



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

## **ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των φορτίσεων σε  
εξέδρες στήριξης πλωτής ανεμογεννήτριας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ρέβελας Ζαχαρίας**

**ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Σ. Α. Μαυράκος**

**Αθήνα, Μάιος 2014**

## Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπυρίδωνα Μαυράκο, ο οποίος μέσω της διδασκαλίας του μαθήματος Στοιχεία Μελέτης και Σχεδίασης Πλωτών Κατασκευών, αποτέλεσε την αφορμή να επιλέξω το παρών θέμα. Τον ευχαριστώ για τη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήταν πολύ δυσκολότερη αν δεν υπήρχε ο κ. Θωμάς Μαζαράκος, μεταδιδακτορικός ερευνητής μηχανικός του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης. Ο κ. Μαζαράκος αποτελεί τον ορισμό του όρου δάσκαλος. Συνδυάζει επιστημονική επάρκεια, προθυμία, ενθουσιασμό και αγάπη μικρού παιδιού γι' αυτό που κάνει και, αναπόφευκτα, μεταδοτικότητα. Τον ευχαριστώ πολύ.

Λόγω της πειραματικής φύσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχα την χαρά να γνωρίσω και να συνεργαστώ με το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής. Ο κ. Γιάννης Τραχανάς και ο κ. Δημήτρης Λιαροκάπης έκαναν τα αδύνατα δυνατά ώστε να ολοκληρωθούν οι πειραματικές μετρήσεις στον περιορισμένο διαθέσιμο χρόνο βρίσκοντας λύση σε όποιο πρόβλημα προέκυπτε. Ο κ. Γιώργος Μυλωνάς βοήθησε καταλυτικά στην κατασκευή των πειραματικών μοντέλων και ήταν πρόθυμος να βοηθήσει όπου χρειάστηκε. Ο κ. Φώτης Κασάπης έκανε χρήση του φορείου για τη διεξαγωγή κάποιων πειραματικών μετρήσεων. Ευχαριστώ τους παραπάνω όπως επίσης και τον καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών και Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Γεώργιο Τζαμπίρα, ο οποίος, ως υπεύθυνος του εργαστηρίου, μου παραχώρησε την πειραματική δεξαμενή και εργάζεται με τρόπο που προάγει την παραγωγικότητα και το καλό κλίμα για τα οποία φημίζεται το εν λόγω εργαστήριο.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα του τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών, κ. Δημήτρη Κονισπολιάτη, ο οποίος συνέλαβε με προθυμία στην εξαγωγή των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στη Νάντια.

## Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, ολοένα και αυξάνονται οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι συμβατικές πηγές παραγωγής έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα αποθέματά τους είναι περιορισμένα. Έτσι, έχει προκύψει η ανάγκη εκμετάλλευσης άλλων πηγών ενέργειας, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εκείνη που ξεχωρίζει ως προς την αφθονία και το κόστος εκμετάλλευσης είναι η αιολική ενέργεια. Μέρος αυτής, ταχύτατα αναπτυσσόμενη και με αρκετά προτερήματα είναι η υπεράκτια αιολική ενέργεια. Για την εκμετάλλευση αυτής, γίνεται χρήση είτε πακτωμένων είτε πλωτών κατασκευών στήριξης. Οι πλωτές κατασκευές αποτελούν ιδανική, από οικονομοτεχνικής άποψης, λύση για περιοχές εγκατάστασης και λειτουργίας, όπου το βάθος της θάλασσας ξεπερνάει τα 60 m, δηλαδή στις περιοχές όπου βρίσκεται το μεγαλύτερο μέρος του αιολικού δυναμικού.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς δύο πλωτών κατασκευών στήριξης, ενός σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου και μιας τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων υπό την επίδραση αρμονικών κυματισμών σε ακινησία αλλά και με μικρές ταχύτητες κίνησης. Έγινε συλλογή και επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων με χρήση μοντέλων υπό κλίμακα 1:40 και μελετήθηκαν οι φορτίσεις, η κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συμβάλλουν στην ανάδειξη και βελτιστοποίηση της καταλληλότερης σχεδίασης πλωτής κατασκευής στήριξης υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

# Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ .....	1
1.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	2
1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	4
Προέλευση.....	4
Εκμετάλλευση και στατιστικά στοιχεία .....	5
1.3 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	8
Αναγκαιότητα εκμετάλλευσης.....	8
Στατιστικά στοιχεία και εξελίξεις.....	10
1.4 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ .....	15
Ανεμογεννήτριες.....	15
Κατασκευές στήριξης .....	22
1.5 ΠΛΩΤΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ .....	32
Γενικά στοιχεία.....	32
Επιλεγμένη παρουσίαση πλωτών ανεμογεννητριών .....	35
Συγκεντρωτικός πίνακας πλωτών κατασκευών.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	59
2.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	60
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	62
Πεδία ανέμου .....	63
Θαλάσσια ρεύματα .....	65
Θαλάσσιοι κυματισμοί .....	66
Γραμμική Θεωρία – απλοί αρμονικοί κυματισμοί .....	73
2.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	75
Φορτία από θαλάσσιους κυματισμούς.....	76
Επίδραση δυνάμεων αναφορικά με το είδος της κατασκευής.....	77
2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ .....	82
Συμπεριφορά κατακόρυφων σωμάτων υπό την επίδραση κυματισμών.....	82
Αλληλεπίδραση κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς .....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	105
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....	106
Πειραματική δεξαμενή και εξοπλισμός.....	106
Πειραματικά μοντέλα .....	112
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	123
Βαθμονομήσεις.....	123
Πειραματικές μετρήσεις .....	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	136
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	137
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 45 cm .....	139

Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 50 cm .....	143
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – πακτωμένη (R35) – βύθισμα 50 cm .....	147
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – ελεύθερη στην κατακόρυφη κίνηση (R47) – βύθισμα 50 cm .....	153
4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	156
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 45 cm .....	158
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 50 cm .....	160
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – πακτωμένη (R35) – βύθισμα 50 cm .....	162
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – ελεύθερη στην κατακόρυφη κίνηση (R47) – βύθισμα 50 cm .....	164
4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	166
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 45 cm .....	168
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 50 cm .....	174
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – πακτωμένη (R35) – βύθισμα 50 cm .....	185
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – ελεύθερη στην κατακόρυφη κίνηση (R47) – βύθισμα 50 cm .....	201
4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ....	204
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 45 cm .....	206
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος – πακτωμένος (R35) – βύθισμα 50 cm .....	208
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – πακτωμένη (R35) – βύθισμα 50 cm .....	210
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων – ελεύθερη στην κατακόρυφη κίνηση (R47) – βύθισμα 50 cm .....	212
4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	215
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	217
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	218
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ... ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟ CD	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ . ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟ CD	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	ΣΥΝΟΔΕΥΤΙΚΟ CD

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ**

## 1.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η σύγχρονη οικονομία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη ενέργειας σε μορφήοικονομική, μεγάλης ασφάλειας, υψηλής ποιότητας, κατάλληλη για τις περισσότερες εφαρμογές και ήπιας συμπεριφοράς στο περιβάλλον κατά την κατανάλωσή της, δηλαδή στην ηλεκτρική ενέργεια. Η εξάρτηση της ανθρωπότητας από αυτήν ολοένα και αυξάνει.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται εκμετάλλευση των πρωτογενών ενεργειακών πηγών που είναι ο ήλιος και η γη (ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα). Οι πρωτογενείς ενεργειακές πηγές μπορούν να διαχωριστούν σε ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες. Ανανεώσιμες είναι οι δυναμικές πηγές ενέργειας οι οποίες ανανεώνονται με σταθερό ρυθμό και σχετικά γρήγορα, ενώ μη ανανεώσιμες θεωρούνται εκείνες που ανανεώνονται με εξαιρετικά αργό ρυθμό. <sup>[1]</sup>

### **Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:**

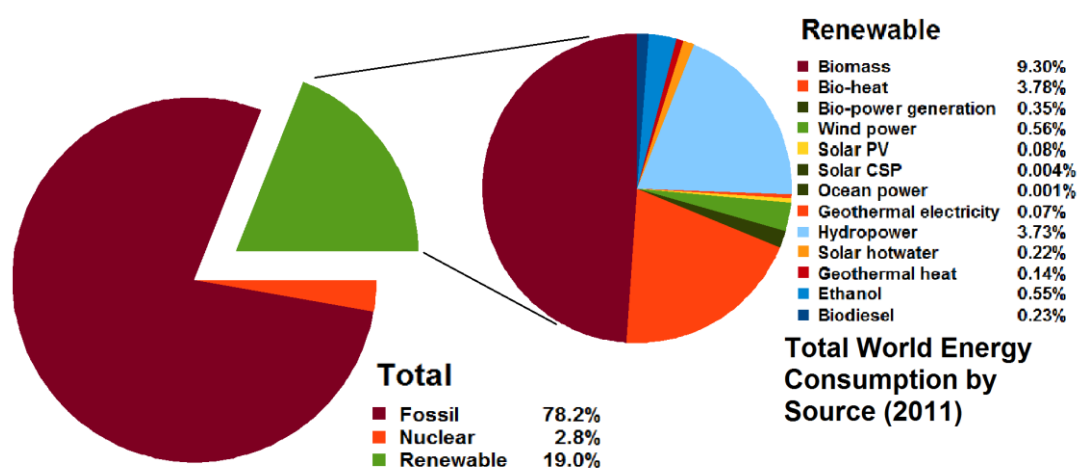
- ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακας, τύρφη, αργό πετρέλαιο, φυσικό αέριο)
- πυρηνικά καύσιμα (ουράνιο, θόριο, δευτέριο, λίθιο, βηρύλλιο)

### **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:**

- ηλιακή
- υδροϊσχύς
- παλίρροιες
- άνεμος
- ωκεανοί
- γεωθερμία
- βιομάζα

Παρά την εκτεταμένη χρήση τους και την εξάρτηση όλων των παγκόσμιων οικονομιών από αυτές, οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Τα ορυκτά καύσιμα ευθύνονται κατά πολύ για την ρύπανση του πλανήτη και για διάφορα άλλα περιβαλλοντολογικά προβλήματα και τα αποθέματά τους είναι πεπερασμένα. Από την άλλη, η πυρηνική ενέργεια είναι μια ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη μορφή ενέργειας διότι, παρά το αρκετά χαμηλό κόστος παραγωγής, στις περιπτώσεις ατυχημάτων τα αποτελέσματα είναι δραματικά. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι τα απόβλητα μια τέτοιας παραγωγικής διαδικασίας είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά με αποτέλεσμα να απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την επ' αόριστων αποθήκευσή τους.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην επένδυση χρόνου και πόρων για την έρευνα και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον και επιπλέον, αποτελούν εγχώριες πλουτοπαραγωγικές πηγές που μπορούν να εξασφαλίσουν την ενεργειακή ανεξαρτησία μιας χώρας. Τα βασικότερα προβλήματα των ΑΠΕ, όπως το υψηλό κόστος επένδυσης και η δυσκολίες στο να συνδεθούν με τα υπάρχοντα δίκτυα, θα ξεπεραστούν στο μέλλον με τη δημιουργία ελκυστικών επενδυτικών ευκαιριών και την αναβάθμιση των ηλεκτρικών δικτύων. Στην Εικόνα 1.1 φαίνεται η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χωρισμένη ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής της.



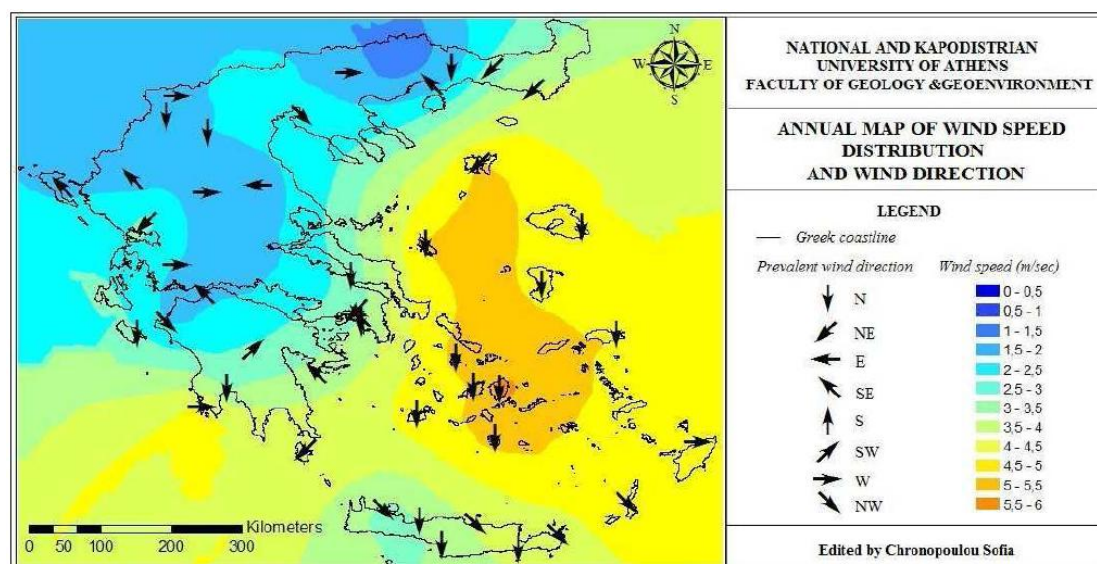
Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τρόπο παραγωγής [21]



## 1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Προέλευση

Ο άνεμος είναι μια πηγή ενέργειας που προέρχεται βασικά από τις διαφοροποιήσεις στην ατμοσφαιρική πίεση, οι οποίες από τη μεριά της οφείλονται στην άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης και της θάλασσας από τον ήλιο. Επομένως, η αιολική ενέργεια είναι έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας και περίπου 1-2% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε άνεμο. Καθώς ο αέρας θερμαίνεται στις τροπικές ζώνες αρχικά ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα και κατόπιν οδεύει χοντρικά προς τους πόλους. Η κίνηση αυτή της ατμόσφαιρας επηρεάζεται σημαντικά από την περιστροφή της γης, η επίδραση της οποίας είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό και μηδενική στους πόλους, από την αναλογία της επιφάνειας ξηράς προς την αντίστοιχη της θάλασσας, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ξηράς (βουνά, πεδιάδες) και από τις εποχές του χρόνου. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω δημιουργούνται συγκεκριμένα «πρότυπα» κίνησης των ανέμων στη γη. Στην Εικόνα 1.2 αποτυπώνεται η ετήσια κατανομή ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου στην Ελλάδα.



