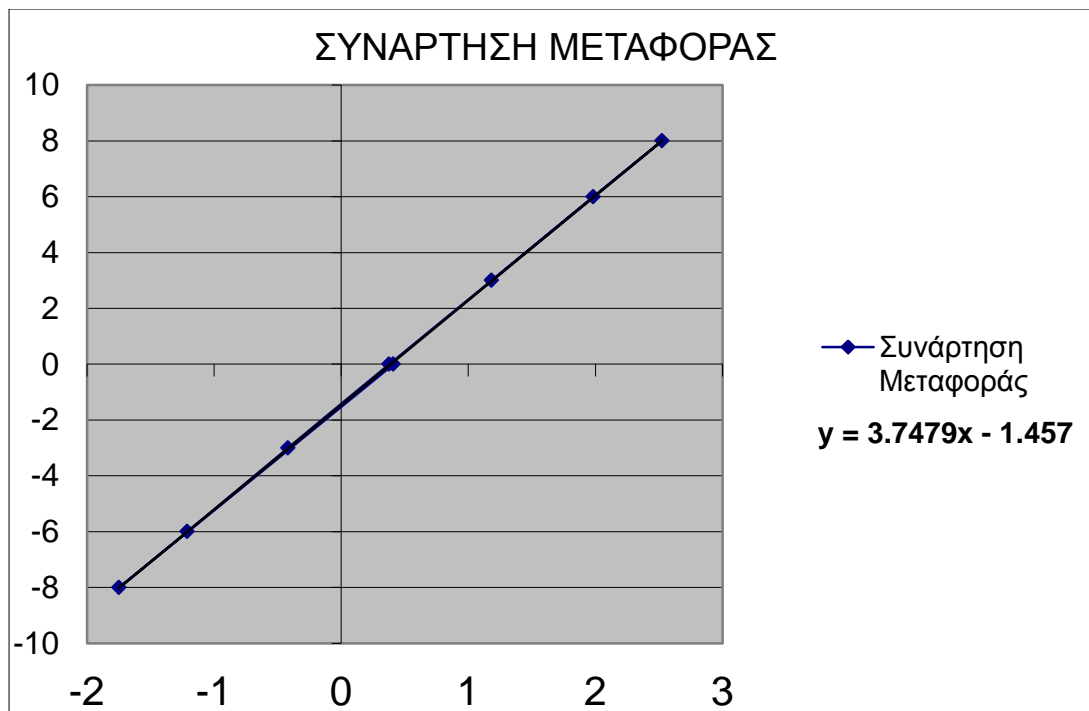
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-1) και διάγραμμα (Διάγραμμα 3-1) παρουσιάζεται ενδεικτικά η βαθμονόμηση του αισθητήρα wave probe της δεξαμενής, στην ουσία

δηλαδή η βαθμονόμηση του κυματιστήρα Wave Generator για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στις 17/9/2012.

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Βαθμονόμηση αισθητήρα: | Wave Gener |
| | 17/9/2012 |

| Volts | Μέγεθος [cm] |
|--------|--------------|
| 0.375 | 0 |
| 1.185 | 3 |
| 1.984 | 6 |
| 2.526 | 8 |
| 0.379 | 0 |
| -0.418 | -3 |
| -1.211 | -6 |
| -1.747 | -8 |
| 0.412 | 0 |

Πίνακας 3.1: Βαθμονόμηση αισθητήρα Wave Generator (το πρόσημο φανερώνει ανύψωση ή βύθιση)



Διάγραμμα 3.1: Συνάρτηση μεταφοράς της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στον αισθητήρα του Wave Generator

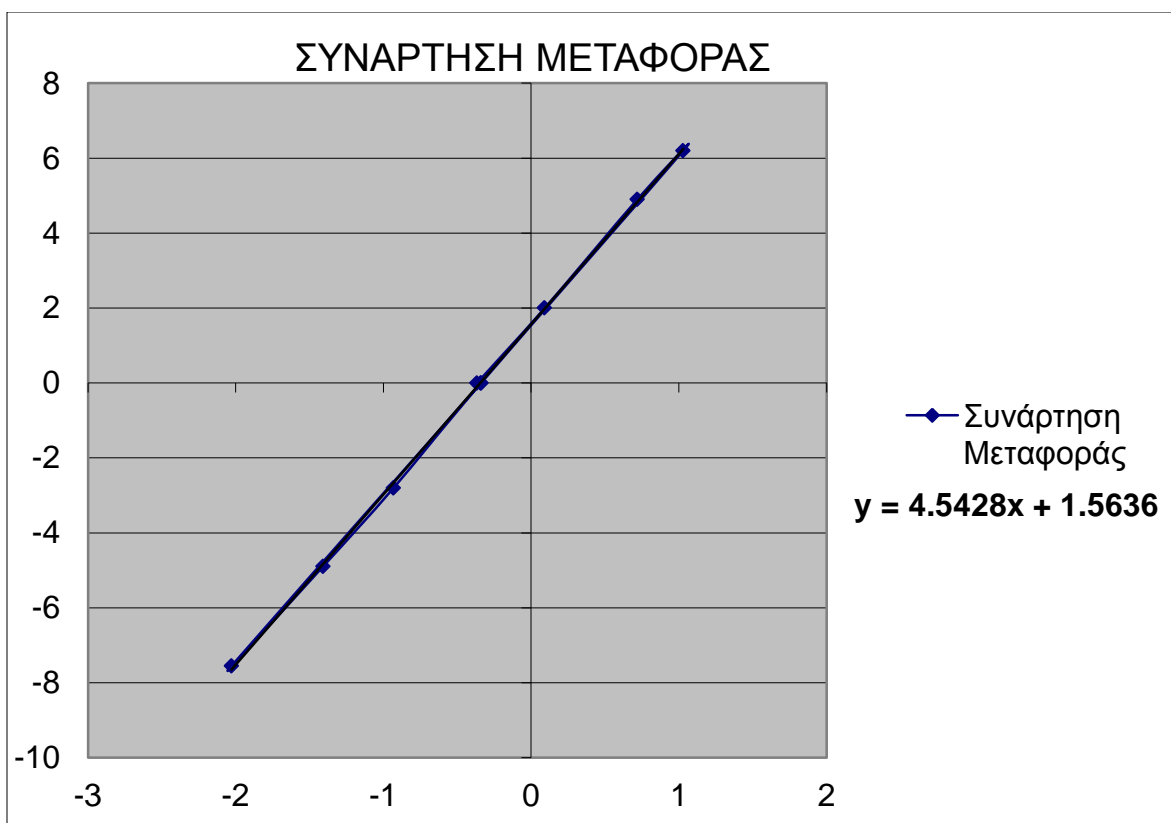
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-2) και διάγραμμα (Διάγραμμα 3-2) παρουσιάζεται ενδεικτικά η βαθμονόμηση του αισθητήρα Wave Probe 1 που είναι τοποθετημένος σε έναν εκ των τριών κυλίνδρων σε θέση 90 μοιρών ως προς την διεύθυνση του κύματος για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στις 17/9/2012.

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Βαθμονόμηση αισθητήρα: | Wave Pr1 |
| | 17/9/2012 |

90 Μοιρες

| Volts | Μέγεθος [cm] |
|--------|--------------|
| -0.366 | 0 |
| 0.092 | 2 |
| 0.719 | 4.9 |
| 1.03 | 6.2 |
| -0.338 | 0 |
| -0.931 | -2.8 |
| -1.409 | -4.9 |
| -2.028 | -7.55 |
| -0.34 | 0 |

Πίνακας 3.2: Βαθμονόμηση αισθητήρα Wave Pr1 (το πρόσημο φανερώνει ανύψωση ή βύθιση)



Διάγραμμα 3.2: Συνάρτηση μεταφοράς της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού

ο Βαθμονόμηση του οργάνου της αντίστασης (resistance)

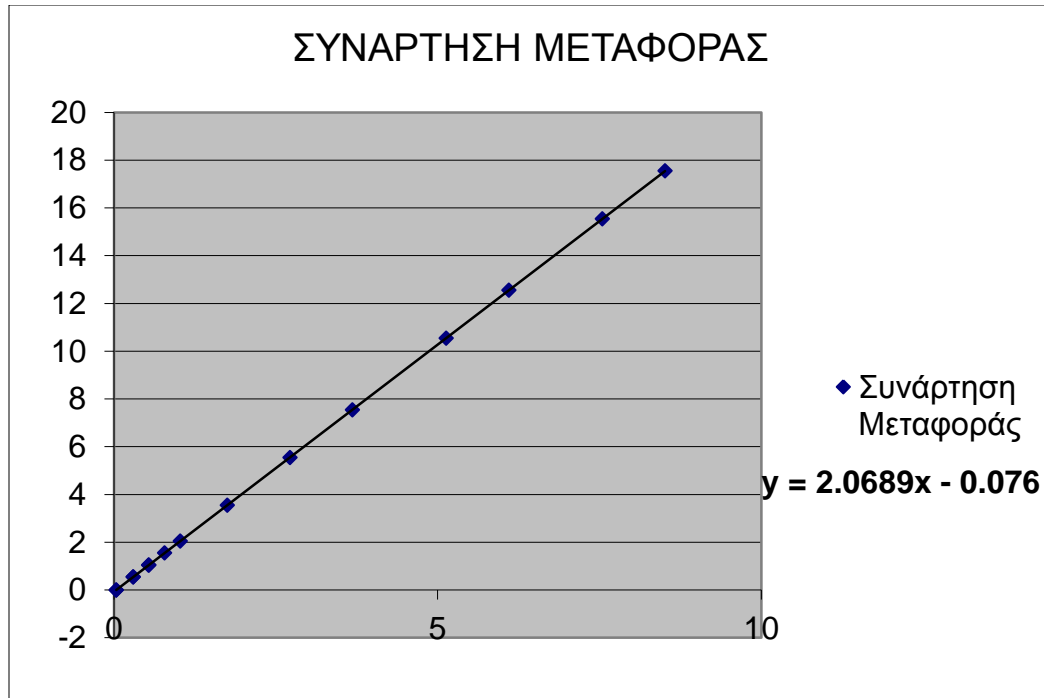
Η βαθμονόμηση των αισθητήρων resistance πραγματοποιήθηκε μια φορά για κάθε δυναμόμετρο, πριν την έναρξη των αντίστοιχων πειραμάτων. Η ορθή διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιείται με το πρότυπο μοντέλο δεμένο στο δυναμόμετρο. Στην περίπτωση του σταθερού δυναμόμετρου λόγω της φύσης των πειραμάτων αυτό δεν ήταν δυνατό και το δυναμόμετρο βαθμονομήθηκε εκτός δεξαμενής, με ανάρτηση πρότυπων βαρών στον πρόβολο του δυναμόμετρου σε οριζόντια διεύθυνση μέσω μιας τροχαλίας. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε και για την πρόσω αλλά και την πίσω κίνηση, δηλαδή ουσιαστικά για την φόρτιση του δυναμόμετρου σε δύο κατευθύνσεις. Η διαδικασία βαθμονόμησης εκτός δεξαμενής δεν επηρεάζει τη συνάρτηση μεταφοράς, απλώς μας δίνει μια διαφορετική αρχική μηδενική τιμή. Στην περίπτωση του ελεύθερου δυναμόμετρου η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο δεμένο στο πόδι του δυναμόμετρου και ακλουθώντας την προαναφερθείσα διαδικασία.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.3) και διάγραμμα (Διάγραμμα 3.3) παρουσιάζεται ενδεικτικά η βαθμονόμηση του αισθητήρα resistance για το δυναμόμετρο R35.

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Βαθμονόμηση αισθητήρα: | Resist. R35 |
| Ημερομηνία: | 10/9/2012 |

| Volts | Μέγεθος |
|-------|---------|
| 0.038 | 0 |
| 0.299 | 0.545 |
| 0.542 | 1.045 |
| 0.784 | 1.545 |
| 1.025 | 2.045 |
| 1.752 | 3.545 |
| 2.72 | 5.545 |
| 3.686 | 7.545 |
| 5.135 | 10.545 |
| 7.549 | 15.545 |
| 6.102 | 12.545 |
| 8.514 | 17.545 |
| 0.539 | 1.045 |
| 0.298 | 0.545 |
| 0.035 | 0 |

Πίνακας 3.2: Βαθμονόμηση αισθητήρα Resist. R35



Διάγραμμα 3.3: Συνάρτηση μεταφοράς της αντίστασης

ο Βαθμονόμηση του οργάνου της κατακόρυφης μετατόπισης (heave)

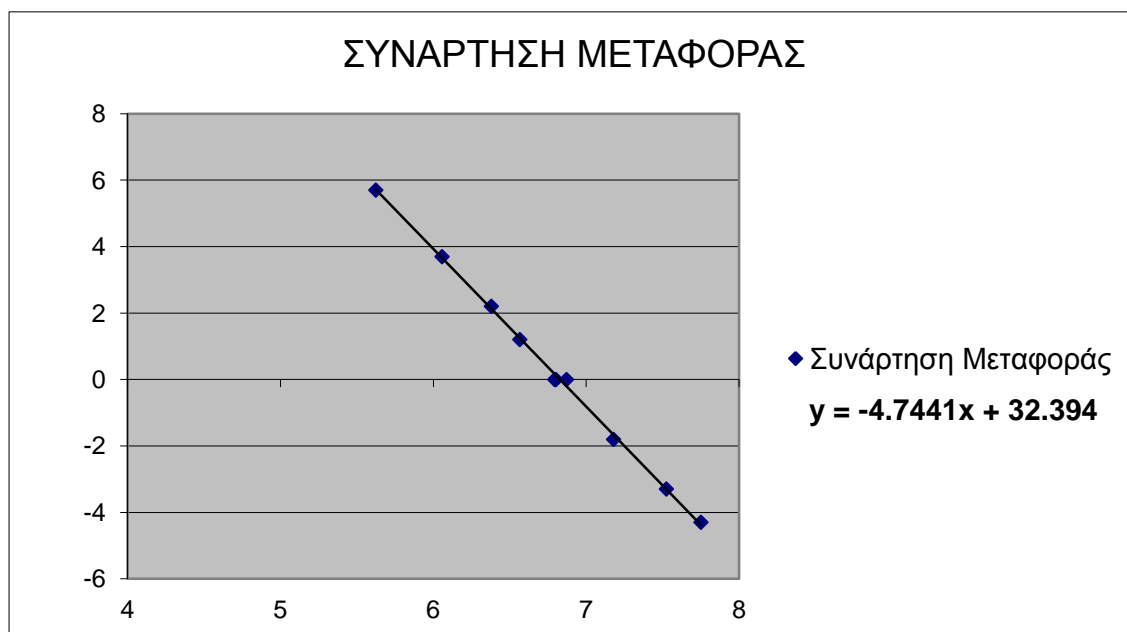
Η βαθμονόμηση του αισθητήρα heave πραγματοποιήθηκε συνολικά δύο φορές κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων, μία φορά πριν γίνουν τα πειράματα της συστοιχίας των τριών κυλίνδρων και μια φορά πριν από τα πειράματα της συστοιχίας τριών κυλίνδρων με προσάρτηση κυκλικού δίσκου στη βάση τους. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα heave βασίζεται στην ορισμένη κίνηση του ελεύθερου μέρους του οργάνου R47. Κατά αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η αντίσταση του αισθητήρα heave με συνέπεια και τη μεταβολή της μετρούμενης τάσης. Για να επιτευχθεί αυτό, είτε θα έπρεπε να αυξομειώνεται η στάθμη του νερού της δεξαμενής είτε θα έπρεπε να ανυψωνόταν και να βυθιζόταν το μοντέλο μέσα στο νερό. Επειδή καμιά από τις δύο μεθόδους δεν είναι εφικτή, για τη βαθμονόμηση του heave το εν δυνάμει σταθερό μέρος του δυναμόμετρου μετατοπιζόταν κατά τον κατακόρυφο άξονα προκαλώντας διαφορετικές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ αυτού και του κινητού μέρους του δυναμόμετρου. Η κατακόρυφη κίνηση του εν δυνάμει σταθερού μέρους του δυναμόμετρου πραγματοποιούνταν μέσω ενός κοχλία ευρισκόμενου στο πάνω μέρος, ενώ η ακριβής κατακόρυφη μετατόπισή του ήταν δυνατό να προσδιοριστεί μέσω ενός μεταλλικού χάρακα που ήταν πακτωμένος κατακόρυφα σε κατάλληλο σημείο στο σταθερό μέρος του δυναμόμετρου.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3-4) και διάγραμμα (Διάγραμμα 3-4) παρουσιάζεται ενδεικτικά η βαθμονόμηση του αισθητήρα heave για την περίπτωση της συστοιχίας τριών κυλίνδρων με προσάρτηση κυκλικού δίσκου στη βάση τους.

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Βαθμονόμηση αισθητήρα: | Heave |
| Ημερομηνία: | 27/9/2012 |

| Volts L | Μέγεθος |
|---------|---------|
| 6.804 | 0 |
| 6.567 | 1.2 |
| 6.381 | 2.2 |
| 6.059 | 3.7 |
| 5.626 | 5.7 |
| 6.795 | 0 |
| 7.181 | -1.8 |
| 7.527 | -3.3 |
| 7.752 | -4.3 |
| 6.873 | 0 |

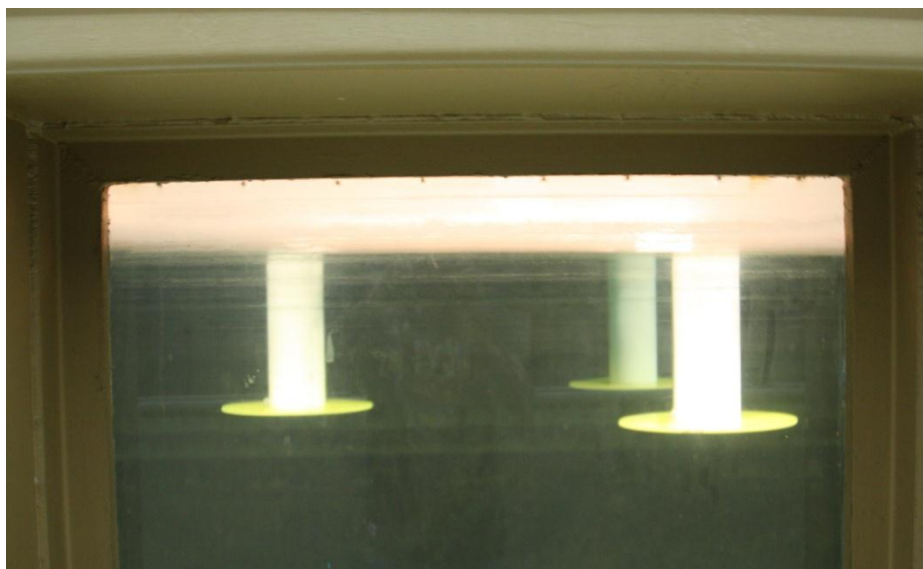
Πίνακας 3.4: Βαθμονόμηση αισθητήρα Heave



Διάγραμμα 3.4: Συνάρτηση μεταφοράς της κατακόρυφης μετατόπισης του μοντέλου

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στην ανωτέρω πειραματική διάταξη και με τη χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα για την παρούσα διπλωματική εργασία. Τα πειράματα αφορούν στη μελέτη υδροδυναμικής συμπεριφοράς πρότυπου μοντέλου πλωτής εξέδρας η οποία είναι προορισμένη να φέρει ανεμογεννήτρια. Τα πειράματα είχαν διάρκεια τριών εβδομάδων, σε καθεμία από τις οποίες πραγματοποιήσαμε διαφορετικό αντικείμενο μελέτης. Την πρώτη εβδομάδα μελετήθηκε απλός κατακόρυφος κύλινδρος, την δεύτερη συστοιχία τριών απλών κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων σε τριγωνική διάταξη και την τρίτη συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων σε τριγωνική διάταξη.



Εικόνα 3.10: Υποβρύχια άποψη της πειραματικής κατασκευής

Μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής υποπεριπτώσεις πειραμάτων:

1. Πειράματα με το μοντέλο πακτωμένο («σταθερά» πειράματα). Τα πειράματα αυτά προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες εγκατεστημένης και αγκυρωμένης πλωτής εξέδρας (anchoring). Στα πλαίσια των «σταθερών» πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν:
 - 1.1 Πειράματα με πλήρη ακινησία του μοντέλου («ακίνητα» πειράματα)
 - 1.2 Πειράματα με μικρή σταθερή πρόσω και πίσω ταχύτητα του μοντέλου («κινούμενα» πειράματα). Η κίνηση αυτή του μοντέλου, που ουσιαστικά επιτυγχάνεται με κίνηση του φορείου της δεξαμενής πάνω στο οποίο είναι προσδεμένο ο μοντέλο, προσομοιάζει την αντίσταση λόγω θαλασσίων ρευμάτων. Οι τιμές των ταχυτήτων στις οποίες κινήθηκε το φορείο ήταν κατά απόλυτη τιμή 0.045, 0.067 και 0.089 m/s.

2. Πειράματα με το μοντέλο ελεύθερο ως προς την κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα («ελεύθερα» πειράματα). Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση της συχνότητας συντονισμού της κατασκευής. Θεωρητικά υπάρχει μια συχνότητα όπου η κατασκευή παραμένει σταθερή παρά την ελευθερία της ως προς την κατακόρυφη κίνηση. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν μόνο για την συστοιχία των τριών κυλίνδρων και όχι για τον μονό κύλινδρο.

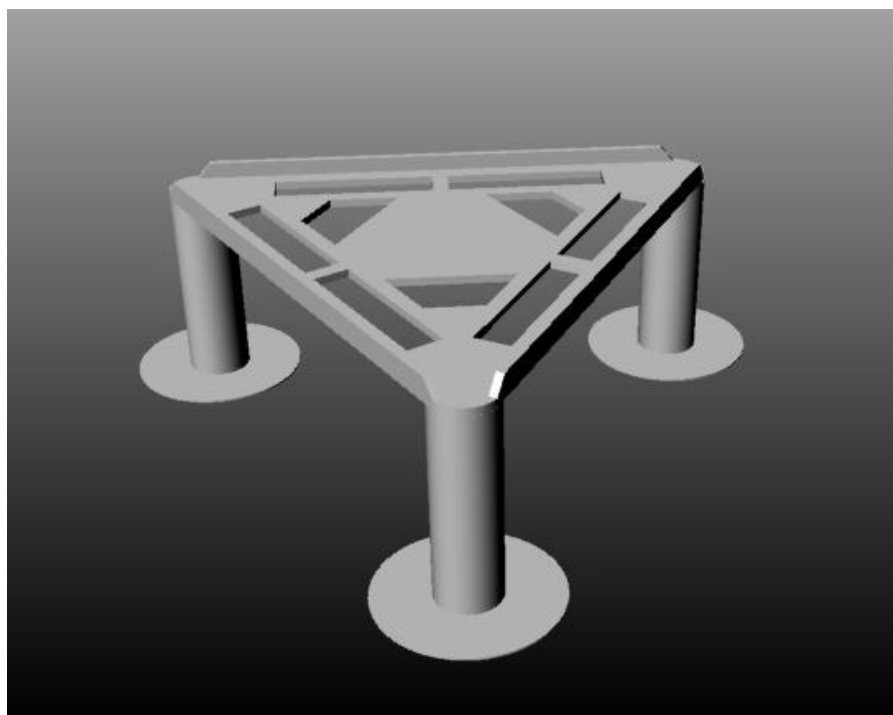
Σε όλα τα πειράματα μετρήθηκε:

- Η αντίσταση του μοντέλου, δηλαδή οι δυνάμεις διέγερσης σε αρμονικούς κυματισμούς, οι οποίοι παράγονται με χρήση κατάλληλου λογισμικού που δίνει εντολή στον κυματιστήρα. Οι παραγόμενοι κυματισμοί είχαν εύρος συχνοτήτων από 0.4 έως 0.8 Hz και πλάτος κύματος 0.4, 0.5 και 0.6 cm.
- Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μέσω των wave probes τα οποία τοποθετήθηκαν στους κυλίνδρους του μοντέλου σε γωνίες 0° και 90° ως προς τη διεύθυνση του παραγόμενου κύματος.

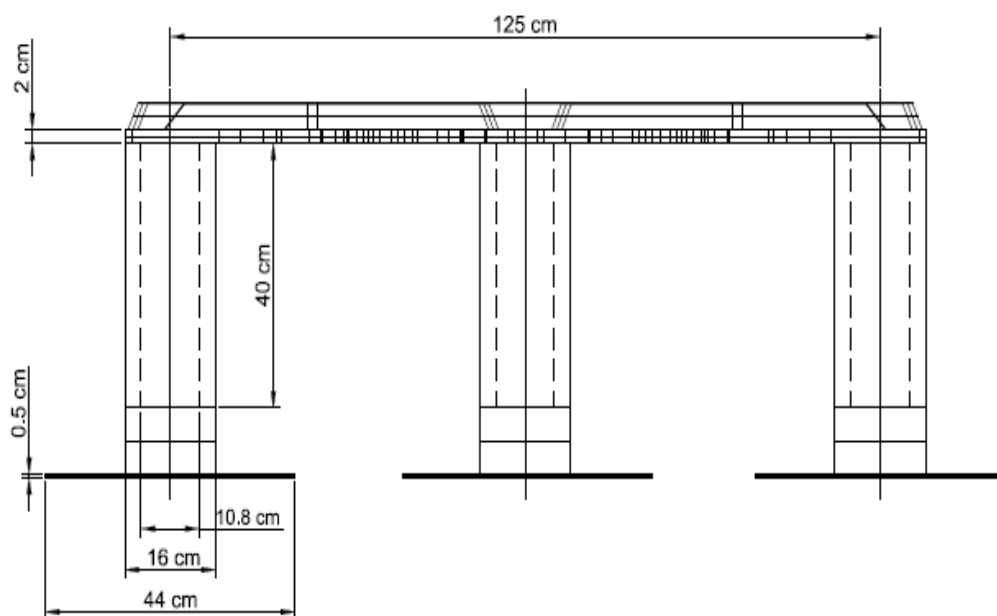
Στα «ελεύθερα» πειράματα μετρήθηκε επιπλέον η κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου (heave).

Πριν από την διεξαγωγή κάθε πειράματος λαμβανόταν μια μέτρηση στην κατάσταση ηρεμίας για τα μετρούμενα μεγέθη. Μετά τη λήψη της μηδενικής μέτρησης, θέταμε ως δεδομένα στον κυματιστήρα την συχνότητα και το πλάτος κυματισμού για την παραγωγή του επιθυμητού κύματος. Μόνο αφότου το κύμα είχε φτάσει και προσπεράσει το φορείο, πραγματοποιούταν η λήψη των μετρήσεων. Στην περίπτωση των «κινούμενων» πειραμάτων το φορείο επιτάχυνε και μετά την σταθεροποίηση της ταχύτητάς του στην επιθυμητή τιμή λαμβάνονταν οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Ο χρόνος καταγραφής των μεγεθών τόσο στην κατάσταση ηρεμίας όσο και κατά τη διάρκεια της κίνησης του φορείου ήταν σταθερός και ίσος με 30 δευτερόλεπτα. Στην περίπτωση των «ελεύθερων» πειραμάτων μόνο ήταν αυξημένος στα 40 δευτερόλεπτα. Μετά το τέλος της κάθε πειραματικής μέτρησης που περιελάμβανε και μετακίνηση του φορείου (πειράματα με μικρή πρόσω ή πίσω ταχύτητα), κατά την επιστροφή του φορείου στην αρχική του θέση, η κεκλιμένη μεταλλική επιφάνεια (σιδερώστρα) που διέθετε το φορείο στο πρυμναίο τμήμα του κατέβαινε στο επίπεδο της επιφάνειας του νερού με σκοπό την ταχύτερη απόσβεση των δημιουργούμενων κυματισμών. Για τη λήψη της επόμενης μέτρησης σε κατάσταση ηρεμίας υπήρχε ενδιάμεσο χρονικό περιθώριο 20 λεπτών με σκοπό την πλήρη ηρεμία της επιφάνειας του νερού.

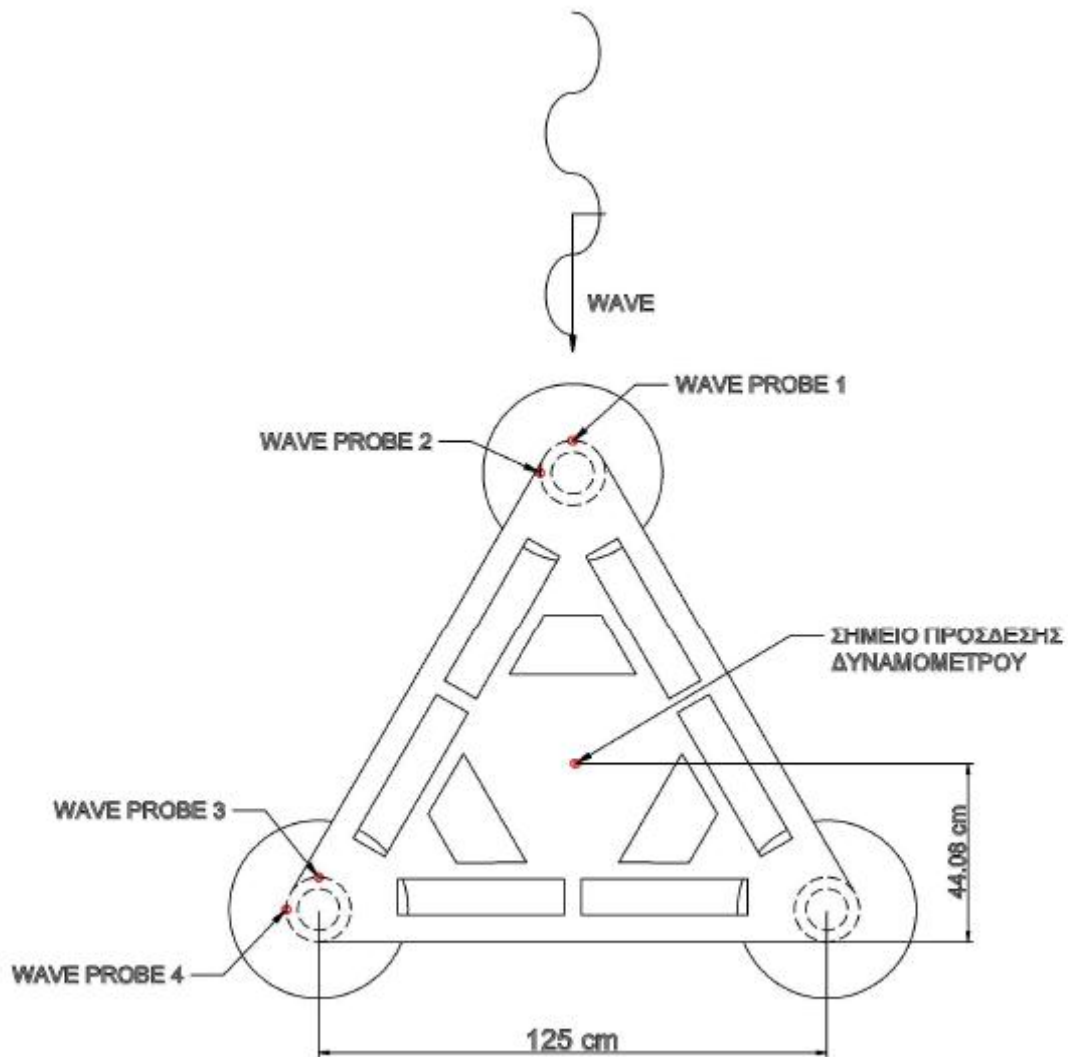
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται η τρισδιάστατη αναπαράσταση και οι διαστασιοποιημένες όψεις του πρότυπου μοντέλου όπως αυτά σχεδιάστηκαν στα σχεδιαστικά προγράμματα Rhino© και Autocad©.



Εικόνα 3.11: Τρισδιάστατη αναπαράσταση του πρότυπου μοντέλου συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων



Εικόνα 3.12: Πρόσωση του πρότυπου μοντέλου συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων



Εικόνα 3.13: Κάτοψη του πρότυπου μοντέλου συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται σύντομα τα χαρακτηριστικά της πλωτής κατασκευής υπό κλίμακα.

| | |
|------------------------------|----------|
| Διάμετρος κυλίνδρων | 16.0 cm |
| Διάμετρος κυλινδρικών δίσκων | 44.0 cm |
| Ύψος κυλίνδρων | 50.0 cm |
| Ισαπόσταση κυλίνδρων | 125.0 cm |
| Βύθισμα | 40.0 cm |

Πίνακας 3.5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μετρήθηκαν τα εξής μεγέθη:

- Η δύναμη αντίστασης, η δύναμη δηλαδή που δέχεται το πλωτό σώμα μας κατά τον οριζόντιο άξονα
- Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (στο εξής, χάριν συντομίας, θα αναφέρεται ως «ανύψωση»)
- Η κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου (heave) - στα αντίστοιχα πειράματα μόνο.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πειραμάτων καταγράφονται από τα μετρητικά όργανα της πειραματικής δεξαμενής σε Volt. Για τη μετατροπή των μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικές μονάδες χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις μεταφοράς, οι οποίες πρόέκυψαν από τη διαδικασία βαθμονόμησης που περιγράφηκε στο Κεφ.3.

Αρχικά έγινε ανάλυση των μετρήσεων στο χρόνο και για κάθε δοκιμή σχεδιάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις των μεγεθών συναρτήσει του χρόνου (χρονικές ιστορίες) με τη βοήθεια του προγράμματος Office Excel. Επίσης υπολογίστηκαν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές, η μέση τιμή, η διάμεσος και η τυπική απόκλιση αυτών.

*Στους πίνακες που ακολουθούν αναφέρονται οι επεξηγήσεις των συντομεύσεων των πινάκων:

| | | |
|---------------|--------------------|-----------------|
| STD | Standard Deviation | Τυπική Απόκλιση |
| MAX | Maximum | Μέγιστη Τιμή |
| MIN | Minimum | Ελάχιστη Τιμή |
| MEAN | Mean | Μέση Τιμή |
| MEDIAN | Median | Διάμεσος |

| | | |
|----------------|----------------|---|
| WP1 | Wave Probe 1 | Ανύψωση Κύματος στον Αισθητήρα Νο.1 |
| WP2 | Wave Probe 2 | Ανύψωση Κύματος στον Αισθητήρα Νο.2 |
| WP3 | Wave Probe 3 | Ανύψωση Κύματος στον Αισθητήρα Νο.3 |
| WP4 | Wave Probe 4 | Ανύψωση Κύματος στον Αισθητήρα Νο.4 |
| WGen | Wave Generator | Ανύψωση Κύματος στον Αισθητήρα της Δεξαμενής (στην ουσία καταγραφή του παραγόμενου από τον κυματιστήρα κύματος) |
| Resist. | Resistance | Δύναμη Αντίστασης |

Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης των μετρήσεων και των διαγραμμάτων που προέκυψαν. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης και των 217 πειραμάτων παρουσιάζονται εκτενώς στο Παράρτημα 2 (βλ. Συνοδευτικό CD).