Εικόνα1.2 Ετήσια κατανομή ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στην Ελλάδα [3]

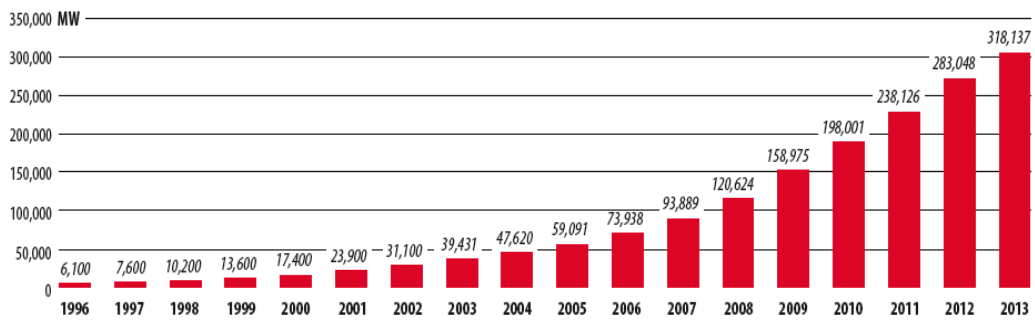
## **Εκμετάλλευση και στατιστικά στοιχεία**

Η εκμετάλλευση του ανέμου ξεκίνησε πριν χιλιάδες χρόνια, αλλά οι πρώτες αιολικές μηχανές τοποθετούνται χρονικά και γεωγραφικά γύρω στο 200 π.Χ. στα σύνορα Περσίας - Αφγανιστάν, με τη μορφή ανεμόμυλων κατακόρυφου άξονα περιστροφής. Πολύ αργότερα, στην περίοδο 1300-1875 μ.Χ. κατασκευάστηκαν οι πρώτοι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα περιστροφής στην Ολλανδία και την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Η κύρια χρήση τους μέχρι τότε ήταν η άντληση νερού και η άλεση δημητριακών.

Μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) ισχύος 12 kW, η πρώτη μεγάλη αιολική μηχανή παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio. Τα επόμενα χρόνια η τεχνολογία εξελίχθηκε τόσο στην Ευρώπη (Δανία, Γαλλία, Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο) όσο και στις ΗΠΑ, ενώ άρχισαν να καθιερώνονται οι κατασκευές οριζόντιου τύπου.

Βασικό ορόσημο στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας θεωρείται η περίοδος που ακολούθησε την πετρελαϊκή κρίση του 1973, κατά την οποία ενεπλάκη η κυβέρνηση των ΗΠΑ στην έρευνα και την ανάπτυξη (Research and Design, R&D) με αποτέλεσμα την εμπορική ανάπτυξη του τομέα και την καθιέρωση εφαρμογών μεγαλύτερης κλίμακας (αιολικά πάρκα ισχύος 50-600 kW) σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια (κυρίως οικιακές και αγροτικές εφαρμογές της τάξης των 1-25 kW). Η εξάπλωση της αιολικής τεχνολογίας και η εγκατάσταση εφαρμογών μεγάλης κλίμακας ξεκίνησε από την πολιτεία της California, όπου κατά την περίοδο 1981-1990 εγκαταστάθηκαν αιολικές μηχανές συνολικής ισχύος 1.7 GW χάρη σε κρατικά κίνητρα. Παράλληλα στη Βόρεια Ευρώπη στις δεκαετίες του '80 και του '90 αυξήθηκαν σταθερά οι εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων, δεδομένης της αυξανόμενης τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. <sup>[4]</sup>

Τα τελευταία 20 χρόνια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικές εγκαταστάσεις γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στην αγνότητα της αιολικής ενέργειας (δεν ρυπαίνει και είναι ασφαλής), στις δυνατότητες εγκατάστασης, στον υψηλό βαθμό απόδοσης και στο κόστος παραγωγής (το κόστος μιας KWh είναι συγκρίσιμο με αυτό που παράγεται από το λιγνίτη). Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Energy Council, GWEC), η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας έφτασε τα 318 GW με την ολοκλήρωση του έτους 2013, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε κατά σχεδόν 200 GW μέσα στην τελευταία πενταετία. <sup>[5]</sup>



Εικόνα 1.3 Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996-2013 (αθροιστικά) [6]

Στην Ευρώπη, το 2013, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικές εγκαταστάσεις αυξήθηκε κατά 11.2 GW, φτάνοντας συνολικά τα 117.3 GW εγκατεστημένης ισχύος. Από το 2000 έως σήμερα, ο ετήσιος ρυθμός εγκατάστασης νέων μονάδων εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας αυξανόταν κατά μέσο όρο κατά 10% κάθε έτος. Πλέον, κατά τη διάρκεια ενός έτους με μέσο άνεμο, η Ευρώπη παράγει 257 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία είναι αρκετά για να καλύψουν το 8% περίπου της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη.<sup>[7]</sup>

Στόχος του Ευρωπαϊκού Οργανισμού 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 από χερσαίες και τα 40 GW από υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Αν επιτευχθεί ο στόχος, περίπου το 14-17% (ανάλογα με τη συνολική ζήτηση) του ηλεκτρισμού στην Ευρώπη θα παράγεται με τη βοήθεια του ανέμου, θα μειωθούν οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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. Τέλος, εκτιμάται από τον την ίδια οργάνωση πως το 2050 η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς θα αγγίξει τα 735 GW. Για να γίνουν ρεαλιστικοί οι παραπάνω στόχοι είναι απαραίτητες οι παρακάτω ενέργειες:<sup>[8]</sup>

- Βελτίωση σχεδίασης και διάταξης των αιολικών πάρκων
- Αύξηση αξιοπιστίας, προσβασιμότητας και αποδοτικότητας των Α/Γ

- Βελτιστοποίηση συντήρησης, συναρμολόγησης και εγκατάστασης των υπεράκτιων Α/Γ και των υποδομών τους
- Επίδειξη εφικτότητας μεγαλύτερων Α/Γ (10-20 MW) και μεγάλων, διασυνδεδεμένων αιολικών πάρκων
- Βελτίωση του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να μπορεί να διαχειριστεί υψηλές τιμές ισχύος
- Επέκταση των εκπαιδευτικών προγραμμάτων και εγκαταστάσεων κατάλληλα

Αξίζει να σημειωθεί πως η Ελλάδα ανήκει στην ομάδα των 11 Ευρωπαϊκών χωρών οι οποίες έχουν άνω του ενός GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύς. Στο τέλος του 2013, το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος έφτασε τα 1865 MW. <sup>[7]</sup>

## 1.3 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Αναγκαιότητα εκμετάλλευσης

Η ιδέα της κατασκευής υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορεί να αποδοθεί στον καθηγητή William E. Heronemus, ο οποίος ήδη από το 1972 τα είχε προτείνει ως λύση στα μειονεκτήματα των χερσαίων αιολικών πάρκων, δηλαδή στην οπτική μόλυνση που προκαλούν και την στέρηση απαραίτητων εκτάσεων από την γεωργία και τη συνεχή αστική ανάπτυξη. Ωστόσο, το αυξημένο κόστος εγκατάστασης σε σχέση με τις χερσαίες και η έλλειψη τεχνογνωσίας (υποδομές, δυνατότητες διασύνδεσης, υλικά κατάλληλα για το διαβρωτικό περιβάλλον, προσαρμογή χερσαίων Α/Γ) δεν επέτρεψε την πραγματοποίησή τους έως το 1990. Τη δεκαετία του 1990 έγιναν μεμονωμένες εγκαταστάσεις μικρού μεγέθους στη Σουηδία, τη Δανία και την Ολλανδία. Σημαντική ανάπτυξη άρχισε να εμφανίζεται ο κλάδος από το 2000 και μετά, με την κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων.



**Εικόνα 1.4** Υπεράκτιες Α/Γ στη Δανία, κοντά στην Κοπεγχάγη <sup>[9]</sup>

### **Πλεονεκτήματα**

Πέραν της πολυτέλειας χώρου στη θάλασσα (απουσία εδαφικών και περιβαλλοντικών περιορισμών), οι δυνατότεροι και πιο σταθεροί άνεμοι (λιγότερες διαταραχές – μικρότερα φαινόμενα τύρβης) εξασφαλίζουν μεγαλύτερο οικονομικό όφελος καθώς η παραγόμενη ισχύς είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Είναι εφικτή

επίσης η κατασκευή μεγαλύτερων Α/Γ διότι η μεταφορά στο σημείο εγκατάστασης γίνεται μέσω θάλασσας. Μεγαλύτερες Α/Γ σημαίνει και πτερύγια μεγαλύτερης

διαμέτρου και άρα αυξημένη παραγωγή ενέργειας, αφού η ισχύς είναι ανάλογη με την επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων. Μεγαλύτερες Α/Γ σημαίνει επίσης ότι η άτρακτος (και άρα και ο ρότορας) βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο, όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος.

Επιπρόσθετα, οι υπεράκτιες αιολικές Α/Γ έχουν μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τις χερσαίες, ενώ όσο απομακρύνονται από την στεριά, μειώνονται η οπτική μόλυνση και οι ακουστικοί περιορισμοί. Συγκεκριμένα, δεν είναι οπτικά αντιληπτές όταν βρίσκονται σε απόσταση:

$$L > \sqrt{(2HR)}, \text{ όπου } H \text{ το ύψος της πλήμνης και } R \text{ η ακτίνα της γης.}^{[10]}$$

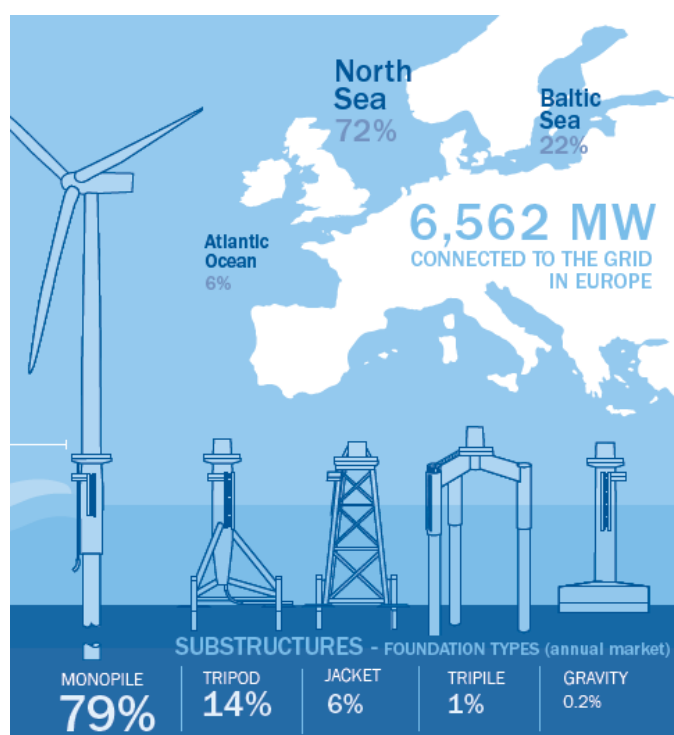
### **Μειονεκτήματα**

Βασικό μειονέκτημα για την ανάπτυξη του υπεράκτιου αιολικού τομέα είναι ο υψηλό επενδυτικό κεφάλαιο που απαιτείται για τη μελέτη σχεδιασμού λόγω της περιπλοκότητας των συστημάτων, τις εδράσεις/θεμελιώσεις και την εγκατάσταση και τον παροπλισμό τους. Οι επιπλέον φορτίσεις που δέχεται μια υπεράκτια Α/Γ εκτός του ανέμου, δηλαδή οι υδροδυναμικές φορτίσεις από τους κυματισμούς και τα θαλάσσια ρεύματα, αλλά και οι, πολύ συχνά, άγριες περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης, απαιτούν τεχνολογικές λύσεις και εξελίξεις που εμπεριέχουν μεγάλο ρίσκο και απαιτούν χρόνο και υψηλό επενδυτικό κεφάλαιο. Επιπλέον, το γεγονός ότι τα υπεράκτια συστήματα τοποθετούνται στο θαλάσσιο περιβάλλον τα κάνει λιγότερο προσβάσιμα για τις αναγκαίες εργασίες συντήρησης, αυξάνοντας το κόστος τους καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο διακοπής λειτουργίας των συστημάτων.<sup>[11]</sup>

## Στατιστικά στοιχεία και εξελίξεις

Συνολικά στο τέλος του 2012 είχαν εγκατασταθεί παγκόσμια, υπεράκτιες Α/Γ ισχύος 5.415 MW. Πάνω από το 90% της παγκόσμια υπεράκτια αιολικής ισχύος είναι εγκατεστημένο στην Βόρεια Ευρώπη. Επίσης, εκτός από κάποιες μεμονωμένες και πρότυπες Α/Γ που είναι εγκατεστημένες σε μεγάλα βάθη και είναι πλωτές, το σύνολο της υπεράκτια αιολικής ισχύος σήμερα προέρχεται από σταθερές εγκαταστάσεις, σε μικρά βάθη. <sup>[12]</sup>

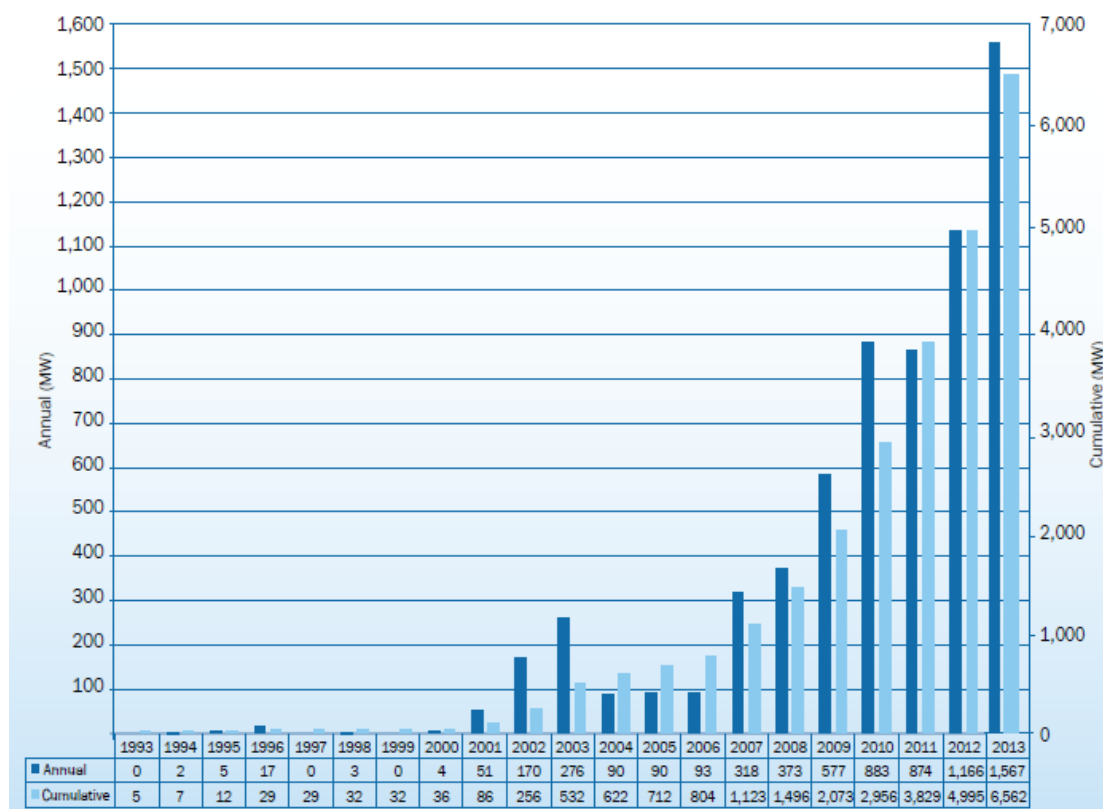
Στην Ευρώπη, στο τέλος του 2013 είχαν εγκατασταθεί και διασυνδεθεί με το Ευρωπαϊκό ηλεκτρικό δίκτυο 2080 υπεράκτιες Α/Γ, μεταξύ 69 υπεράκτιων αιολικών πάρκων, σε 11 διαφορετικές χώρες. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 6562 MW, με δυνατότητα ετήσιας μέσης παραγωγής ίση με περίπου 24 TWh.



**Εικόνα 1.5** Στατιστικά στοιχεία υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη <sup>[13]</sup>

Σήμερα, 12 υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι υπό κατασκευή στην Ευρώπη, τα οποία με την ολοκλήρωσή τους θα αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ κατά 3 GW. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2020 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θα φτάσει τα 40 GW. Τα 40 GW διαθέσιμης ισχύος θα επιφέρουν μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 85 Mt ετησίως. Ο

στόχος για το 2030 είναι τα 150 GW και η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 292 Mt ετησίως. Είναι προφανές ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα βοηθήσει καθοριστικά την Ευρώπη να πετύχει τον στόχο που έχει θέσει, το 20% της κατανάλωσης ενέργεια να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. [13][14]



**Εικόνα 1.6** Ετήσιες και αθροιστικές εγκαταστάσεις υπεράκτιας αιολικής ισχύος στην Ευρώπη [13]

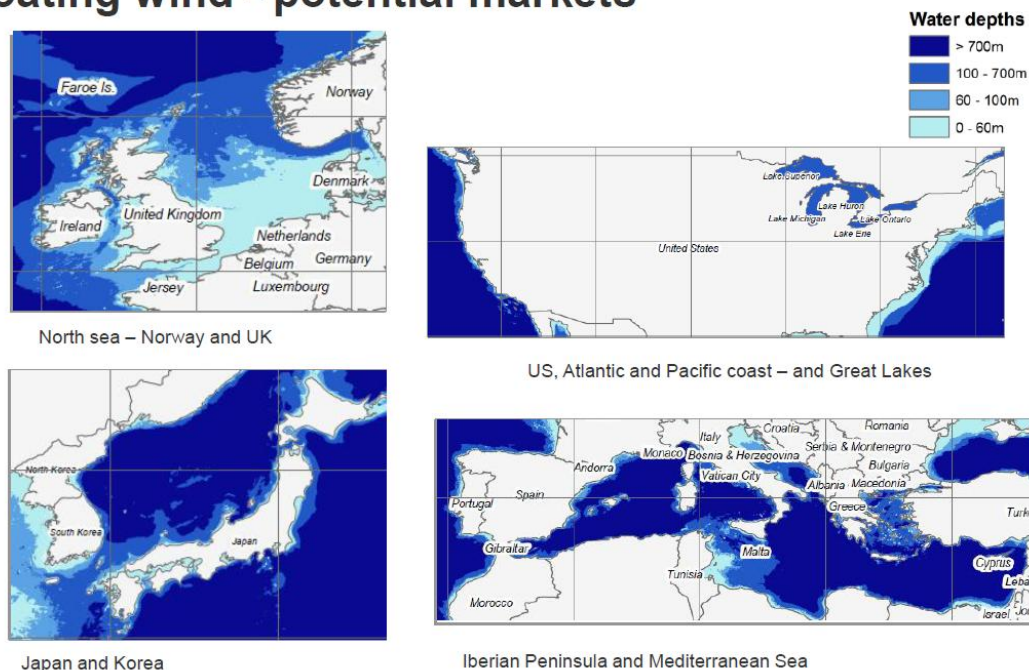
Εκτός Ευρώπης, η Κίνα έχει θέσει ως στόχο να έχει υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος ίσης με 30 GW έως το 2020. Οι Η.Π.Α. παρότι διαθέτουν πλούσιο αιολικό δυναμικό και έχουν πολλές εγκαταστάσεις στο στάδιο της μελέτης, δεν παράγουν αυτή τη στιγμή ηλεκτρική ενέργεια από υπεράκτιες Α/Γ. [12]

Οι υπεράκτιοι αιολικοί πόροι είναι τέτοιοι που θα μπορούσαν να καλύψουν τέσσερις φορές τις ανάγκες σε ενέργεια των Η.Π.Α. και επτά φορές εκείνες της Ευρώπης. Για να γίνει εκμετάλλευση όμως του μεγαλύτερου μέρους των υπεράκτιων αιολικών πόρων, θα απαιτηθεί εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε μεγάλα βάθη θάλασσας. Στην Εικόνα 1.7 φαίνεται ένας βαθυμετρικός χάρτης με περιοχές ανά τον κόσμο όπου θα μπορούσε μελλοντικά να γίνει εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Είναι φανερή



η υπεροχή της θαλάσσιας έκτασης όπου το βάθος είναι μεγάλο και κατ' επέκταση και η ανάγκη ανάπτυξης υπεράκτιας αιολικής τεχνολογίας που να μπορεί να λειτουργεί σε αυτά. Για βάθη άνω των 60 m περίπου η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι τεχνικά πιο εφικτή και οικονομικά πιο συμφέρουσα μέσω πλωτών Α/Γ αντί για σταθερών.

## Floating wind - potential markets



**Εικόνα 1.7** Βαθυμετρικός χάρτης με πιθανές υπεράκτιες περιοχές εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας [15]

Ο κλάδος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη με απώτερο σκοπό την οικονομική βιωσιμότητά του και τη βελτιστοποίηση των υπεράκτιων συστημάτων. Τα κύρια πεδία έρευνας (Research and Design, R&D) και οι απαραίτητες ενέργειες αναφέρονται παρακάτω: [16][17][18]

- Οικονομική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του κόστους του συνολικού συστήματος ενός αιολικού πάρκου (σχεδιασμός διάταξης, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση).
- Θαλάσσιος χωροταξικός σχεδιασμός (Maritime Spatial Planning, MSP) προκειμένου να διευκολυνθεί η βιομηχανία ως προς τον σχεδιασμό μελλοντικών

έργων και οι επενδύσεις στον τομέα να γίνουν ασφαλέστερες και άρα περισσότερες.

- Ακριβέστερη χαρτογράφηση θαλάσσιων περιοχών ως προς τα χαρακτηριστικά των ανέμων τους.
- Ορθή επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης.
- Διασύνδεση της κυμαινόμενης παραγωγής ισχύος με το υπόλοιπο δίκτυο και εξομάλυνση αυτής. Όταν δεν γίνεται διαβίβαση της ηλεκτρικής ισχύος με υποθαλάσσιες γραμμές μεταφοράς, πρέπει να αποφασιστεί αν θα αποθηκεύεται η ενέργεια και σε τι μορφή (π.χ. σε υδρογόνο) ή αν θα χρησιμοποιείται επιτόπου (π.χ. για αφαλάτωση θαλασσινού νερού).
- Αύξηση αξιοπιστίας και αποδοτικότητας Α/Γ και διερεύνηση εφικτότητας κατασκευής Α/Γ μεγαλύτερου μεγέθους καθώς και διασυνδεδεμένων αιολικών πάρκων μεγαλύτερου μεγέθους.
- Βελτιστοποίηση κατασκευών στήριξης υπεράκτιων Α/Γ.
- Σχεδιασμός μηχανολογικού εξοπλισμού κατάλληλου για τις ιδιαιτερότητες της υπεράκτιας λειτουργίας. Η τεχνογνωσία των χερσαίων Α/Γ πρέπει να προσαρμοστεί για τις συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στην περίπτωση των πλωτών συστημάτων πρέπει επιπλέον να προσαρμοστεί στις αναπόφευκτες επιταχύνσεις (πλεύση). Μεγάλο βάρος πρέπει να δοθεί στην διερεύνηση των ανοχών του κιβωτίου μετάδοσης κίνησης, των εδράνων, του δρομέα και της ατράκτου σε διατοιχισμό (roll), προνευτασμό (pitch), διαμήκη οριζόντια ταλάντωση (surge) και κατακόρυφη ταλάντωση (heave). Επιπλέον, απαιτούνται αλλαγές στους μηχανισμούς ελέγχου του προσανατολισμού - εκτροπής της ατράκτου (yaw system) και ρύθμισης των πτερυγίων.
- Σχεδιασμός της πλωτής κατασκευής. Είναι αναγκαία η ανάπτυξη εξειδικευμένων εργαλείων προσομοίωσης για πλήρως συζευγμένη ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος υπό την ταυτόχρονη δράση ανέμου και κυμάτων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της πλωτής κατασκευής και της Α/Γ πρέπει να διερευνηθεί πιο διεξοδικά, όπως επίσης και η βιωσιμότητα, η αξιοπιστία και η προσβασιμότητα ολόκληρου του συστήματος.
- Εκπαίδευση του απαραίτητου προσωπικού για την επάνδρωση της υπεράκτιας αγοράς αιολικής ενέργειας.

- Προγραμματισμός της εφοδιαστικής αλυσίδας με τέτοιο τρόπο που να μην καθυστερεί η εγκατάσταση νέων μονάδων από ελλείψεις υποδομής, όπως για παράδειγμα έλλειψη πλοίων ειδικών προδιαγραφών για την εγκατάσταση των μονάδων ή λιμένων ανεφοδιασμού για την εξυπηρέτησή τους.
- Σημαντική χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη.

## 1.4 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Για να γίνει εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στο υπεράκτιο περιβάλλον απαιτείται μια κατασκευή στήριξης της Α/Γ στις περισσότερες περιπτώσεις διαφορετική του απλού πύργου που χρησιμοποιείται στις χερσαίες εγκαταστάσεις, η οποία θα τη στηρίζει, θα εξασφαλίζει την όσο το δυνατόν ομαλότερη λειτουργία της αλλά και θα διατηρεί τη θέση της αν πρόκειται για πλωτή. Έτσι, οι υπεράκτιες Α/Γ αποτελούνται από δύο κύρια τμήματα, την ίδια την Α/Γ και την **κατασκευή στήριξης** αυτής.