4.1.1 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

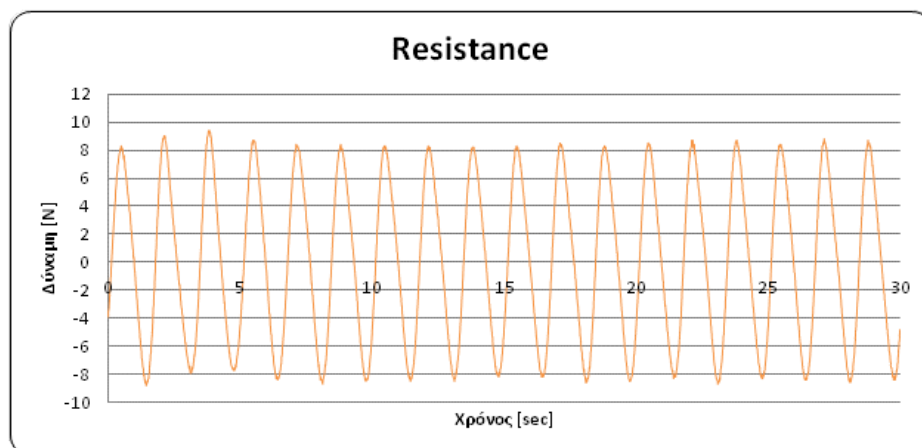
Πείραμα 14

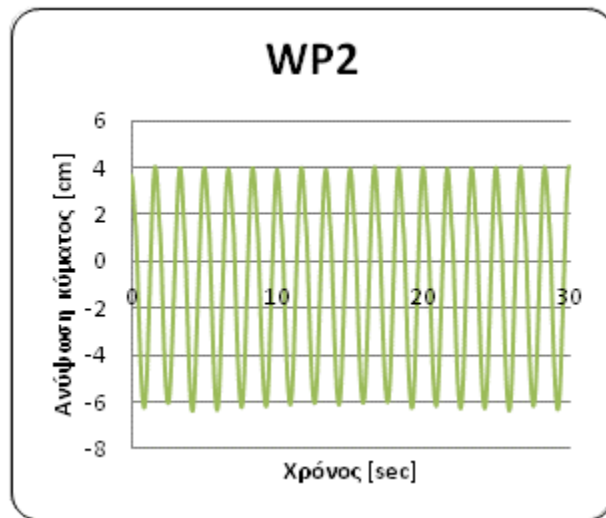
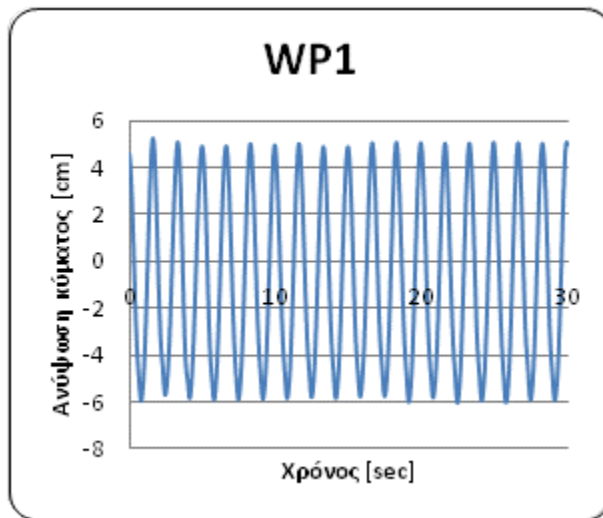
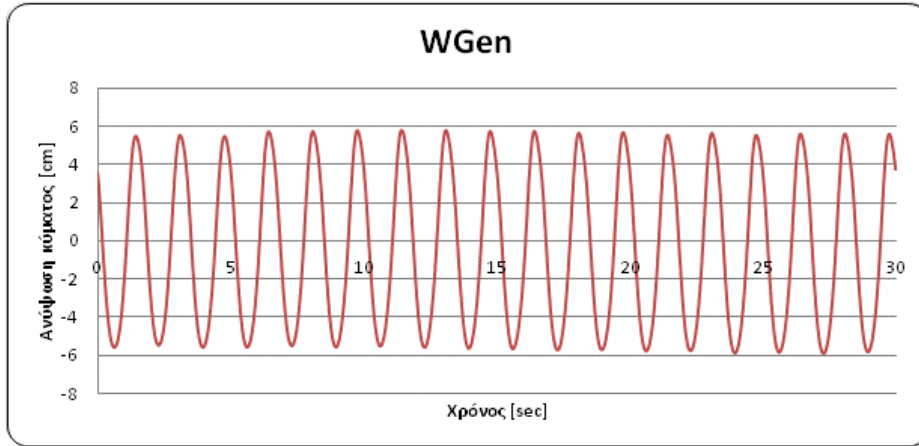
| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 6 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 14:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|-------|-------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 3.808 | 3.571 | 0.000 | 0.000 | 4.084 | 5.714 |
| MAX | 5.243 | 4.010 | 0.000 | 0.000 | 5.811 | 9.359 |
| MIN | -6.056 | -6.404 | 0.000 | 0.000 | -5.891 | -8.780 |
| MEAN | -0.749 | -1.061 | 0.000 | 0.000 | -0.385 | -0.011 |
| MEDIAN | -1.144 | -0.830 | 0.000 | 0.000 | -0.839 | 0.046 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 14:





4.1.2 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

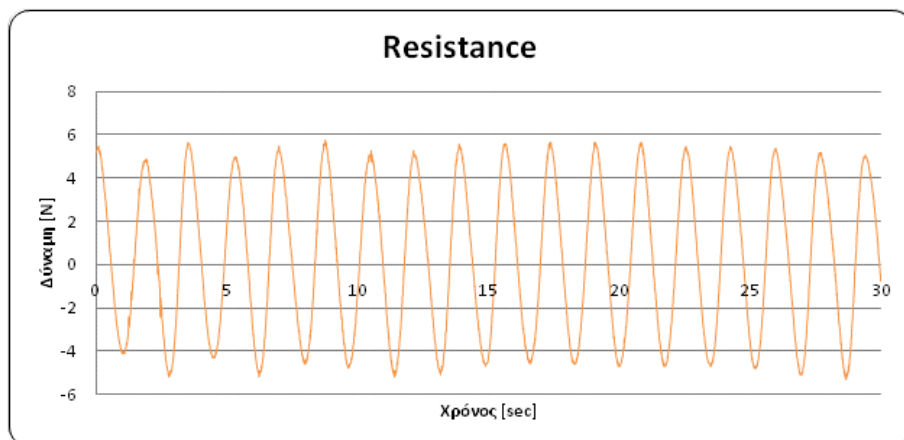
Πείραμα 50

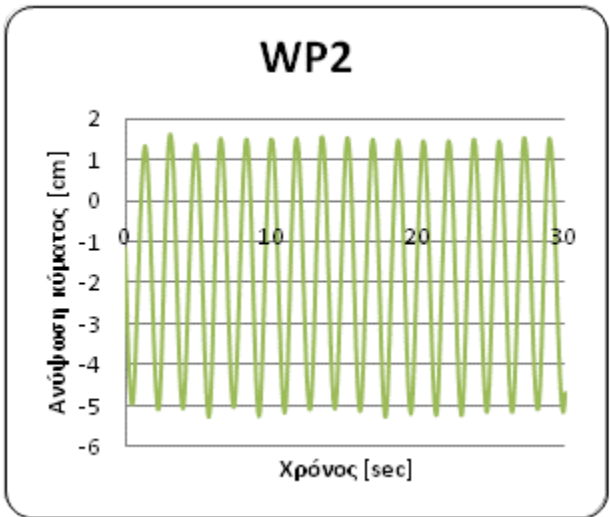
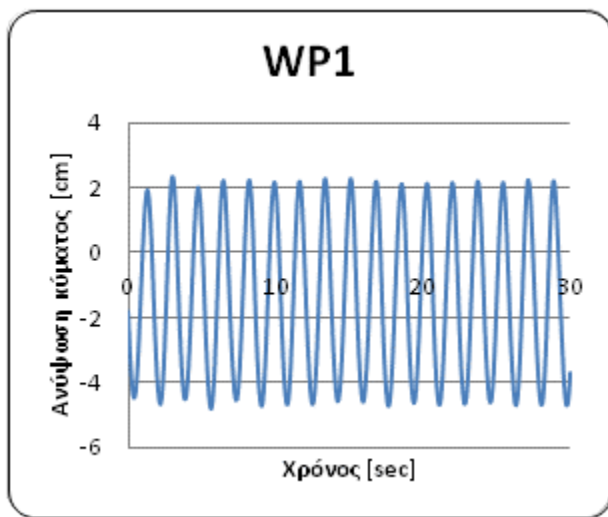
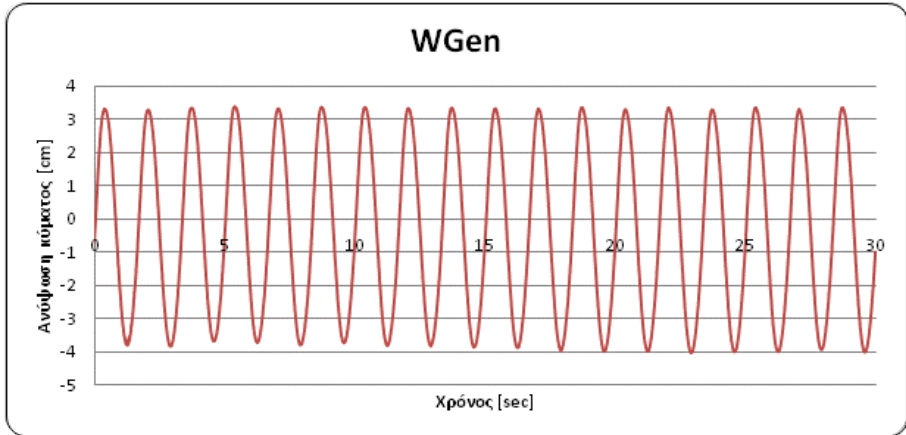
| | | | |
|----------------------|------|--------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | -0,089 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 50:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|-------|-------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 2.417 | 2.340 | 0.000 | 0.000 | 2.580 | 3.527 |
| MAX | 2.313 | 1.612 | 0.000 | 0.000 | 3.394 | 5.788 |
| MIN | -4.825 | -5.261 | 0.000 | 0.000 | -4.047 | -5.310 |
| MEAN | -1.433 | -1.785 | 0.000 | 0.000 | -0.370 | 0.285 |
| MEDIAN | -1.631 | -1.756 | 0.000 | 0.000 | -0.523 | 0.350 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 50:





4.1.3 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

Πείραμα 70

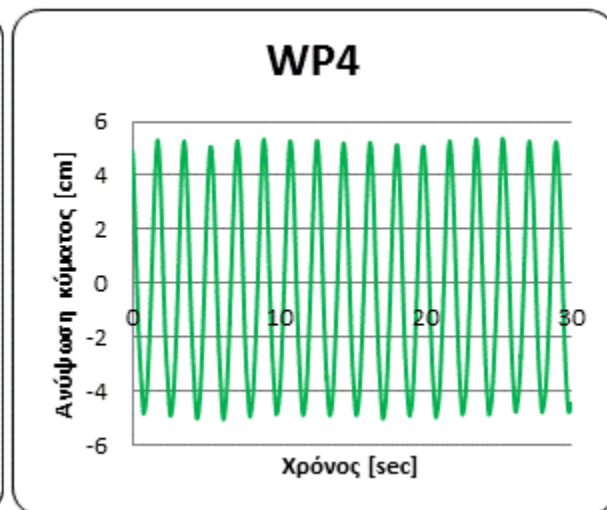
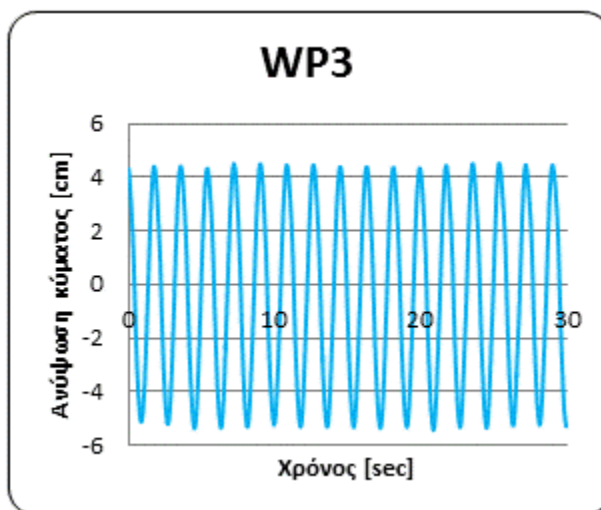
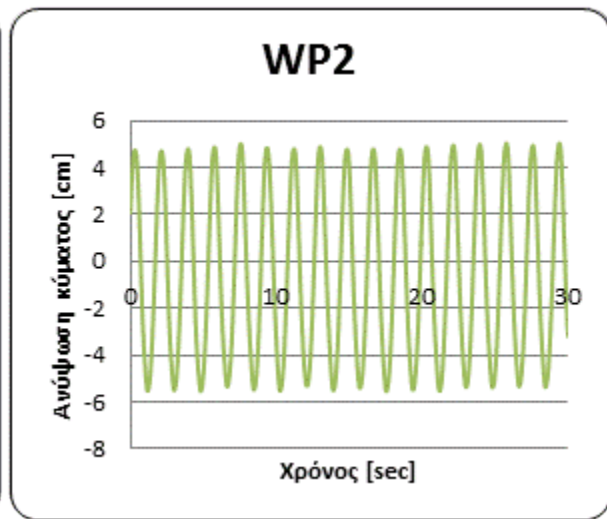
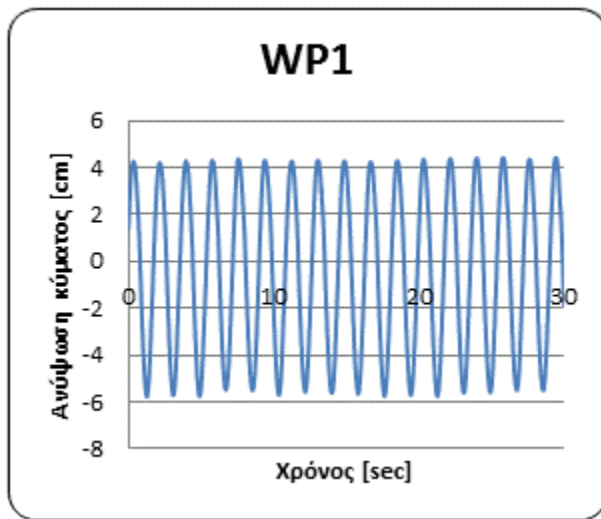
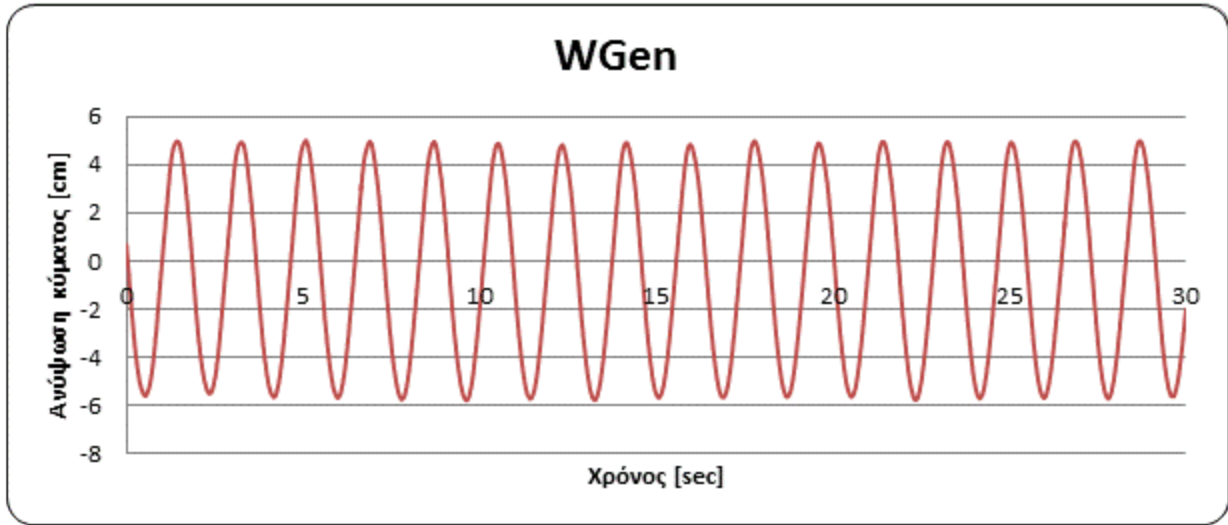
| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,55 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 6 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 70:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 3.537 | 3.686 | 3.436 | 3.527 | 3.735 | 13.341 |
| MAX | 4.416 | 5.026 | 4.524 | 5.373 | 5.008 | 18.423 |
| MIN | -5.776 | -5.554 | -5.438 | -5.053 | -5.801 | -21.247 |
| MEAN | -0.379 | -0.449 | -0.369 | -0.234 | -0.631 | -0.927 |
| MEDIAN | -0.084 | -0.734 | -0.311 | -0.683 | -0.899 | -0.529 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 70:





4.1.4 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

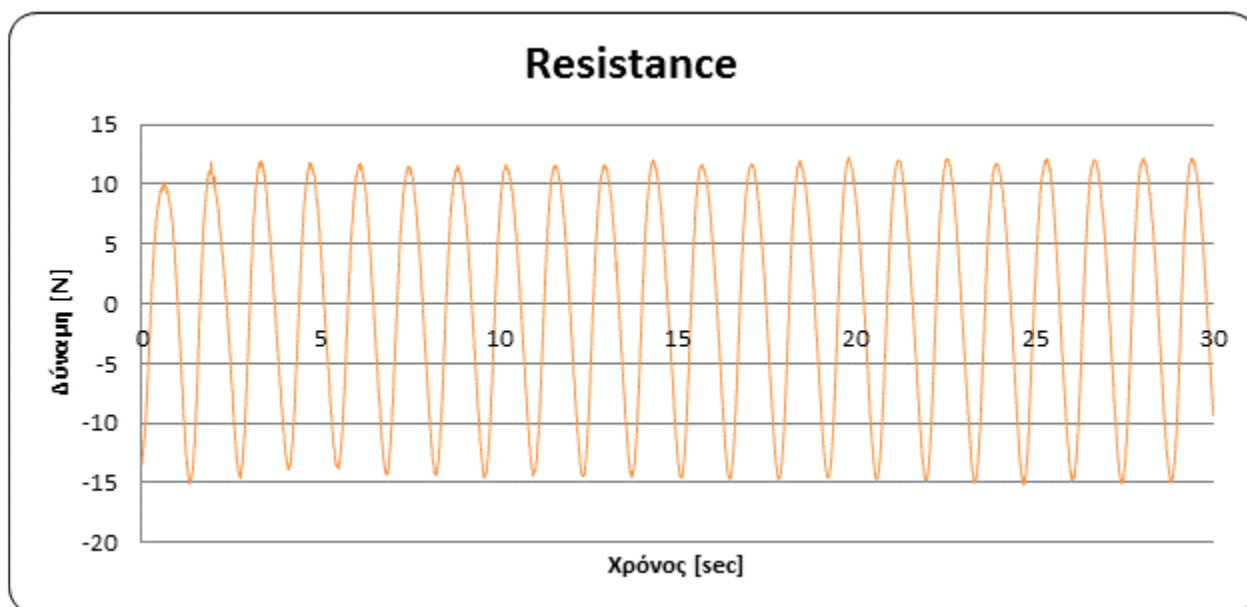
Πείραμα 99

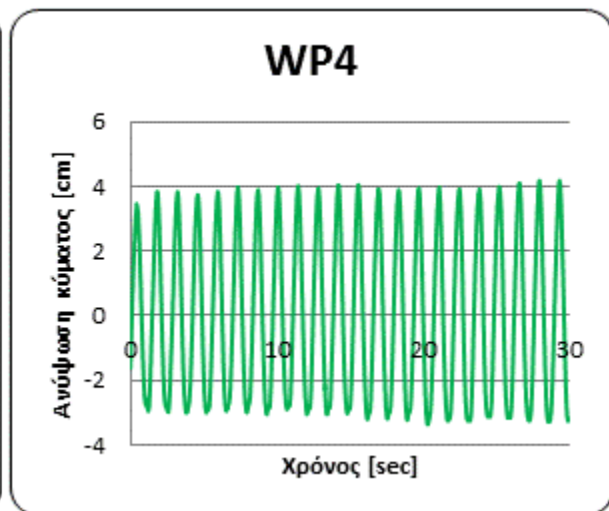
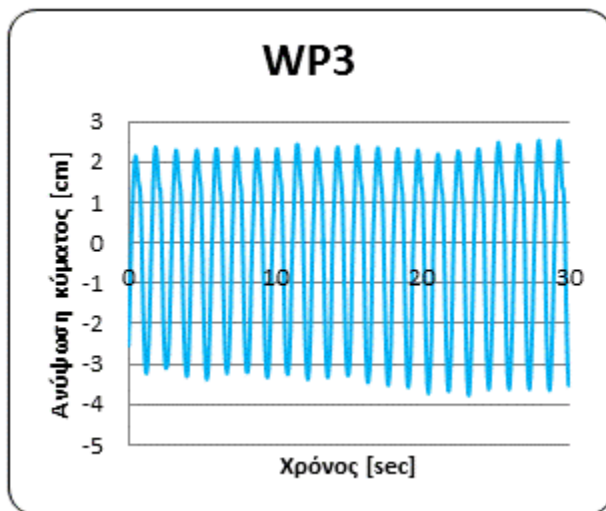
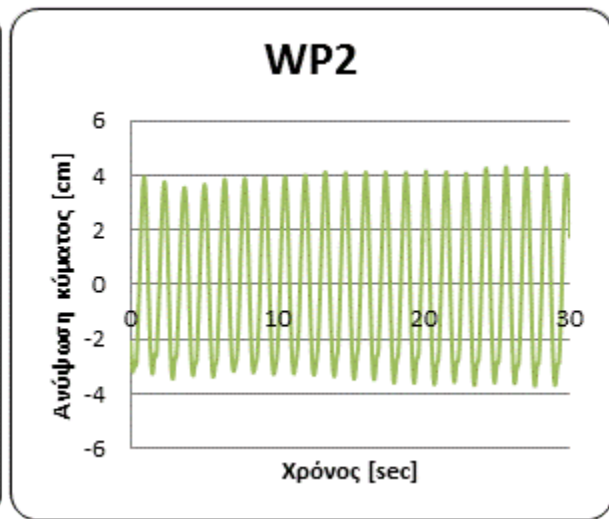
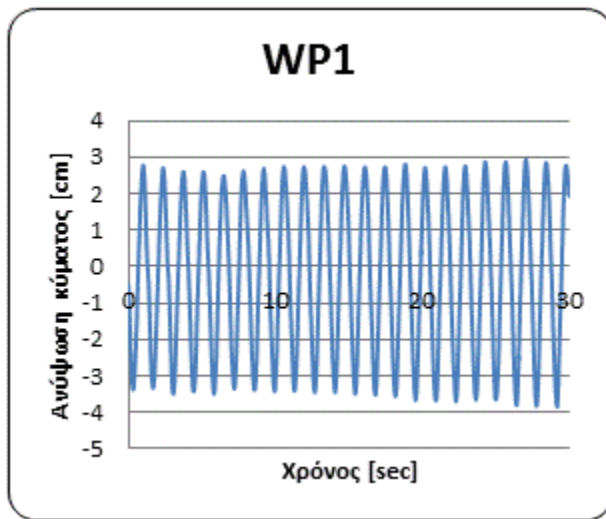
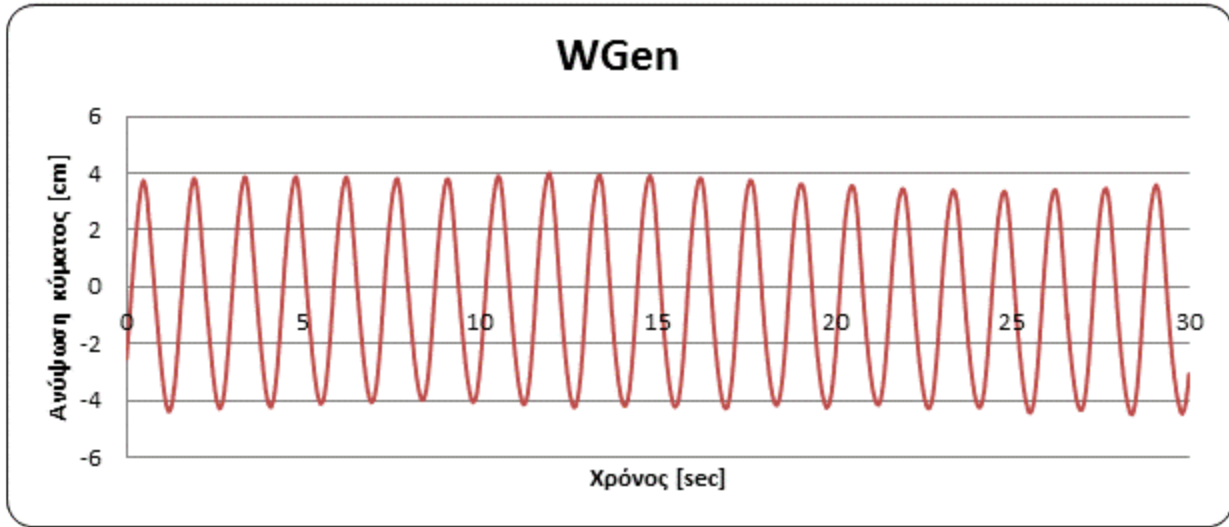
| | | | |
|----------------------|------|-------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,70 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0,089 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 99:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 2.163 | 2.657 | 2.063 | 2.552 | 2.811 | 9.173 |
| MAX | 2.928 | 4.299 | 2.539 | 4.174 | 4.008 | 12.268 |
| MIN | -3.848 | -3.695 | -3.769 | -3.367 | -4.499 | -15.194 |
| MEAN | -0.272 | -0.056 | -0.249 | 0.020 | -0.441 | -0.166 |
| MEDIAN | -0.170 | -0.449 | 0.257 | -0.274 | -0.613 | 0.954 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 99:





4.1.5 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

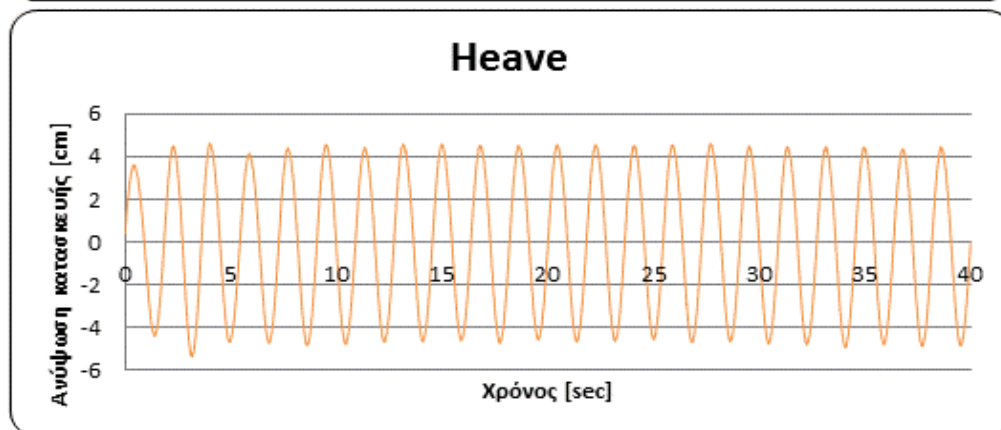
Πείραμα 128

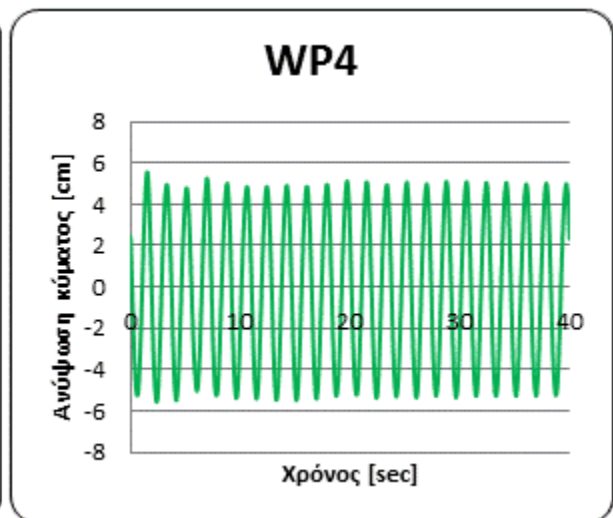
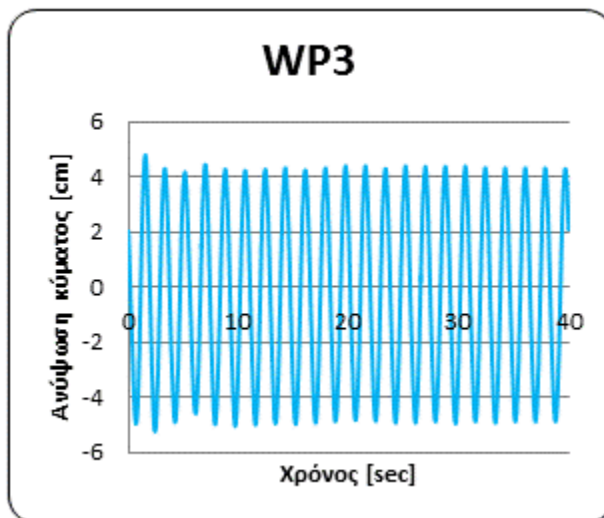
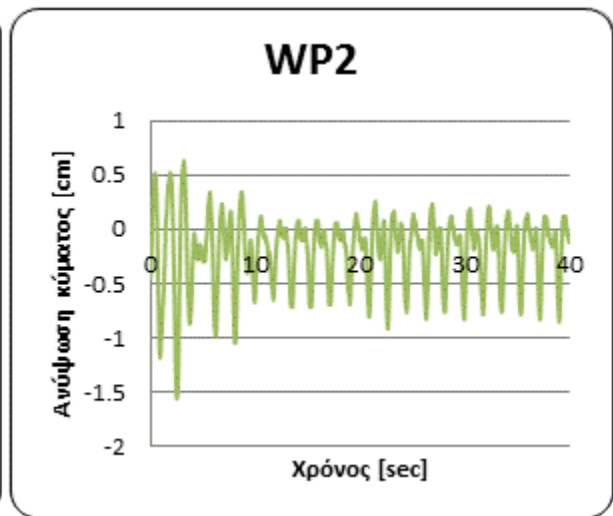
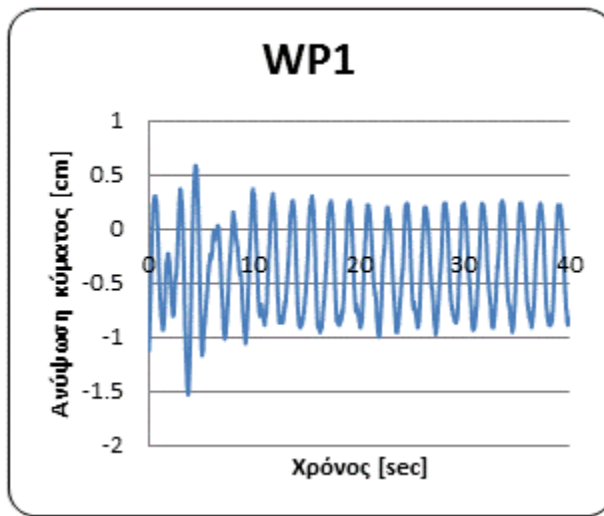
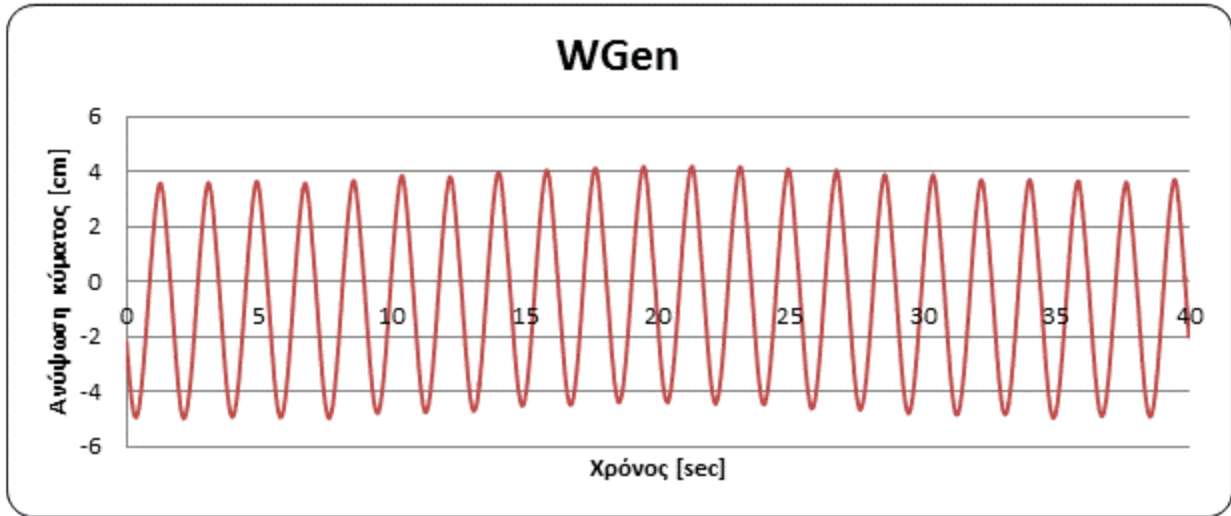
| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,55 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 128:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. | Heave |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton | cm |
| STD | 0.425 | 0.330 | 3.260 | 3.676 | 2.963 | 10.687 | 3.213 |
| MAX | 0.583 | 0.631 | 4.782 | 5.555 | 4.178 | 15.778 | 4.635 |
| MIN | -1.531 | -1.561 | -5.249 | -5.569 | -4.985 | -16.833 | -5.379 |
| MEAN | -0.378 | -0.195 | -0.285 | -0.131 | -0.578 | -0.016 | -0.084 |
| MEDIAN | -0.421 | -0.121 | -0.309 | -0.076 | -0.612 | -0.331 | 0.000 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 128:





4.1.6 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

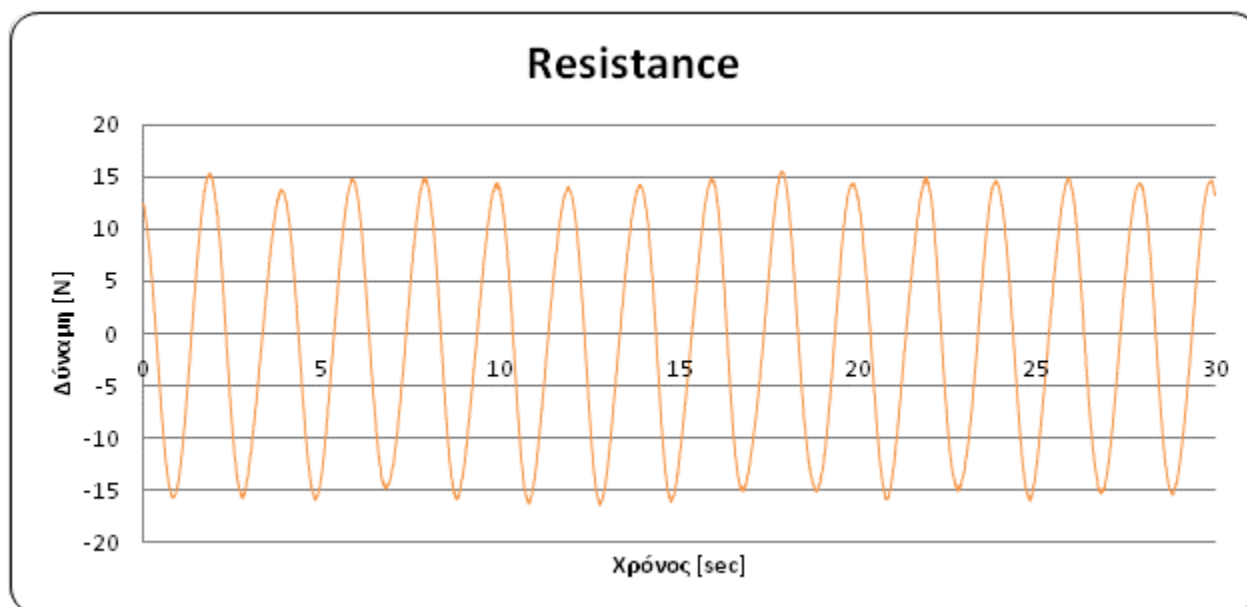
Πείραμα 140

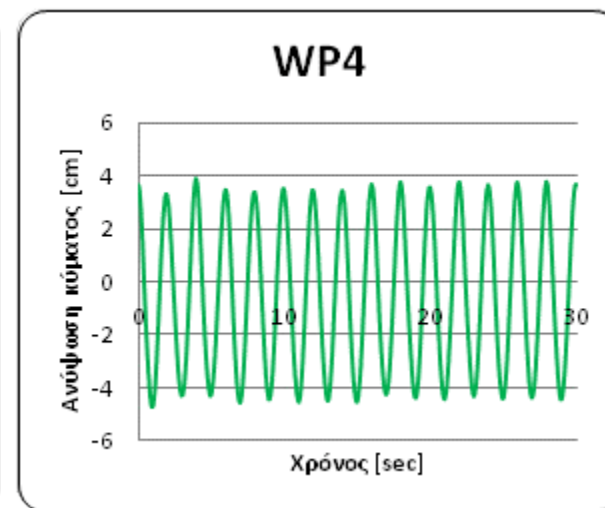
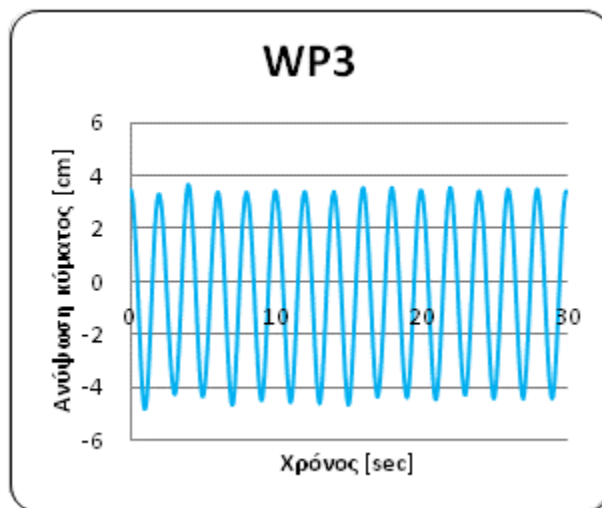
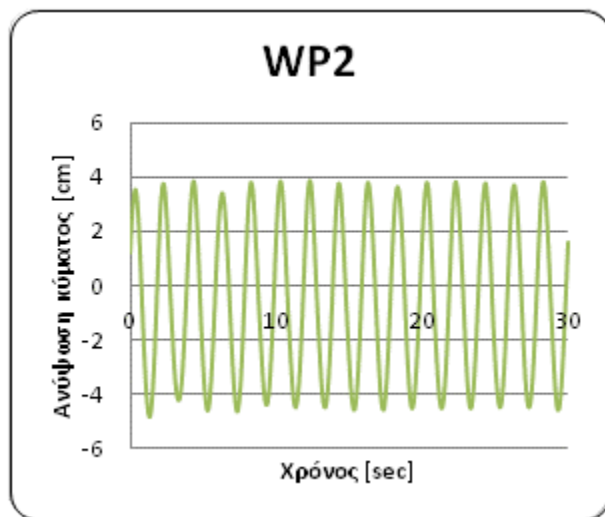
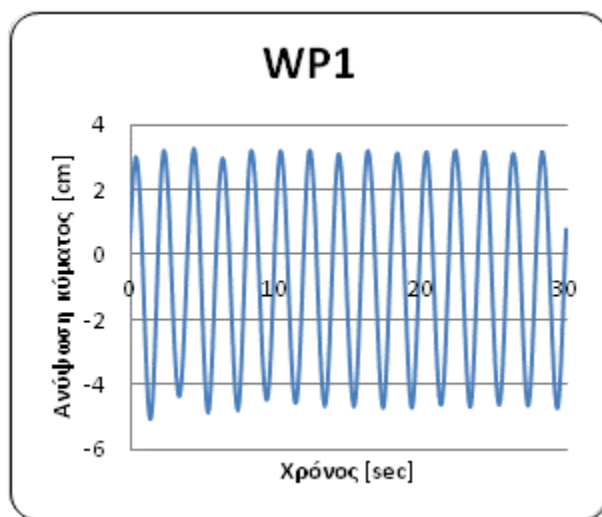
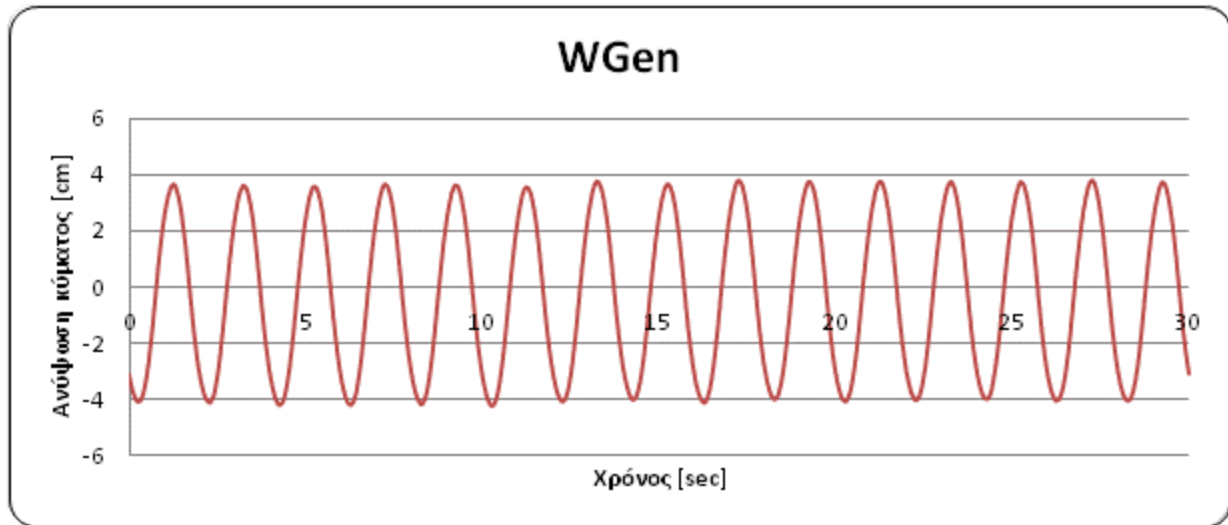
| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,50 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 140:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 2.785 | 2.891 | 2.790 | 2.839 | 2.794 | 10.567 |
| MAX | 3.296 | 3.839 | 3.701 | 3.923 | 3.827 | 15.539 |
| MIN | -5.086 | -4.821 | -4.793 | -4.743 | -4.239 | -16.494 |
| MEAN | -0.689 | -0.547 | -0.358 | -0.522 | -0.281 | -0.400 |
| MEDIAN | -0.634 | -0.690 | -0.258 | -0.665 | -0.366 | -0.224 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 140:





4.1.7 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

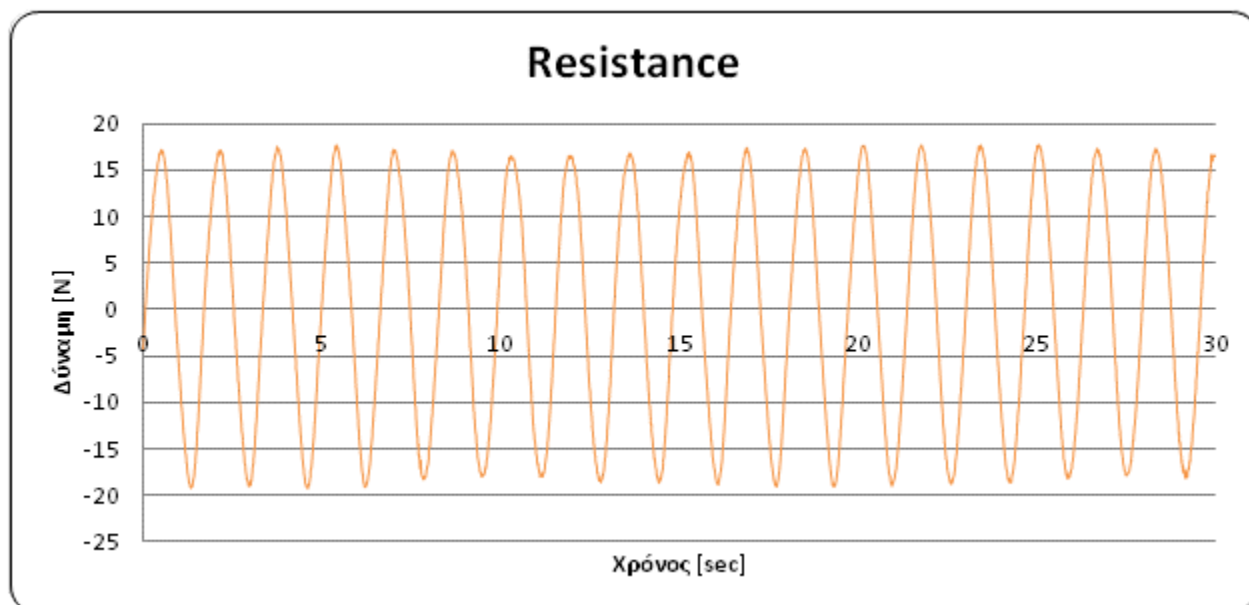
Πείραμα 158

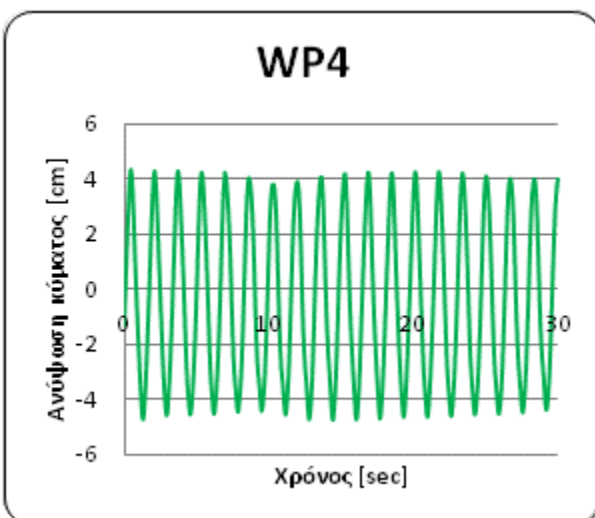
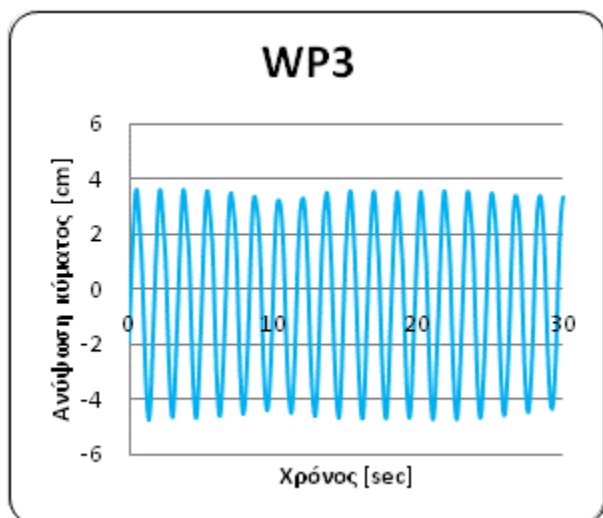
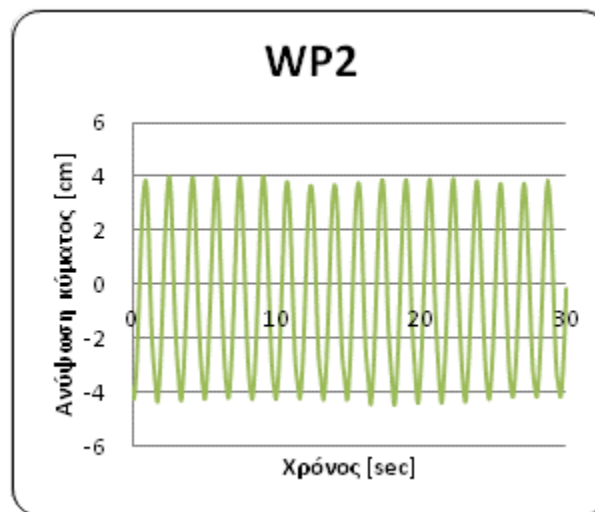
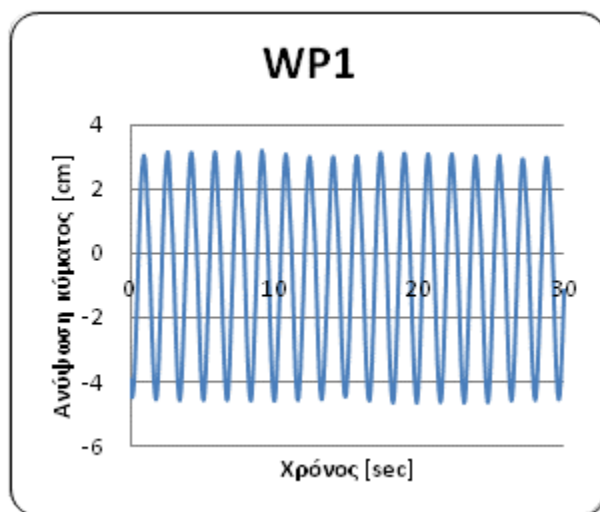
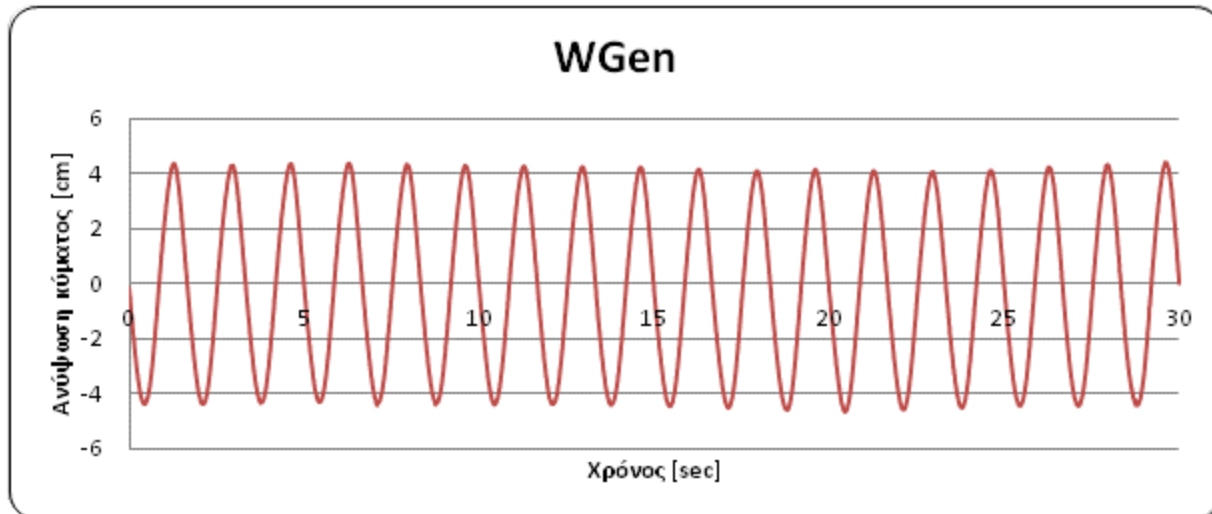
| | | | |
|----------------------|------|-------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0,045 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 158:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton |
| STD | 2.661 | 2.825 | 2.862 | 2.993 | 3.027 | 12.495 |
| MAX | 3.188 | 3.958 | 3.630 | 4.297 | 4.397 | 17.814 |
| MIN | -4.671 | -4.448 | -4.768 | -4.743 | -4.695 | -19.277 |
| MEAN | -0.718 | -0.500 | -0.347 | -0.371 | -0.252 | -0.062 |
| MEDIAN | -0.589 | -0.876 | -0.084 | -0.589 | -0.346 | 0.467 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 158:





4.1.8 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

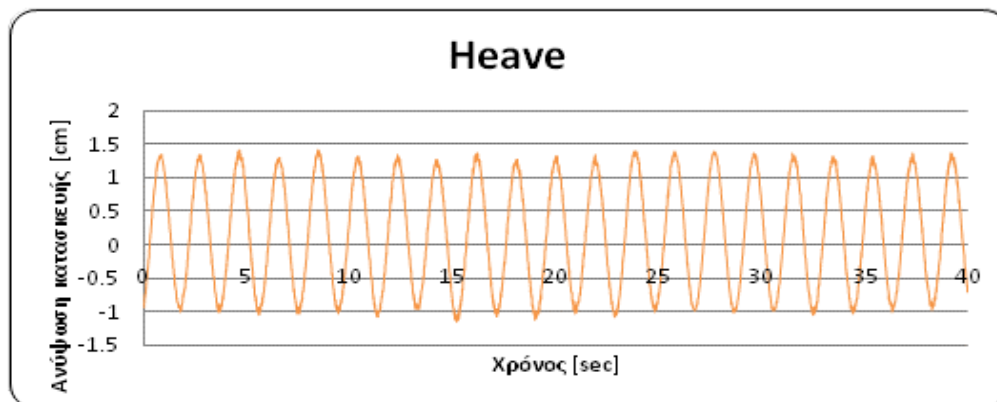
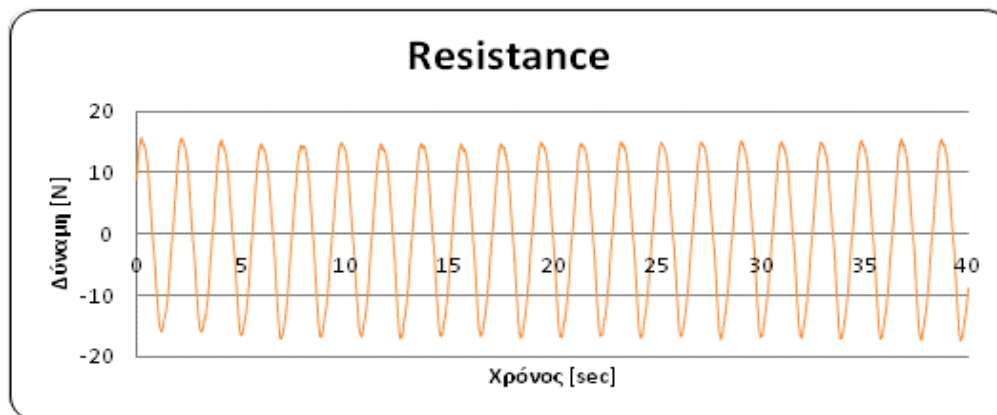
Πείραμα 202

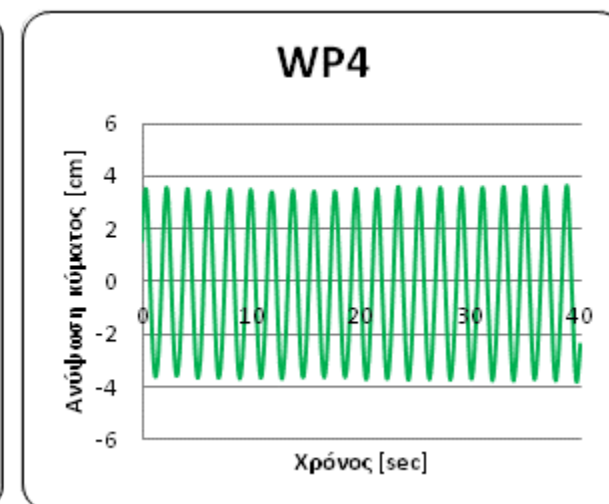
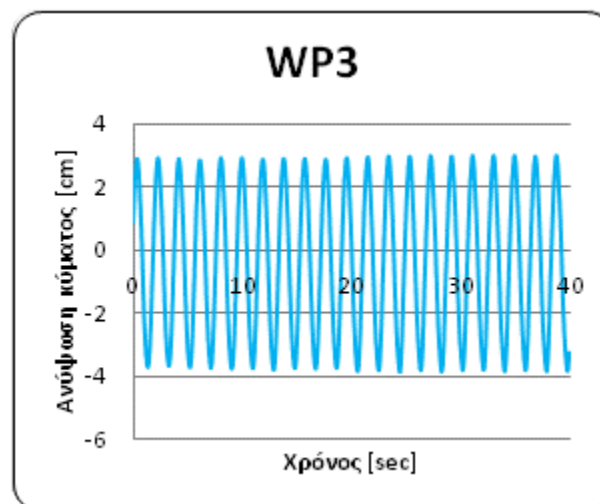
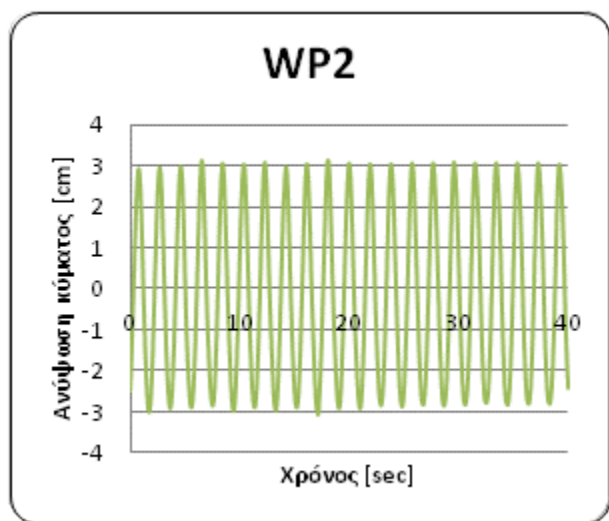
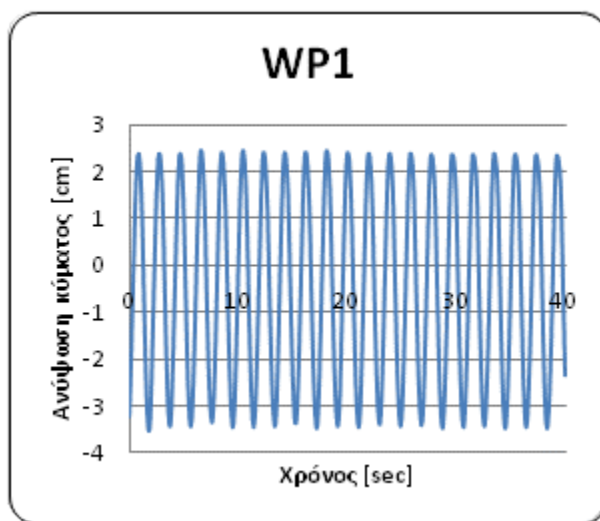
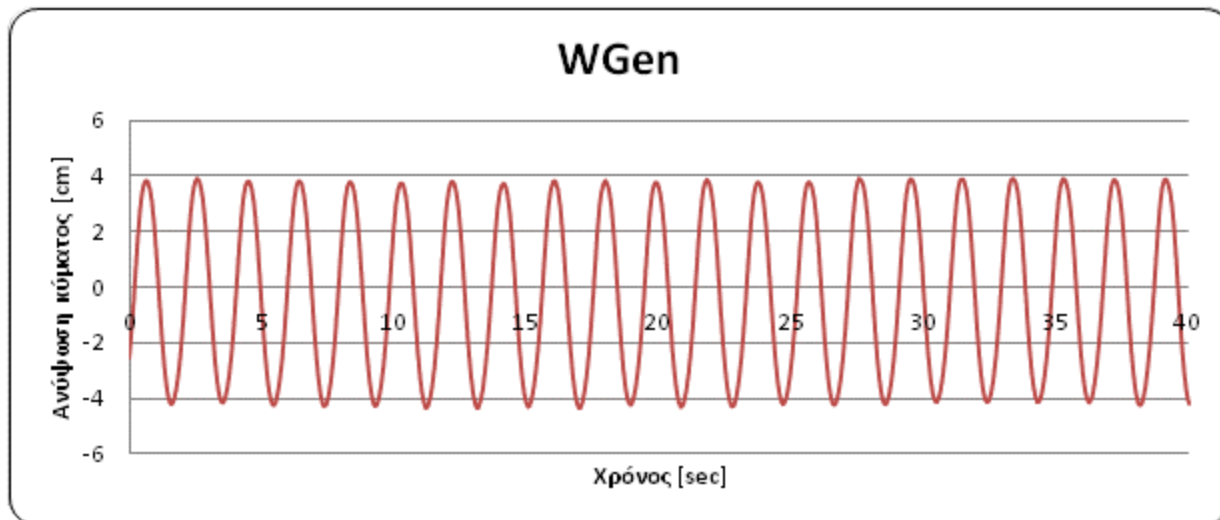
| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,52 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

Χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων μετρήσεων για το Πείραμα 202:

| | WP1 | WP2 | WP3 | WP4 | WGen | Resist. | Heave |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | cm | cm | cm | cm | cm | Newton | cm |
| STD | 2.092 | 2.105 | 2.361 | 2.544 | 2.898 | 11.113 | 0.805 |
| MAX | 2.460 | 3.148 | 3.005 | 3.647 | 3.886 | 15.856 | 1.401 |
| MIN | -3.542 | -3.096 | -3.835 | -3.841 | -4.327 | -17.504 | -1.147 |
| MEAN | -0.419 | -0.128 | -0.358 | -0.244 | -0.253 | -0.021 | 0.158 |
| MEDIAN | -0.385 | -0.335 | -0.249 | -0.410 | -0.392 | 0.262 | 0.172 |

Χρονικές ιστορίες μετρήσεων για το Πείραμα 202:





4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των πειραμάτων έγινε στατιστική ανάλυση αυτών. Βασικό εργαλείο της στατιστικής ανάλυσης στον τομέα του σχεδιασμού πλοίων και πλωτών κατασκευών είναι ο συντελεστής *response amplitude operator* (RAO), που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την πιθανή συμπεριφορά πλωτών σωμάτων σε κατάσταση θάλασσας. Ο RAO προκύπτει είτε από πειραματικές δοκιμές πρότυπων μοντέλων, είτε από τρεξίματα ειδικών προγραμμάτων CFD.

Η στατιστική ανάλυση στο πλαίσιο των πειραμάτων αυτών μπορεί να γίνει από τρία διαφορετικά προγράμματα που είναι διαθέσιμα από τον Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών και πιο συγκεκριμένα από το «Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης», το πρόγραμμα MATLAB, το πρόγραμμα MINITAB, αλλά και το EXCEL. Έχει όμως ελεγχθεί [57] (Μαζαράκος Κ. Π., 2008), πως και τα τρία προγράμματα έχουν ακριβώς την ίδια ακρίβεια κατά των υπολογισμό στατιστικών μεγεθών. Στην στατιστική επεξεργασία που ακολούθησε έγινε χρήση του κώδικα **FFTOM.m** σε πρόγραμμα MATLAB.

Κώδικας υπολογισμού FFTOM.m

Ο Κώδικας **FFTOM.m**, έχει γραφεί από τον Θ. Π. Μαζαράκο, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. (2010) [58], [59], Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Μηχανικό του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης στο **MATLAB** και κάνει στατιστική επεξεργασία πειραμάτων. Το πρόγραμμα αυτό αρχικά σχεδιάζει τις χρονικές ιστορίες του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους (δύναμη διέγερσης, κινήσεις, ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας, air-gap, δυνάμεις έκπτωσης, τάσεις σε σχοινιά, κ.τ.λ.). Στη συνέχεια υπολογίζει τα βασικά στατιστικά μεγέθη: **mean, maximum, minimum, standard deviation**, για το κάθε μέγεθος και τέλος κάνει **Fast Fourier Transformation (FFT ή DFT)** για όποιο μέγεθος θέλουμε να υπολογίσουμε.

Στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω του Κώδικα FFTOM.m

Για κάθε δοκιμή, εκτελείται η ακόλουθη ανάλυση.

- *Mean, Min, Max* και *Std* σε κάθε κανάλι για την αρχή της δοκιμής. (5s για τους απλούς αρμονικούς κυματισμούς και 1s στο ήρεμο νερό). Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: **Zmean, Zmin, Zmax, Zstd**
- *Mean, Min, Max* και *Std* σε κάθε κανάλι για επιλεγμένο διάστημα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: **Vmean, Vmin, Vmax, Vstd**
- Οι μέσες τιμές στην αρχή πρέπει να αφαιρεθούν από τις μέσες τιμές κατά τη διάρκεια του επιλεγμένου διαστήματος, ως εξής: **Vmean-Zmean**.

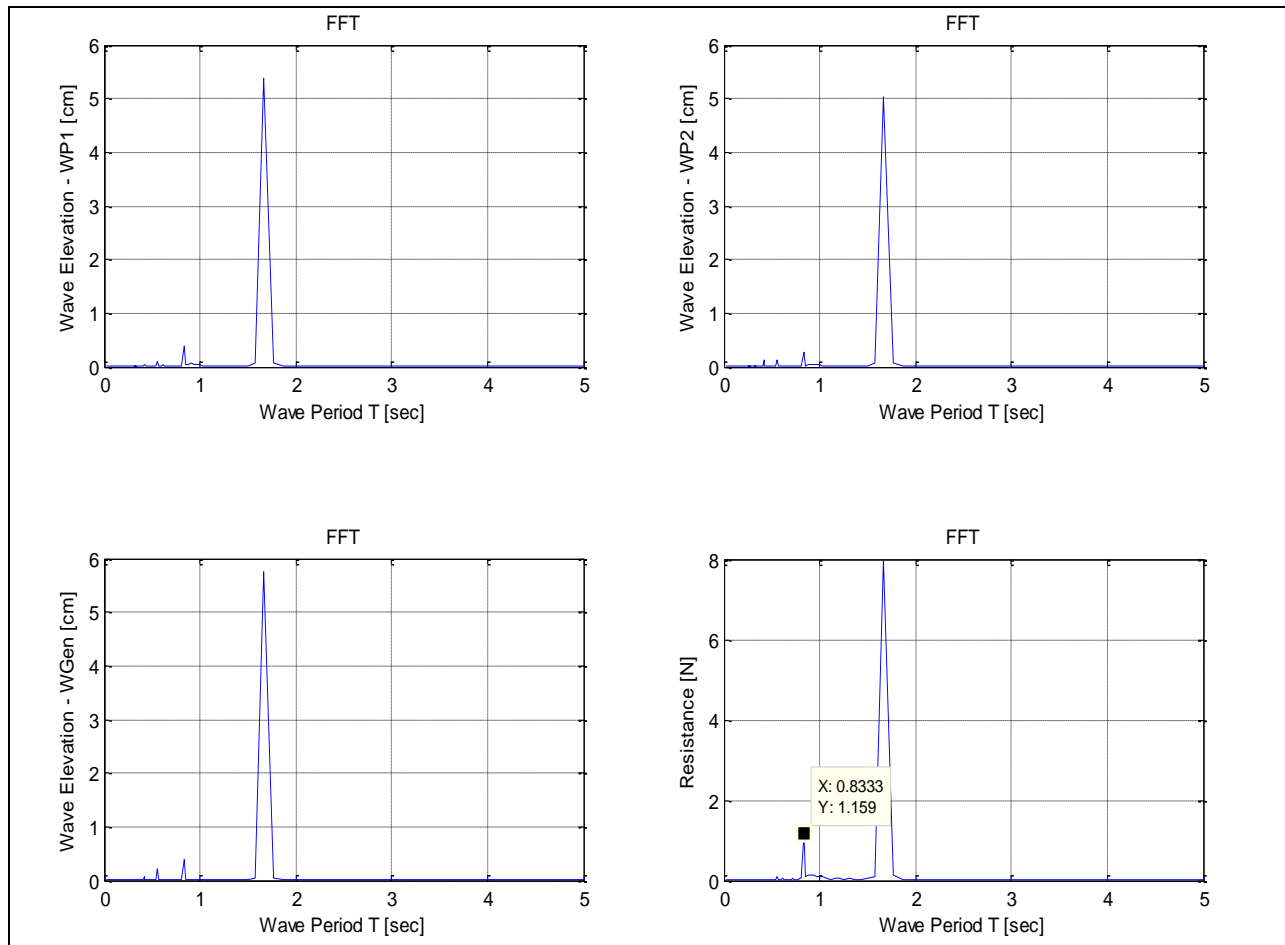
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης των μετρήσεων και των διαγράμμάτων που προέκυψαν. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και των 217 πειραμάτων παρουσιάζονται εκτενώς στο Παράρτημα 3 (βλ. Συνοδευτικό CD).

4.2.1 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

Πείραμα 14

| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 6 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 14:

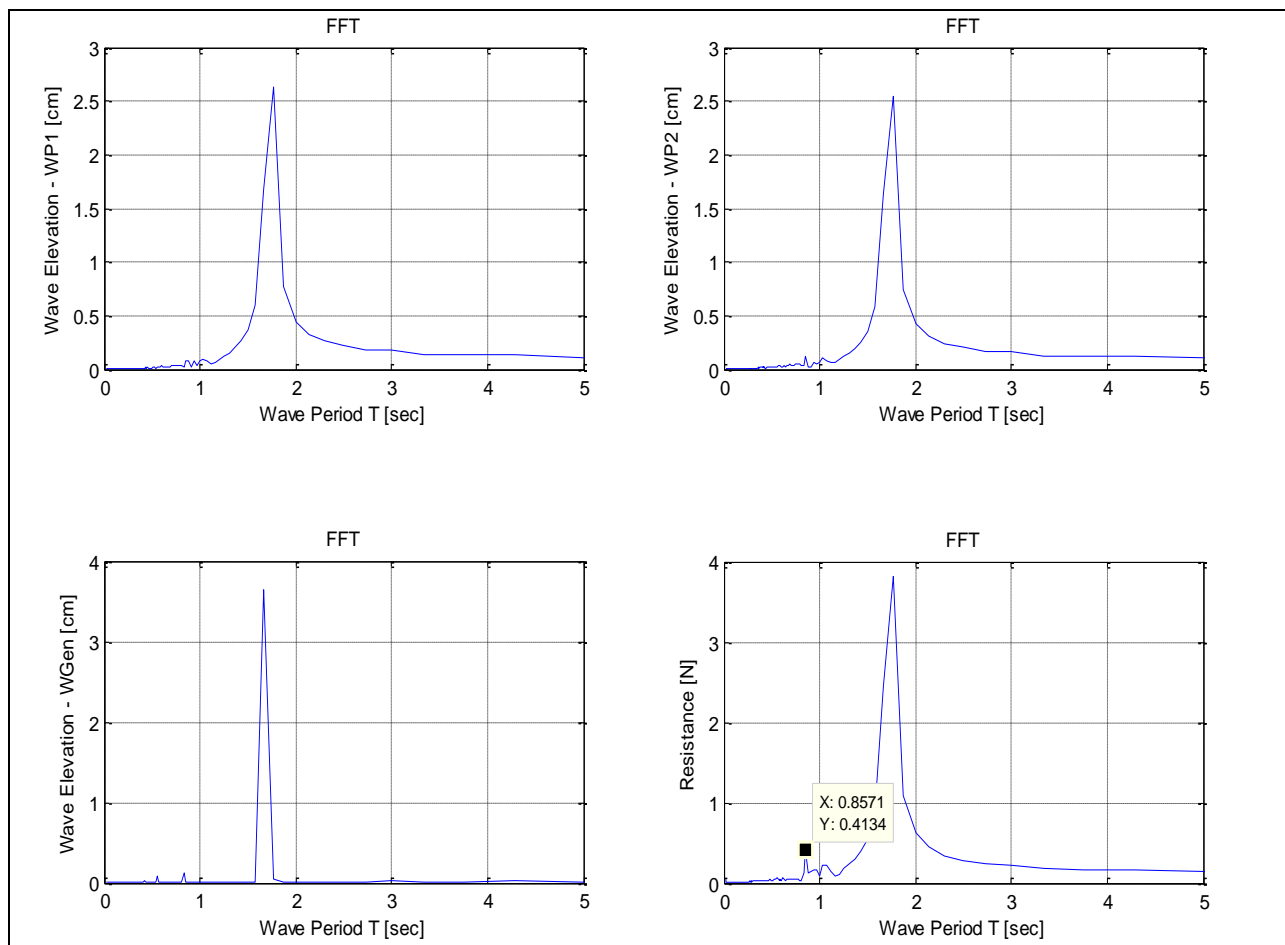


4.2.2 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πείραμα 50

| | | | |
|----------------------|------|--------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | -0,089 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 50:

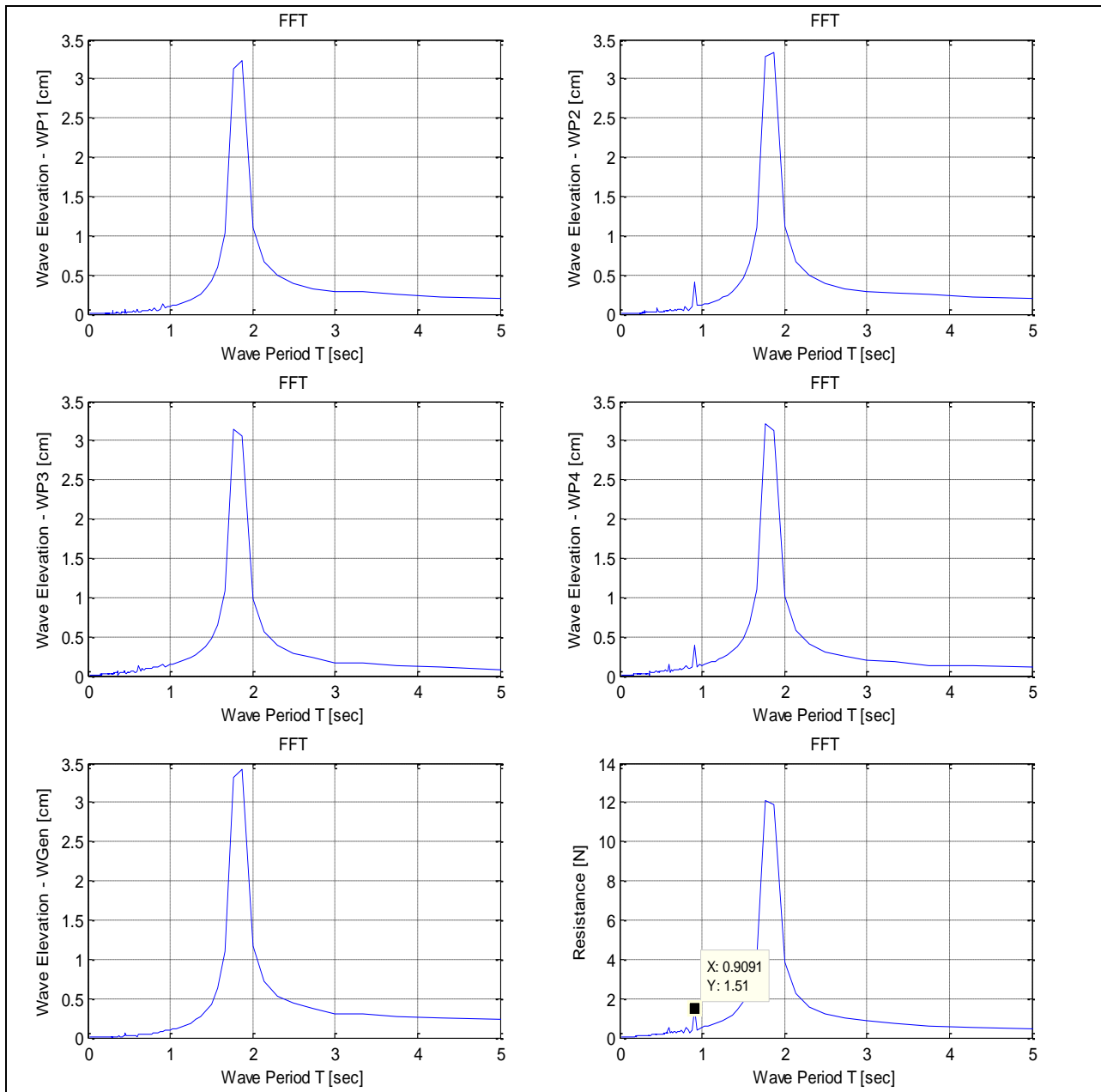


4.2.3 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

Πείραμα 70

| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,55 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 6 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 70:

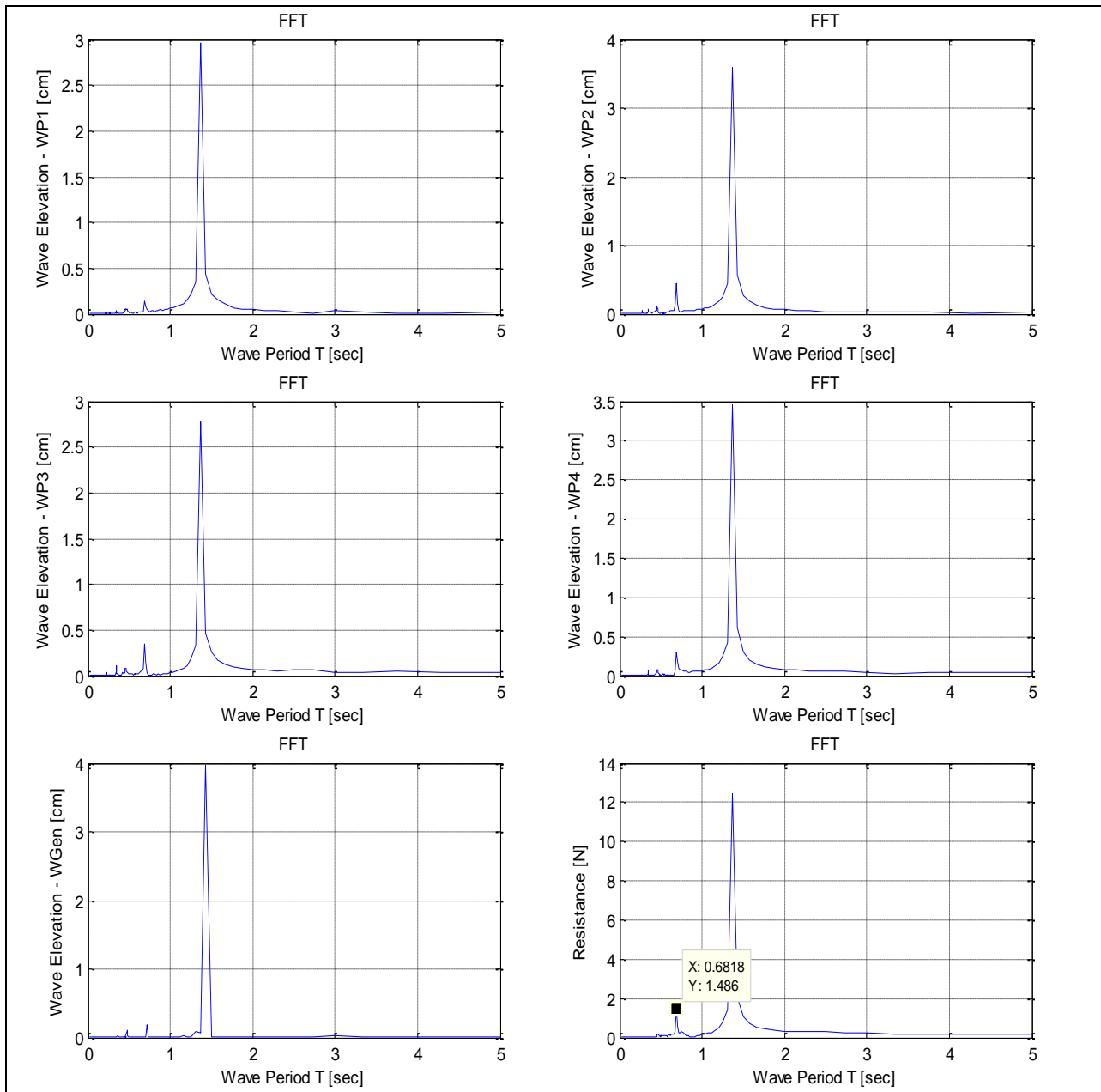


4.2.4 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πείραμα 99

| | | | |
|----------------------|------|-------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,70 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0,089 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 99:

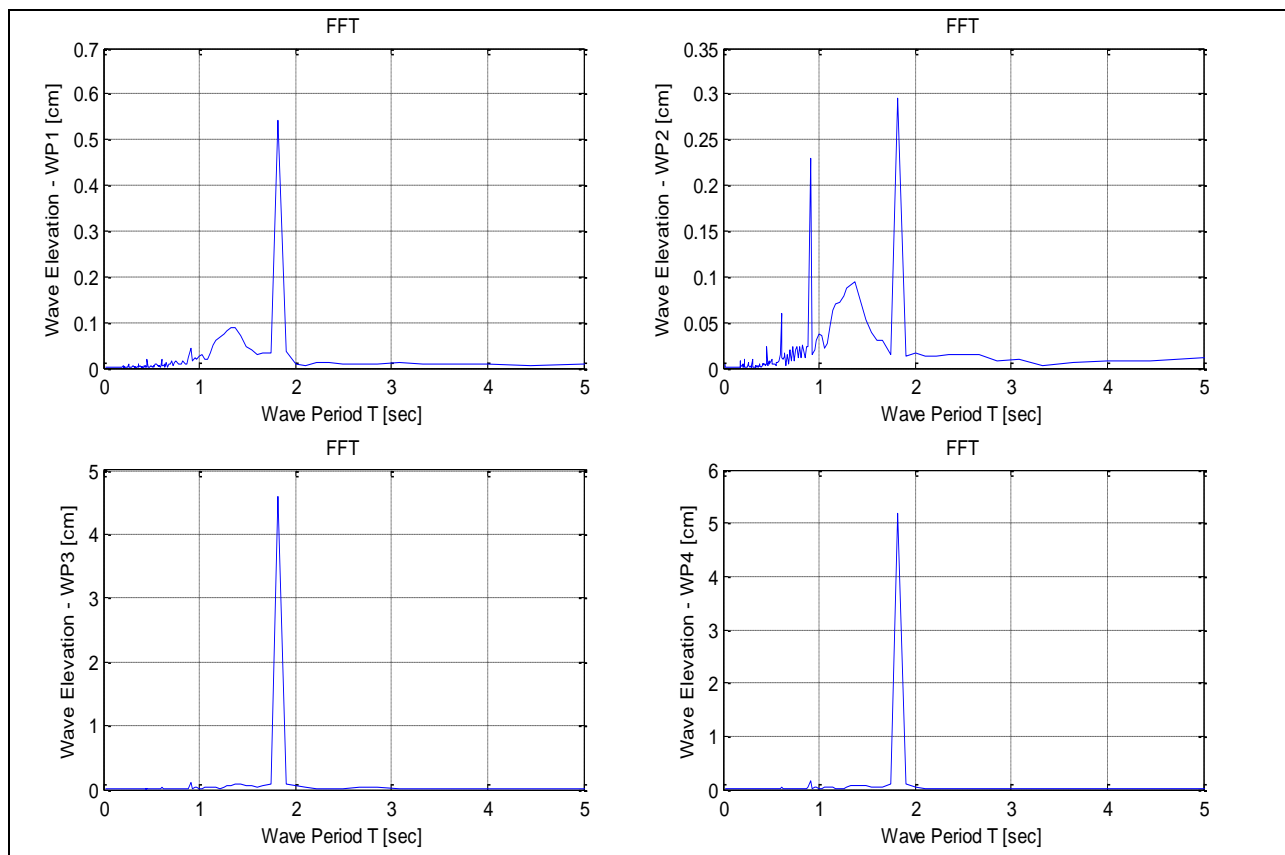


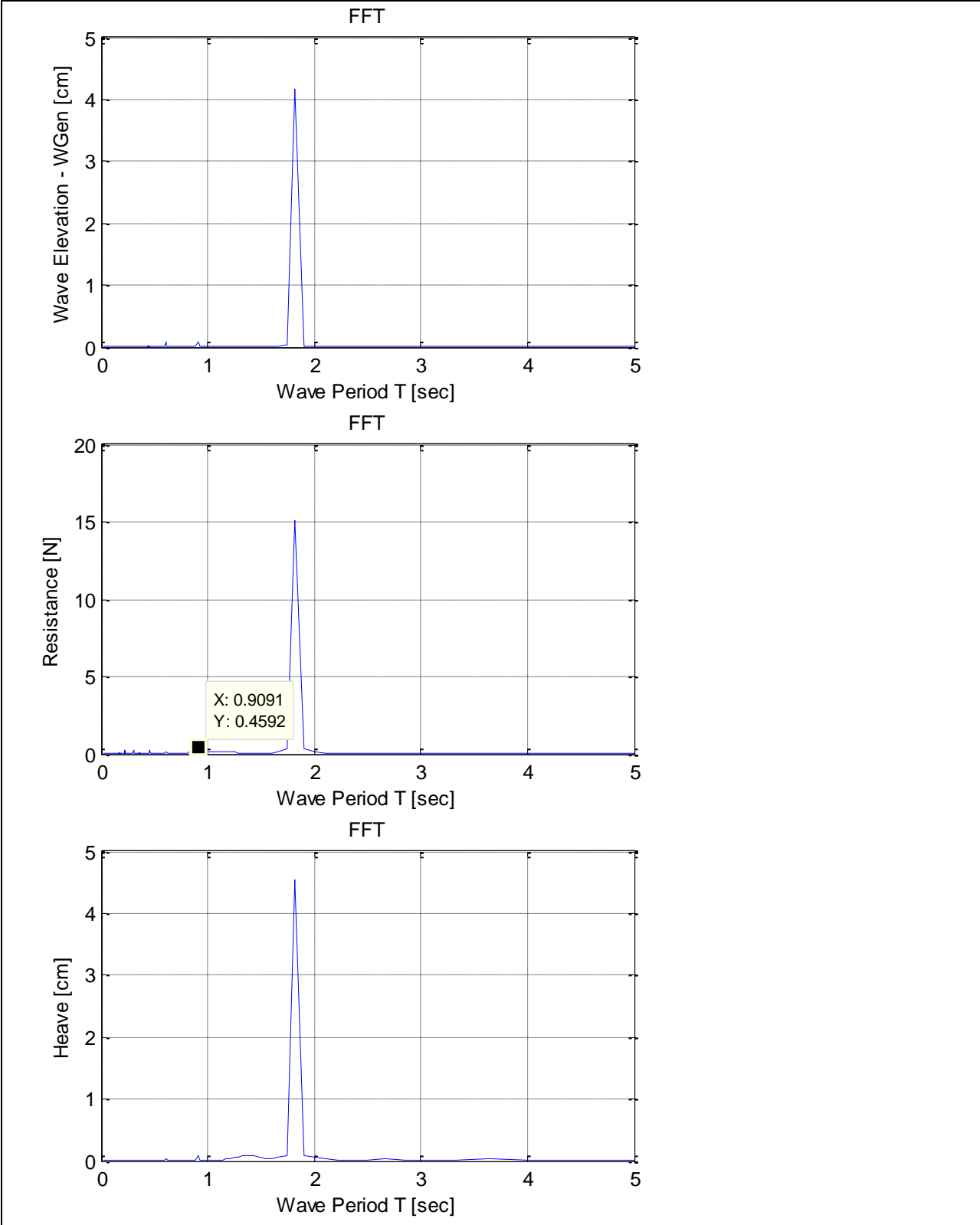
4.2.5 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

Πείραμα 128

| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,55 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 128:



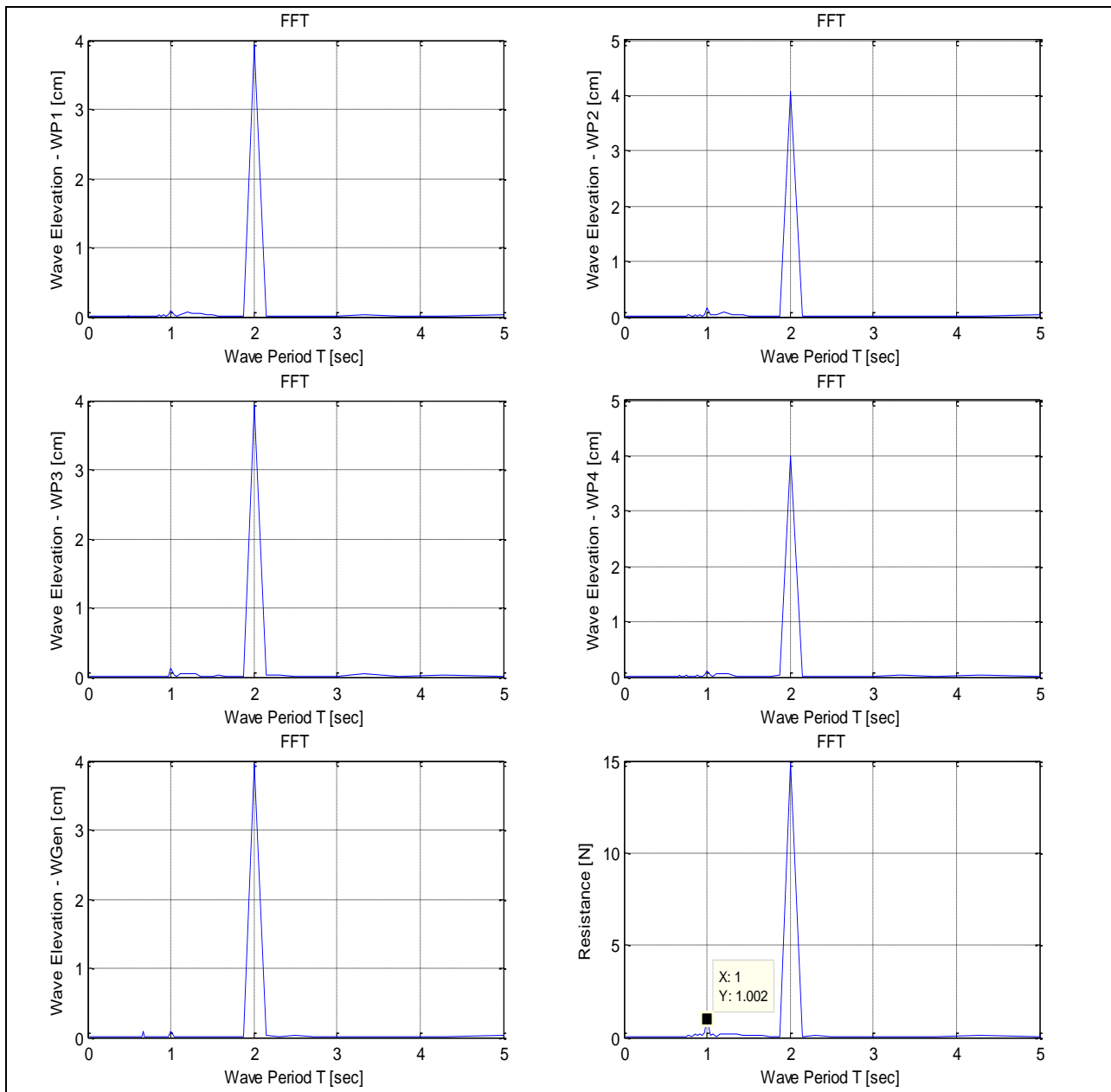


4.2.6 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

Πείραμα 140

| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,50 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 140:

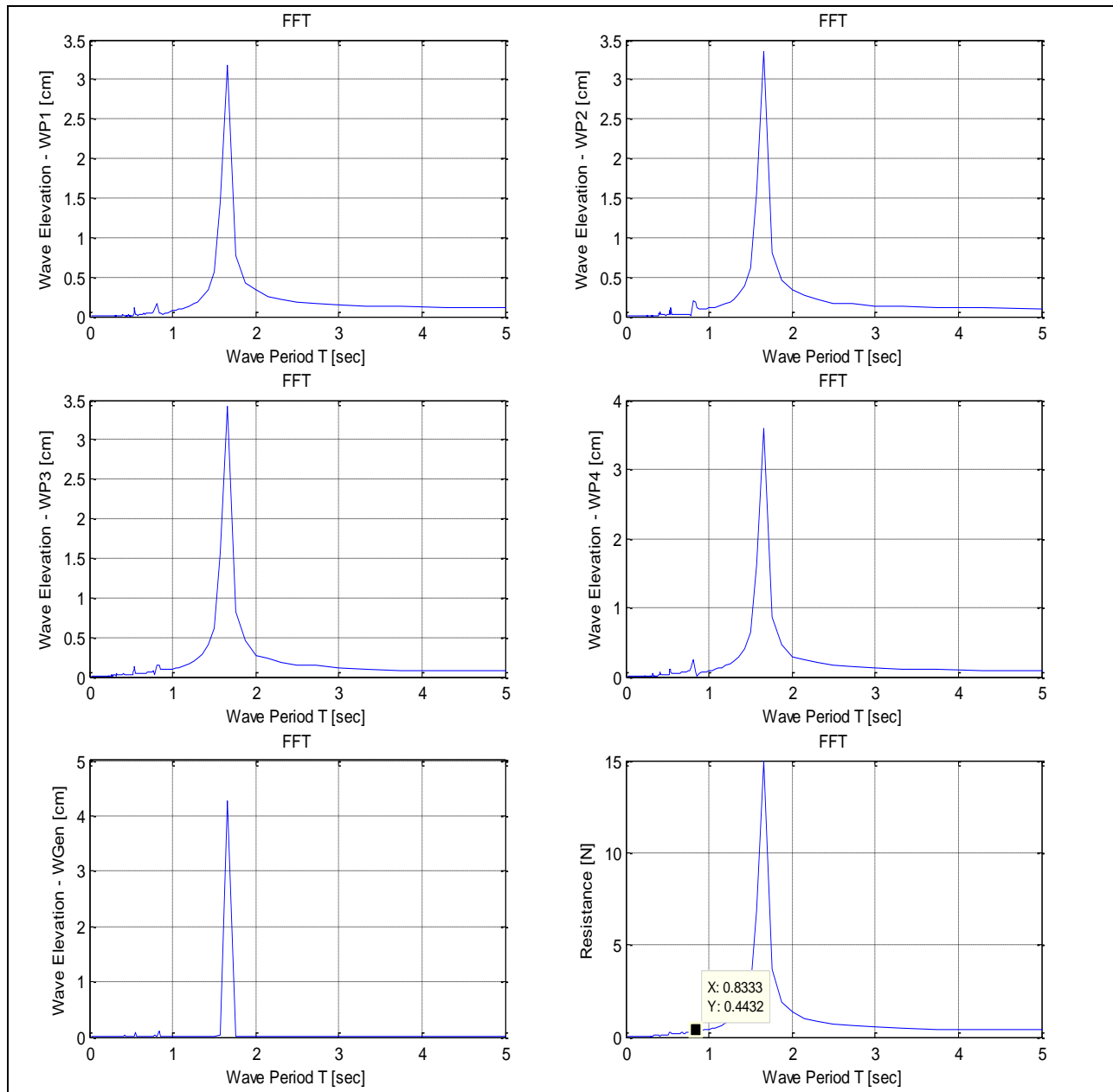


4.2.7 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πείραμα 158

| | | | |
|----------------------|------|-------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,60 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0,045 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 158:

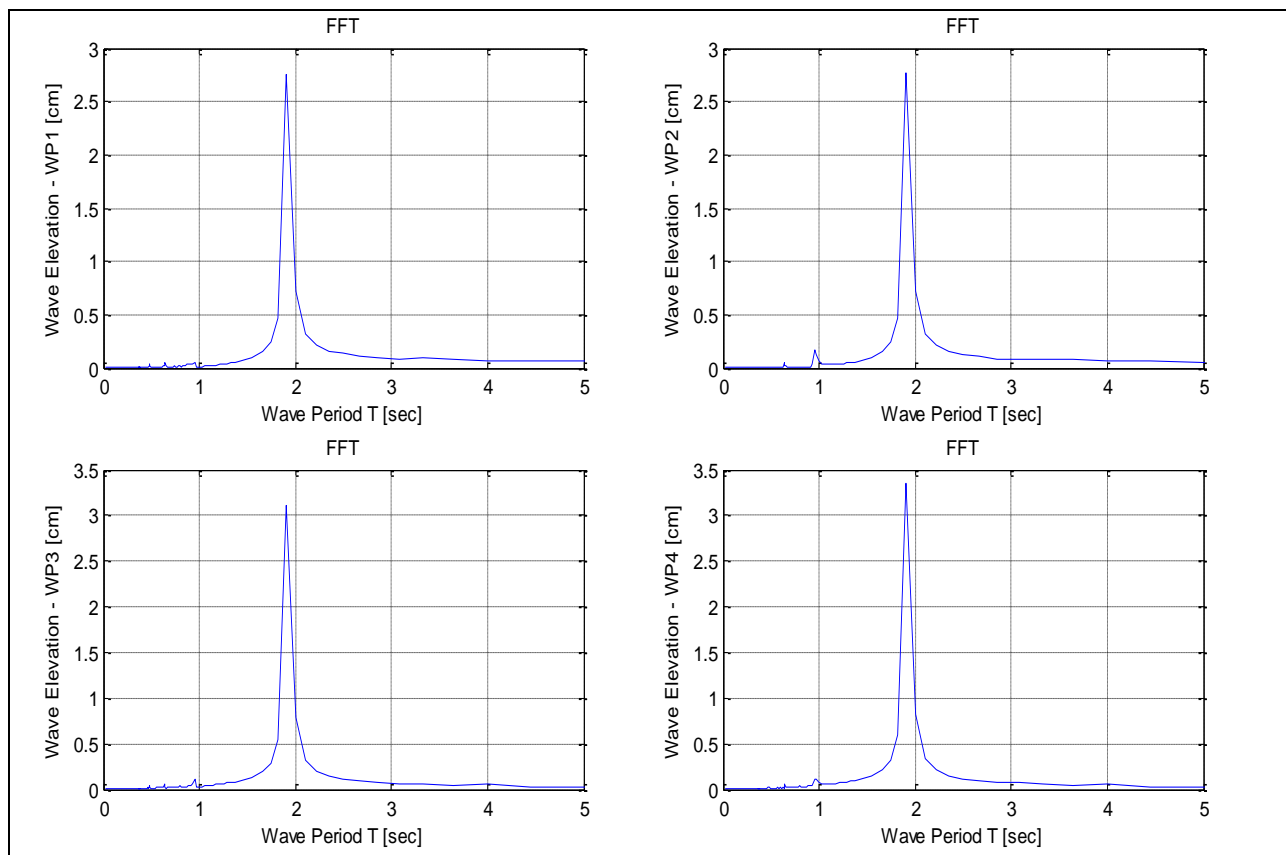


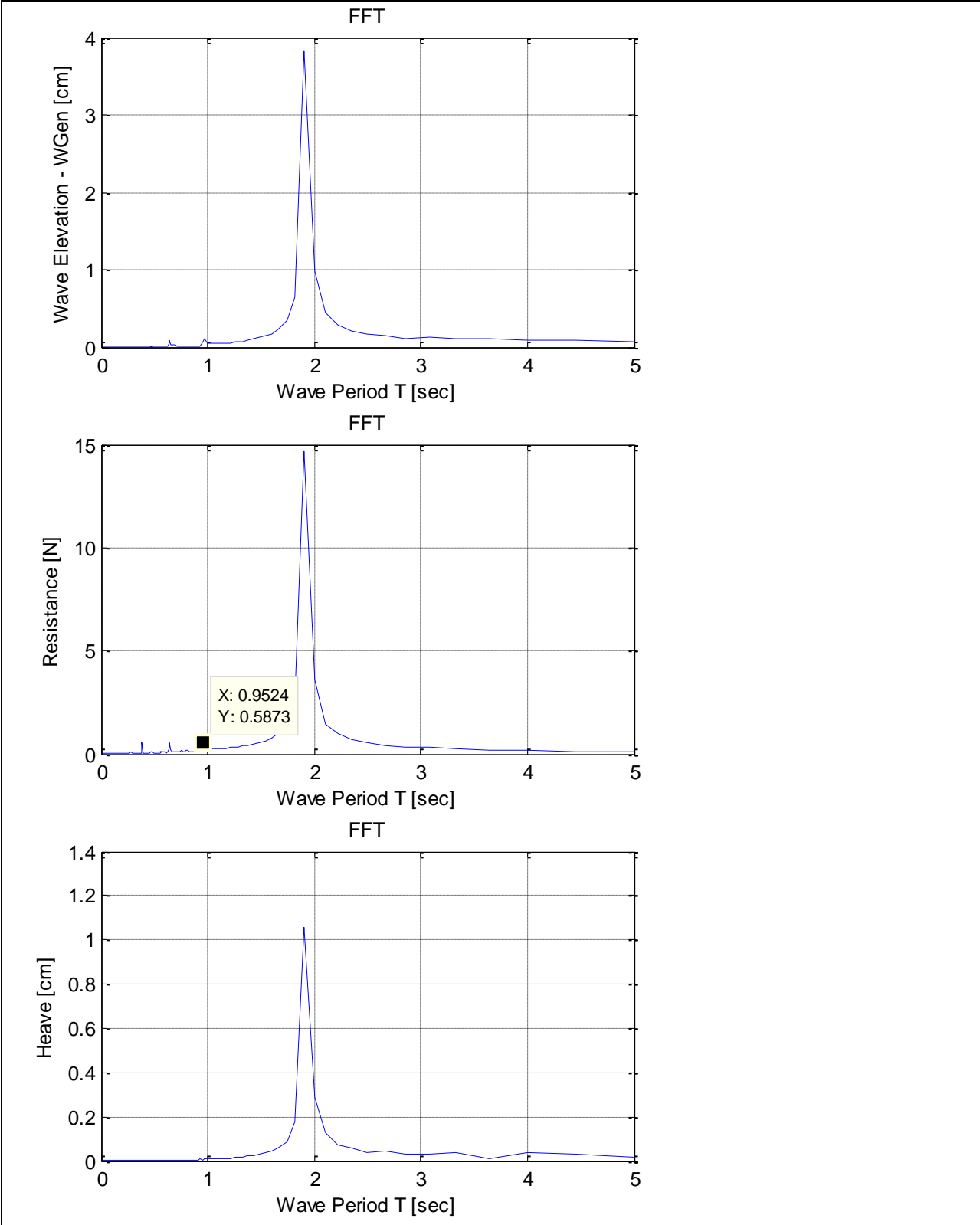
4.2.8 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με ελευθερία κατακόρυφης κίνησης

Πείραμα 202

| | | | |
|----------------------|------|------|-------|
| Συχνότητα κυματισμού | f= | 0,52 | Hz |
| Ταχύτητα συστήματος | v= | 0 | m/sec |
| Πλάτος κυματισμού | H/2= | 4 | cm |

- FFT διαγράμματα για το Πείραμα 202:





4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να γίνουν συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε μέγεθος από την στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων, κατέστη απαραίτητη η αδιαστατοποίησή τους.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τροποποιήσεις:

- Για την ανύψωση J της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και την κατακόρυφη ανύψωση της κατασκευής:

$$J' = \frac{J}{\left(\frac{H}{2}\right)} \rightarrow [-]$$

- Για τη δύναμη αντίστασης F_x :

$$F'_x = \frac{F_x}{\rho g b^2 \left(\frac{H}{2}\right)} \rightarrow [-]$$

- Για τη drift δύναμη F_{dx} :

$$F'_{dx} = \frac{F_{dx}}{\rho g b \left(\frac{H}{2}\right)^2} \rightarrow [-]$$

- Για τη 2^{ης} τάξης δύναμη F_{2x} :

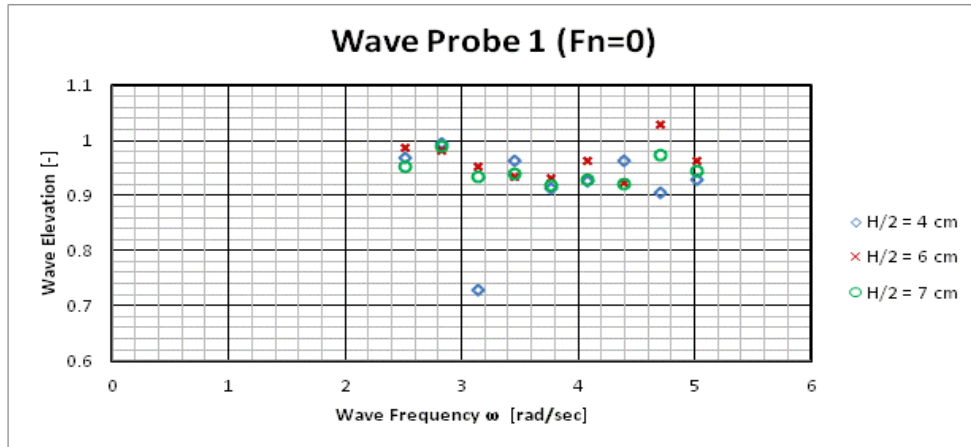
$$F'_{2x} = \frac{F_{2x}}{\rho g b \left(\frac{H}{2}\right)^2} \rightarrow [-]$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ομαδοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε κοινά διαγράμματα συναρτήσει της συχνότητας κυματισμών εκφρασμένης σε r/s . Συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για ίδιες συχνότητες και διαφορετικά πλάτη κυματισμών, καθώς και ίδιες συχνότητες αλλά διαφορετικές πρόσω ή πίσω ταχύτητες.

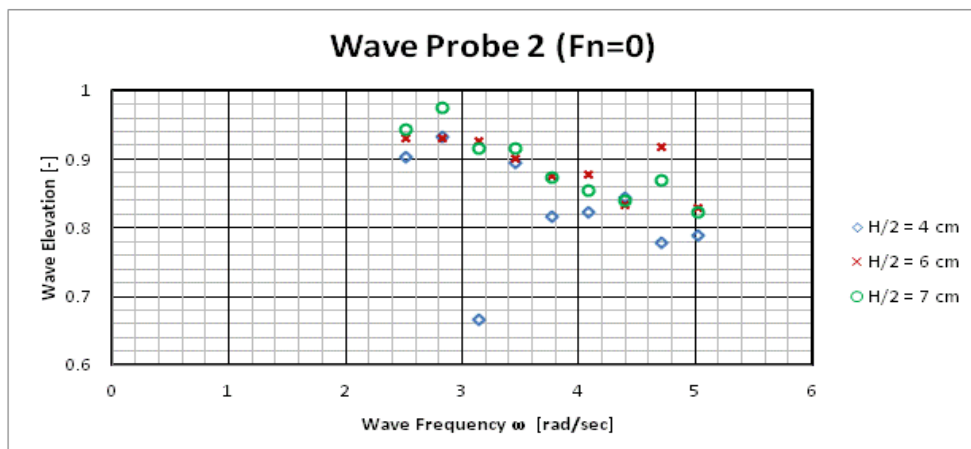
Τα ομαδοποιημένα συγκριτικά διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω.

4.3.1 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

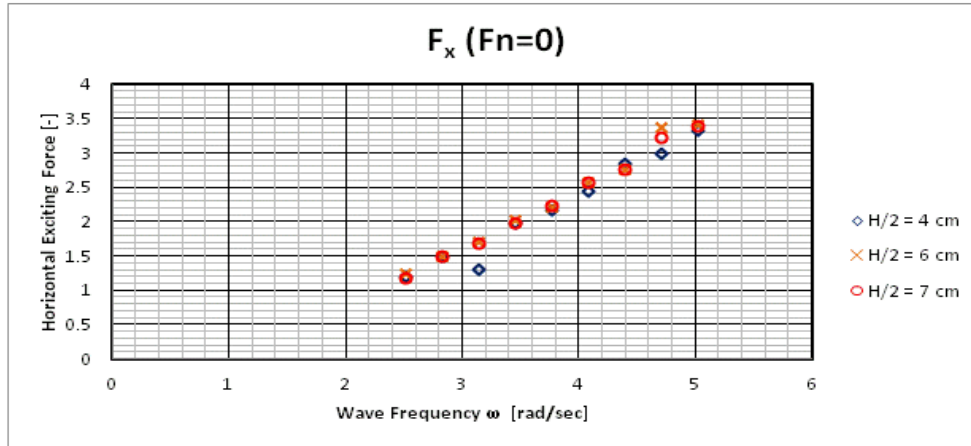
Πειράματα 1 έως 27



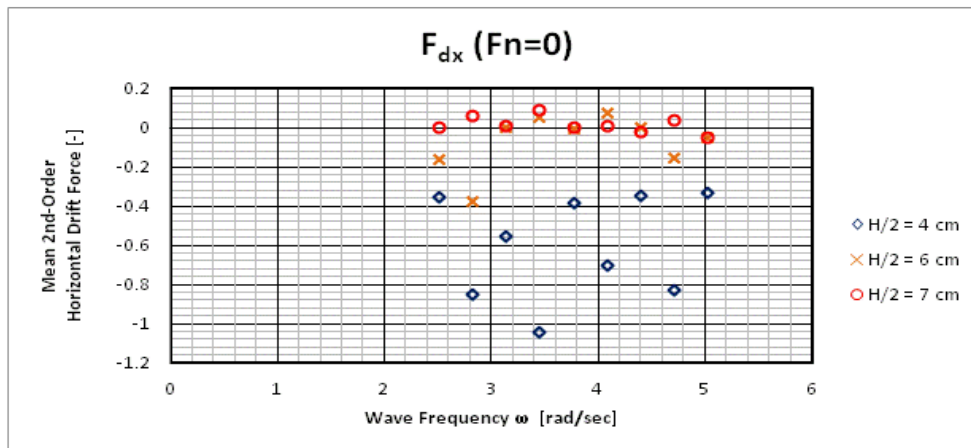
Διάγραμμα 4.3.1.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορα πλάτη κύματος.



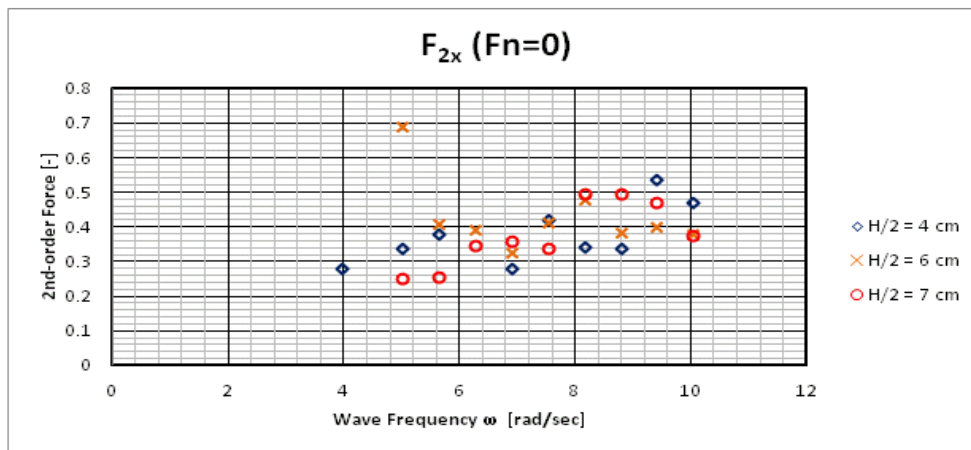
Διάγραμμα 4.3.1.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορα πλάτη κύματος.



Διάγραμμα 4.3.1.3: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.1.4: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

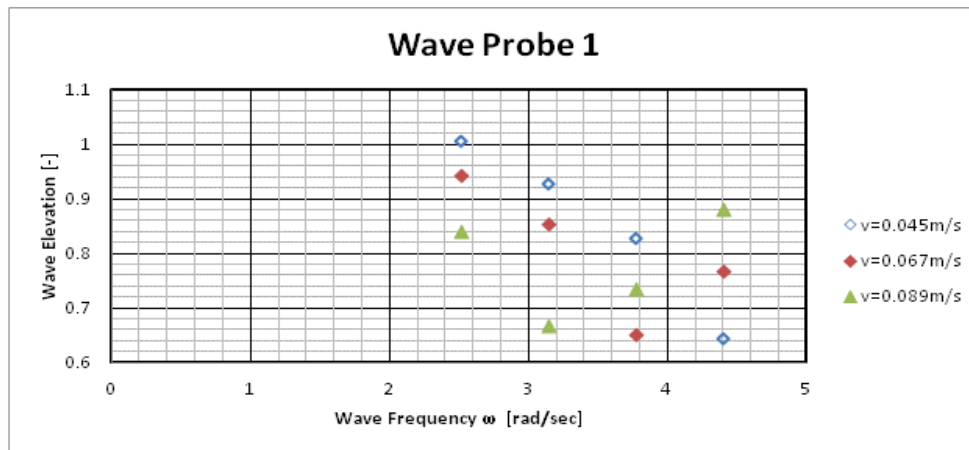


Διάγραμμα 4.3.1.5: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

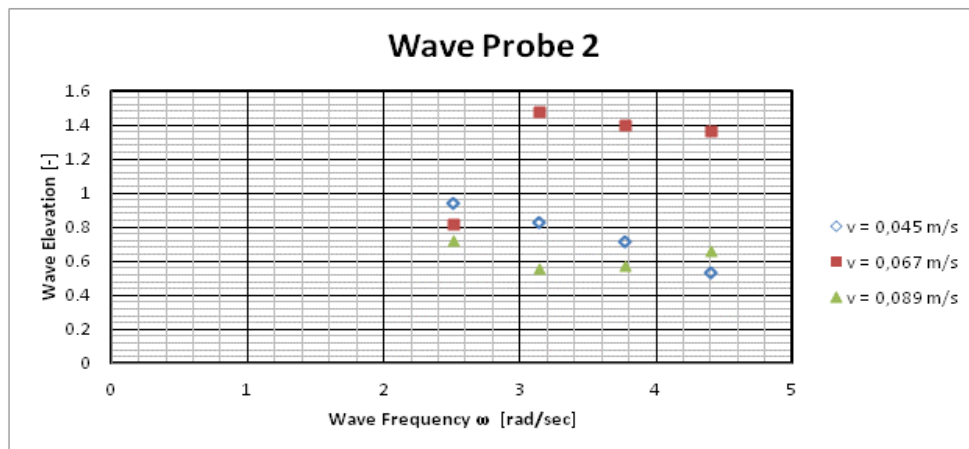
4.3.2 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πειράματα 28 έως 51

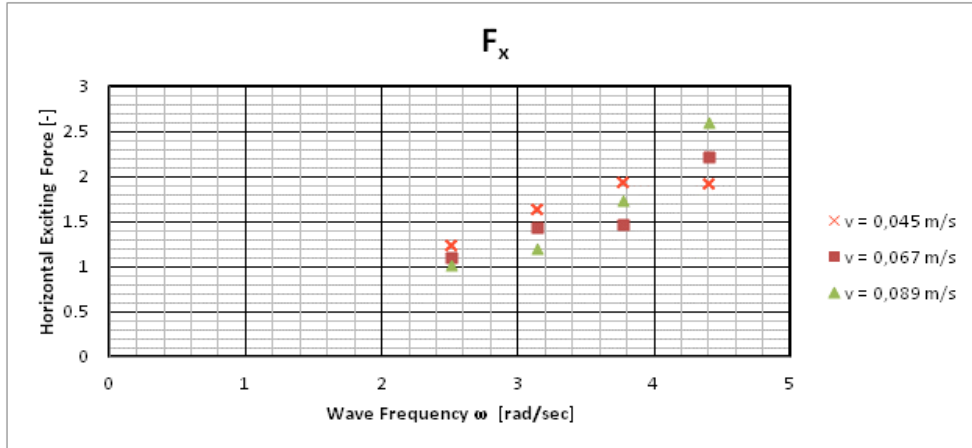
ΠΡΟΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



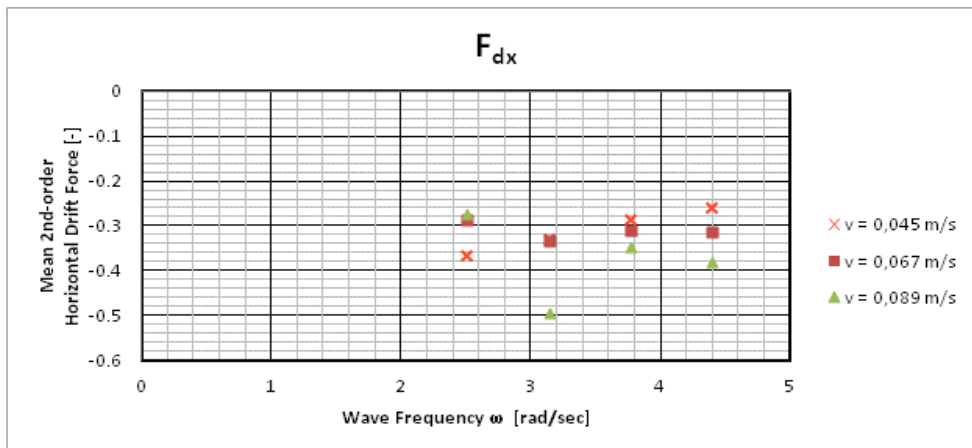
Διάγραμμα 4.3.2.1.: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



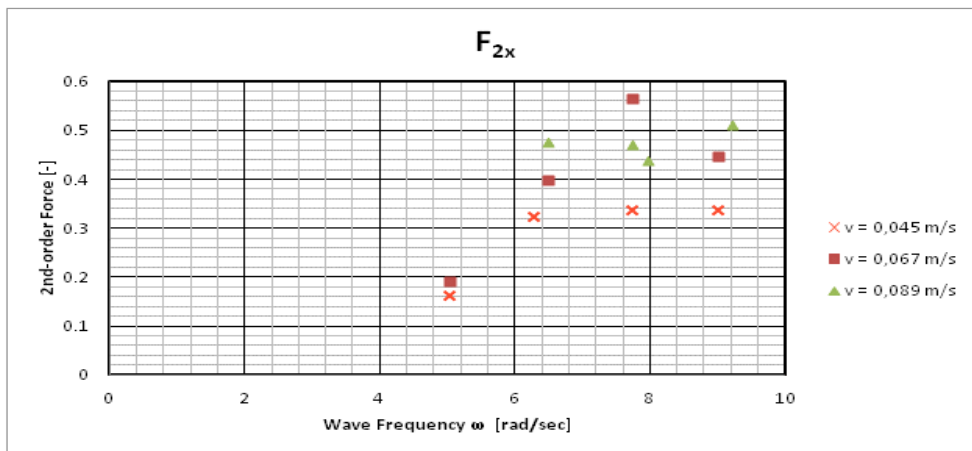
Διάγραμμα 4.3.2.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.2.3: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

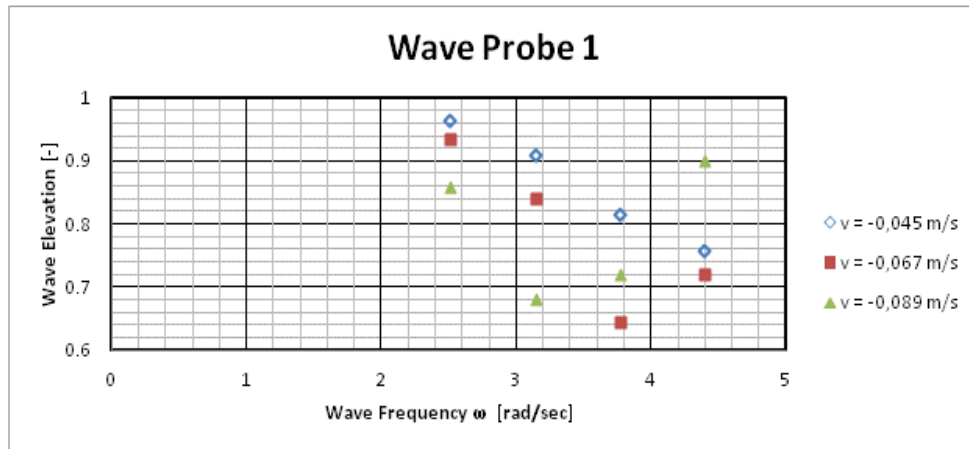


Διάγραμμα 4.3.2.4: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

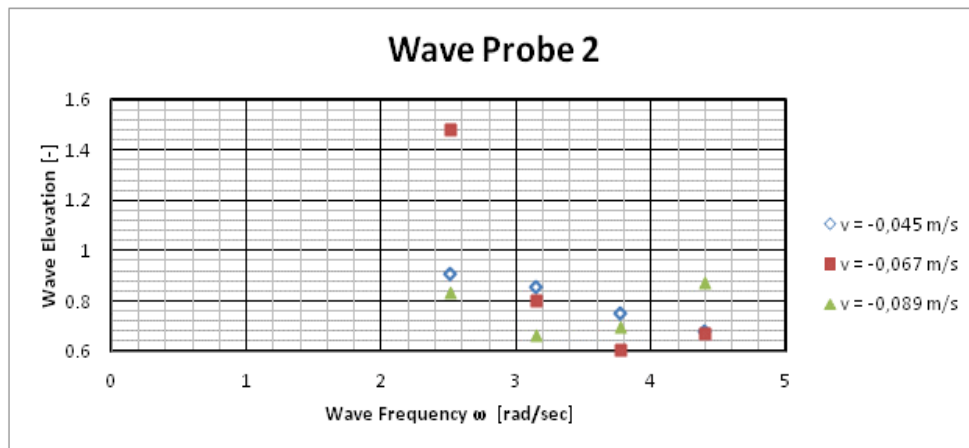


Διάγραμμα 4.3.2.5: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

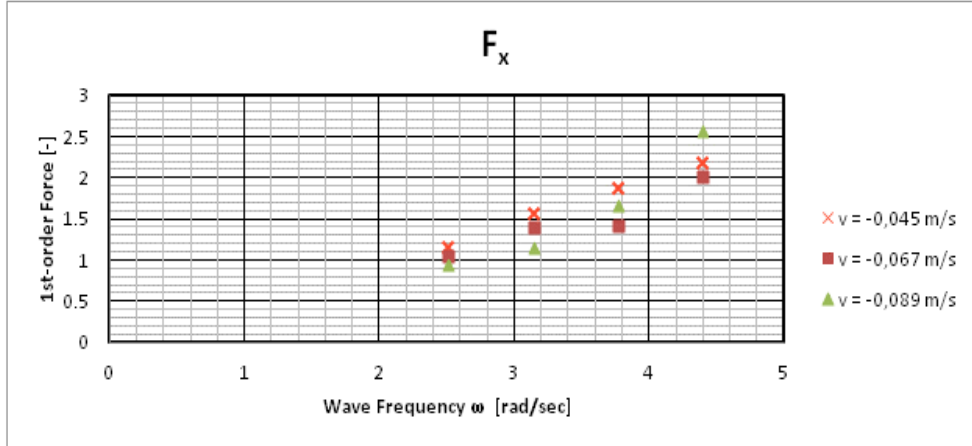
ΠΙΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



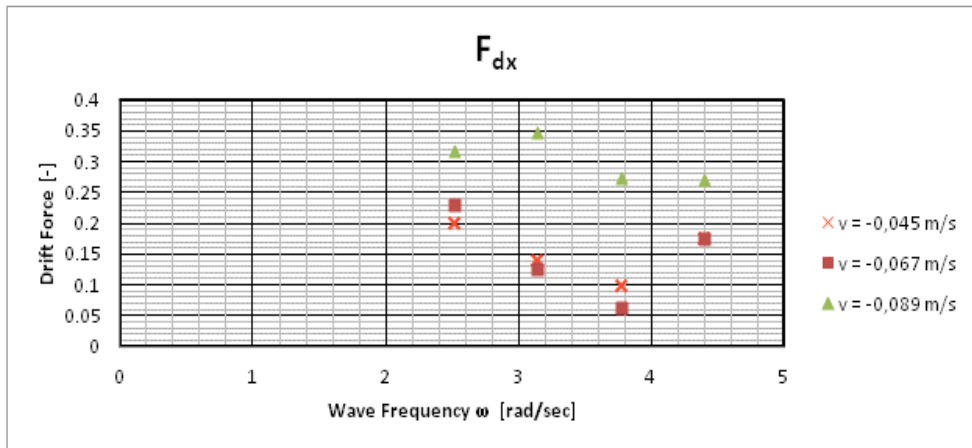
Διάγραμμα 4.3.2.6: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



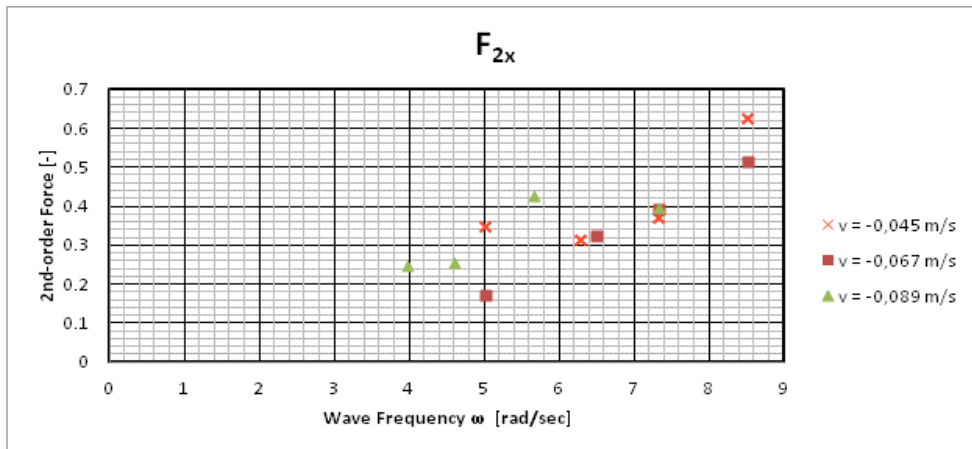
Διάγραμμα 4.3.2.7: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.2.8: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



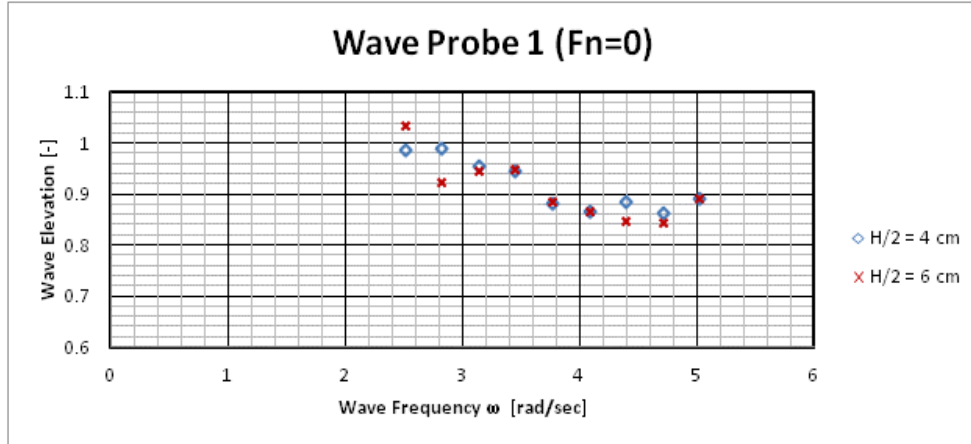
Διάγραμμα 4.3.2.9: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



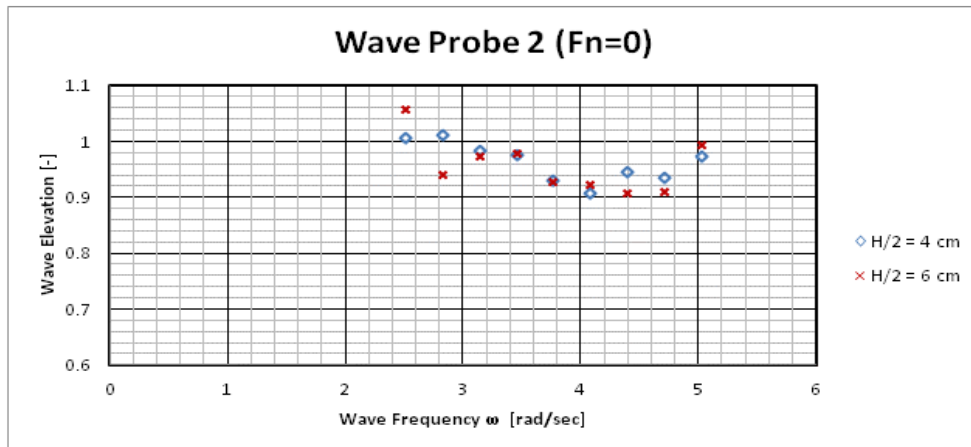
Διάγραμμα 4.3.2.10: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.