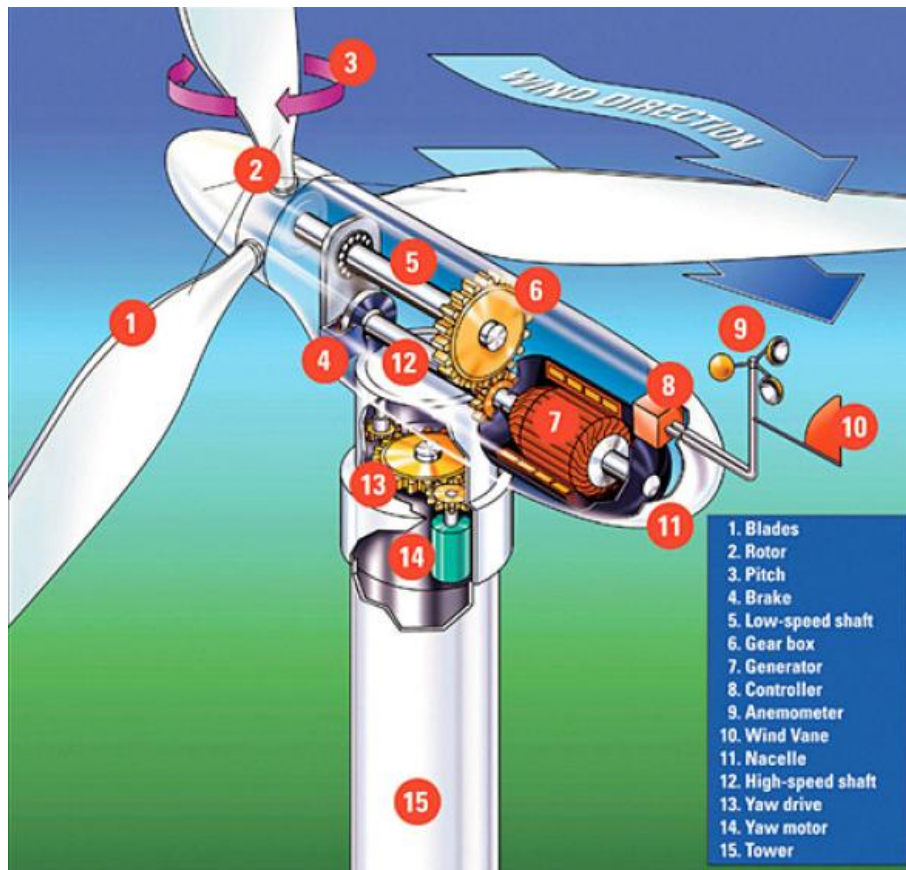
### Ανεμογεννήτριες

#### Δομή και κατηγορίες

Οι ανεμογεννήτριες είναι συσκευές που αξιοποιούν την αιολική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του ανέμου για να παράγουν μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια ηλεκτρική και μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: στις Α/Γ **οριζόντιου άξονα** και στις Α/Γ **κατακόρυφου άξονα**. Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα είναι οι πιο διαδεδομένες και θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης, ο οποίος επίσης περιστρέφεται ώστε να είναι πάντοτε παράλληλος και με την διεύθυνση του ανέμου. Μπορεί να είναι τύπου **ανάντη** (upwind), όπου τον άνεμο τον συναντούν πρώτα τα πτερύγια και έπειτα η άτρακτος ή τύπου **κατάντη** (downwind), όπου συμβαίνει το αντίθετο. Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια (τύπου έλικας). Το 75% των σύγχρονων Α/Γ έχουν τρία πτερύγια. Ένα από τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων πτερυγίων είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσής τους, ο οποίος οφείλεται στις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της αεροδυναμικής. <sup>[1]</sup>

Τα κυριότερα τμήματα μιας Α/Γ είναι ο **δρομέας** ή πτερωτή (rotor), η **άτρακτος** (nacelle) όπου συνήθως βρίσκεται και η **ηλεκτρογεννήτρια**, ο **πύργος στήριξης** και το **σύστημα ελέγχου**.



**Εικόνα 1.8** Η δομή μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα [19]

Ο δρομέας αποτελείται από τα πτερύγια που συνδέονται στην πλήμνη του και συνδέεται με τον κεντρικό (οριζόντιο) άξονα. Τα πτερύγια κατασκευάζονται από ενισχυμένο πολυεστέρα, ελαφρά κράματα μετάλλων κ.α. ή συνίστανται από περισσότερα του ενός υλικά (π.χ. συνδυασμός χάλυβα και πολυμερών).

Στην άτρακτο βρίσκεται ο κύριος άξονας της Α/Γ ο οποίος κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα ώστε να μπορεί να μεταφέρει ισχυρές στρεπτικές και καμπτικές ροπές. Η έδραση του άξονα γίνεται συνήθως σε δύο έδρανα, τα οποία είναι ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το ίδιο το βάρος του, όσο και τα ασκούμενα φορτία. Συνδεδεμένα με τον κύριο άξονα είναι επίσης το σύστημα μετάδοσης (περιλαμβάνει κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα στις υψηλές ταχύτητες στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρογεννήτριες), το σύστημα πέδησης για τη διακοπή της λειτουργίας αλλά και ο μηχανισμός εκτροπής ώστε τα πτερύγια να βρίσκονται πάντα στη διεύθυνση του ανέμου. Τέλος, στο ένα άκρο του κύριου άξονα συνδέεται και η ηλεκτρογεννήτρια που είναι σύγχρονη ή επαγωγική και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Στον πύργο στήριξης στηρίζεται η άτρακτος και άρα και ο δρομέας. Είναι κυλινδρικής ή δικτυωτής μορφής, αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα μεταξύ τους τμήματα και συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα.

Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί και ρυθμίζει τη λειτουργία της Α/Γ με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία της στις συνθήκες ανέμου για τις οποίες είναι σχεδιασμένη και τη διακοπή της στην περίπτωση πολύ μεγάλων ταχυτήτων ανέμου ή στην περίπτωση συντήρησης.

## Λειτουργία

Ο αέρας προκαλεί την περιστροφή των πτερυγίων του δρομέα μέσω αεροδυναμικής ώθησης με αποτέλεσμα την περιστροφή και του κυρίου άξονα της Α/Γ και τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και στη συνέχεια, μέσω της ηλεκτρογεννήτριας, σε ηλεκτρική.

Η κινητική ενέργεια αέρα μάζας  $m$  και ταχύτητας  $v$  δίνεται από τη σχέση:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Αν θεωρήσουμε κυλινδρικό όγκο ανέμου διατομής  $A$  τότε η παροχή μάζας αέρα  $\dot{m}$  ισούται με  $\rho Av$  σε  $kg/s$ . Επομένως, η κινητική ενέργεια του αέρα ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή η ισχύς του ανέμου, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

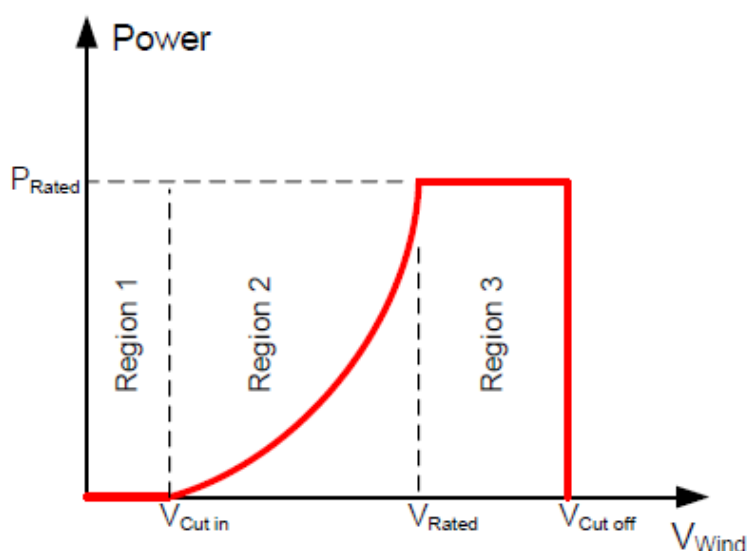
$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει πως η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη:

- της πυκνότητας του αέρα (η πυκνότητα του αέρα μειώνεται με το ύψος και είναι μικρότερη στις τροπικές περιοχές από ότι στις περιοχές με ψυχρό κλίμα και αυξάνεται στο θαλάσσιο περιβάλλον)
- της επιφάνειας μέσω της οποίας διέρχεται
- του κύβου της ταχύτητας

Από τα παραπάνω συμπεράσματα γίνεται αντιληπτή η καταλληλότητα των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων όταν επιθυμείται η μέγιστη εκμετάλλευση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Οι υπεράκτιες Α/Γ βρίσκονται σε ιδανικό περιβάλλον (δυνατοί και σταθεροί άνεμοι, αέρας μεγάλης πυκνότητας) ενώ είναι μεγαλύτερου μεγέθους (μεγαλύτερο ύψος ατράκτου και μεγαλύτερη διάμετρος πτερυγίων δρομέα).

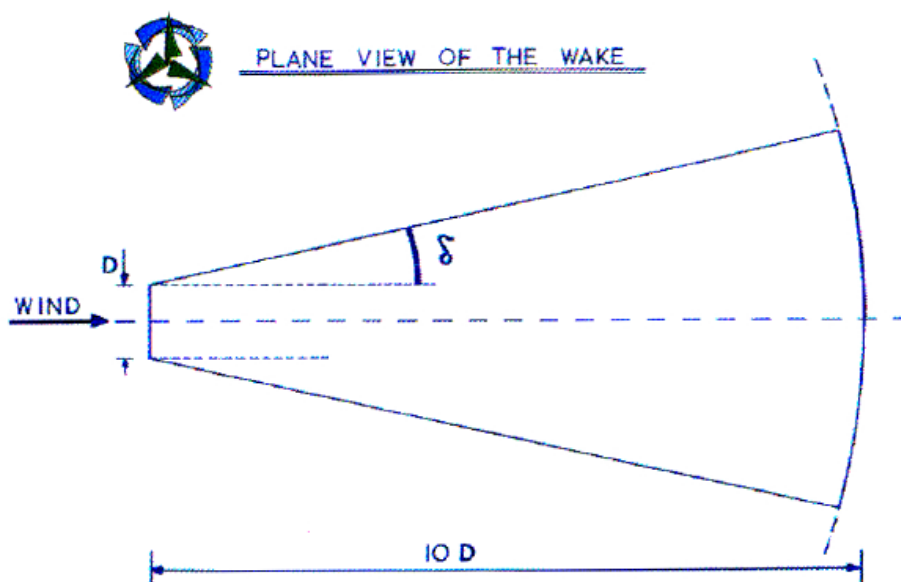
Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Α/Γ είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε μια περιοχή ταχυτήτων ανέμου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9. Η χαμηλότερη ταχύτητα ονομάζεται ταχύτητα έναρξης (cut in speed) και είναι η ταχύτητα κάτω από την οποία η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μικρή (μικρότερη από τις απώλειες του συστήματος) και άρα δεν συμφέρει να είναι σε λειτουργία η συσκευή. Η ονομαστική ταχύτητα (rated speed) είναι η ταχύτητα του ανέμου στην οποία η συσκευή επιτυγχάνει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ. Πάνω από αυτήν την ταχύτητα υπάρχουν μηχανισμοί ελέγχου με σκοπό να διατηρούν την παραγόμενη ενέργεια σταθερή για αυξανόμενη ταχύτητα ανέμου, μέχρι η τελευταία να φτάσει την ταχύτητα αποκοπής (cut off speed) η οποία είναι και η μέγιστη που μπορεί να αντέξει η συσκευή και στην οποία διακόπτεται η λειτουργία της. <sup>[20]</sup>



**Εικόνα 1.9** Η αποδιδόμενη ισχύς μιας Α/Γ ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και οι περιοχές λειτουργίας <sup>[20]</sup>

Όσον αφορά τη διάταξη πολλών Α/Γ σε ένα αιολικό πάρκο με τρόπον τέτοιο που να εξασφαλίζει την αποδοτική λειτουργία τους, υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των Α/Γ έτσι ώστε η λειτουργία της μίας να μην

επηρεάζει τη λειτουργία των άλλων. Πιο συγκεκριμένα, με το πέρασμα του ανέμου από το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων μιας Α/Γ δημιουργείται στην κατάντη κατεύθυνση ο ομόρους (wake) της συσκευής. Η περιοχή αυτή που χαρακτηρίζεται από υψηλή τύρβη και μείωση των ταχυτήτων του ανέμου, ονομάζεται περιοχή σκίασης και δεν ενδείκνυται για τοποθέτηση άλλης Α/Γ, διότι στην περίπτωση αυτή θα λειτουργούσε με μειωμένη απόδοση αλλά και καταπόνηση λόγω της τύρβης. Η περιοχή σκίασης και άρα και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ Α/Γ εξαρτάται από την κατεύθυνση του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης και τη διάμετρο του δρομέα. Στην Εικόνα 1.10 φαίνεται η περιοχή σκίασης μιας Α/Γ με δρομέα διαμέτρου  $D$ , όπου η γωνία της περιοχής σκίασης είναι  $12^\circ$ .



Εικόνα 1.10 Ενδεικτική περιοχή σκίασης μιας Α/Γ [21]

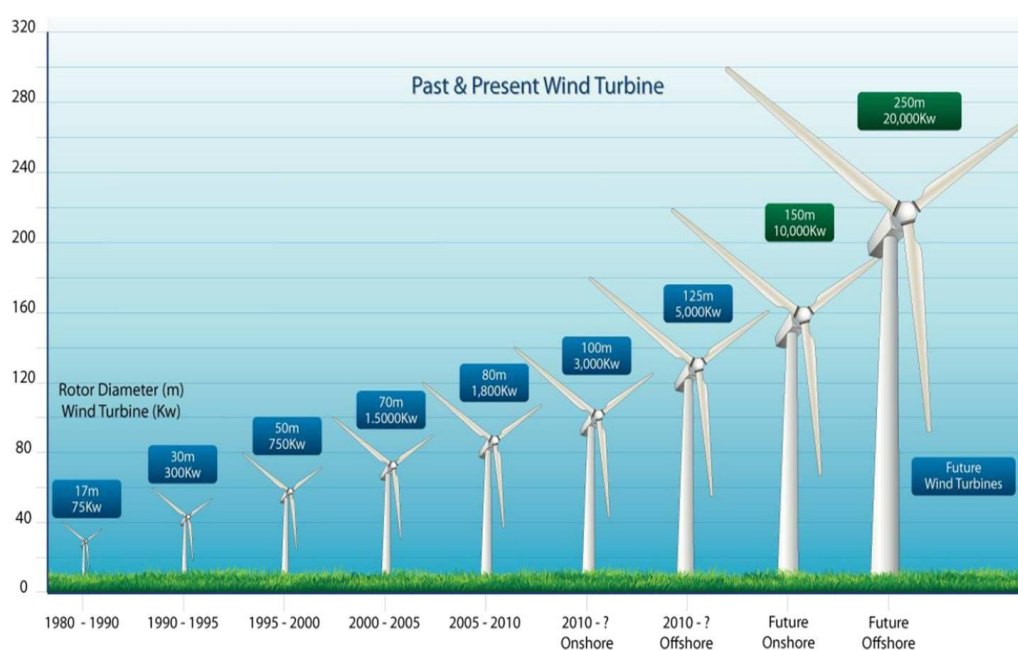
## Εξελίξεις

Βασικός παράγοντας για την εντατικοποίηση της έρευνας στις Α/Γ και την επιθυμία να αυξηθεί το μέγεθός τους είναι η σημαντική ανάπτυξη που αναμένεται να υπάρξει στον υπεράκτιο αιολικό τομέα. Αυτό διότι στο υπεράκτιο περιβάλλον υπάρχει σχεδόν ανεξάντλητος διαθέσιμος χώρος αλλά και η δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερων κατασκευών.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η ονομαστική ισχύς των Α/Γ αυξήθηκε από τα 250 kW στα 5 MW και η διάμετρος των πτερυγίων του δρομέα από τα 25 m στα 125 μέτρα.



Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως Α/Γ ισχύος 3-5 MW, ενώ ήδη έχουν κατασκευαστεί και Α/Γ μέχρι 8 MW. Σύμφωνα με μια μελέτη εφικτότητας που διεξήχθη από την Ευρωπαϊκή κοινοπραξία για την αιολική ενέργεια UpWind, η κατασκευή Α/Γ ισχύος 20 MW αναμένεται το 2020. Η διάμετρος του δρομέα μιας τέτοιας Α/Γ θα είναι 200 m και η άτρακτος θα είναι τοποθετημένη σε μεγαλύτερο ύψος. Για την κατασκευή τους θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στη σχεδίαση, τα υλικά που χρησιμοποιούνται αλλά και στον τρόπο λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, αναλογικά με το μέγεθός τους θα είναι ελαφρύτερες και πιο εύκαμπτες από τις σημερινές. [22]



Εικόνα 1.11 Η εξέλιξη του μεγέθους των χερσαίων και των υπεράκτιων Α/Γ [23]

Η μεγαλύτερη Α/Γ σε λειτουργία σήμερα είναι η πρότυπη V164 8 MW, από την εταιρία Vestas η οποία είναι εγκατεστημένη, προς το παρόν, στη τοποθεσία δοκιμαστικής λειτουργίας στο Osterild της Δανίας, ενώ προορίζεται για υπεράκτια αιολικά πάρκα. [24]



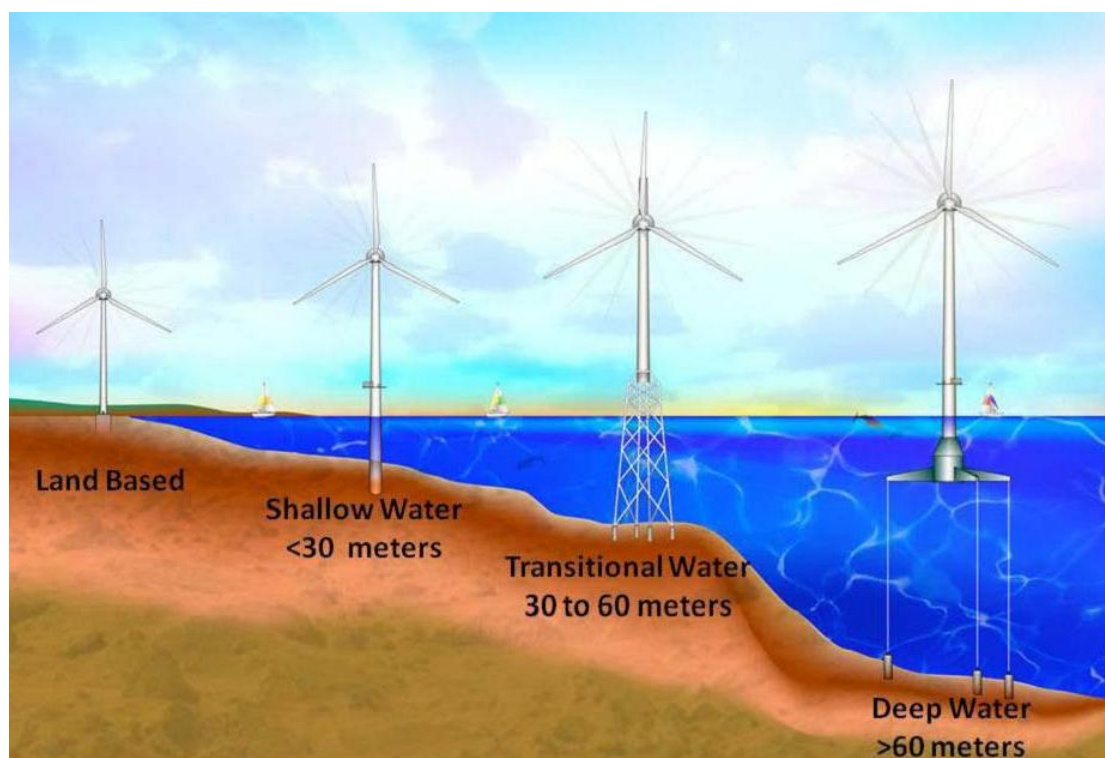
**Εικόνα 1.12** Η πρότυπη Α/Γ V164 των 8 MW σε δοκιμαστική λειτουργία [25]

Όταν μεγαλώνει το μέγεθος μιας Α/Γ, αυξάνει και το κόστος κατασκευής, μεταφοράς και εγκατάστασης. Η ηλεκτρική τους παραγωγή όμως είναι αναλογικά υψηλότερη από μια μικρότερη Α/Γ και έτσι τελικά αποτελούν πιο συμφέρουσα λύση (ισχυρότεροι και πιο σταθεροί άνεμοι όταν αυξάνει το ύψος, μεγαλύτερη διάμετρος δρομέα επιτρέπεται από το αυξημένο ύψος της ατράκτου). Επίσης, η έκταση που θα χρησιμοποιούν οι μεγαλύτερες Α/Γ θα είναι μικρότερη από αυτήν που χρησιμοποιούν οι σημερινού μεγέθους Α/Γ για να παράγουν την ίδια ισχύ, λόγω των αποστάσεων μεταξύ των Α/Γ ενός αιολικού πάρκου που πρέπει να τηρηθούν λόγω των περιοχών σκίασης.

## Κατασκευές στήριξης

Οι υπεράκτιες Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο στήριξής τους: τις **σταθερές** και τις **πλωτές**. Οι σταθερές υποστηρίζονται από βάσεις που είναι πακτωμένες στον πυθμένα και εμποδίζουν κάθε κίνηση τους, ενώ οι πλωτές υποστηρίζονται από πλωτήρες οι οποίοι είναι προσδεμένοι στον πυθμένα με κάποιο σύστημα αγκύρωσης που απλώς περιορίζει την κίνησή τους. Ο περιορισμός της κίνησής τους ποικίλει και εξαρτάται τόσο από το είδος του επιλεγμένου πλωτήρα όσο και από το είδος του συστήματος αγκύρωσης.

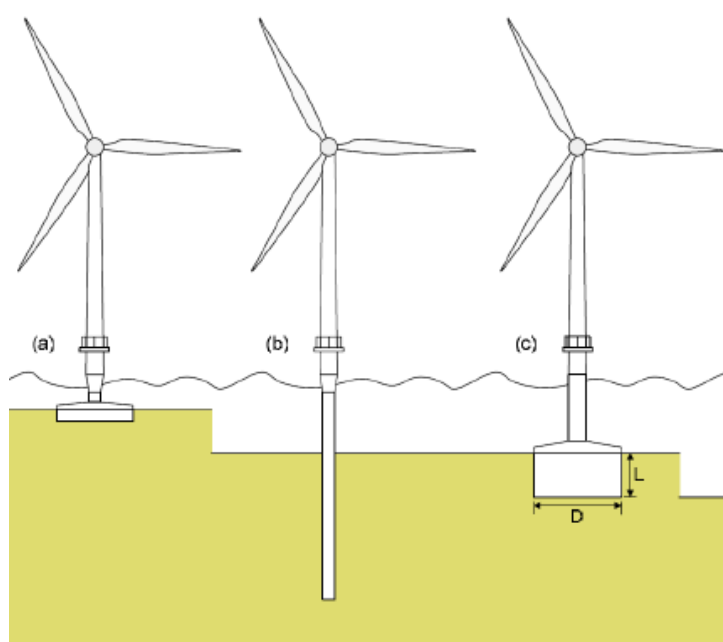
Βασικός παράγοντας για την επιλογή του τρόπου στήριξης μια υπεράκτιας Α/Γ είναι το βάθος της θάλασσας στην τοποθεσία εγκατάστασης και λειτουργίας, το οποίο καθορίζει και τον τρόπο στήριξης που αποτελεί την εφικτότερη τεχνικά αλλά και οικονομικότερη λύση. Ανάλογα με το βάθος, μπορεί να γίνει διαχωρισμός των κατασκευών στήριξης σε **κατασκευές μικρού βάθους**, **κατασκευές μεσαίου βάθους** και **κατασκευές μεγάλου βάθους** – **πλωτές κατασκευές**.



Εικόνα 1.13 Κατασκευές στήριξης Α/Γ ανάλογα με το βάθος νερού [26]

## Μικρού βάθους

Για μικρά βάθη, έως 30 m, η οικονομικότερη λύση είναι η στερέωση της Α/Γ στον πυθμένα είτε με εισχώρηση ενός χαλύβδινου πυλώνα στο έδαφος (Monopile), είτε με εδράσεις βαρύτητας (Gravity Base), είτε με εδράσεις κενού/αναρρόφησης (Suction Bucket), όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 1.14. Στις παραπάνω περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται χερσαίες Α/Γ με επιπλέον προστασία κατά του οξειδωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος και των οποίων τα ηλεκτρικά συστήματα έχουν αναβαθμιστεί και προσαρμοστεί κατάλληλα.