4.3.3 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

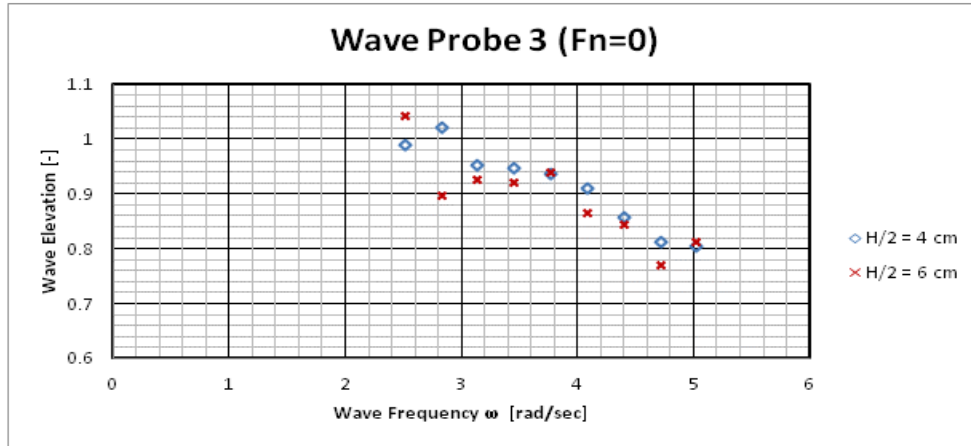
Πειράματα 58 έως 75



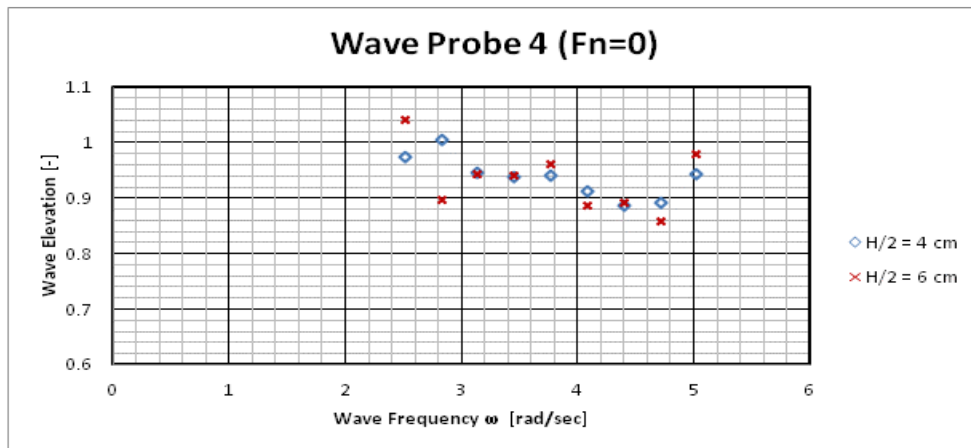
Διάγραμμα 4.3.3.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσκει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορα πλάτη κύματος.



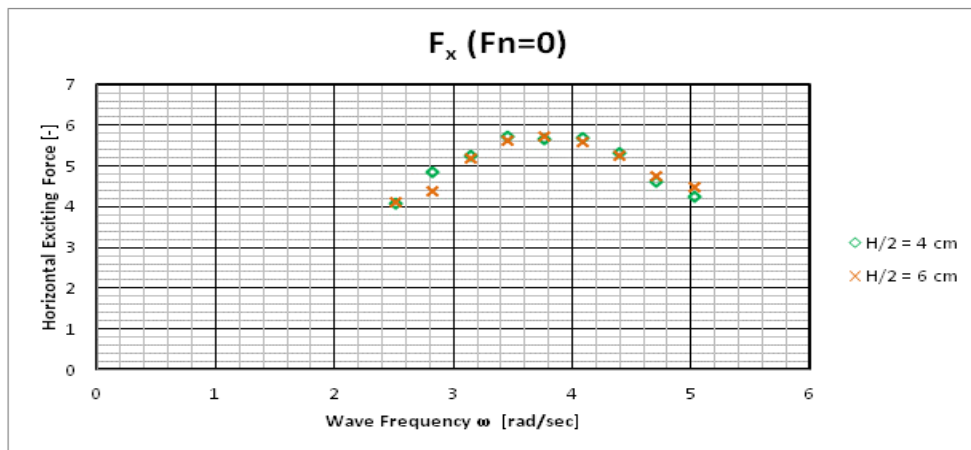
Διάγραμμα 4.3.3.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσκει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορα πλάτη κύματος.



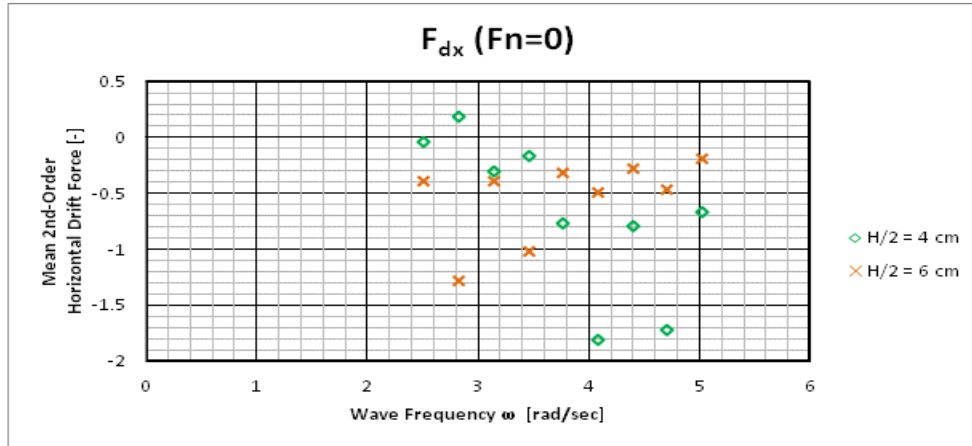
Διάγραμμα 4.3.3.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορα πλάτη κύματος.



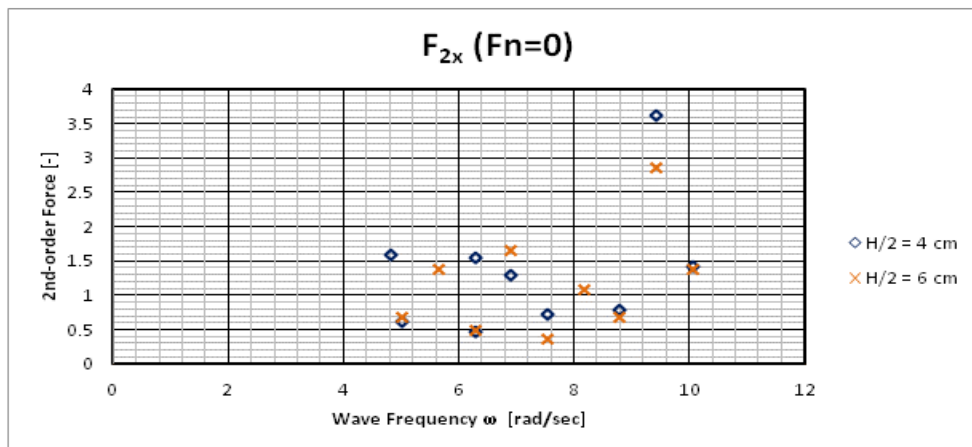
Διάγραμμα 4.3.3.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορα πλάτη κύματος.



Διάγραμμα 4.3.3.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος.



Διάγραμμα 4.3.3.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος.

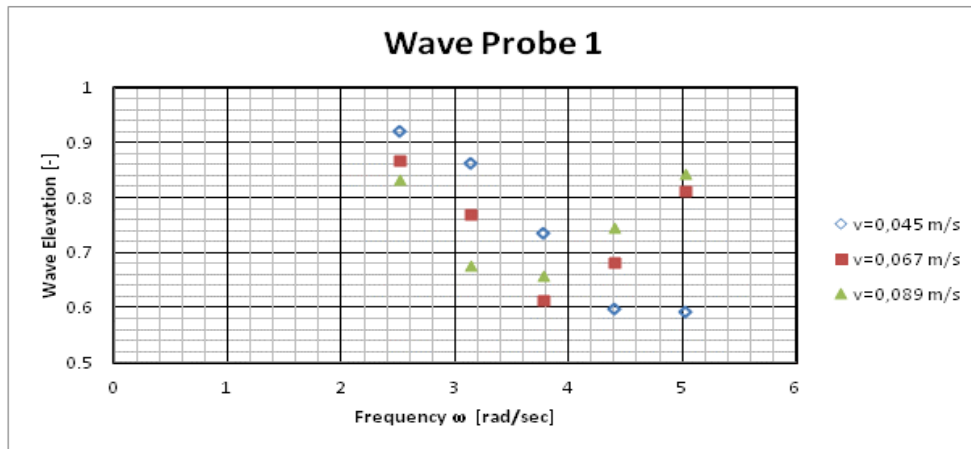


Διάγραμμα 4.3.3.7: Η δευτεροτάξη δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

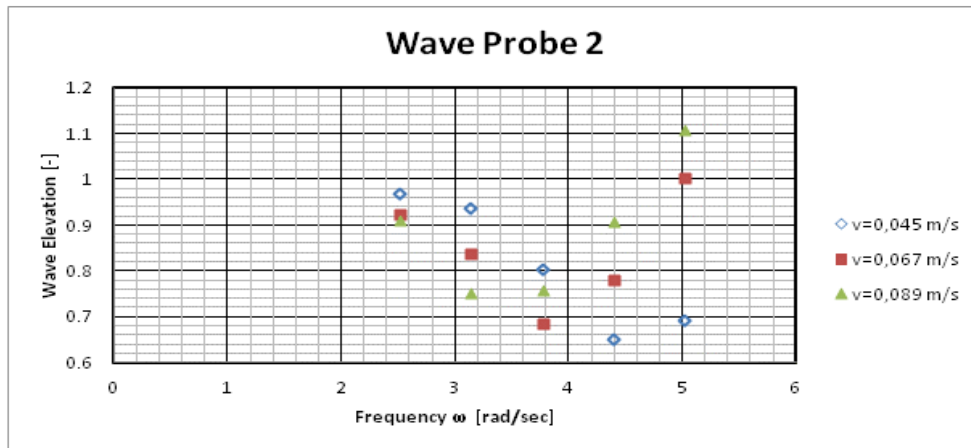
4.3.4 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πειράματα 76 έως 105

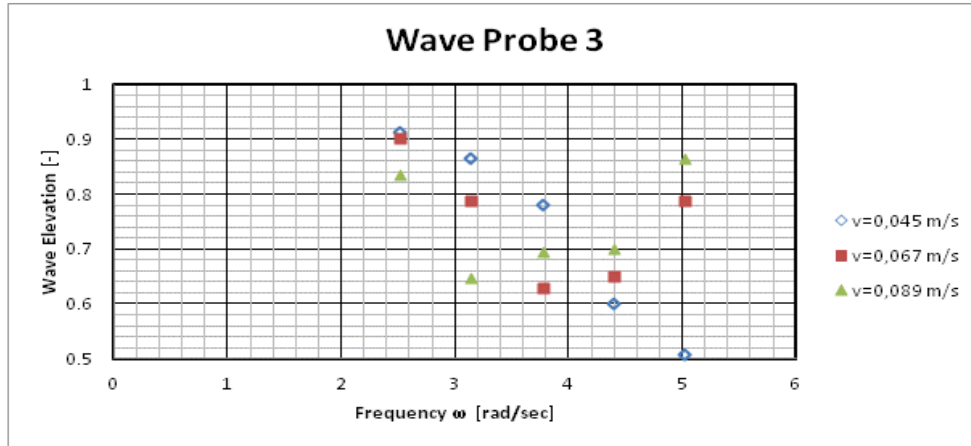
ΠΡΟΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



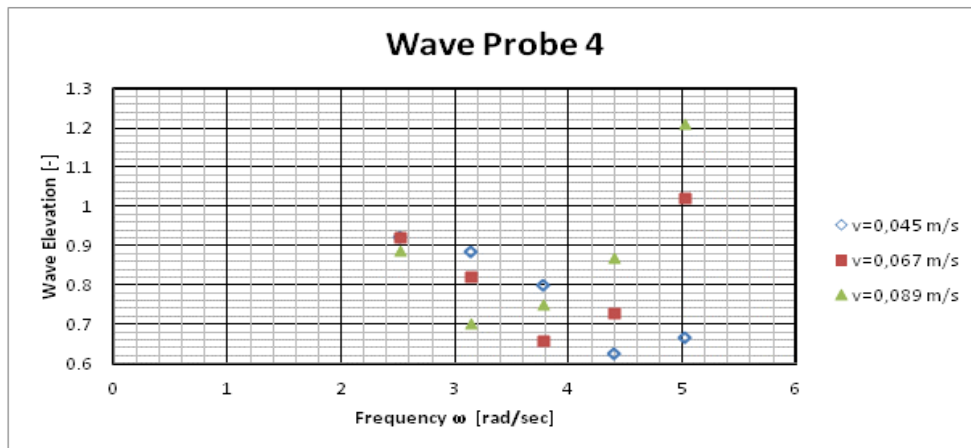
Διάγραμμα 4.3.4.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



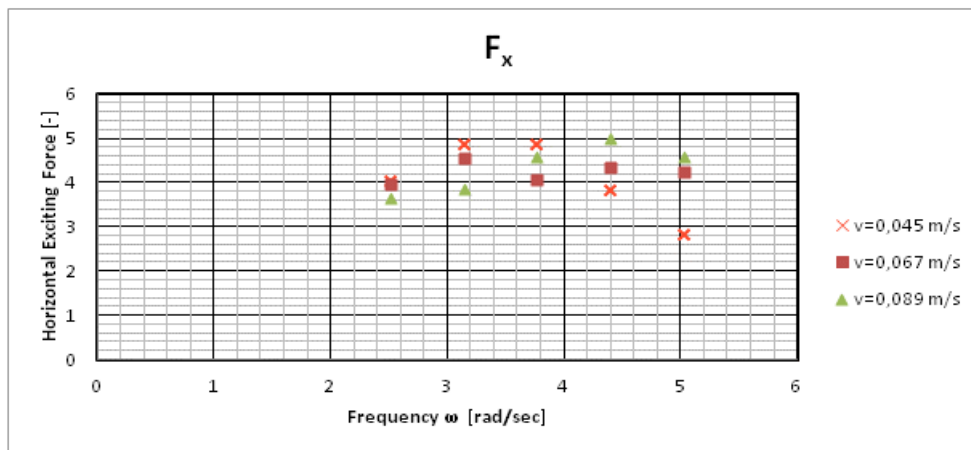
Διάγραμμα 4.3.4.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



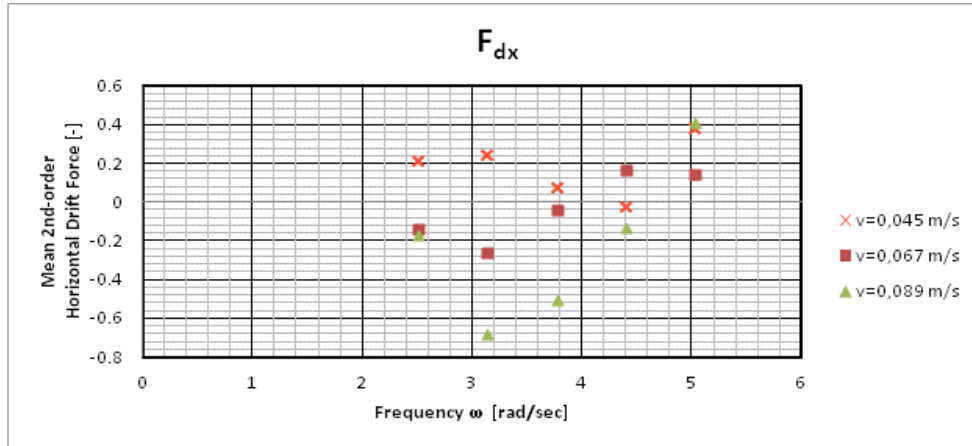
Διάγραμμα 4.3.4.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



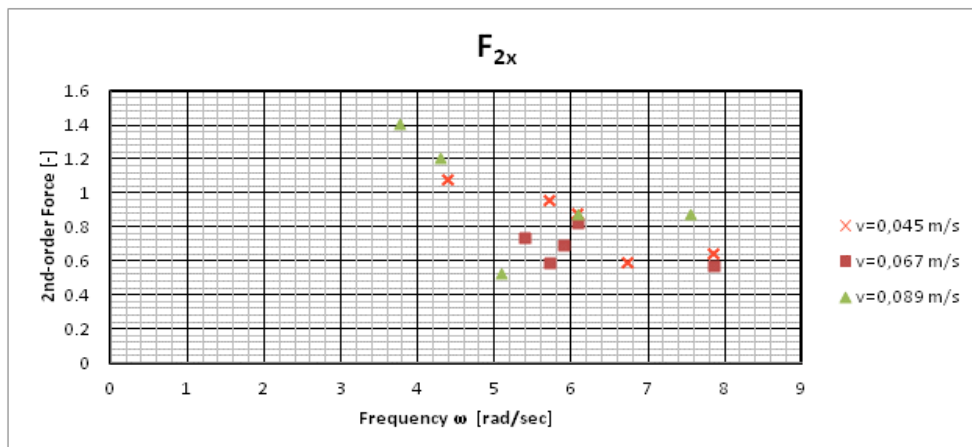
Διάγραμμα 4.3.4.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.4.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

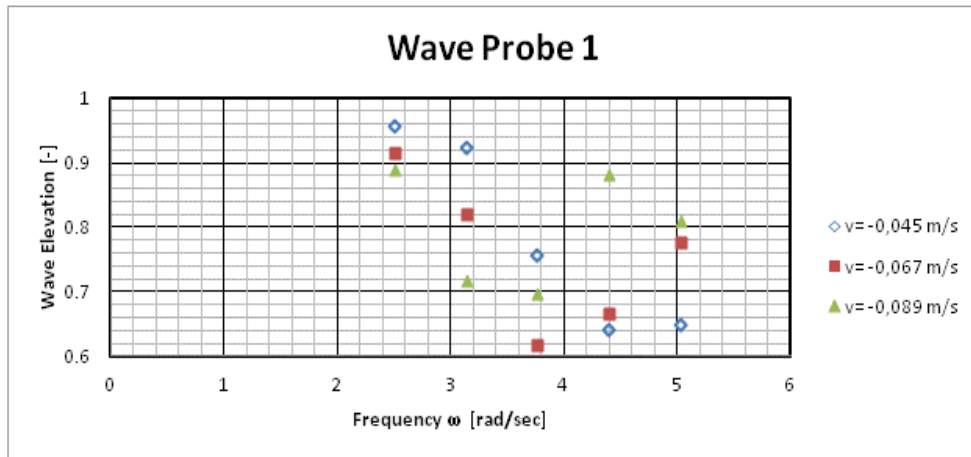


Διάγραμμα 4.3.4.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

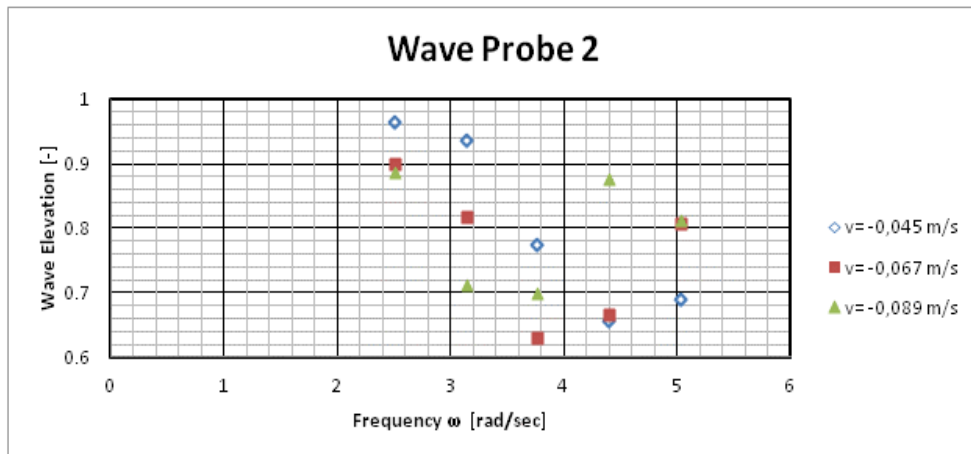


Διάγραμμα 4.3.4.7: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

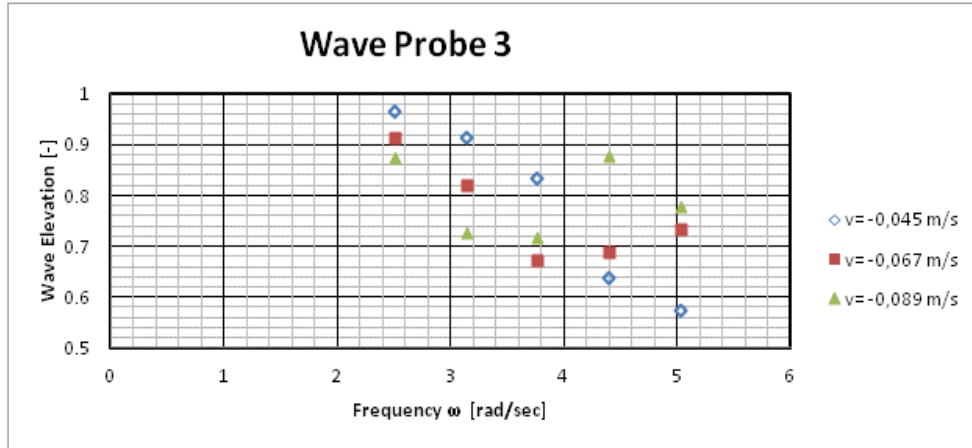
ΠΙΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



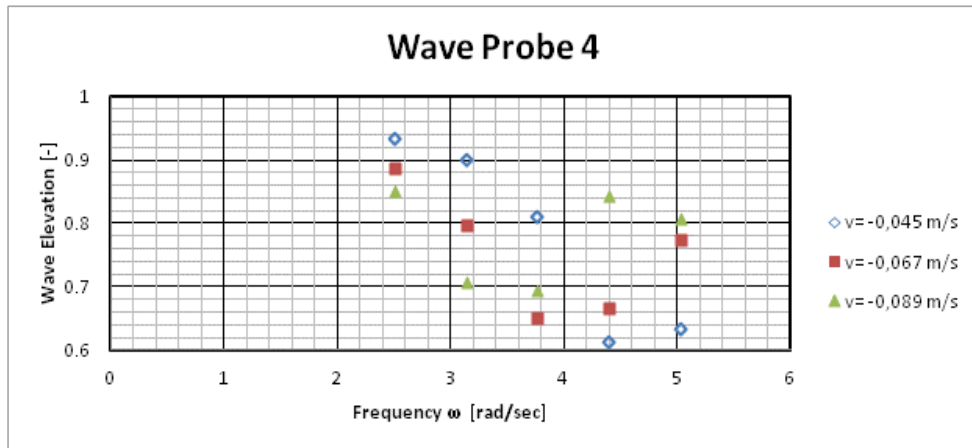
Διάγραμμα 4.3.4.8: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



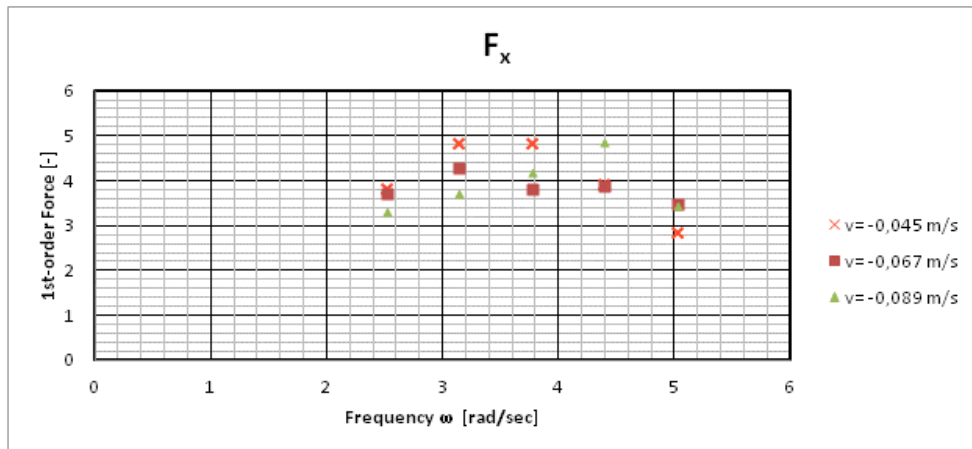
Διάγραμμα 4.3.4.9: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



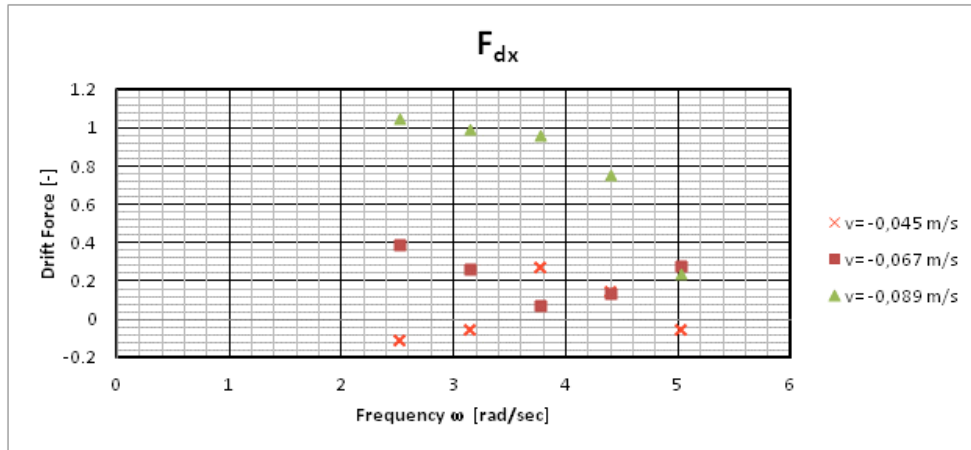
Διάγραμμα 4.3.4.10: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



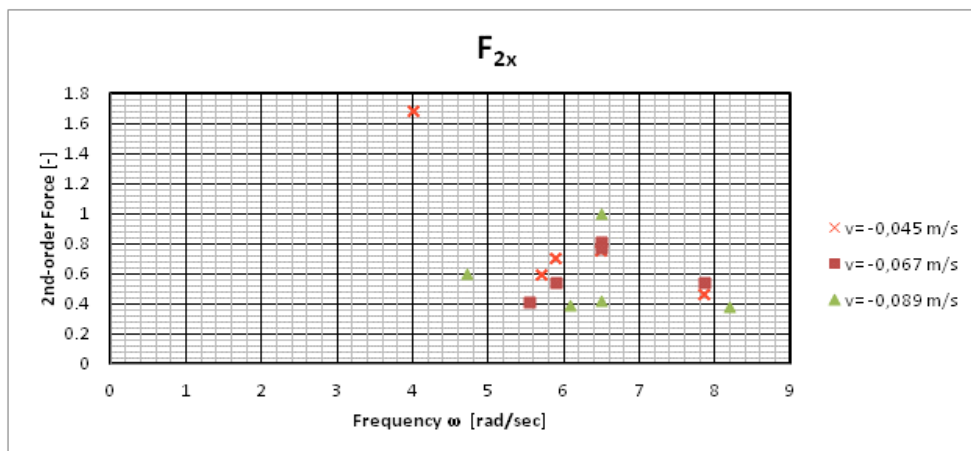
Διάγραμμα 4.3.4.11: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.4.12: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



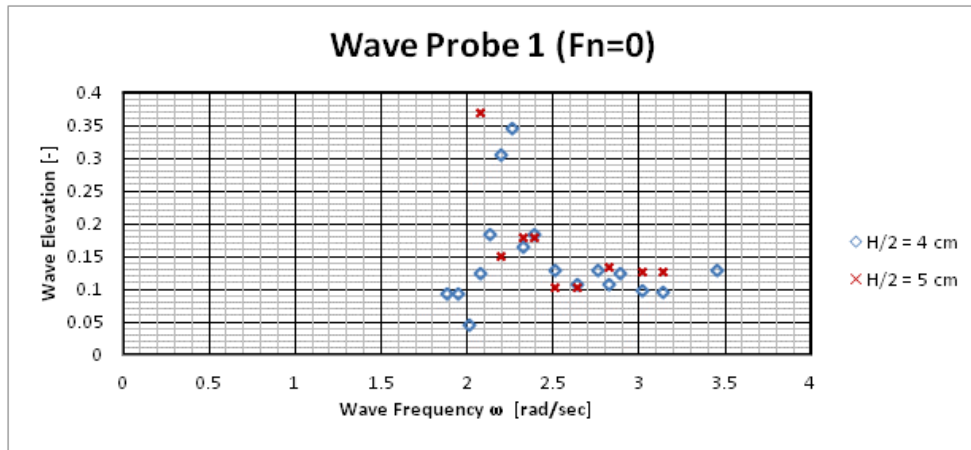
Διάγραμμα 4.3.4.13: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



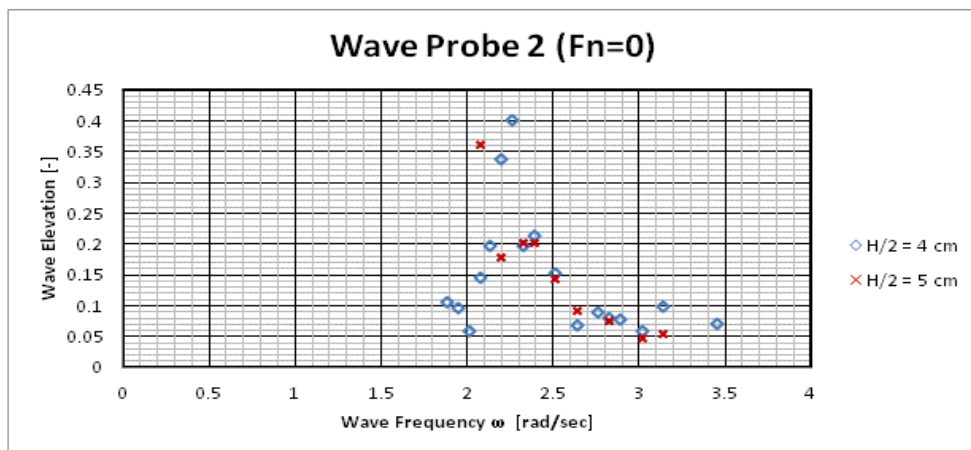
Διάγραμμα 4.3.4.14: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.

4.3.5 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

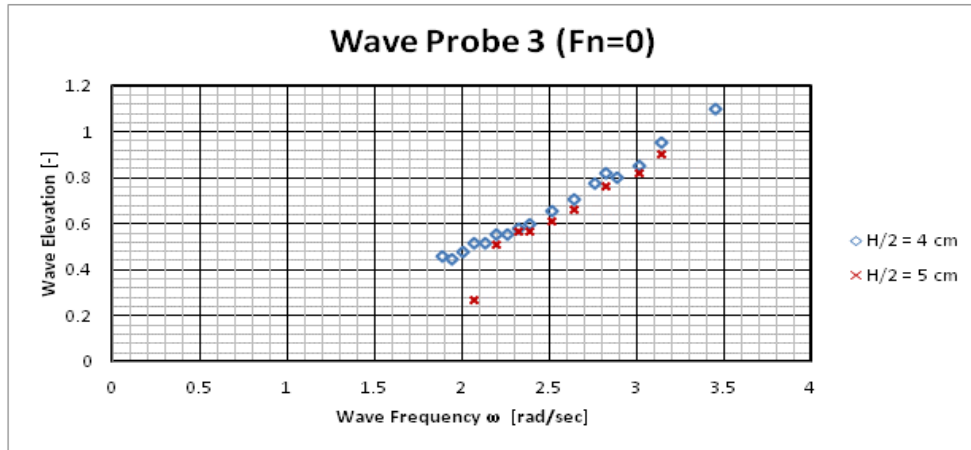
Πειράματα 112 έως 137



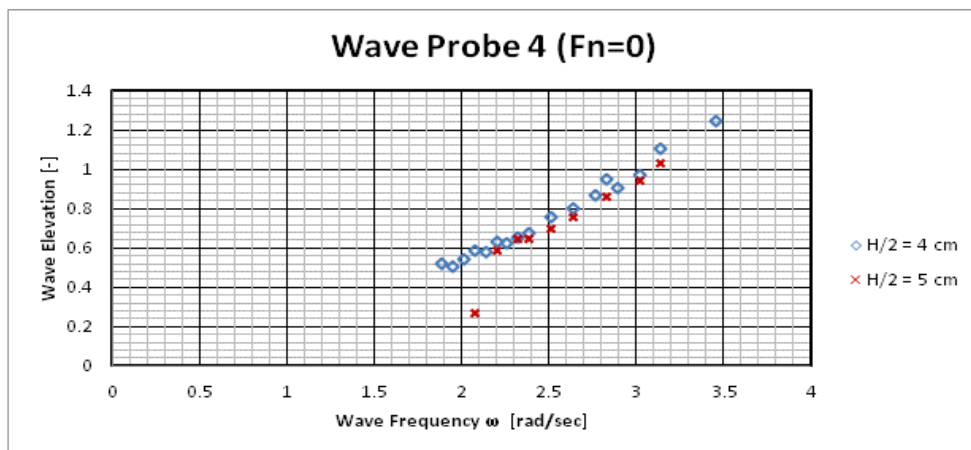
Διάγραμμα 4.3.5.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορα πλάτη κύματος.



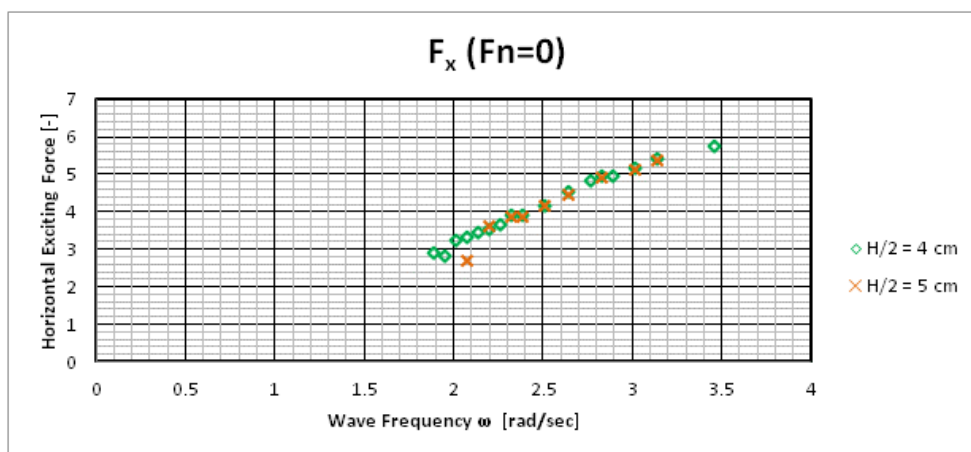
Διάγραμμα 4.3.5.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορα πλάτη κύματος.



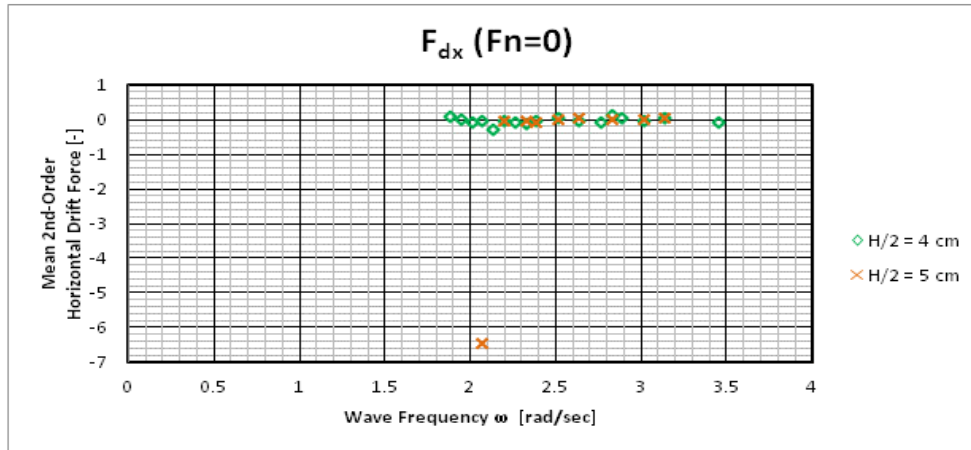
Διάγραμμα 4.3.5.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορα πλάτη κύματος.



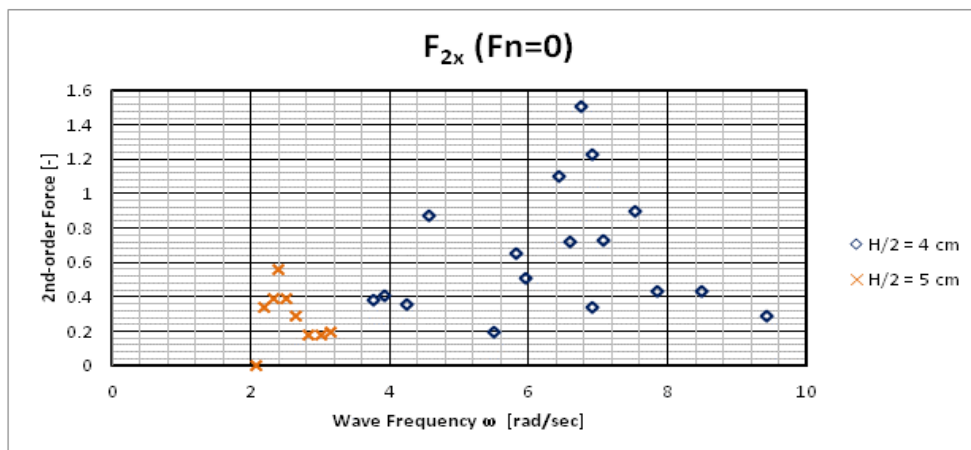
Διάγραμμα 4.3.5.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορα πλάτη κύματος.