**Εικόνα 1.14** Σταθερές κατασκευές στήριξης Α/Γ μικρού βάθους, όπου (α) έδραση βαρύτητας, (β) μονού πυλώνα και (γ) έδραση κενού/αναρρόφησης [27]

### Μονού Πυλώνα (Monopile)

Πρόκειται για έναν απλό, συνήθως κυλινδρικό χαλύβδινο πυλώνα που εισχωρεί στον πυθμένα και στον οποίο στηρίζεται είτε απευθείας είτε μέσω μεταβατικού τμήματος ο πύργος της Α/Γ. Η απλότητα των κατασκευών μονού πυλώνα και η σχεδόν αυτούσια μεταφορά τους από το χερσαίο στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι που κάνουν συμφέρουσα τη χρήση τους στα μικρά βάθη. Όμως, η σχετικά μικρή ακαμψία τους κάνει ασύμφορη τη χρήση τους στα μεγαλύτερα βάθη (άνω των 20-30 m). Σε αυτά τα βάθη, για να διατηρηθεί επαρκής ακαμψία της κατασκευής απαιτείται πολύ

μεγάλος όγκος πρώτων υλών και πιο εξειδικευμένα μηχανήματα μεταφοράς και εγκατάστασης. <sup>[26][28]</sup>

### **Εδράσεις Βαρύτητας (Gravity Base)**

Οι εδράσεις βαρύτητας εξασφαλίζουν στήριξη και ευστάθεια κυρίως μέσω του μεγάλου βάρους της. Κατασκευάζονται από χάλυβα και σκυρόδεμα και αποτελούνται από έναν κεντρικό άξονα που υποδέχεται τον πύργο της Α/Γ καθώς και από μια επίπεδη βάση που ακουμπάει στον πυθμένα. Η συγκεκριμένη λύση είναι πιο άκαμπτη από τους μονούς πυλώνες και ενώ το κόστος της αυξάνεται επίσης σημαντικά με την αύξηση του βάθους, αυξάνεται το βάθος στο οποίο αποτελεί συμφέρουσα λύση, εξαιτίας της χρήσης σκυροδέματος. Τέλος, απαιτείται ανάλυση της σύστασης του πυθμένα ώστε να εξασφαλιστεί ομοιογένεια και καλή προετοιμασία του εδάφους στο σημείο εγκατάστασης. <sup>[26][29]</sup>

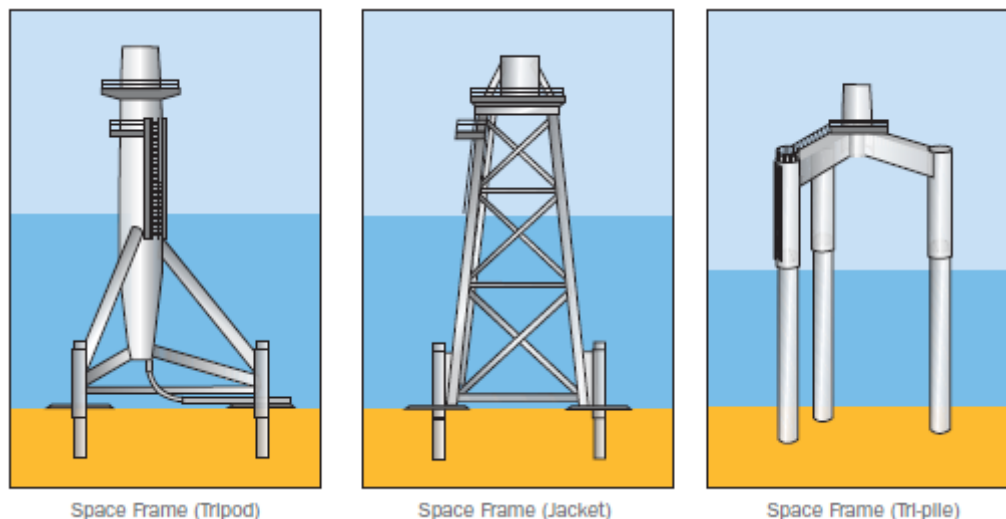
### **Εδράσεις Κενού/Αναρρόφησης (Suction Bucket)**

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συνδυασμό έδρασης μονού πυλώνα και βαρύτητας. Οι κατασκευές αυτές αποτελούνται από έναν κύριο, χαλύβδινο άξονα κωνικής μορφής, το κάτω μέρος του οποίου αποτελείται από κοιλότητες, οι οποίες γεμίζουν με νερό κατά την τοποθέτηση στον πυθμένα. Στη συνέχεια, αντλείται το νερό από τις κοιλότητες προς τα έξω και η διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται είναι υπεύθυνη για την στήριξη της κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται να γίνει ούτε διάτρηση ούτε ειδική προετοιμασία του πυθμένα. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εύκολης μετακίνησης σε διαφορετικό σημείο.

## **Μεσαίου βάθους**

Για βάθη από 30 m έως 60 m, χρησιμοποιούνται επίσης σταθερές κατασκευές, που στερεώνονται στον πυθμένα. Στην περίπτωση αυτή όμως απαιτούνται βάσεις μεγαλύτερου μεγέθους ή/και με περισσότερα σημεία στήριξης. Οι βασικότερες κατηγορίες κατασκευών στήριξης μεσαίου βάθους είναι οι μεταλλικοί πύργοι (Jacket), τα τρίποδα (Tripod) και οι τριπλοί πυλώνες (Tri-pile), όπως φαίνονται και στην Εικόνα 1.15. Όπως και στην περίπτωση των κατασκευών μικρού βάθους έτσι και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται χερσαίες Α/Γ με επιπλέον προστασία κατά

του οξειδωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος και των οποίων τα ηλεκτρικά συστήματα έχουν αναβαθμιστεί και προσαρμοστεί κατάλληλα.



Εικόνα 1.15 Σταθερές κατασκευές στήριξης Α/Γ μεσαίου βάθους <sup>[30]</sup>

### **Μεταλλικοί Πύργοι (Jacket)**

Οι μεταλλικοί πύργοι αποτελούνται από κύρια κοίλα μέρη τα οποία συνθέτουν έναν πλαισιακό φορέα και από ενδιάμεσα δευτερεύοντα στοιχεία (braces). Προκατασκευάζονται, ρυμουλκούνται, ποντίζονται και θεμελιώνονται στον θαλάσσιο πυθμένα με συστήματα βαρύτητας ή με πασσάλους. Ο μεταλλικός πύργος εκτείνεται είτε μέχρι την άτρακτο της Α/Γ (Full-height Jacket) είτε διαμορφώνεται σε πυλώνα στον οποίο στηρίζεται η Α/Γ (Submerged Jacket with transition to tube tower). Εξαιτίας της αυξημένης ακαμψίας τους αλλά και των μικρότερων επιφανειών, οι φορτίσεις λόγω κυματισμών είναι μειωμένες σε σχέση με τους μονούς πυλώνες. Βέβαια το κόστος κατασκευής και συντήρησής τους είναι επίσης αυξημένο. <sup>[26][30][31]</sup>

### **Τρίποδα (Tripod)**

Τα τρίποδα κατασκευάζονται από χάλυβα και αποτελούνται από τρεις διαγώνιους συνδέσμους οι οποίοι οδηγούν σε τρεις πυλώνες. Ο καθένας από του πυλώνες εισχωρεί στον πυθμένα της θάλασσας, όπως στην περίπτωση του μονού πυλώνα. Σε σχέση με τον μονό πυλώνα όμως παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία και άρα η

εναλλακτική αυτή είναι κατάλληλη για μεγαλύτερα βάθη. Στην ουσία τα τρίποδα αποτελούν μια ελαφρύτερη και απλοποιημένη εκδοχή των μεταλλικών πύργων. Μειονέκτημά τους είναι η απαίτηση για σχετικά επίπεδο πυθμένα. Τέλος, τα τρίποδα μπορούν να συνδυαστούν με εδράσεις κενού/αναρρόφησης. <sup>[30][32][33]</sup>

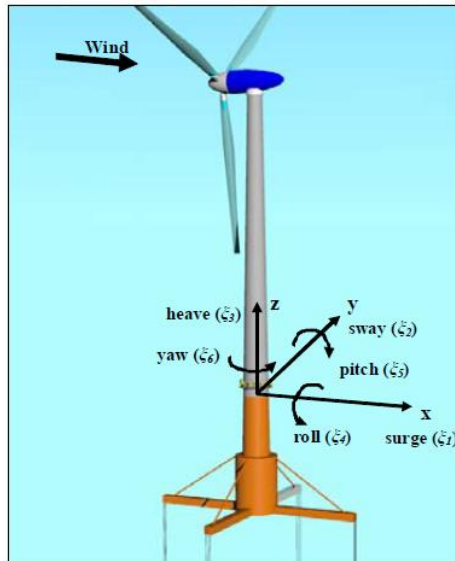
### **Τριπλοί Πυλώνες (Tri-Pile)**

Οι τριπλοί πυλώνες είναι σχετικά νέος σχεδιασμός. Αποτελούνται από τρεις χαλύβδινους πυλώνες οι οποίοι εισχωρούν στον πυθμένα και πάνω στους οποίους, στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας, τοποθετείται ένα τρίποδο. Η διάμετρος των πυλώνων δεν χρειάζεται να είναι τόσο μεγάλη όσο στην περίπτωση του μονού πυλώνα ενώ το άνοιγμα του κατώτερου τμήματος μπορεί να προσαρμοστεί στις γεωλογικές συνθήκες της τοποθεσίας εγκατάστασης. <sup>[32][33]</sup>

### **Μεγάλου βάθους – Πλωτές κατασκευές**

Όσο μεγαλώνει το βάθος της θάλασσας στο επιθυμητό σημείο εγκατάστασης μιας υπεράκτιας Α/Γ, αυξάνουν και το κόστος αλλά και οι τεχνικές δυσκολίες στην περίπτωση που γίνει χρήση σταθερής κατασκευής στήριξης. Έτσι, για βάθη άνω των 60 m περίπου, ο προτιμώμενος τρόπος στήριξης μια υπεράκτιας Α/Γ είναι μέσω κάποιας πλωτής κατασκευής, η οποία με τη σειρά της προσδένεται στον πυθμένα της θάλασσας μέσω αγκύρωσης.

Όταν μια Α/Γ στηρίζεται σε πλωτή κατασκευή, αναπόφευκτα υπεισέρχονται στο σύστημα έξι επιπλέον βαθμοί ελευθερίας, τρεις γραμμικοί (ταλάντωση κατά τους άξονες x, y, z – surge, sway, heave) και τρεις γωνιακοί (ταλάντωση περί του άξονες x, y, z – roll, pitch, yaw).



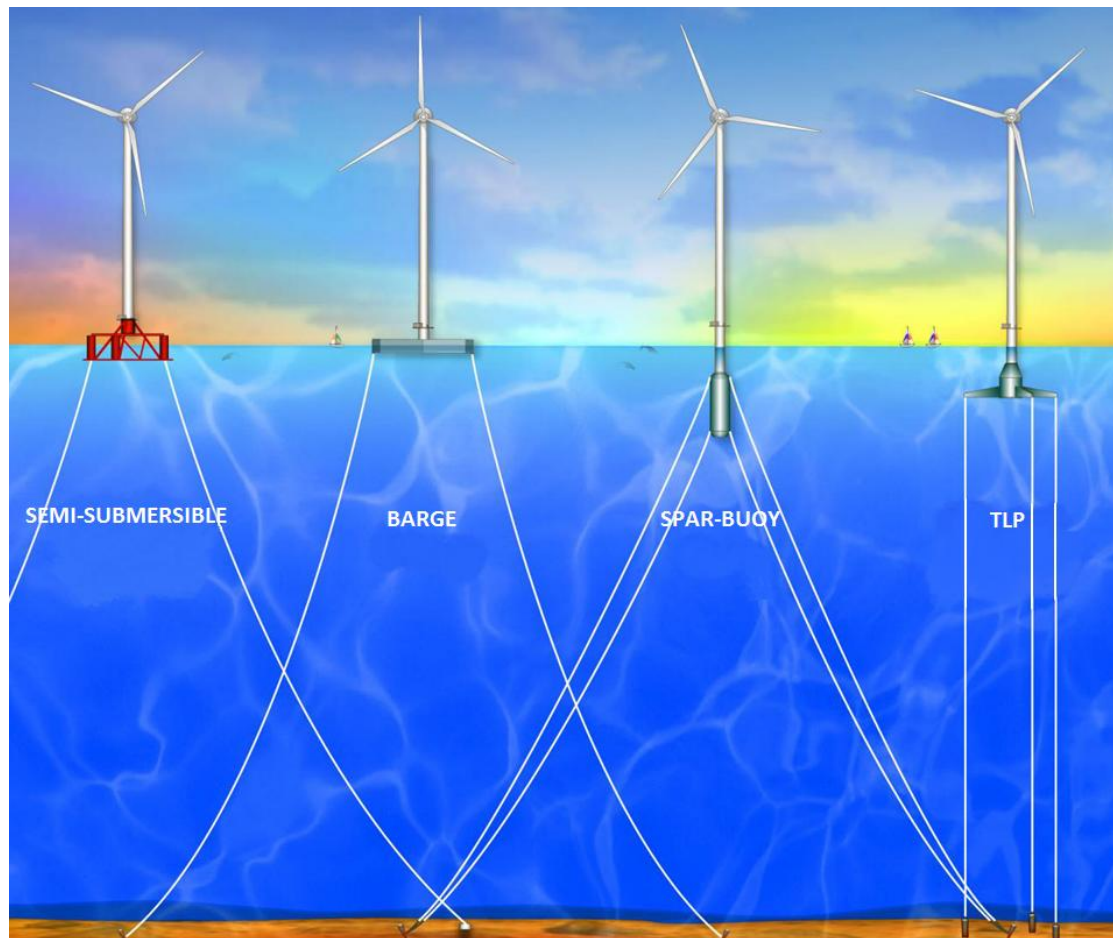
Εικόνα 1.16 Οι έξη βαθμοί ελευθερίας μιας πλωτής Α/Γ [34]

Η ελευθερία κίνησης που έχουν οι πλωτές κατασκευές, καθιστά απαραίτητη την προσαρμογή των χερσαίων Α/Γ πιο ριζικά απ' ότι στην περίπτωση των σταθερών υπεράκτιων κατασκευών στήριξης. Έτσι, εκτός από την προετοιμασία τους για τις ιδιαίτερες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος, απαιτείται η χρήση υλικών που να είναι πιο ανθεκτικά στην κόπωση αλλά και ο εξοπλισμός τους με εξελιγμένα συστήματα ελέγχου.

Μια κατάλληλη πλωτή κατασκευή οφείλει να εξασφαλίζει αρκετή άντωση ώστε να αντισταθμίζεται το βάρος της Α/Γ αλλά και να περιορίζει κυρίως την κατακόρυφη ταλάντωση heave αλλά και τις γωνιακές ταλαντώσεις roll και pitch.