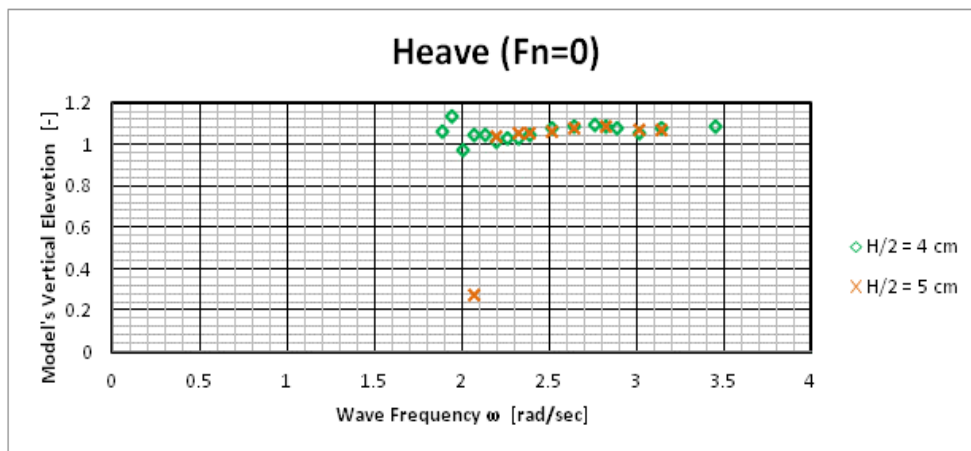
Διάγραμμα 4.3.5.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.5.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



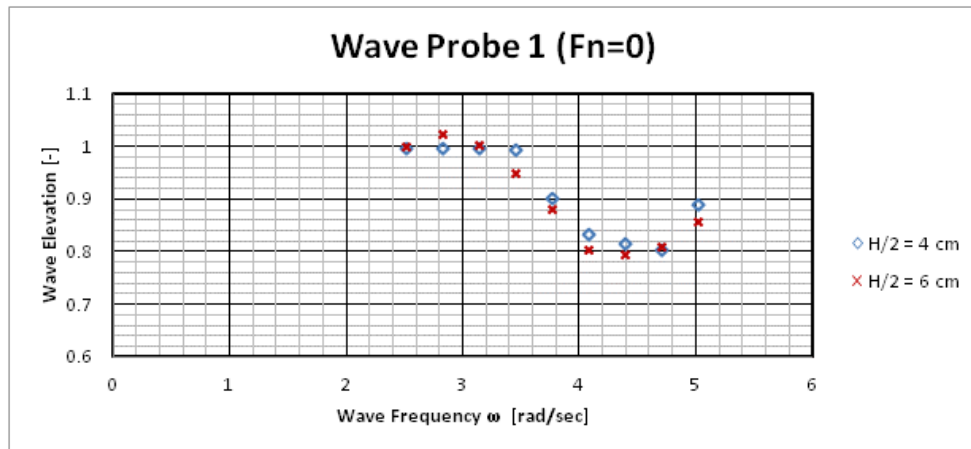
Διάγραμμα 4.3.5.7: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



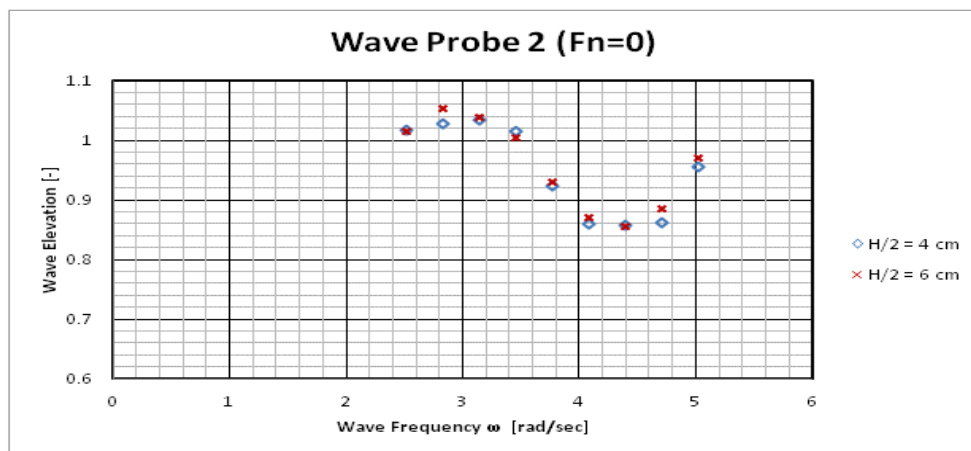
Διάγραμμα 4.3.5.8: Η κατακόρυφη ανύψωση της κατασκευής συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

4.3.6 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

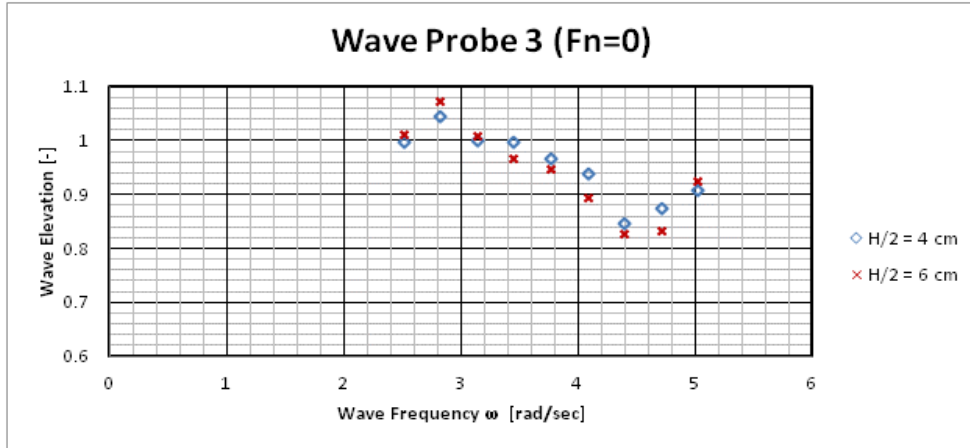
Πειράματα 138 έως 155



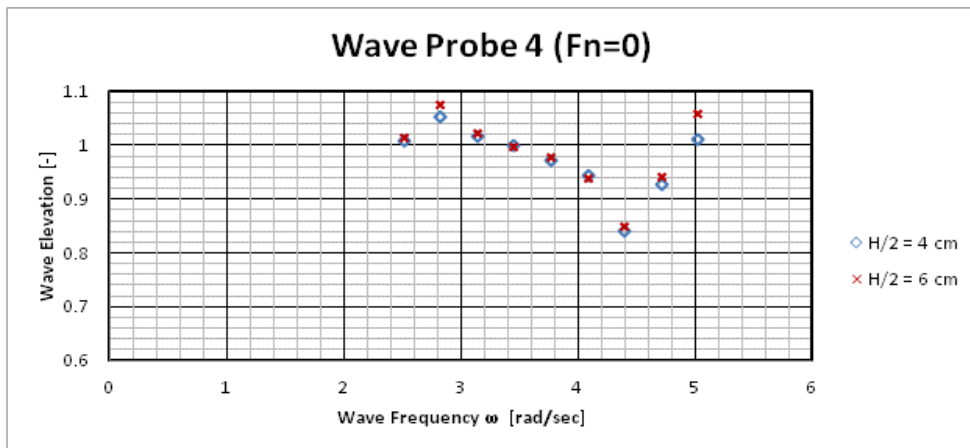
Διάγραμμα 4.3.6.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσκει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορα πλάτη κύματος.



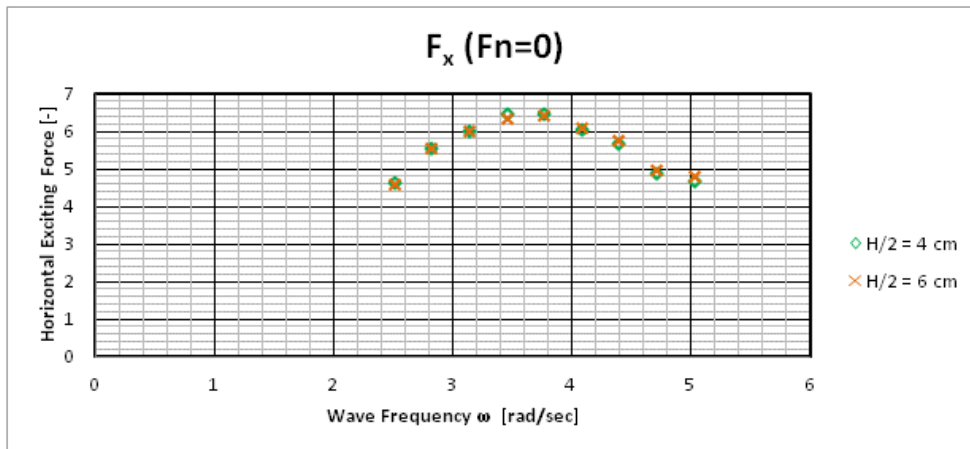
Διάγραμμα 4.3.6.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσκει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορα πλάτη κύματος.



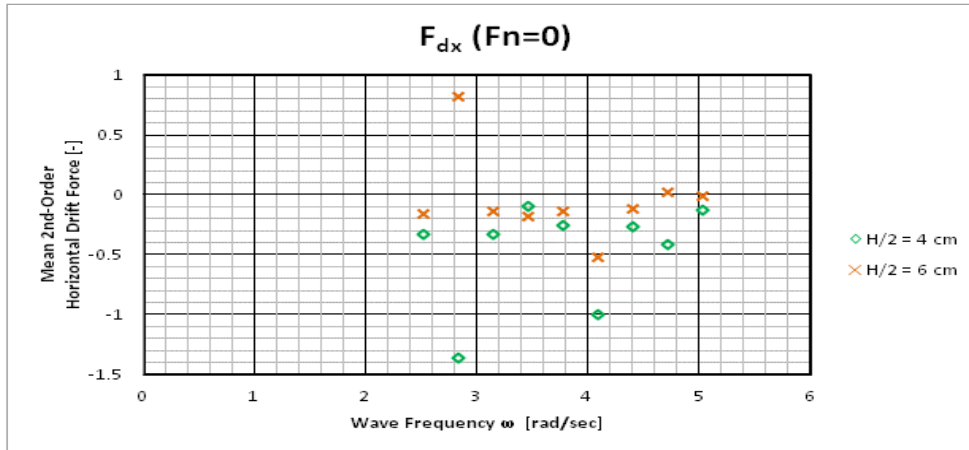
Διάγραμμα 4.3.6.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορα πλάτη κύματος.



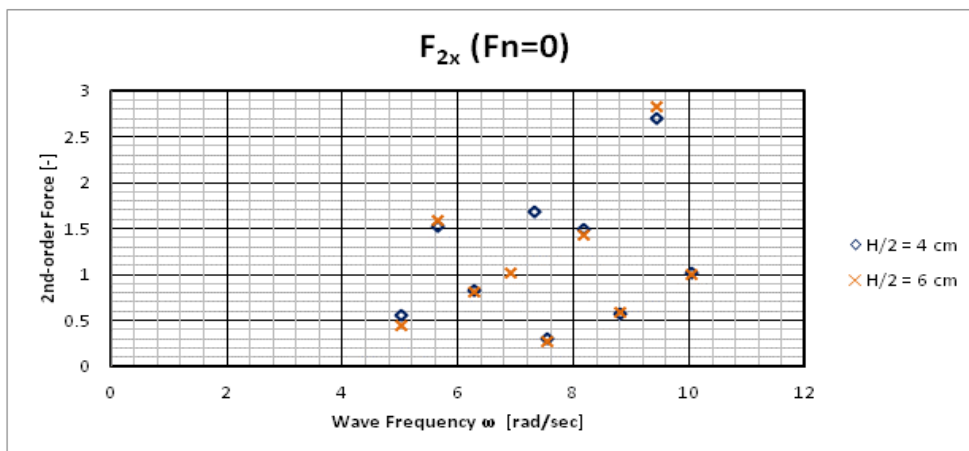
Διάγραμμα 4.3.6.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορα πλάτη κύματος.



Διάγραμμα 4.3.6.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.6.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

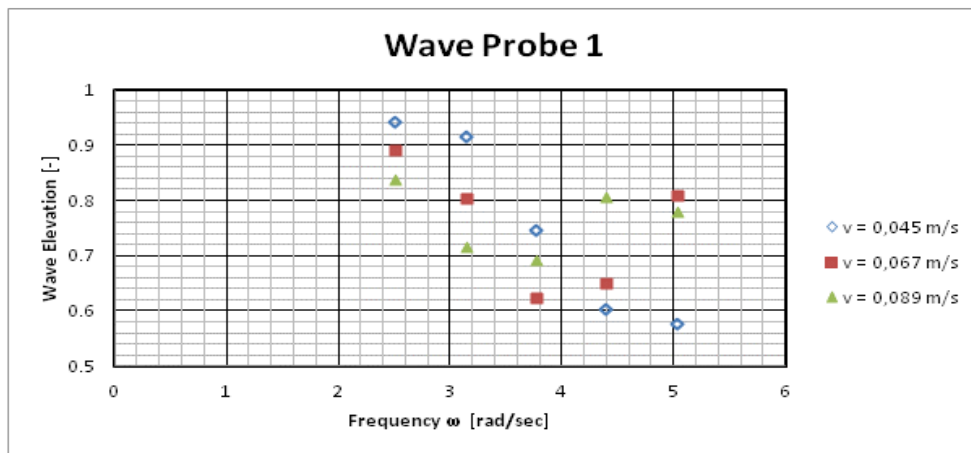


Διάγραμμα 4.3.6.7: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

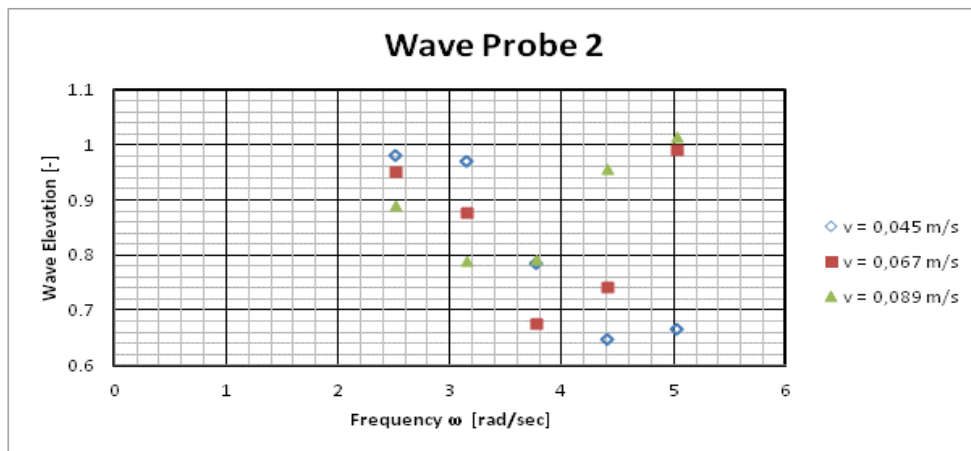
4.3.7 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή κινούμενη

Πειράματα 156-185

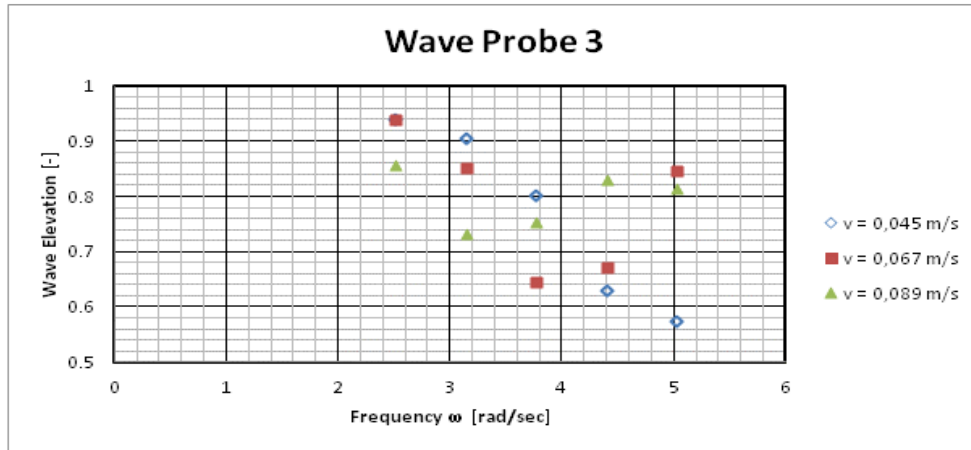
ΠΡΟΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



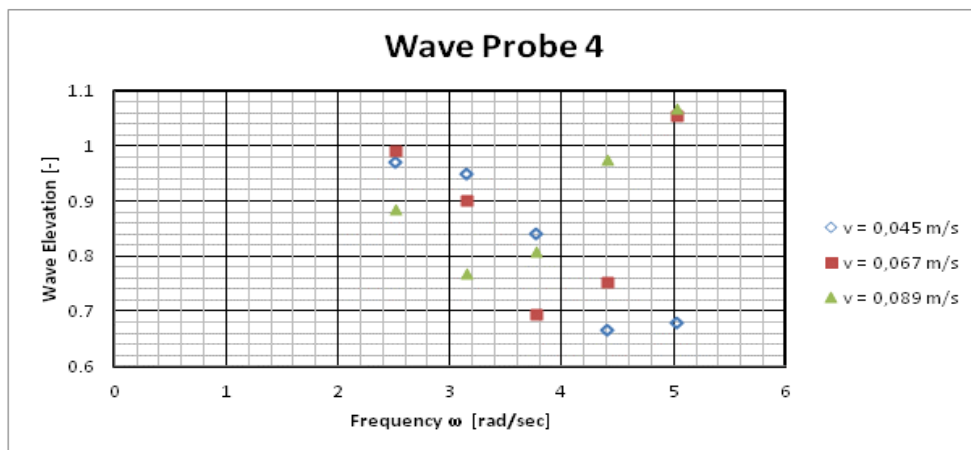
Διάγραμμα 4.3.7.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



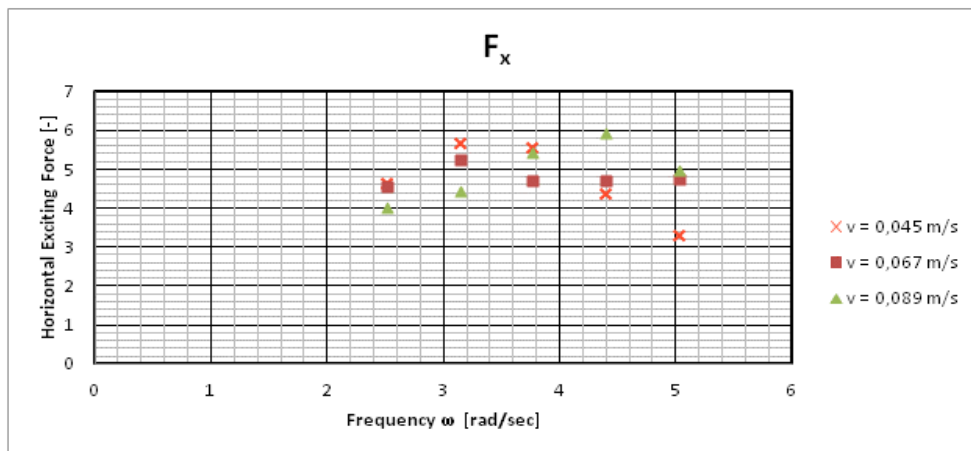
Διάγραμμα 4.3.7.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



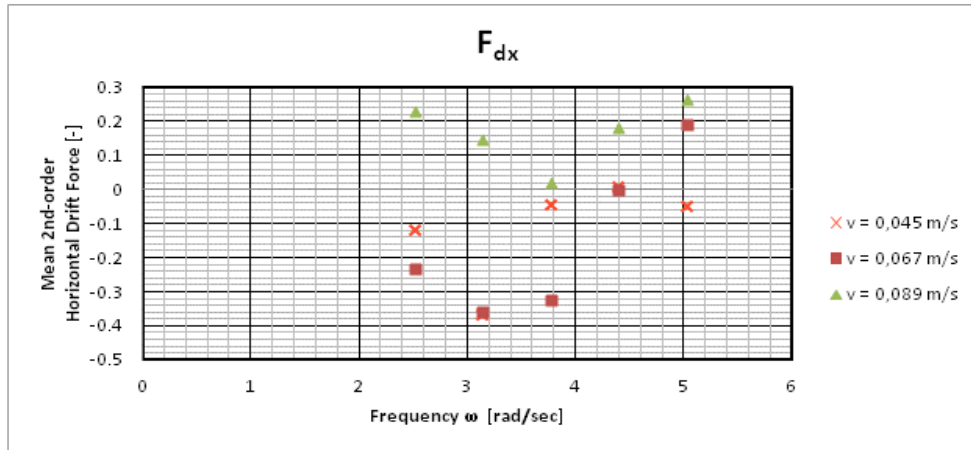
Διάγραμμα 4.3.7.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



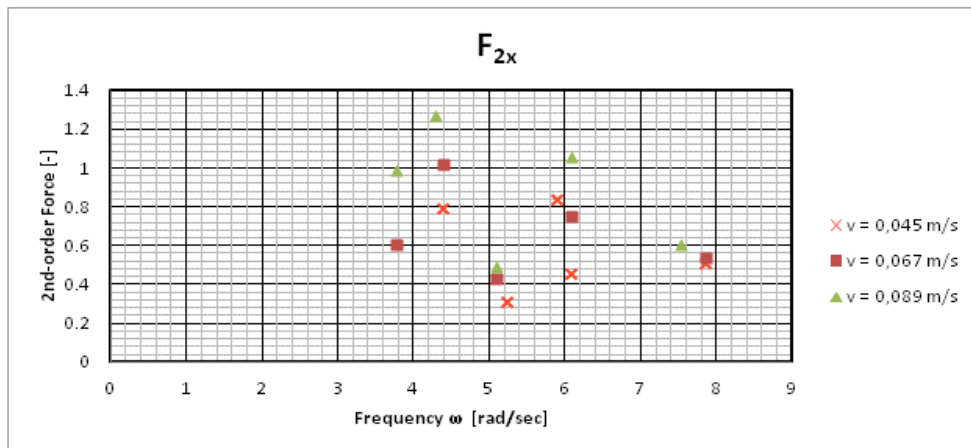
Διάγραμμα 4.3.7.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορες πρόσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.7.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

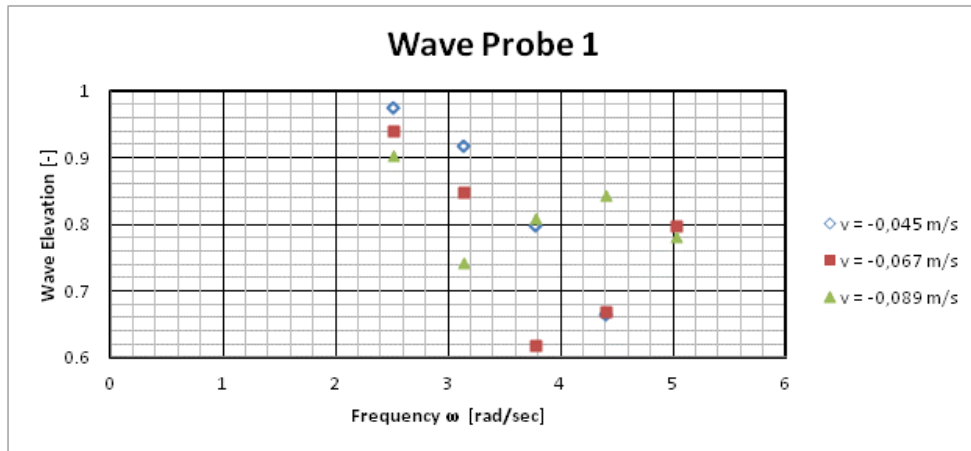


Διάγραμμα 4.3.7.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

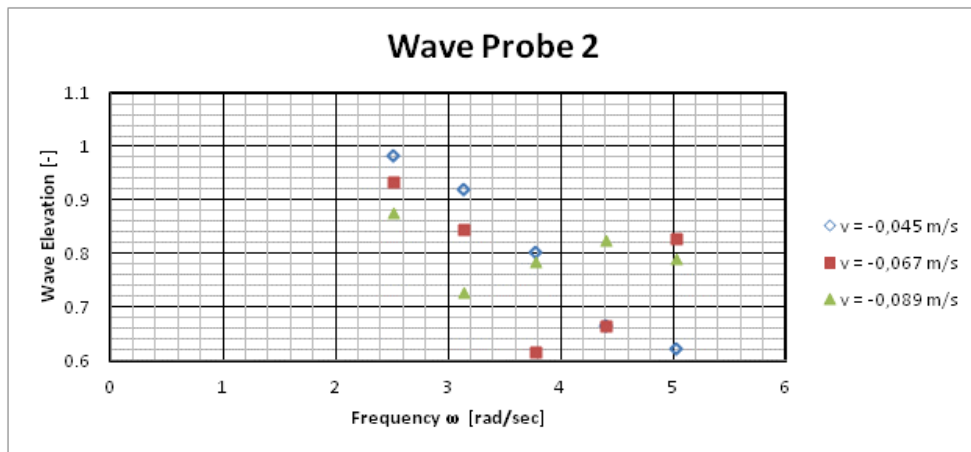


Διάγραμμα 4.3.7.7: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πρόσω ταχύτητες.

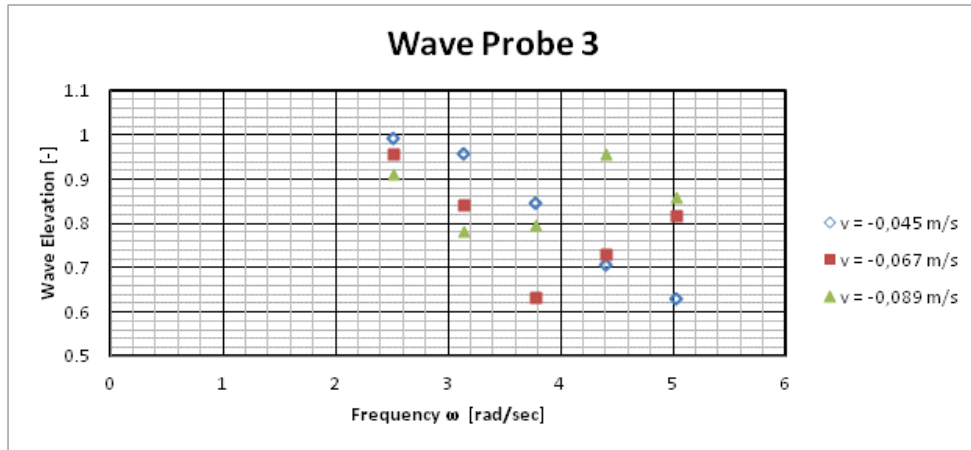
ΠΙΣΩ ΤΑΧΥΤΗΤΑ



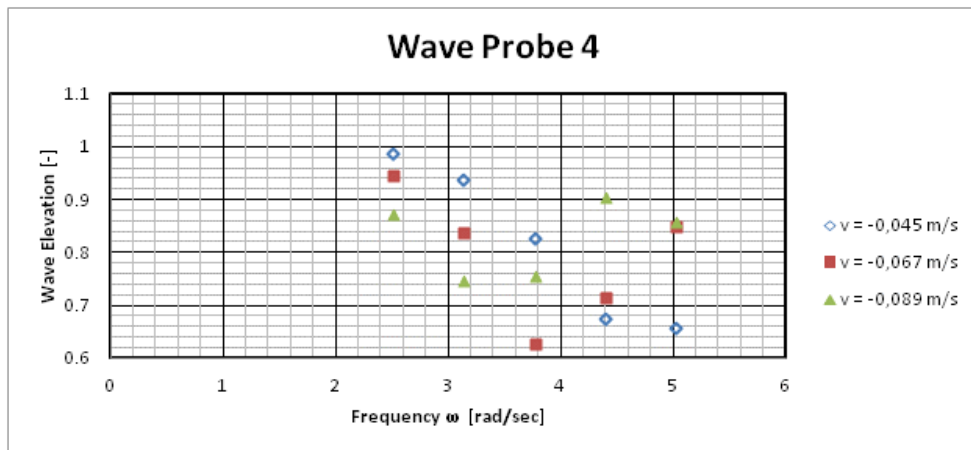
Διάγραμμα 4.3.7.8: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



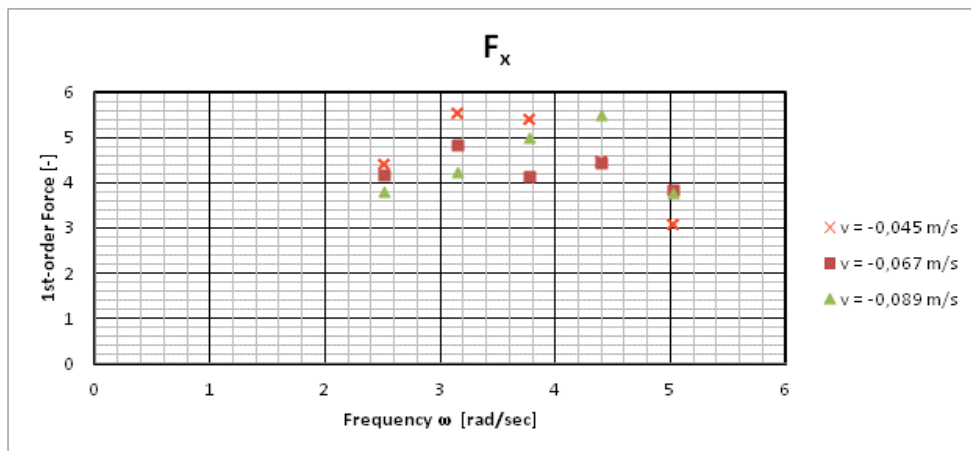
Διάγραμμα 4.3.7.9: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



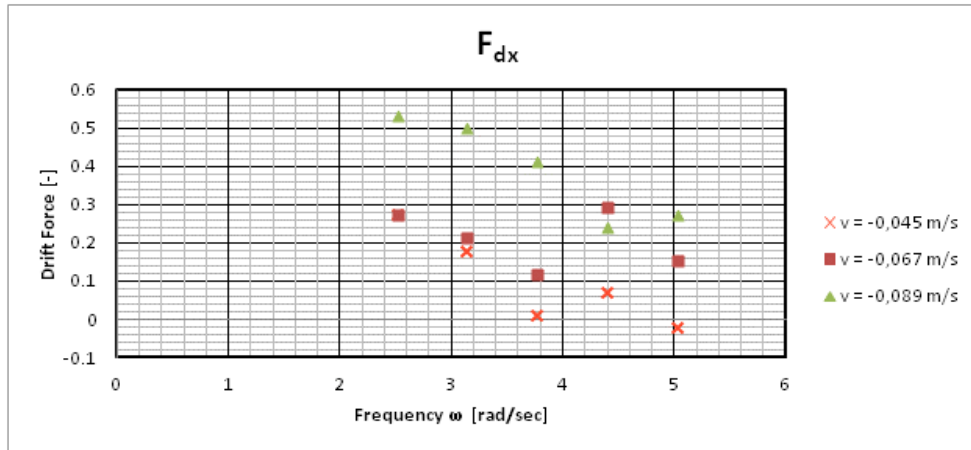
Διάγραμμα 4.3.7.10: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



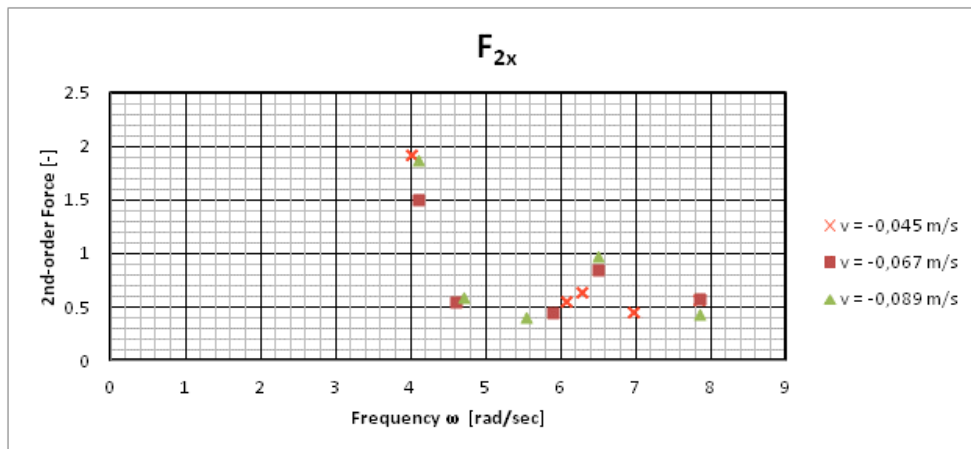
Διάγραμμα 4.3.7.11: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορες πίσω ταχύτητες.



Διάγραμμα 4.3.7.12: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



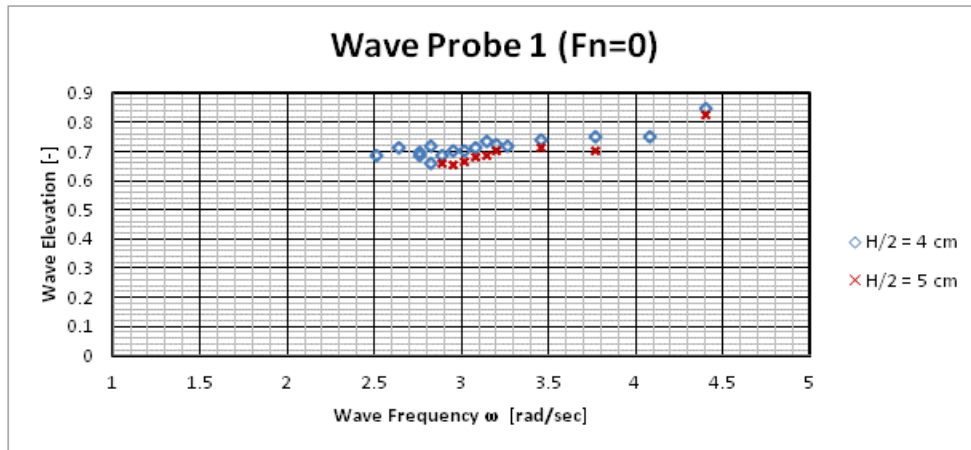
Διάγραμμα 4.3.7.13: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.



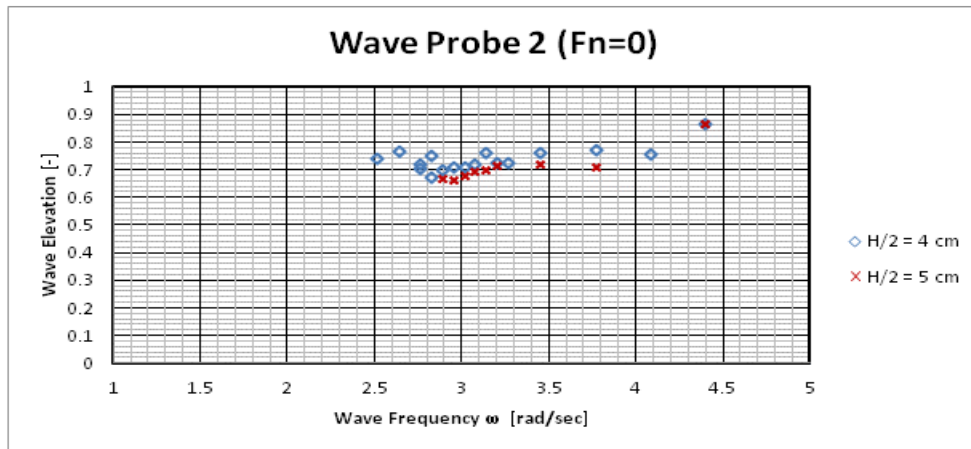
Διάγραμμα 4.3.7.14: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορες πίσω ταχύτητες.

4.3.8 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

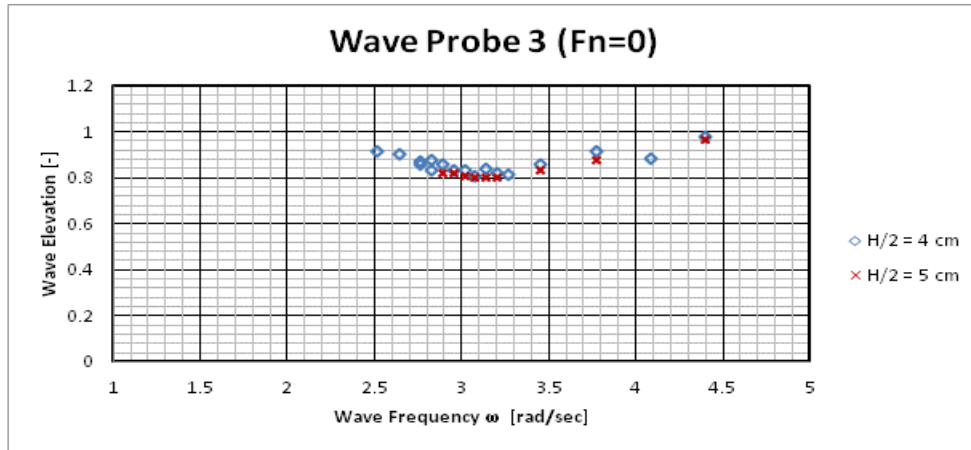
Πειράματα 192-217



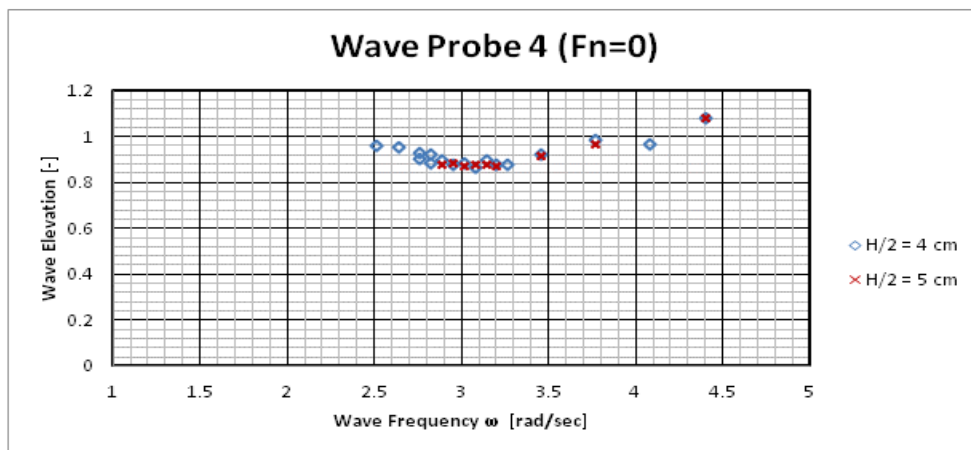
Διάγραμμα 4.3.8.1: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 1 για διάφορα πλάτη κύματος.



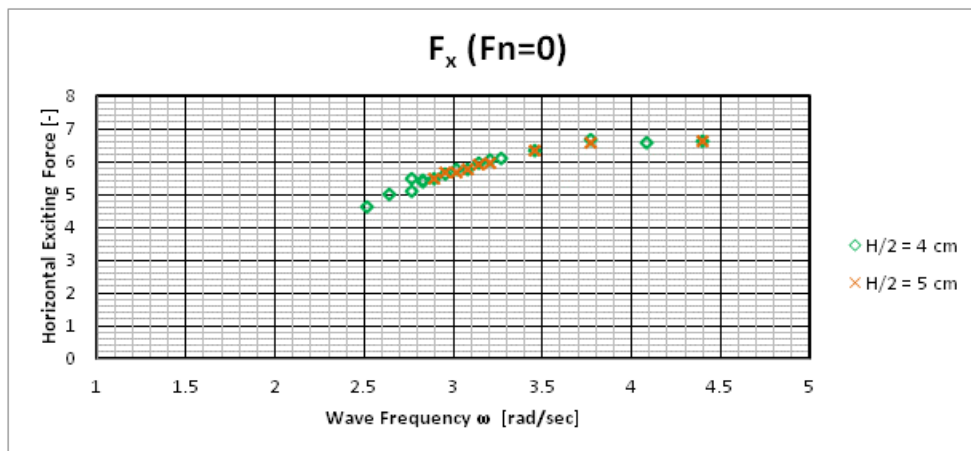
Διάγραμμα 4.3.8.2: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 2 για διάφορα πλάτη κύματος.



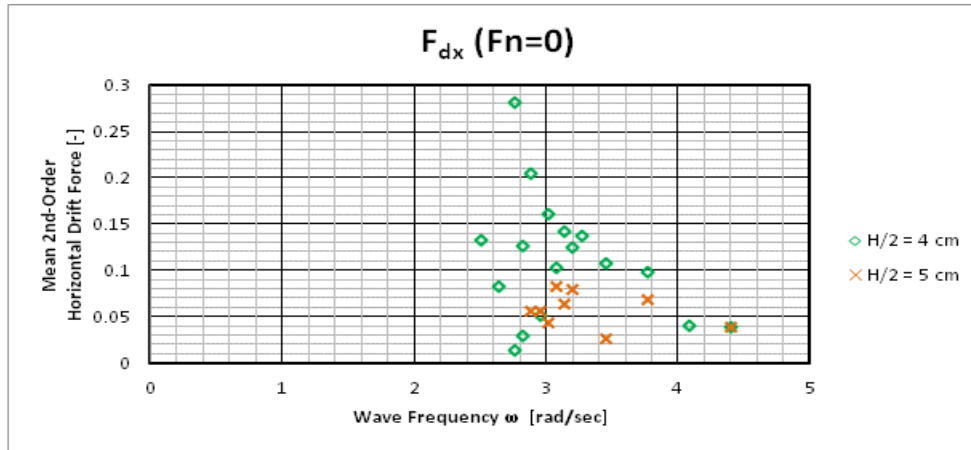
Διάγραμμα 4.3.8.3: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 3 για διάφορα πλάτη κύματος.