Όπως και στις υπεράκτιες βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, έτσι και στην περίπτωση των πλωτών Α/Γ είναι εφικτή, από τεχνολογικής άποψης, η κατασκευή πολλών διαφορετικών διατάξεων. Μπορεί να γίνει κατηγοριοποίησή τους βάσει του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνουν υδροστατική ευστάθεια, βάσει του αριθμού Α/Γ που μπορούν να υποστηρίξουν ή και βάσει του τύπου αγκύρωσης που χρησιμοποιούν. Παρακάτω θα αναλυθούν τέσσερις γενικές κατηγορίες κατασκευών, βασική διαφορά των οποίων είναι ο τρόπος με τον οποίον επιτυγχάνουν υδροστατική ευστάθεια.





Εικόνα 1.17 Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες πλωτών κατασκευών [26]

### Ευστάθεια μέσω ισάλου επιφάνειας - κατασκευή τύπου barge

Η κατασκευή τύπου barge (ή floater) είναι συνήθως μια απλή ορθογωνική εξέδρα που επιτυγχάνει ευστάθεια χάρη στη μεγάλη ίσαλο επιφάνεια, ενώ η θέση της διατηρείται με συμβατικές γραμμές αγκύρωσης. Το μικρό βύθισμα σχεδίασης επιτρέπει την χρήση της σε οποιοδήποτε βάθος νερού. Η σχεδίασή της είναι τέτοια που την καθιστά οικονομικά αποδοτική, ενώ η εγκατάστασή της στην περιοχή λειτουργίας είναι απλή διαδικασία.

Ένα μειονέκτημά της είναι η ευαισθησία που παρουσιάζει στους προσπίπτοντες κυματισμούς, διότι το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής βρίσκεται πάνω από τη ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, η εξέδρα τύπου barge ακολουθεί τις κινήσεις των κυματισμών αντί να τα τέμνει και παρουσιάζει κινήσεις μεγάλου εύρους. Από τις κινήσεις αυτές επηρεάζονται οι φορτίσεις που δέχεται ο πύργος της εγκατεστημένης Α/Γ, καθώς και η ρύθμιση της ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής

του δρομέα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Το τελευταίο γεγονός καθιστά την εξέδρα τέτοιου τύπου ακατάλληλη για περιοχές όπου οι θαλάσσιες συνθήκες είναι σκληρές και κατάλληλη μόνο για προασπισμένες θαλάσσιες περιοχές. <sup>[10][20][26]</sup>

### **Ευστάθεια μέσω αγκυρώσεων – κατασκευή τύπου TLP**

Η κατασκευή τύπου TLP (Tension-Leg Platform) αποτελείται από μια κυλινδρική γάστρα με ακτίνες στο κατώτερο τμήμα της, στις οποίες προσδένονται οι γραμμές αγκύρωσης. Η κατασκευή αγκυρώνεται με γραμμές αγκύρωσης που βρίσκονται υπό κατακόρυφη προένταση και είναι αυτές που προσδίδουν στην κατασκευή υδροστατική ευστάθεια. Το βύθισμα στο οποίο σταθεροποιείται τελικά η κατασκευή μέσω των αγκυρώσεων είναι μεγαλύτερο από αυτό στο οποίο θα ισορροπούσε από μόνη της, με αποτέλεσμα να υπάρχει περίσσεια άντωσης. Η περίσσεια άντωσης αυξάνει περαιτέρω την προένταση. Χρησιμοποιούνται γραμμές αγκύρωσης υψηλής αξονικής ακαμψίας ώστε να περιορίζονται όσο τον δυνατόν περισσότερο οι κατακόρυφες κινήσεις της κατασκευής.

Συγκρινόμενες με την εξέδρα τύπου barge, επηρεάζεται λιγότερο από τους προσπίπτοντες κυματισμούς. Αυτό συμβαίνει διότι το μεγαλύτερο μέρος της γάστρας βρίσκεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον, η χρήση γραμμών αγκύρωσης υπό προένταση αυξάνει την αντίσταση της κατασκευής στις κινήσεις roll, pitch και heave. Βασικά μειονεκτήματα αυτής της σχεδίασης είναι αφενός το μεγάλο κόστος του συστήματος αγκύρωσης και αφετέρου η απαραίτητη προϋπόθεση το έδαφος του πυθμένα στο σημείο εγκατάστασης να είναι τέτοιο που να μπορεί να αντέξει τις μεγάλες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό. Οι σχετικά μικρές κινήσεις και περιστροφές της εξέδρας TLP επιτρέπουν τη χρήση συστημάτων ελέγχου σχεδόν πανομοιότυπων με αυτά που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των χερσαίων Α/Γ. Αυτό είναι πολύ σημαντικό και αποτελεί σχεδιαστικό προτέρημα της εξέδρας τύπου TLP, αφού με μικρές αλλαγές στο σύστημα ελέγχου και ενίσχυση του πύργου (παρουσιάζει αυξημένη κόπωση σε σχέση με το χερσαίο περιβάλλον), μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι Α/Γ που έχουν μελετηθεί για τη στεριά, χωρίς να χρειάζεται επανασχεδίαση. <sup>[10][20][26]</sup>

### **Ευστάθεια μέσω έρματος – κατασκευή τύπου spar-buoy**

Η κατασκευή τύπου spar-buoy (ανωστικό σώμα) είναι απλή κατασκευή και αποτελείται από μια λεπτόγραμμη κατακόρυφη κυλινδρική γάστρα, στο κατώτερο τμήμα της οποίας βρίσκεται μια δεξαμενή έρματος, ενώ γίνεται χρήση συμβατικών γραμμών αγκύρωσης. Το μεγάλο βύθισμά της και η ύπαρξη έρματος στο κατώτερο τμήμα της (υψηλή ροπή αντίστασης και μεγάλο μοχλοβραχίονα επαναφοράς), είναι τα χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν υδροστατική ευστάθεια. Το μεγάλο βύθισμα αποσβένει επίσης τις κινήσεις heave.

Όπως στην περίπτωση της εξέδρας τύπου TLP έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, το μεγαλύτερο μέρος της γάστρας βρίσκεται υποθαλάσσια και άρα η αλληλεπίδραση της κατασκευής με τους κυματισμούς είναι μειωμένη. Βέβαια, λόγω των συμβατικών γραμμών αγκύρωσης (χρησιμοποιούνται λόγω χαμηλότερου κόστους), έχει μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων. Κατά το σχεδιασμό μια κατασκευής τύπου spar-buoy δίνεται προσοχή στο να προκύψουν ιδιοσυχνότητες roll και pitch χαμηλότερες από τις συχνότητες διέγερσης των κυματισμών για τις περισσότερες καταστάσεις θάλασσας. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τους άλλου δύο γενικούς τύπους εξεδρών, υπάρχει περιορισμός όσον αφορά το βάθος των περιοχών εγκατάστασης, εξαιτίας του μεγάλου απαιτούμενου βυθίσματος για τη λειτουργία της. Η δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής τύπου spar-buoy είναι κάπου ενδιάμεσα μεταξύ της συμπεριφοράς μιας εξέδρας τύπου barge και μιας εξέδρας τύπου TLP. <sup>[10][20][26]</sup>

### **Ευστάθεια μέσω ισάλου επιφάνειας και έρματος – κατασκευή τύπου semi-submersible**

Η κατασκευή τύπου semi-submersible είναι μια πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα που αποτελείται από απλά ή σύνθετα κατακόρυφα κυλινδρικά σώματα (συχνά σε τριγωνική διάταξη) τα οποία ενώνονται μεταξύ τους και με το κατάστρωμα, εάν αυτό υπάρχει, μέσω κατασκευαστικών δοκών (brackets) διαφόρων διαμέτρων. Η υδροστατική ευστάθεια εξασφαλίζεται μέσω ισάλου επιφάνειας και έρματος. Το έρμα είναι τοποθετημένο εντός των κυλινδρικών σωμάτων, το μεγαλύτερο τμήμα των οποίων βρίσκεται κάτω από την ίσαλο επιφάνεια προσδίδοντας άντωση στην κατασκευή. Συνήθως στην περίπτωση της ημιβυθισμένης εξέδρας χρησιμοποιούνται συμβατικές γραμμές αγκύρωσης.

Στην περίπτωση της εξέδρας τύπου semi-submersible, ο κύριος όγκος της κατασκευής βρίσκεται κάτω από την ίσαλο επιφάνεια και κατά συνέπεια η κατασκευή ταλαιπωρείται λιγότερο από τις φορτίσεις λόγω κυματισμών σε σχέση με μια εξέδρα

τύπου barge. Το μεγαλύτερο μέρος της ευστάθειας το προσδίδει η ίσαλος επιφάνεια ενώ το έρμα κυρίως προσδίδει τη δυνατότητα μεταβολής του βυθίσματος (ρύθμιση άντωσης) και ρύθμισης της διαγωγής.<sup>[35][36]</sup>

## 1.5 ΠΛΩΤΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

### Γενικά στοιχεία

Η ανάπτυξη πλωτών Α/Γ με σκοπό την εκμετάλλευση των υπεράκτιων αιολικών πόρων που βρίσκονται σε βάθη στα οποία δεν μπορούν ή δεν συμφέρει οικονομικά να χρησιμοποιηθούν σταθερές κατασκευές αποτελεί αναγκαία εξέλιξη. Οι πλωτές κατασκευές παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα και κάποιες δυσκολίες, οι οποίες στο μέλλον αναμένεται να μειωθούν. <sup>[37]</sup>

### **Πλεονεκτήματα**

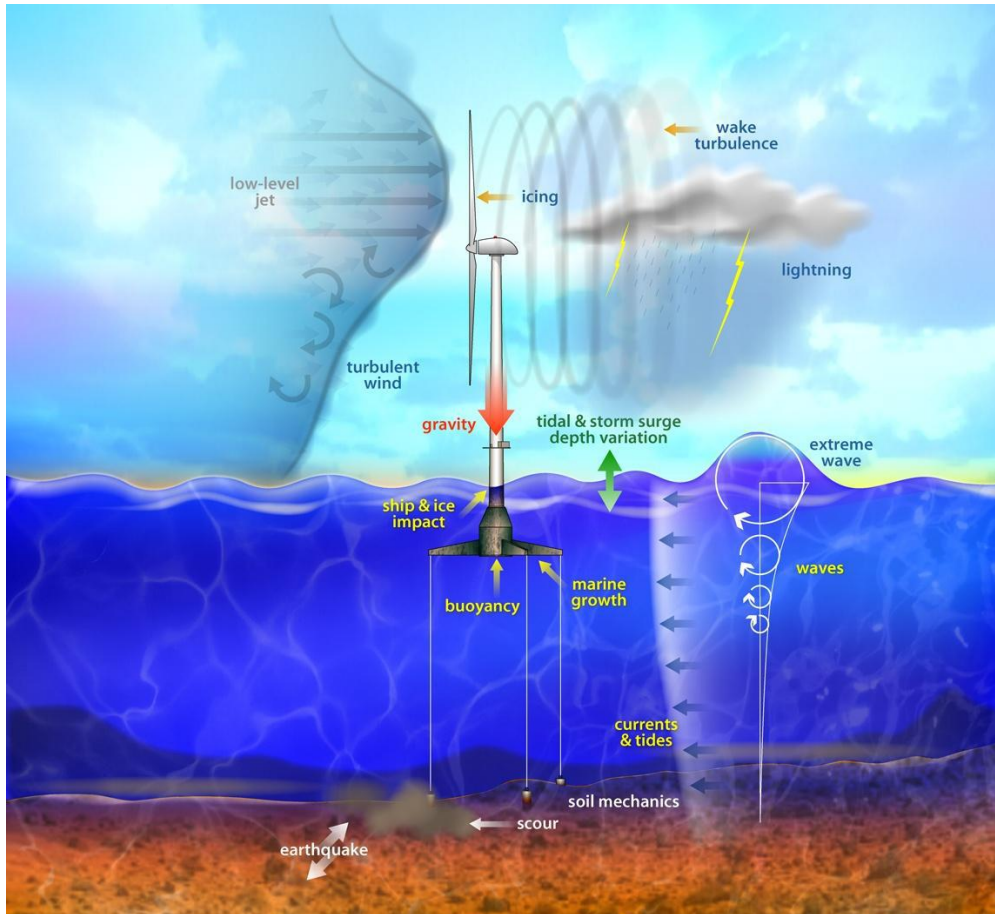
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε βάθη μεγαλύτερα των 60m(σε αντίθεση με τις σταθερές κατασκευές) και να εκμεταλλευτούν το μεγαλύτερο μέρος του αιολικού δυναμικού του πλανήτη. Η τοποθεσία εγκατάστασης είναι λοιπόν συνήθως μακριά από τις ακτές, όπου επικρατούν ισχυρότεροι και πιο σταθεροί άνεμοι.
- Δέχονται μικρότερα φορτία από την επίδραση των κυματισμών.
- Το βάρος της κατασκευής είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τις σταθερές κατασκευές.
- Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει η δυνατότητα πλήρους συναρμολόγησης επί ξηράς. Στη συνέχεια ρυμουλκούνται ως το σημείο εγκατάστασης, ενώ μπορούν επίσης να αποσυναρμολογηθούν και να μετακινηθούν αφήνοντας το σημείο στο οποίο είχαν εγκατασταθεί ανέπαφο.
- Λόγω της ευελιξίας τοποθέτησής και μετακίνησής τους σε περίπτωση ανάγκης, δεν εμποδίζουν θαλάσσιους δρόμους, δεν δυσχεραίνουν την αλιεία και τον τουρισμό και η οπτική όχληση δεν αποτελεί πρόβλημα.
- Έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης εκμετάλλευσης και άλλων μορφών ανανεώσιμης ενέργειας (κυματική ενέργεια, ενέργεια θαλάσσιων ρευμάτων, ηλιακή ενέργεια).