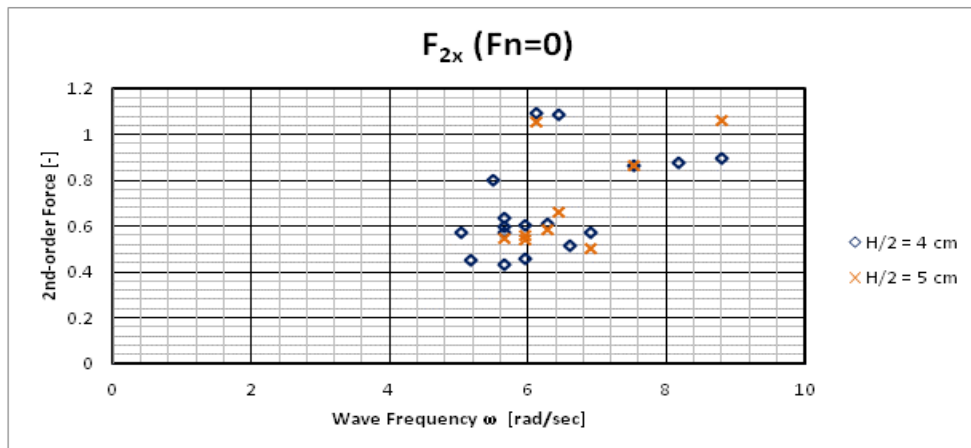
Διάγραμμα 4.3.8.4: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε στον αισθητήρα κύματος 4 για διάφορα πλάτη κύματος.



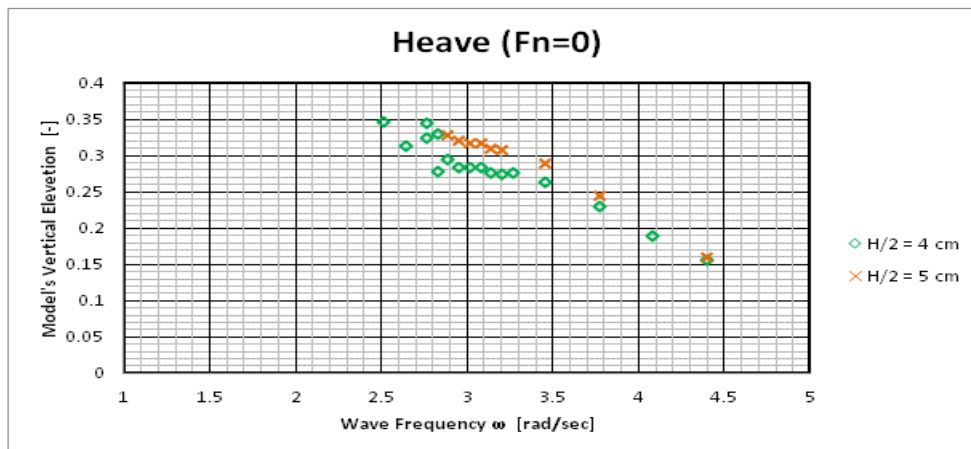
Διάγραμμα 4.3.8.5: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.8.6: Η 2^{ης} τάξης μέση δύναμη έκπτωσης συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.8.7: Η δευτεροτάξια δύναμη συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .



Διάγραμμα 4.3.8.8: Η κατακόρυφη ανύψωση της κατασκευής συναρτήσει της συχνότητας σε rad/sec, όπως μετρήθηκε για διάφορα πλάτη κύματος .

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για τον υπολογισμό των φορτίων και δυνάμεων που ασκούνται σε πλωτές κατασκευές υπό την επίδραση κυματισμών, πέρα από τις πειραματικές μετρήσεις σε πρότυπα μοντέλα, γίνεται και χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων προσομοίωσης.

Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το HAMVAB (Hydrodynamic Analysis of Multiple Vertical Axisymmetric Bodies), που έχει γραφεί από τον Σ. Α. Μαυράκο, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. στον Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών. Το πρόγραμμα παρέχει τις πρώτης τάξης δυνάμεις διέγερσης λόγω κυματισμών και τις επαγόμενες κινήσεις σε πολλαπλά αλληλεπιδρώντα σώματα συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις λαμβάνονται υπόψη για την επίλυση των προβλημάτων περίθλασης και ακτινοβολίας. Τα σώματα στη διάταξη μπορούν να κινηθούν είτε ανεξάρτητα είτε όλα μαζί ως ένα σώμα. Στη διαδικασία επίλυσης μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν δυνάμεις επαναφοράς λόγω ελαστικών σχοινιών που είναι προσδεμένα στους κυλίνδρους. Οι δυνάμεις έκπτωσης, τόσο στη συνολική διάταξη που αποτελείται από πολλαπλά σώματα αλλά και σε κάθε σώμα ξεχωριστά, υπολογίζονται κάνοντας χρήση απειροστών όγκων ελέγχου γύρω από κάθε μέρος της διάταξης.

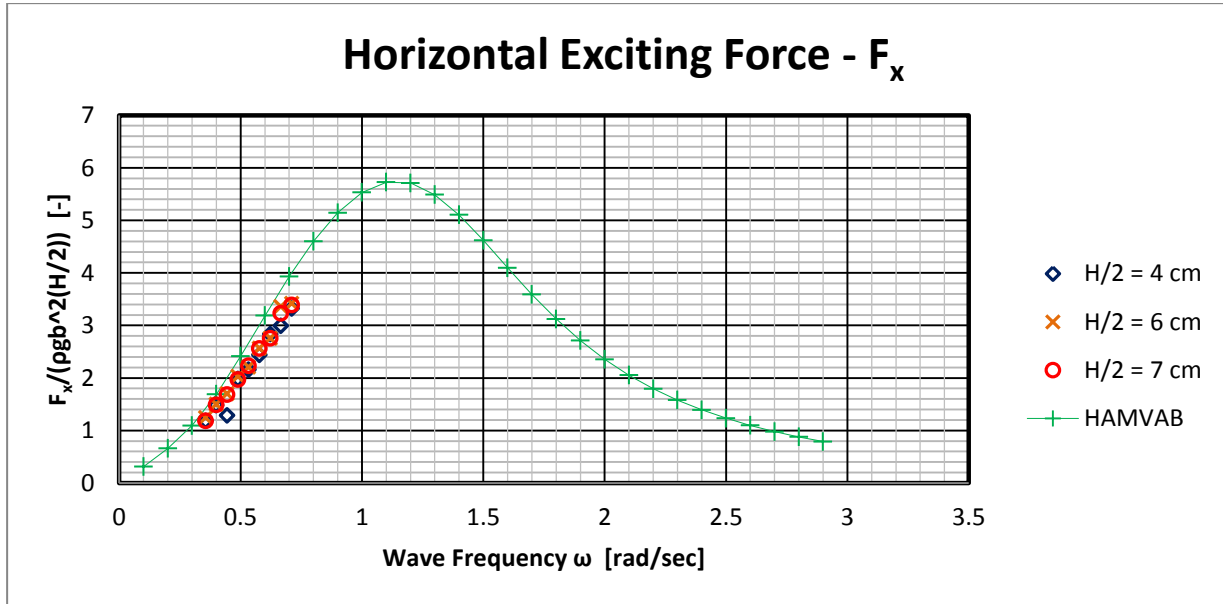
Τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων υπολογίζονται συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά κάθε σώματος ξεχωριστά δια μέσου μιας της θεώρησης των πολλαπλών ανακλάσεων (multiple-scattering physical procedure). Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κάθε σώματος εκτιμώνται με χρήση γενικευμένων συμμετρικών ιδιοσυναρτήσεων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το πεδίο ροής γύρω από το σώμα χωρίζεται σε περιοχές με σχήμα δακτυλίων, σε κάθε μία από τις οποίες το δυναμικό ταχύτητας γράφεται σύμφωνα με τις συμμετρικές γενικευμένες ιδιοσυναρτήσεις κατά Fourier. Οι άγνωστοι συντελεστές προσδιορίζονται από τις συνθήκες συνεχείας για το δυναμικό και για την ταχύτητα ροής αλλά και από τις οριακές συνθήκες έτσι, ώστε να ικανοποιούνται για την βρεχόμενη επιφάνεια του επιπλέοντος σώματος.

Εισάγοντας τα χαρακτηριστικά του πρότυπου μοντέλου στο πρόγραμμα, προέκυψαν τα θεωρητικά αποτελέσματα για την οριζόντια δύναμη διέγερσης και τη δύναμη έκπτωσης, καθώς και για την ανύψωση περί την κατακόρυφη διεύθυνση (heave) της κατασκευής. Τα αποτελέσματα εισήχθησαν σε διαγράμματα συναρτήσεως της συχνότητας κυματισμών εκφρασμένης σε r/s ώστε να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων (Κεφ. 4.3).

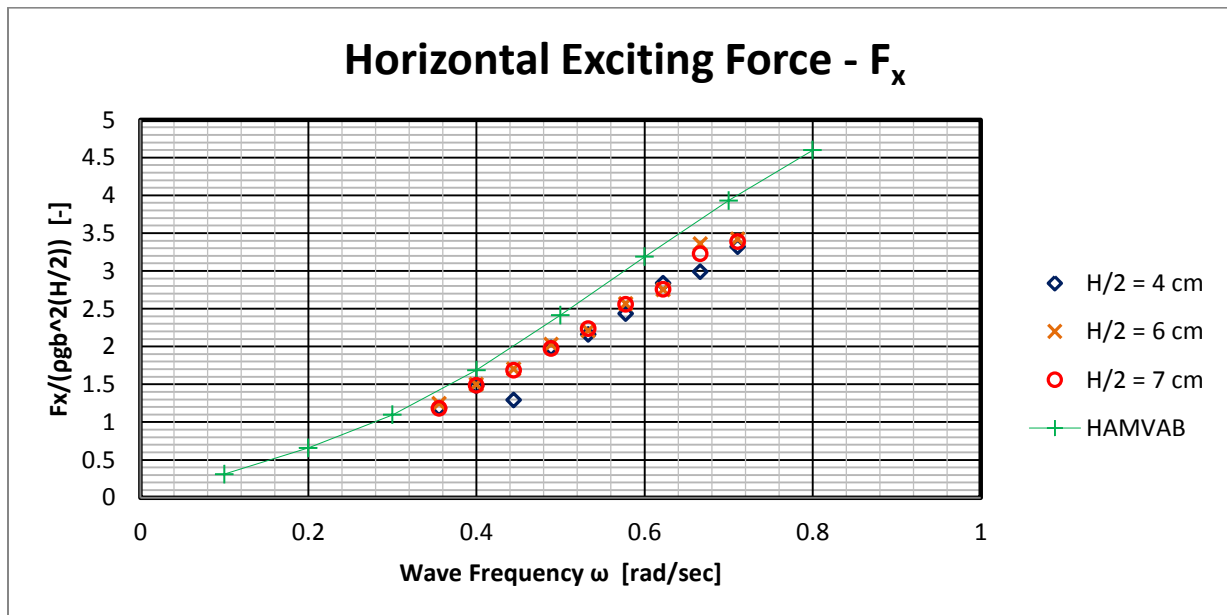
Τα συγκριτικά διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω.

4.4.1 Απλός κατακόρυφος κύλινδρος – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

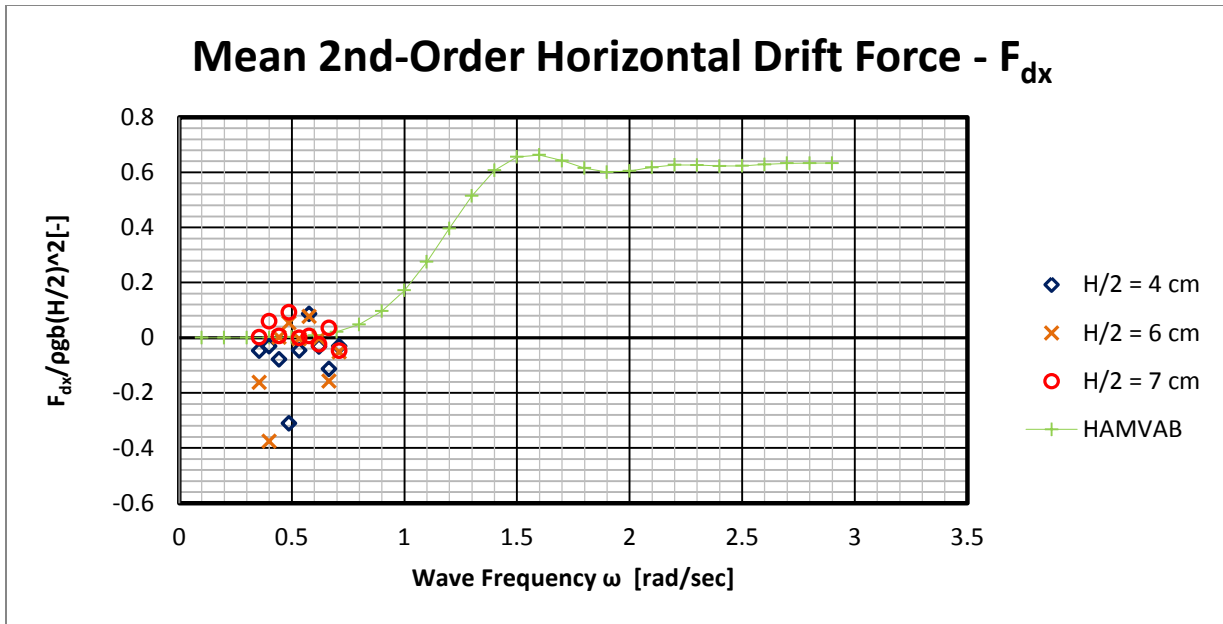
Πειράματα 1 έως 27



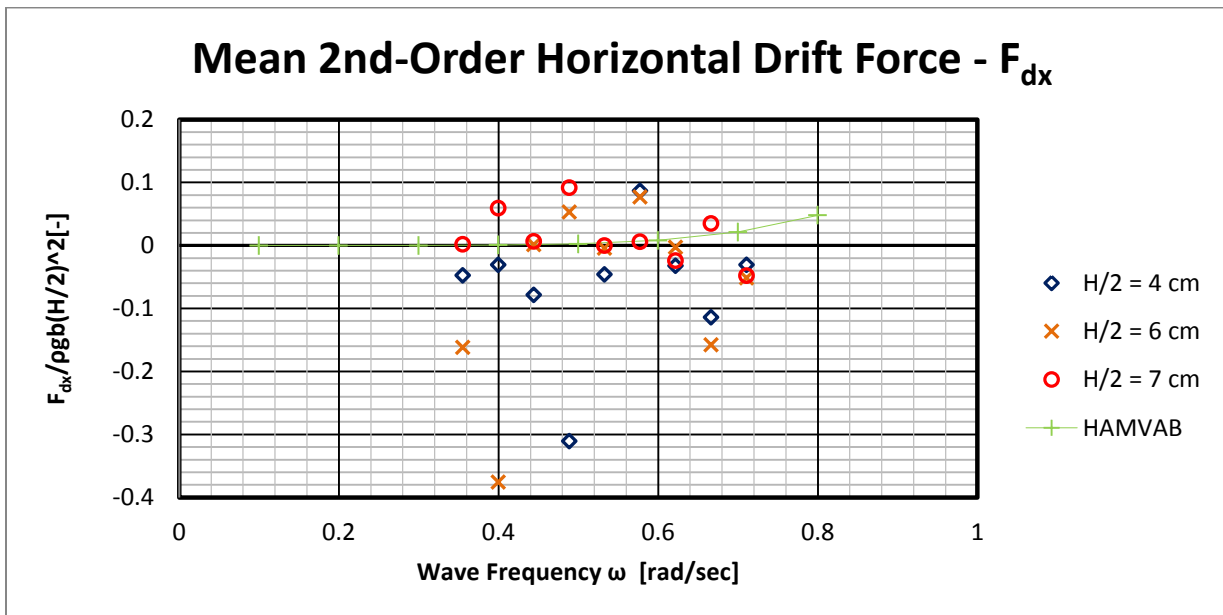
Διάγραμμα 4.4.1.1: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.



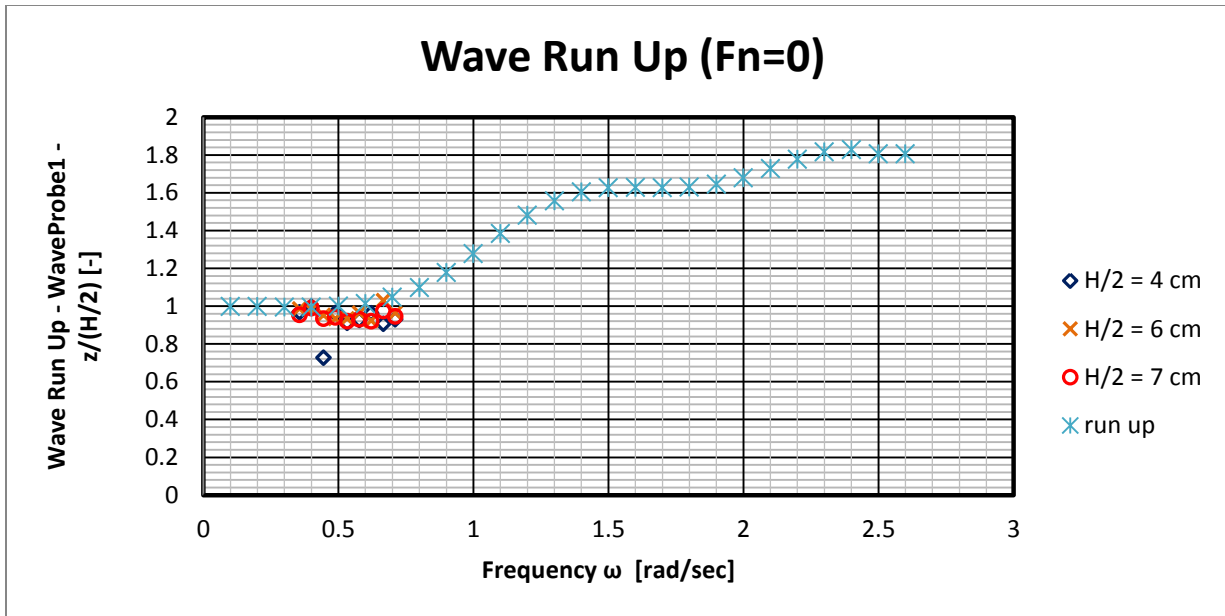
Διάγραμμα 4.4.1.2: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



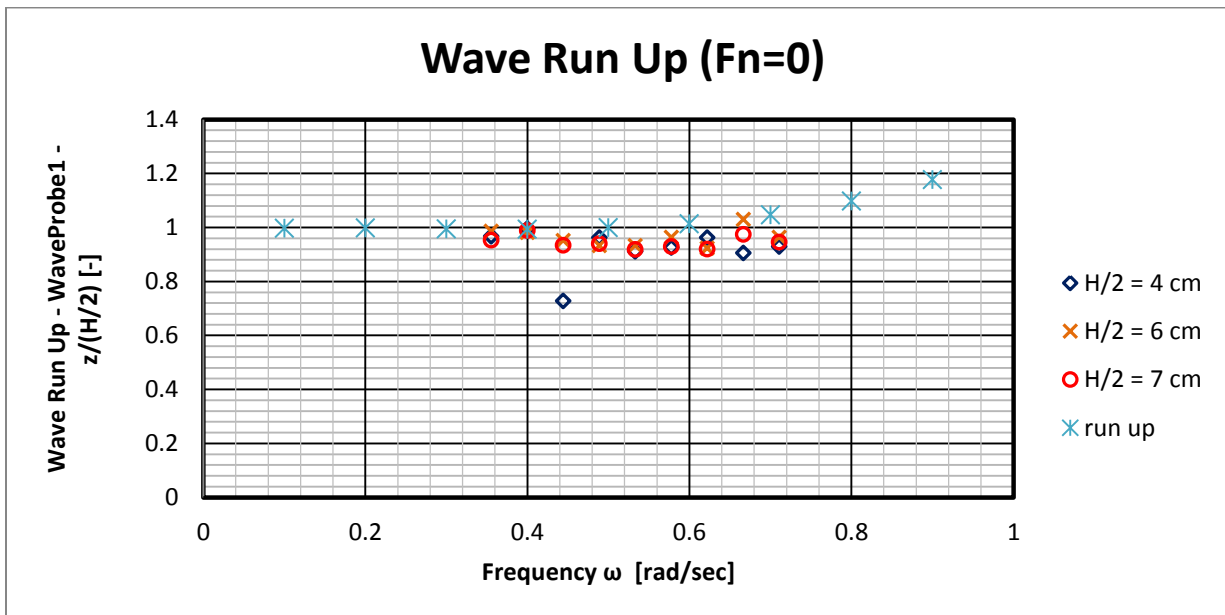
Διάγραμμα 4.4.1.3: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 4.4.1.4: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



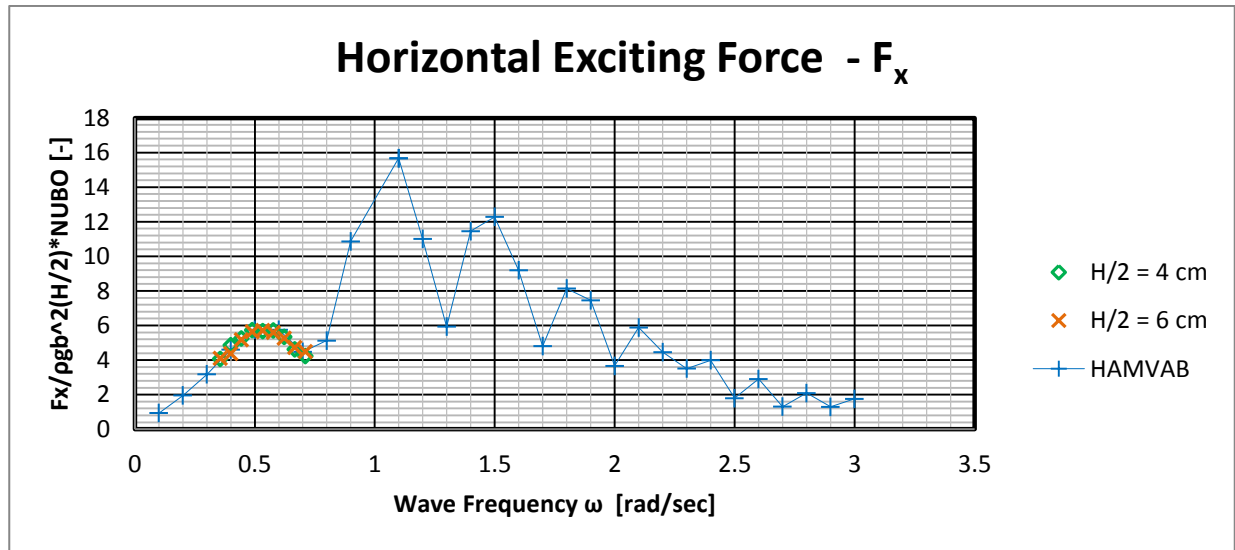
Διάγραμμα 4.4.1.5: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.



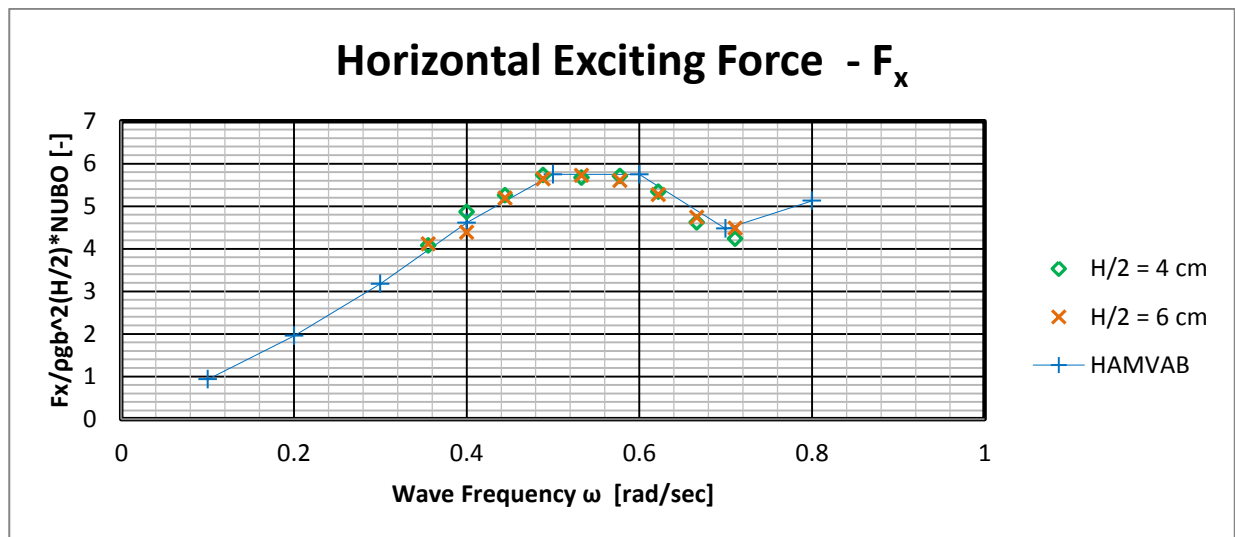
Διάγραμμα 4.4.1.6: Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)

4.4.2 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

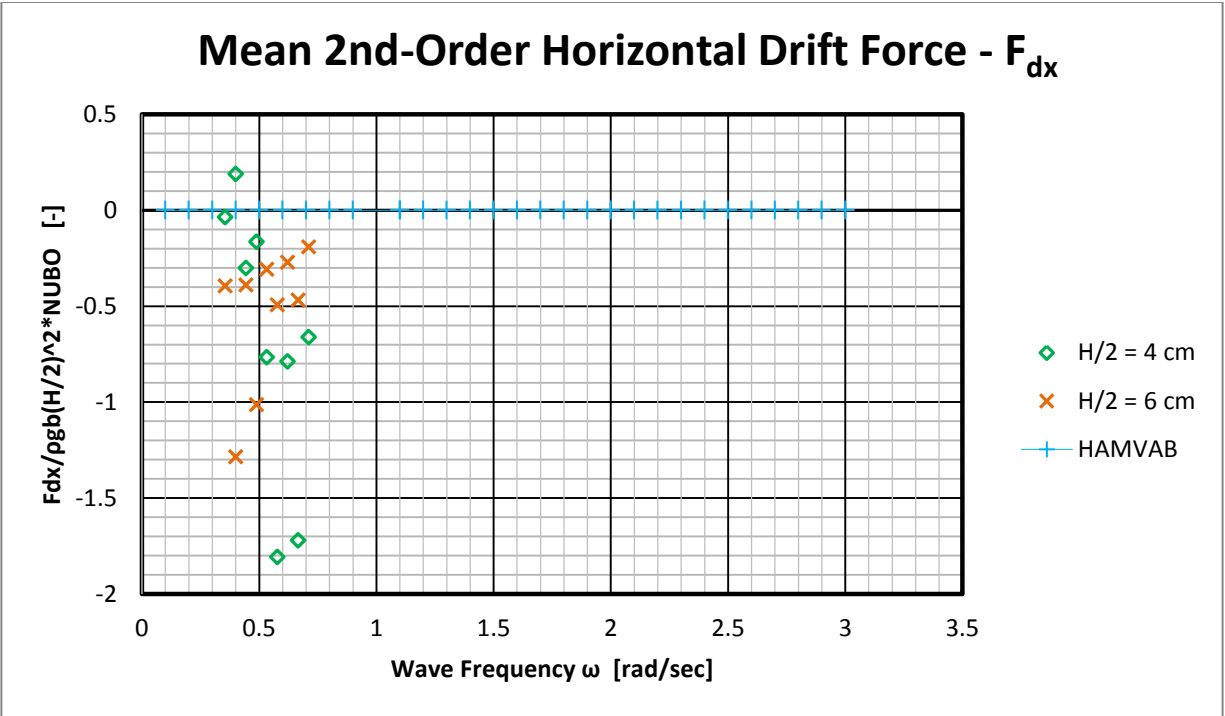
Πειράματα 58 έως 75



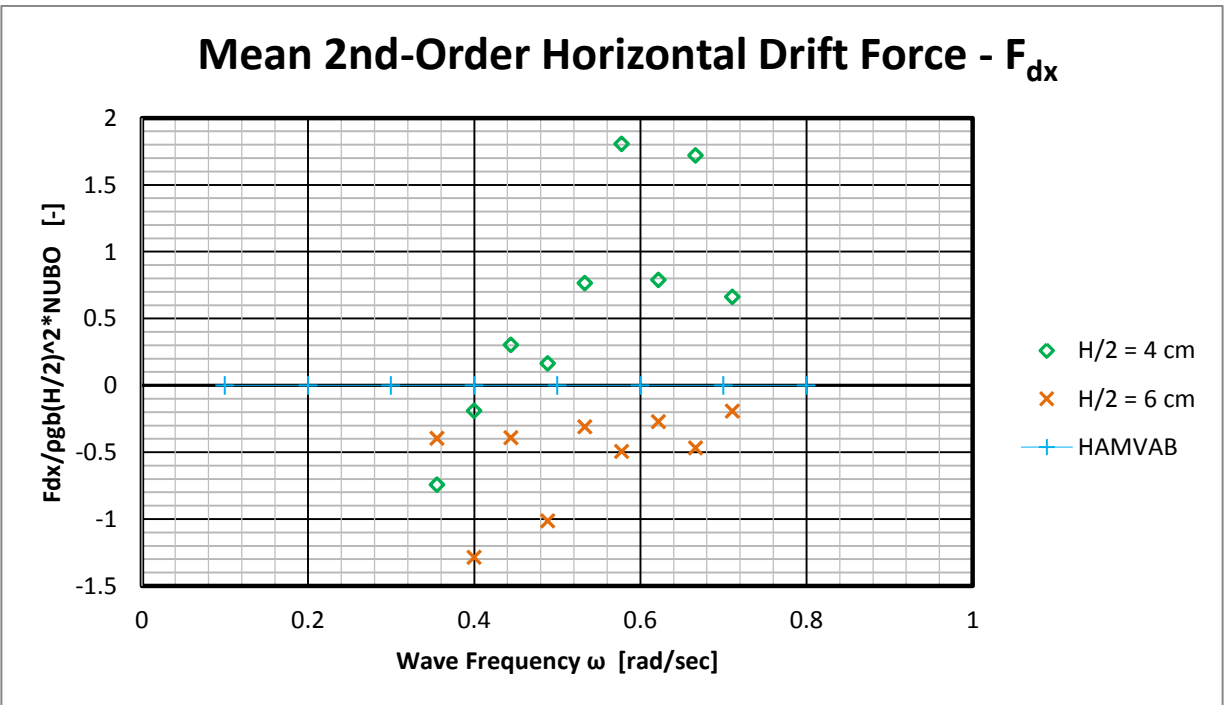
Διάγραμμα 4.4.2.1: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.



Διάγραμμα 4.4.2.2: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



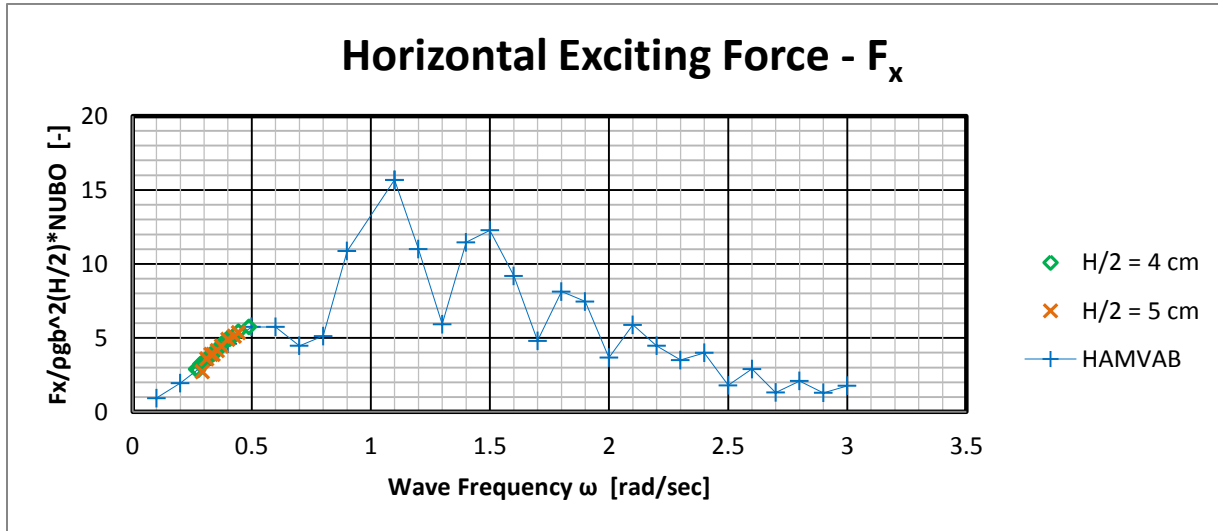
Διάγραμμα 4.4.2.3: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



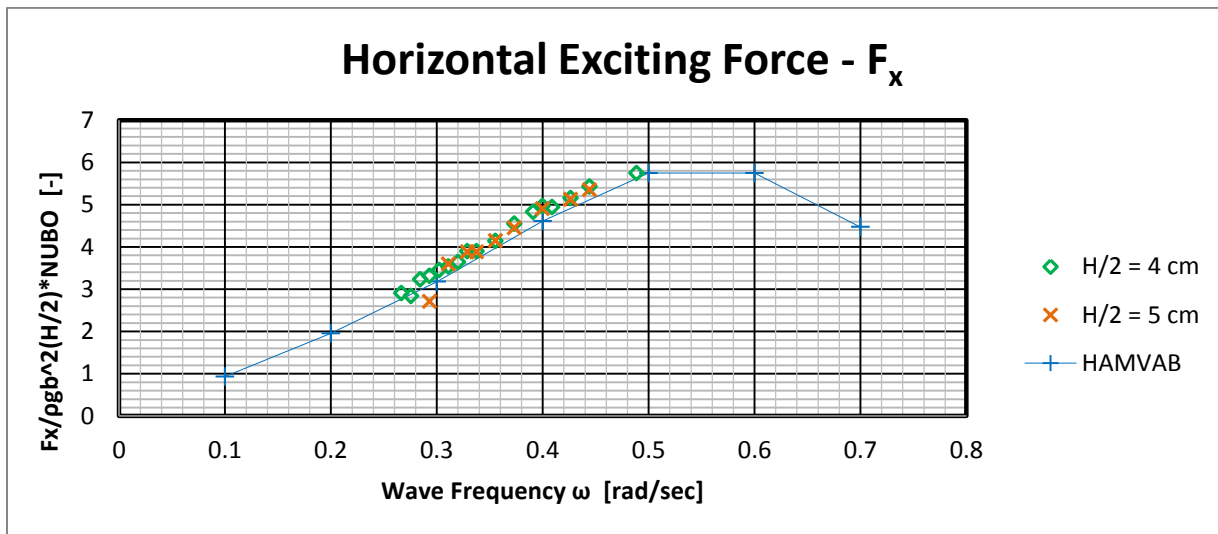
Διάγραμμα 4.4.2.4: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)

4.4.3 Τριγωνική συστοιχία κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

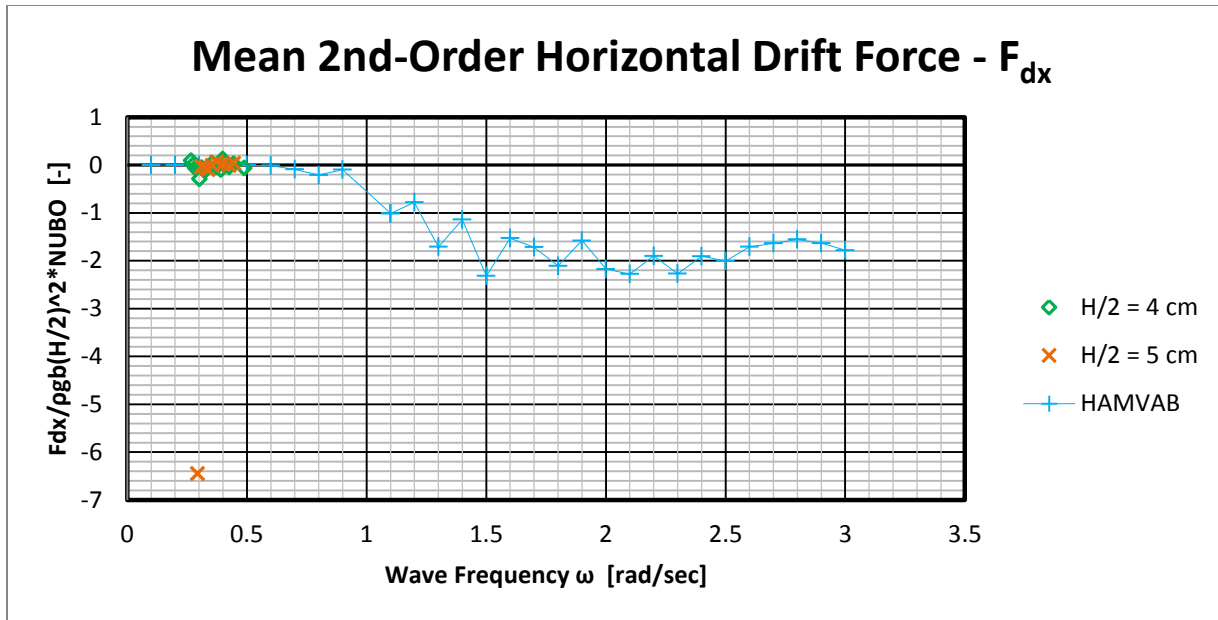
Πειράματα 112 έως 137



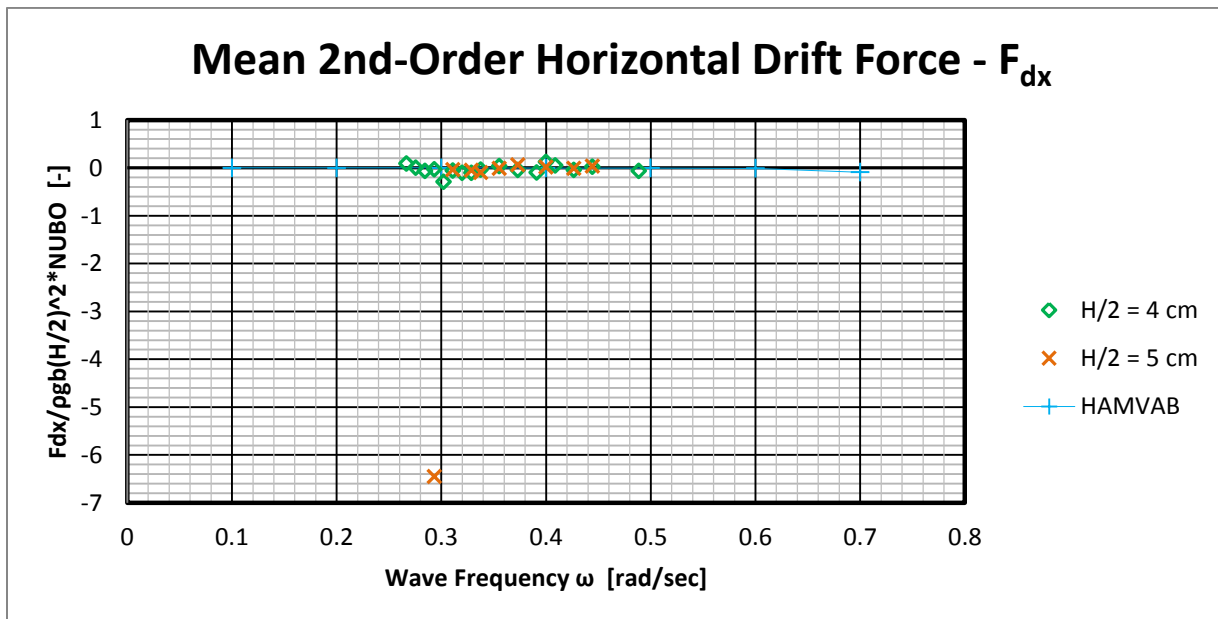
Διάγραμμα 4.4.3.1: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



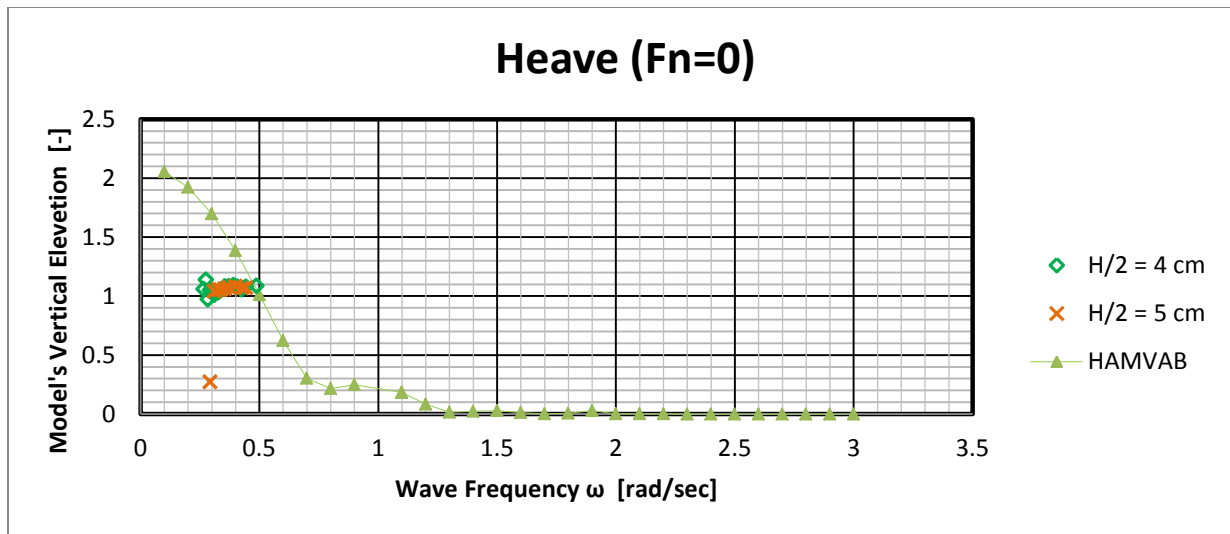
Διάγραμμα 4.4.3.2: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



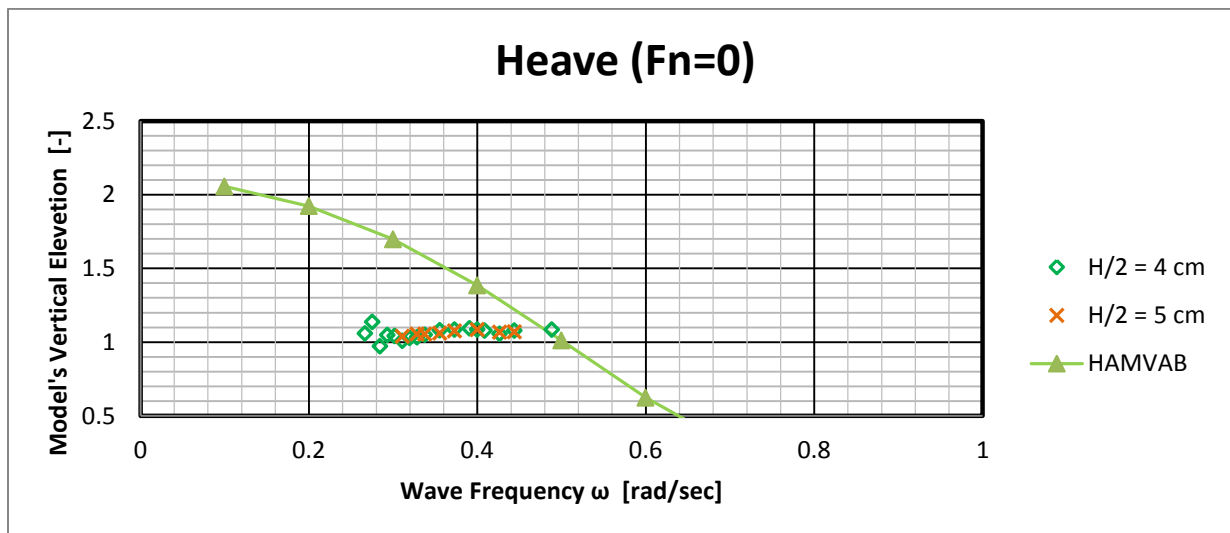
Διάγραμμα 4.4.3.3: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



Διάγραμμα 4.4.3.4: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



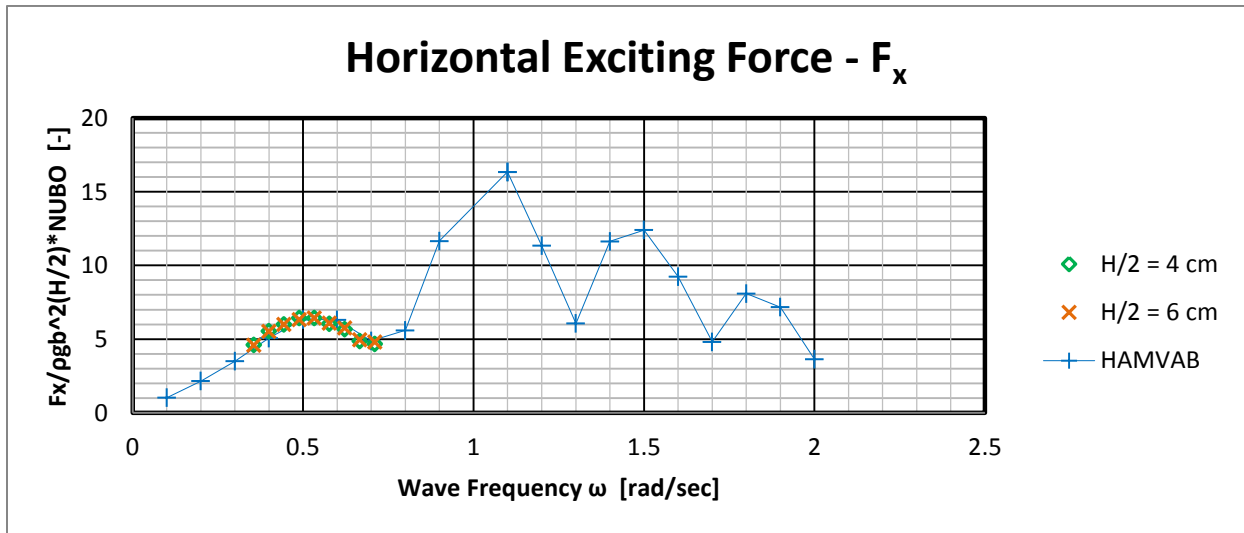
Διάγραμμα 4.4.3.5: Η κατακόρυφη ανύψωση (heave) της κατασκευής, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



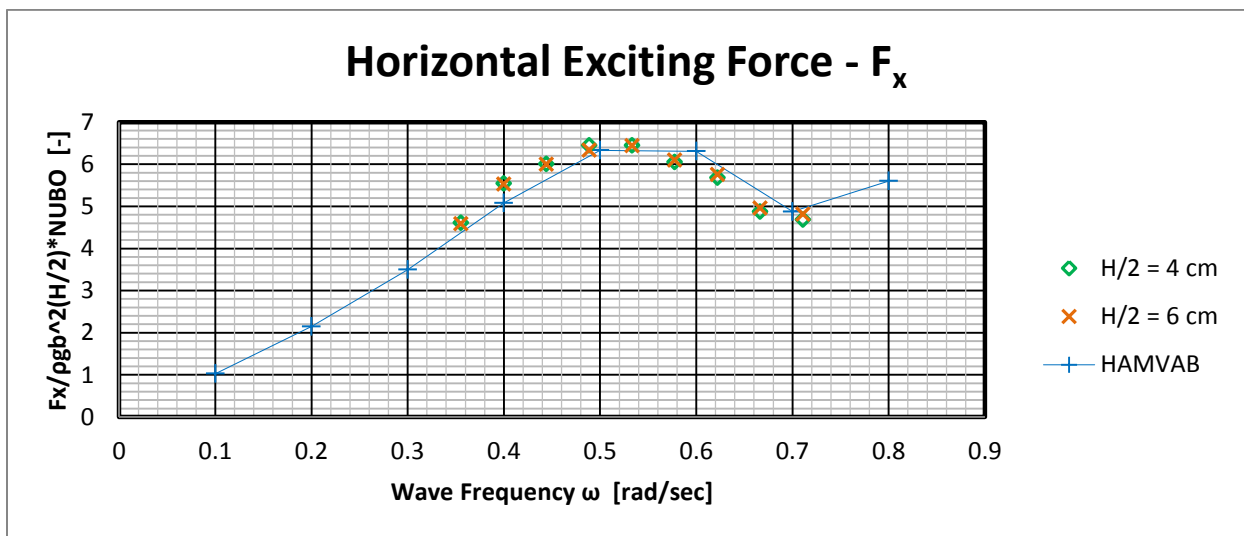
Διάγραμμα 4.4.3.6: Η κατακόρυφη ανύψωση (heave) της κατασκευής, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)

4.4.4 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων– Πειράματα με την κατασκευή ακίνητη

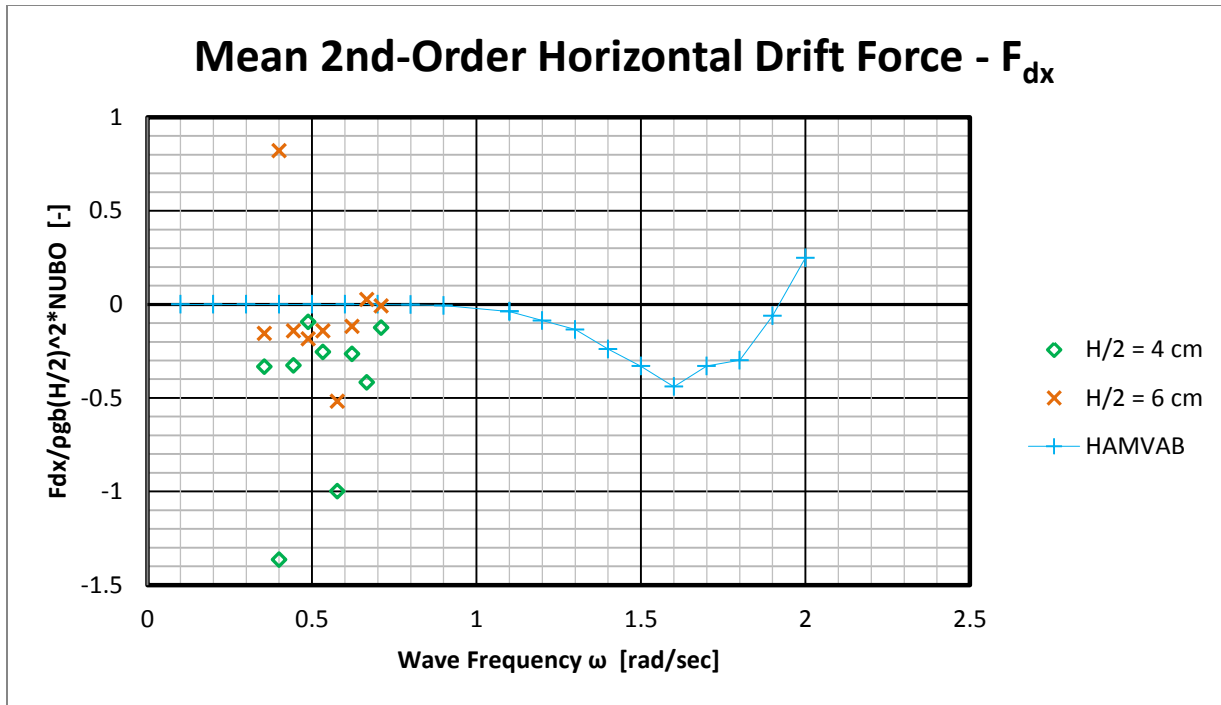
Πειράματα 138 έως 155



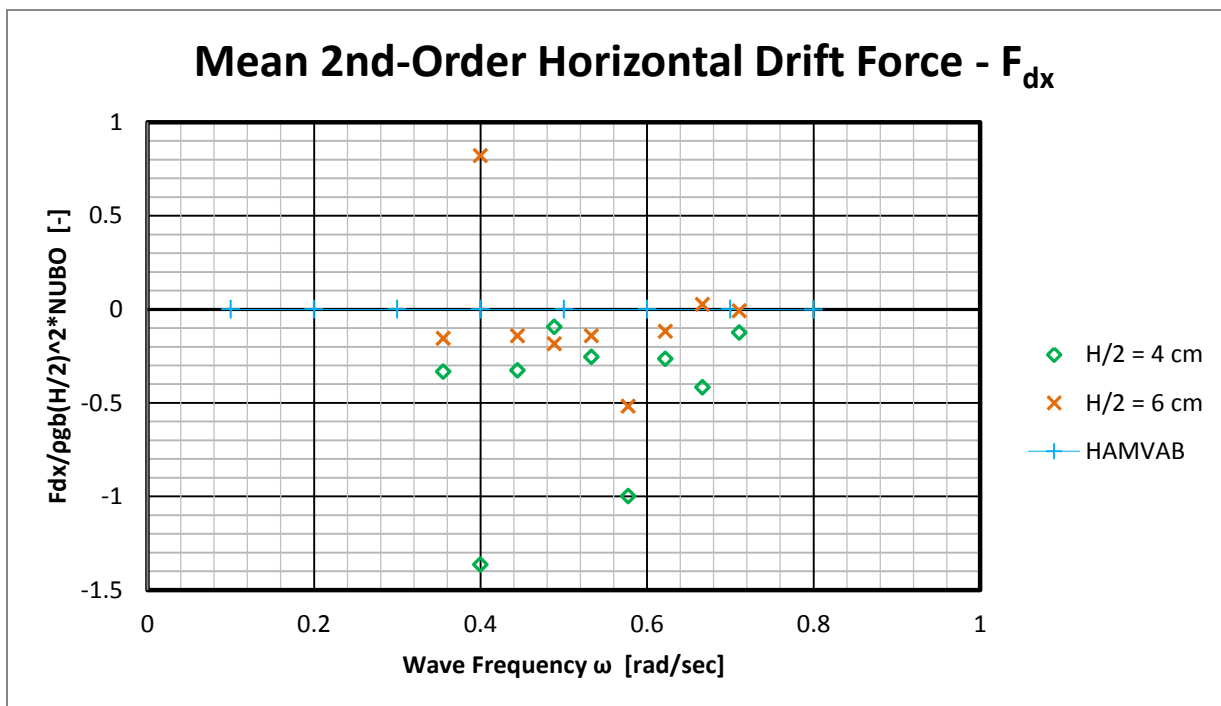
Διάγραμμα 4.4.4.1: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



Διάγραμμα 4.4.4.2: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



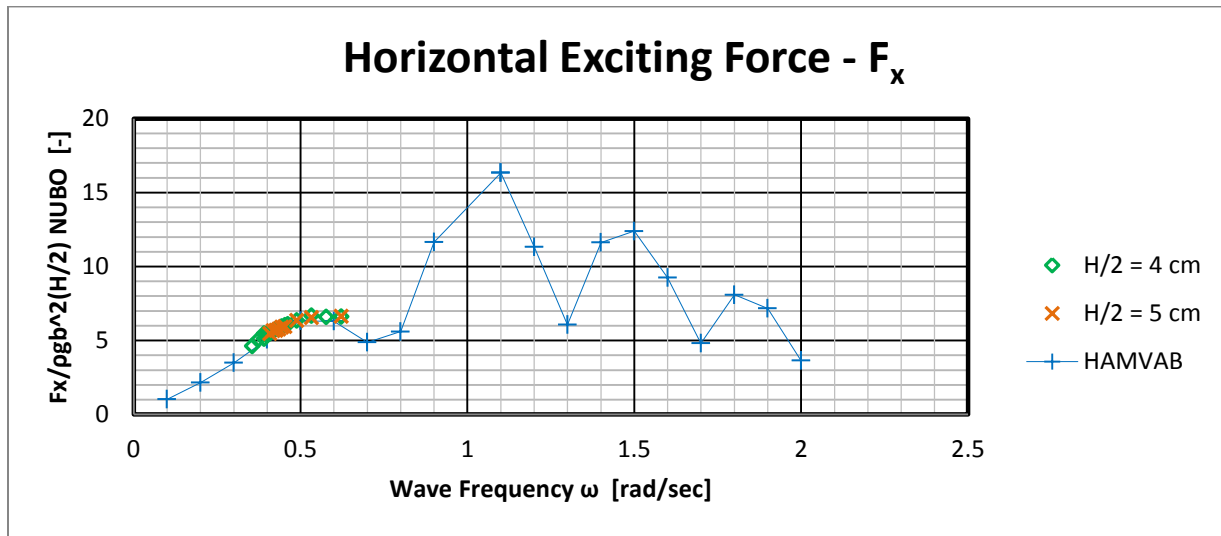
Διάγραμμα 4.4.4.3: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



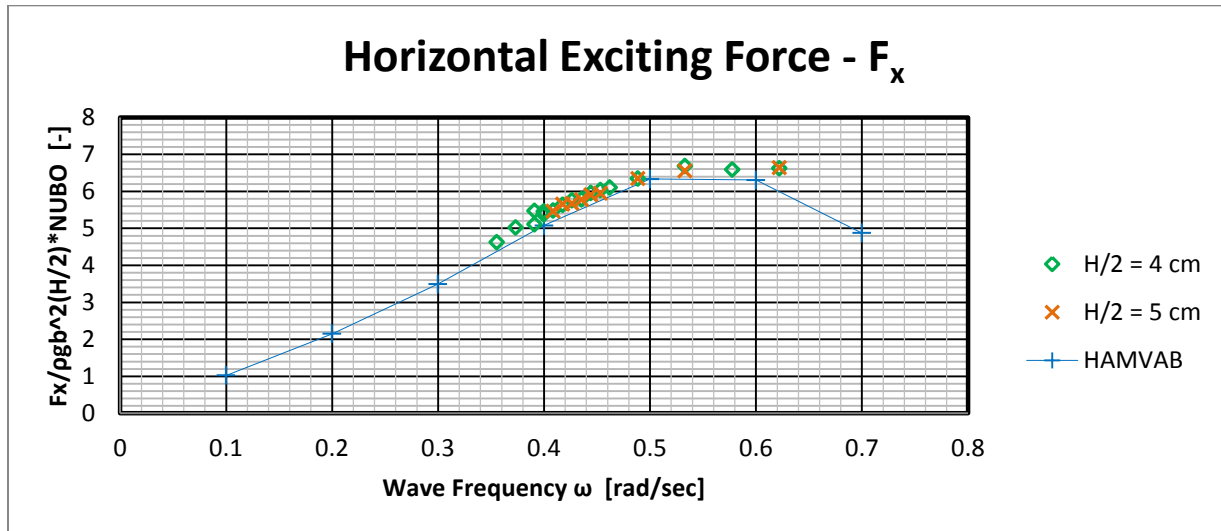
Διάγραμμα 4.4.4.4: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)

4.4.5 Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – Πειράματα με ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα

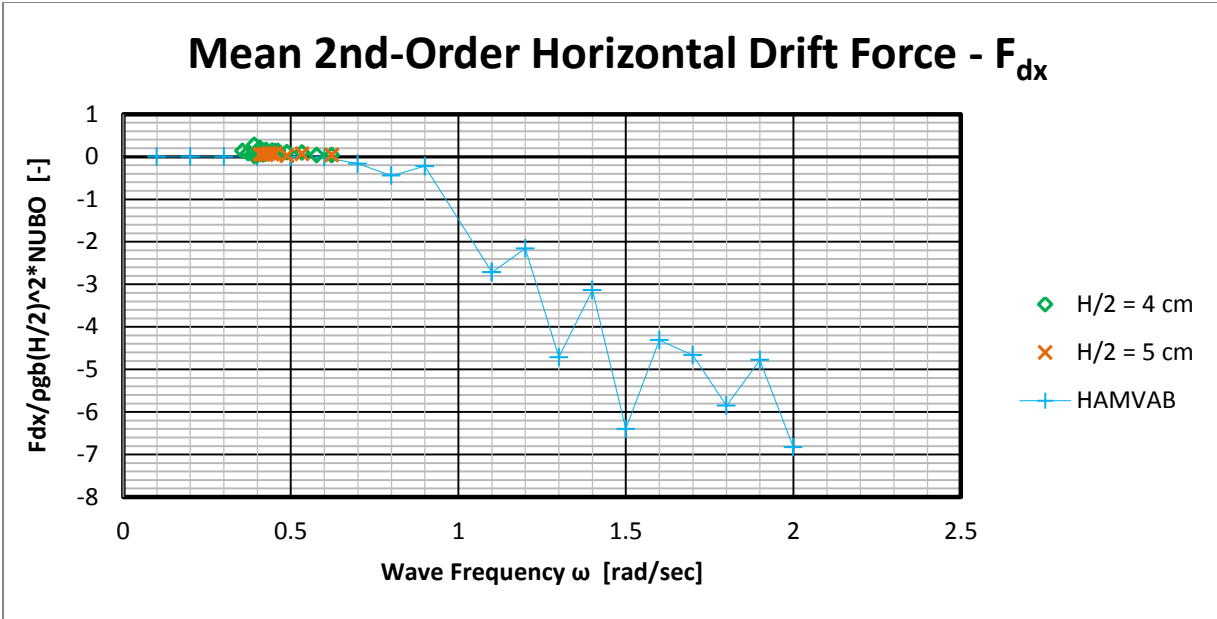
Πειράματα 192-217



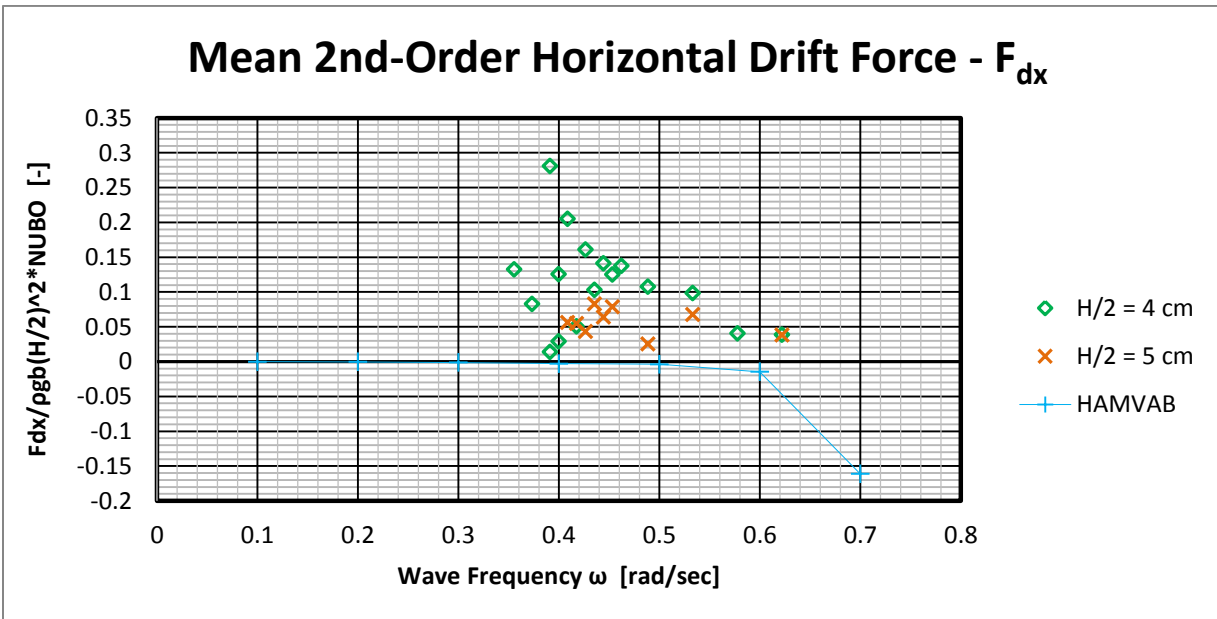
Διάγραμμα 4.4.5.1: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



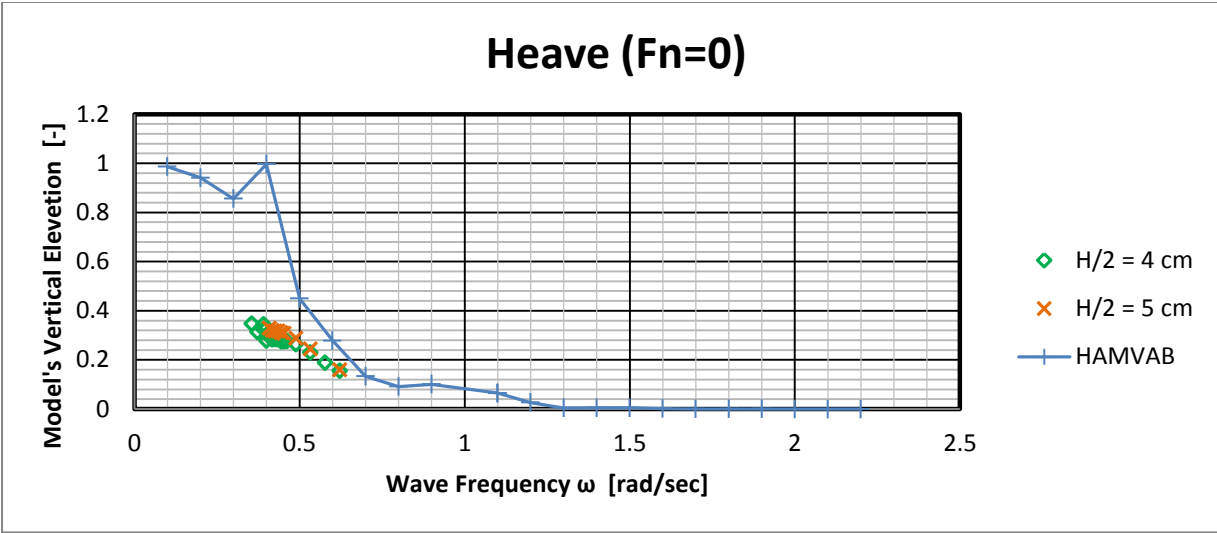
Διάγραμμα 4.4.5.2: Η οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



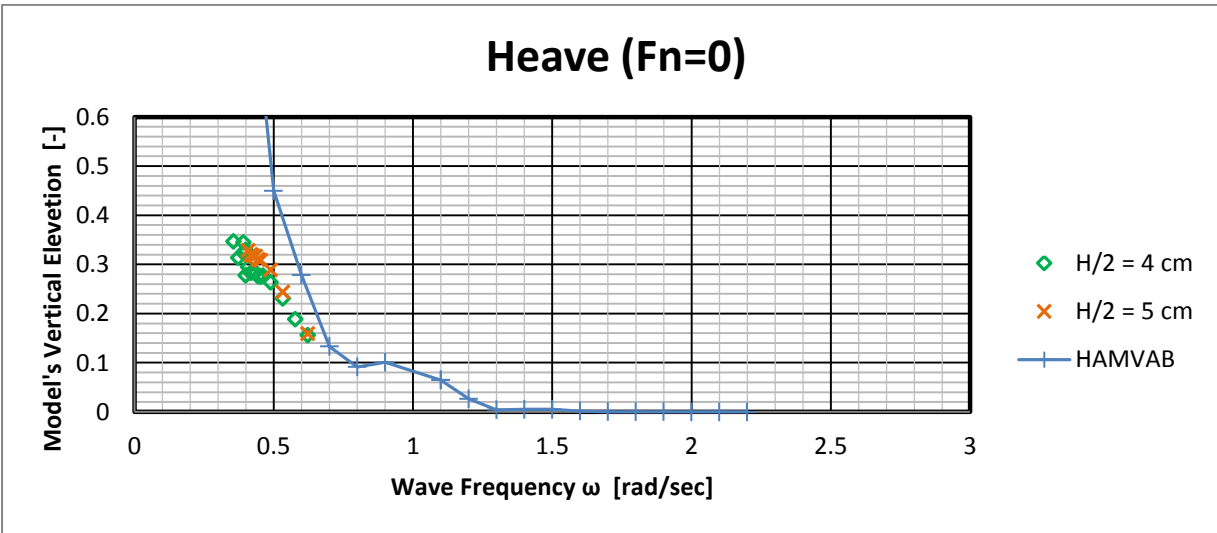
Διάγραμμα 4.4.5.3: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



Διάγραμμα 4.4.5.4: Η 2^{ης} τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)



Διάγραμμα 4.4.5.5: Η κατακόρυφη ανύψωση (heave) της κατασκευής, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων



Διάγραμμα 4.4.5.6: Η κατακόρυφη ανύψωση (heave) της κατασκευής, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα HAMVAB συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (μεγέθυνση στην περιοχή των πειραματικών μετρήσεων)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων αυτούσια, αλλά και κατόπιν επεξεργασίας, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής:

- Ο κυματιστήρας του ΕΝΘΥ είναι σε θέση να παράγει αρμονικούς κυματισμούς σε ένα πεδίο συχνοτήτων που κυμαίνονται από 0.3 έως και 1.2Hz. Ωστόσο, βάσει προηγούμενων πειραματικών μετρήσεων είναι γνωστό ότι η ακρίβεια της παραγωγής κυμάτων στα όρια του κυματιστήρα, δηλαδή από 0.3 έως 0.4Hz και 1.1 έως 1.2Hz, παρουσιάζει σημαντική αβεβαιότητα. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς, τόσο τα διαγράμματα ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας νερού όσο και τα διαγράμματα της αντίστασης δεν είναι αμιγώς ημιτονικά, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο.
- Η τροποποίηση της κατασκευής με την προσάρτηση κυλινδρικών δίσκων επιβεβαιώνει τις αρχικές προβλέψεις για βελτιωμένη συμπεριφορά σε κυματισμούς χαμηλότερων συχνοτήτων. Πράγματι, με την απεικόνιση των διαγραμμάτων αντίστασης συναρτήσει του χρόνου πιστοποιείται η αρχική αυτή υπόθεση.
- Η συμπεριφορά της κατασκευής, όσον αφορά στην αντίσταση της στους κυματισμούς, δεν επηρεάζεται από το ύψος των κυματισμών. Αυτό γίνεται φανερό στα διαγράμματα των αδιαστατοποιημένων αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης, όπου συμπίπτουν οι τιμές για διαφορετικά ύψη κυματισμών. Αυτό οφείλεται στο ότι στην προμελέτη που έγινε για να επιλεγούν τα συγκεκριμένα ύψη κύματος και οι συχνότητες, είχε ληφθεί μέριμνα, να βρίσκονται στην γραμμική περιοχή (Μαζαράκος 2010 ^[58]) Το ίδιο παρατηρείται και για την κατακόρυφη ανύψωση της κατασκευής. Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού δεν θα μπορούσε να είναι ανεξάρτητη από το ύψος των κυματισμών. Ωστόσο, στην περίπτωση της σύνθετης κατασκευής με προσαρτημένους κυλινδρικούς δίσκους, παρατηρούνται σημαντικά μικρότερες αποκλίσεις στις αντίστοιχες τιμές για διαφορετικά ύψη κυματισμών, όπως φαίνεται στα συγκριτικά διαγράμματά τους.
- Οι θεωρητικοί υπολογισμοί επαληθεύουν με πολύ καλή ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα, κυρίως όσον αφορά στην οριζόντια δύναμη διέγερσης F_x . Για την 2^α τάξης οριζόντια δύναμη έκπτωσης F_{dx} , επειδή τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι πολύ κοντά στο 0 η σύγκριση δεν είναι εύκολη, ενώ για την ανύψωση h_{ave} της κατασκευής παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα τείνουν να ακολουθήσουν το την εφαιπόμενη αλλά και την οριακή τιμή της θεωρητικής καμπύλης. Αποδεικνύεται έτσι και η αξιοπιστία του προγράμματος HAMVAB (Μαζαράκος 2010, [58]).

- Ορισμένα σημεία που εκφεύγουν κατά πολύ από τα υπόλοιπα στα διαγράμματα (βλ. Διαγρ. 4.3.1.1, 4.3.3.1, 4.3.5.1) οφείλονται σε λάθη κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως είναι φανερό και από τις χρονικές ιστορίες για τα μεγέθη των αντίστοιχων πειραμάτων, κάτι που επισημάνθηκε και κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των (βλ. Πειράματα 3, 68, 129).
- Γενικά τα πειράματα όπως πάντα παρουσιάζουν αστάθμητους παράγοντες, όπως είναι τα μετρητικά όργανα, η λειτουργία και η βαθμονόμησή τους, αστοχίες στη λήψη πειραματικών μετρήσεων, ειδικά στην αρχή και το τέλος αυτών και φυσικά ο ανθρώπινος παράγοντας. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να αλλοιώσουν την ορθότητα των πειραμάτων, αλλά πάντα λαμβάνονται υπόψη.

5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Όσον αφορά στην περαιτέρω μελέτη της υδροδυναμικής ανάλυσης πλωτών κατασκευών υπό την επίδραση κυματισμών και μικρής πρόσω ή πίσω ταχύτητας, αλλά και πιο συγκεκριμένα για τριγωνικές πλωτές ημιβυθισμένες κατασκευές προορισμένες να πλέουν σε βαθιά νερά και να φέρουν ανεμογεννήτρια, το πεδίο είναι ευρύ. Ακολουθούν ενδεικτικά ορισμένες προτάσεις:

- Για τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα και αποτελέσματα των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να γίνει αναλυτικότερη μελέτη του δευτεροτάξιου προβλήματος και θεωρητική προσέγγιση υπό αυτή τη σκοπιά.
- Για ομοίως διαμορφωμένη πειραματική διάταξη και μεθοδολογία, θα μπορούσε να γίνει διεξαγωγή νέων πειραμάτων με διαφοροποιημένα ή νέα χαρακτηριστικά όπως:
 - Νέα κλίμακα προτύπου μοντέλου
 - Διαφορετικά βυθίσματα
 - Μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, πιθανόν και για εύρεση της συχνότητας συντονισμού της κατασκευής
 - Δημιουργία τυχαίων κυματισμών και διερεύνηση των φασμάτων τους.
- Για νέα πειραματική διάταξη να διεξαχθούν πειράματα:
 - Με προσαρτημένο μοντέλο ανεμογεννήτριας
 - Με τοποθέτηση ή προσομοίωση αγκυρώσεων, είτε υπό υψηλή προένταση, είτε συμβατικών κλάδων
 - Με προσθήκη συνδετικών δοκών ανάμεσα στους πυλώνες της κατασκευής (μπρακέτα)
 - Με διαφοροποίηση του κυλινδρικού δίσκου στο κάτω μέρος της κατασκευής (διαφορετική διάμετρος, ύψος)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

- [1] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges22.html>
- [2] http://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power
- [4] **GWEC**, (2012), *Global Wind Statistics*
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:GlobalWindPowerCumulativeCapacity.png>
- [6] <http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx>
- [7] **EWEA**, (2012), *Wind Power Annual Statistics*
- [8] **EWEA**, (2009), *Offshore Report*
- [9] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [10] http://www.nrel.gov/analysis/sustain_lca_results.html
- [11] **Ε. Μπινόπουλος, Π. Χαβιαρόπουλος**, (2006), *Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των Αιολικών Πάρκων « Μύθοι και Πραγματικότητα»*, ΚΑΠΕ
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_wind_power
- [13] http://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power
- [15] **Esteban M., López J., Negro V., Diez J.** (2011), *Why Offshore Wind Energy, Renewable Energy, Elsevier*
- [16] <http://www.aquaret.com/index.php?lang=el>
- [17] **EWEA**, (2011), *Offshore Report*
- [18] **EESI** – Environmental and Energy Studying Institute, (October 2010), *Offshore Wind Energy*
- [19] **Musial W., Butterfield S., & Boone A.** (2004), *Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines, NREL, 23rd ASME Wind Energy Symposium, Nevada.*
- [20] **Grogg K.**, (2005), *Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines, World Renewable Energy Congress 2011, Sweden*
- [21] **Sclavounos, P.**, (2008). *Floating offshore wind turbines, Marine Technology Society Journal, 42, 39-43.*

- [22] **Koby Attias, Shaul P. Ladany**, (2011), *Optimal Layout for Wind Turbine Farms*, World Renewable Energy Congress 2011, Sweden
- [23] http://paradeigma.site90.net/1_15_-.html
- [24] http://www.planningni.gov.uk/index/policy/policy_publications/planning_statements/pps18/pps18_annex1_wind/pps18_annex1_technology/pps18_annex1_spacing.htm
- [25] http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
- [27] **UpWind**, (March 2001), *Report*
- [28] <http://www.eon-uk.com/generation/3947.aspx>
- [29] <http://lorc.e-kvator.com/Knowledge/Wind/Support-structures/Tripile>
- [30] <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-i-technology/chapter-5-offshore/wind-farm-design-offshore/offshore-support-structures.html>
- [31] <http://lorc.e-kvator.com/Knowledge/Wind/Support-structures/Tripile>
- [32] <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/wind-energy-gets-serial/1012449.article>
- [33] http://en.wikipedia.org/wiki/Floating_wind_turbine
- [34] http://de.wikipedia.org/wiki/Schwimmende_Windkraftanlage
- [35] <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/73032-semi-submersible-offshore-wind-turbine/>
- [36] **S. Butterfield, W. Musial, and J. Jonkman, P. Sclavounos**, (2005), *Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines*, NREL, Copenhagen Offshore Wind Conference, Denmark
- [37] **K. P. Thiagarajan and H. J. Daghe**, (2012), *State-of-the-art review of floating platform concepts for offshore wind energy generation*, ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2012-83690, Brazil
- [38] **Justin Frye, Nathan Horvath, Arnold Ndegwa**, (2011), *Design of scale model floating wind turbine: Spar-Buoy*, Major Qualifying Project Report, Worcester Polytechnic Institute

- [39] <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/newenergy/renewablepowerproduction/offshore/hywind/pages/hywindputtingwindpowertothetest.aspx>
- [40] <http://www.greendiary.com/hywind-world-s-first-floating-turbine-to-start-its-voyage.html>
- [41] <http://www.offshorewind.biz/2013/07/05/usa-statoil-freezes-hywind-maine-project/>
- [42] http://en.wikipedia.org/wiki/Tension-leg_platform
- [43] <http://www.livescience.com/7183-floating-ocean-windmills-designed-generate-power.html>
- [44] **Nihei, Y., Matsuura, M., Fujioka, H., and Suzuki, H.,** (2011), *An approach for the optimum design of TLP type offshore wind turbines*, *Proceedings 30th Int. Conf. Ocean Offshore Arctic Eng, OMAE 2011, Paper 50258, Rotterdam.*
- [45] <http://wacleanetech.org/2011/08/new-platform-would-let-wind-farms-float/>
- [46] <http://en.wikipedia.org/wiki/Semi-submersible>
- [47] **Roddier D., Pfeifer A., Aubault A., Weinstein J.,** (2011), *A generic 5W Windfloat for numerical tool validation & comparison against a generic spar*, *ASME 2011 30st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2011-50278, Rotterdam*
- [48] <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>
<http://www.compositesworld.com/articles/wind-over-deep-water>
- [49] <http://volumatrixgroup.com/tag/floating-offshore-wind/>
- [50] *Floating offshore Wind Foundations: Industry Consortia and projects in the United States, Europe and Japan – Main(e) International Consulting LLC , (May 2013)*
- [51] **UpWind,** (January 2011), *Executive Summary*
- [52] **Σ. Α. Μαυράκος,** (1999), *Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, Αθήνα*
- [53] **Σ. Α. Μαυράκος,** (2012), *Συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεις θαλασσίων κατασκευών, Αθήνα*
- [54] http://en.wikipedia.org/wiki/Morison_equation
- [55] **K. Kokkinowrachos, S. Mavrakos, S. Asorakos,** (1986), *Behaviour of vertical bodies of revolution in waves*, *Ocean Engng, Vol. 13, No. 6, pp. 505-538, G. Britain*
- [56] **S.A. Mavrakos, P. Koumoutsakos,** (1987), *Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves*

- [57] **Mazarakos, K. P.**, (2008). '*Analysis of loads and motions on a TLP on the time domain and comparisons with experiments*', Master Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, Division of Marine Structures, National Technical University of Athens.
- [58] **Mazarakos, T. P.**, (2010). "*Second- Order Wave Loading and Wave Drift Damping on Floating Marine Structures*" Ph.D. Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, Division of Marine Structures, Laboratory of Floating Structures and Mooring Systems, National Technical University of Athens, pp. 1-272.
- [59] **Mazarakos, T. P., Mavrakos, S. A.**, (2013). *Wave current interaction on a vertical truncated cylinder floating in finite depth waters*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, **227** (3), 243-255.