## Μειονεκτήματα

- Εξαιτίας των ισχυρών φορτίσεων και των δυσμενών συνθηκών υπό τις οποίες λειτουργούν, η βελτιστοποίηση και η αξιοπιστία των πλωτών κατασκευών είναι απαραίτητες.
- Η προσβασιμότητα είναι δύσκολη λόγω της απόστασής τους από τη στεριά και των συχνά δύσκολων καιρικών συνθηκών.
- Η παραγόμενη ενέργεια βρίσκεται μακριά από τα καταναλωτικά κέντρα (στη στεριά) και πρέπει να αποφασίζεται πως θα αποθηκεύεται/μεταφέρεται.
- Δεν υπάρχουν ακόμη ανεμολογικά και κυματικά δεδομένα για όλες τις πιθανές τοποθεσίες εγκατάστασης.
- Δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς οομόρους και η τυρβώδης ροή που αναπτύσσεται γύρω από τις Α/Γ και το πώς επηρεάζονται οι κινήσεις και οι φορτίσεις των διπλανών πλωτών Α/Γ.
- Οι σχεδιάσεις και το μέγεθος των Α/Γ που θα χρησιμοποιηθούν δεν έχουν βελτιστοποιηθεί για τις πλωτές εφαρμογές.

Μια πλωτή Α/Γ λειτουργεί σε περιβάλλον από το οποίο δέχεται πολλές, ισχυρές και διαφορετικές φορτίσεις και καταπονήσεις (Εικόνα 1.18), οι οποίες επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά της και καθορίζουν τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και του κατασκευαστικούς περιορισμούς.

Η διαδικασία της σχεδίασης και της εξέλιξης ενός συστήματος γενικότερα, είναι μια συνεχής διαδικασία συμβιβασμών μεταξύ των τεχνικά βέλτιστων και οικονομικά φθηνότερων επιλογών. Στην περίπτωση των πλωτών Α/Γ, οι συμβιβασμοί πρέπει να γίνονται και μεταξύ των τεχνικών επιλογών του κάθε υποσυστήματος διότι η πολυπλοκότητα είναι μεγάλη. Πρέπει να γίνει σύζευξη, κατά κύριο λόγο, των δυναμικών αποκρίσεων της Α/Γ με αυτές του πλωτήρα, υπό την επίδραση στοχαστικών μοντέλων κυματισμού και ανέμου, ενώ παράλληλα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι υπόλοιπες επιδράσεις του περιβάλλοντος στο οποίο θα λειτουργήσει. <sup>[34]</sup>



**Εικόνα 1.18** Η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί μια πλωτή Α/Γ [38]

Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί, προς το παρόν, το γεγονός ότι το μέγεθος και η περιοδικότητα των φορτίσεων δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη βεβαιότητα ούτε η δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Κατά συνέπεια, έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός πιθανών σχεδιάσεων, χωρίς ωστόσο ακόμη να είναι σαφές το ποιος υπερτερούν.

Οι προτεινόμενες σχεδιάσεις είτε ανήκουν αμιγώς σε μία από τις γενικές κατηγορίες πλωτών κατασκευών (barge, spar-buoy, TLP, semi-submersible) είτε συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά διαφορετικών κατηγοριών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι χαρακτηριστικά όπως, ο τύπος του πλωτήρα που επιλέγεται, το βάθος στο σημείο εγκατάστασης, τα χαρακτηριστικά του πυθμένα, η ευαισθησία της Α/Γ και οι περιορισμοί κόστους καθορίζουν και την επιλογή του συστήματος αγκύρωσης και αν αυτό που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι με γραμμές συμβατικού τύπου (catenary moorings) ή με προτεταμένους κλάδους (tension ή taught-leg moorings).

## Επιλεγμένη παρουσίαση πλωτών ανεμογεννητριών

### Hywind

Το Σεπτέμβριο του 2009 ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση της Hywind, της πρώτης πιλοτικής πλωτής Α/Γ φυσικού μεγέθους και ηλεκτρικής ισχύος της τάξης των MW στον κόσμο. Το σημείο τοποθέτησης βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα, 10 km νοτιοδυτικά του δήμου Karmøy της Νορβηγίας (η τοποθεσία επιλέχθηκε λόγω των ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών - για να δοκιμαστεί η τεχνολογία) και έχει βάθος 200 m. Η ιδέα γεννήθηκε το Μάιο του 2008 από το παράρτημα StatoilHydro του ενεργειακού κολοσσού Statoil και είναι σχεδιασμένη για βάθη μεταξύ 120-700 m.



Εικόνα 1.19 Η πλωτή Α/Γ Hywind<sup>[39]</sup>

Η Hywind είναι εξοπλισμένη με μία Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας και ισχύος 2.3 MW της Siemens που εδράζεται σε μακρόστενο κυλινδρικό πλωτήρα τύπου spar-buoy, σχεδιασμένο από την γαλλική εταιρία Technip. Το περίβλημα του πλωτήρα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα (είναι επίσης δυνατή η χρήση σκυροδέματος σε μελλοντικές εκδόσεις), όπως επίσης και ο προσαρτημένος πάνω στον πλωτήρα πύργος της Α/Γ. Στο κάτω μέρος του πλωτήρα τοποθετούνται, ως μόνιμο έρμα, νερό,



χαλίκι και πέτρες, ώστε τελικά να αποκτήσει το επιθυμητό βύθισμα των 100 m. Η πρόσδεση στον πυθμένα επιτυγχάνεται με τρεις γραμμές αγκύρωσης (χαλύβδινα συρματόσχοινα) συμβατικού τύπου με βάρη μάζας (clump weights). Τελικά, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται με υποθαλάσσιο καλώδιο μήκους 13 km στην ακτή.

Η συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων γίνεται εξ' ολοκλήρου σε προφυλαγμένα ύδατα και έτσι η ρυμούλκηση στο σημείο μόνιμης εγκατάστασης, όπου και απομένει μόνο η σύνδεση με τις γραμμές αγκύρωσης και το καλώδιο ρεύματος, εκτελείται σε κατακόρυφη θέση. Η εγκατάσταση έγινε από την Statoil Hydro σε συνεργασία με τη Siemens, ενώ μαζί ανέπτυξαν και το κατάλληλο σύστημα ελέγχου των κινήσεων της κατασκευής με πρωταρχικό σκοπό τη μερική απόσβεση των κινήσεων συντονισμού και τη μείωση της κόπωσης. Ο ελεγκτής αυτός είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί και σε διαφορετικές Α/Γ. Τα κύρια χαρακτηριστικά της πλωτής Α/Γ Hywind φαίνονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα. <sup>[39][40]</sup>

Ισχύς Α/Γ	2.3 MW
Βάρος Α/Γ	138 tons
Διάμετρος ρότορα	82.4 m
Ύψος πλήμνης από ίσαλο επιφάνεια	65 m
Διάμετρος στην ίσαλο γραμμή	6 m
Βύθισμα	100 m
Διάμετρος βυθισμένου τμήματος	8.3 m
Εκτόπισμα	5300 m <sup>3</sup>
Κατάλληλα βάθη	120-700 m
Γραμμές αγκύρωσης	3 συμβατικές γραμμές

**Πίνακας 1.1** Κύρια χαρακτηριστικά της Hywind <sup>[40]</sup>

Η εγκατάσταση της πρώτης πλωτής Α/Γ Hywind έγινε με στόχο να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση της κατασκευής με τους ανέμους και τους θαλάσσιους κυματισμούς και να συλλεχθούν αρκετά δεδομένα για τη βελτιστοποίησή της επόμενης γενιάς Hywind. Τα πρώτα δύο χρόνια λειτουργίας, η Hywind κρίθηκε επιτυχημένη σχεδίαση, αφού η παραγωγή ρεύματος ξεπέρασε τις προσδοκίες. Πιο συγκεκριμένα, από την αρχή της λειτουργίας της το Σεπτέμβριο του 2009 μέχρι την τελευταία φετινή

ενημέρωση έγινε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με 32.5 GWh. Το έτος 2011 υπολογίστηκε ο συντελεστής λειτουργίας του συστήματος και βρέθηκε ίσος με 50% που θεωρείται υψηλός. Επιπλέον, οι κινήσεις του πλωτήρα δεν έχουν προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία της Α/Γ, ενώ η προσβασιμότητα και η διαδικασία συντήρησης είναι παρόμοιες με αυτές των σταθερών υπεράκτιων Α/Γ. Τέλος, κατάφερε να αντέξει υπό τις φορτίσεις καταγεγραμμένων ανέμων ταχύτητας 40 m/s και κυματισμών ύψους 19 m. <sup>[15][40][41]</sup>

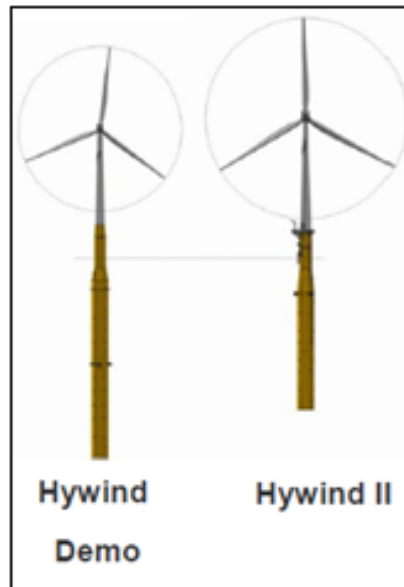


**Εικόνα 1.20** Διαδικασία ελέγχου και συντήρησης της Hywind <sup>[42]</sup>

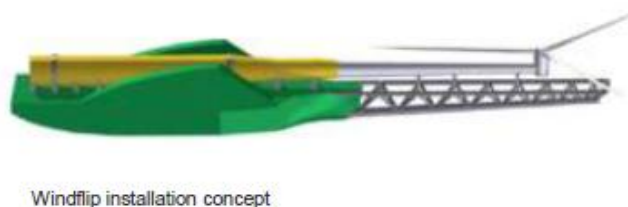
Επόμενο βήμα για την Statoil είναι η κατασκευή ενός πιλοτικού αιολικού πάρκου που θα περιλαμβάνει μικρό αριθμό HywindII (Εικόνα 1.21), μιας βελτιωμένης εκδοχής της πρωτότυπης Hywind, ελαφρύτερης και μεγαλύτερης. Πιθανές τοποθεσίες εγκατάστασης είναι είτε στη Maine των Η.Π.Α., είτε στην Σκωτία, με επικρατέστερη την τελευταία. Το πιλοτικό πάρκο υπολογίζεται ότι θα έχει 12-15 MW εγκατεστημένης ισχύος και η κατασκευή του, η εκκίνηση της οποίας έχει προγραμματιστεί για το 2016, αναμένεται να οδηγήσει σε: <sup>[43]</sup>

- Βελτιστοποίηση συναρμολόγησης και εγκατάστασης (Εικόνα 1.22)
- Έλεγχο σε πραγματικές συνθήκες της νέας HywindII
- Έλεγχο της αξιοπιστίας ενός τέτοιου πάρκου

- Μείωση κατασκευαστικού ρίσκου και κόστους ενός μελλοντικού πάρκου πολύ μεγαλύτερου μεγέθους



**Εικόνα 1.21** Πρωτότυπη και εξελιγμένη μορφή της Hywind <sup>[43]</sup>



**Εικόνα 1.22** Διευκόλυνση εγκατάστασης με το σύστημα Windflip <sup>[43]</sup>

Τελικός στόχος της Statoil είναι να κατασκευάσει πλωτά αιολικά πάρκα μεγάλης έκτασης και ισχύος της τάξης των 500-1000 MW, αποτελούμενα από πλωτές Α/Γ Hywind επόμενης γενιάς ισχύος άνω των 5 MW η καθεμία, των οποίων το κόστος εκτιμάται ότι θα πέσει τη δεκαετία 2020-2030 στα ίδια επίπεδα με εκείνα των σταθερών αιολικών πάρκων, εξαιτίας της οικονομία κλίμακας και της γενικότερης ανάπτυξης της αγοράς. Φυσικά, επιθυμία της Statoil είναι να πρωτοστατήσει στην αγορά των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. <sup>[43]</sup>

## Windfloat

Τον Οκτώβριο του 2011 έγινε στα ανοιχτά των ακτών της Aguçadoura στην Πορτογαλία η εγκατάσταση της δεύτερης ανά τον κόσμο πλωτής Α/Γ σε φυσικό μέγεθος (ισχύος της τάξης των MW). Πρόκειται για την εξέδρα Windfloat της εταιρίας Principle Power, η οποία και συναρμολογήθηκε εξ' ολοκλήρου στη στεριά και στη συνέχεια δεξαμενίστηκε και ρυμουλκήθηκε για 400 km, έως το σημείο εγκατάστασης. Το γεγονός ότι ακόμα και η Α/Γ είχε τοποθετηθεί πάνω στον πλωτήρα πριν τον δεξαμενισμό της κατασκευής έκανε δυνατή τη μεταφορά και εγκατάσταση της Windfloat χωρίς τη χρήση ειδικών πλοίων βαρέας ανυψωτικής ικανότητας. Επιπλέον, με βύθισμα λίγο μικρότερο των 20 m, είναι κατάλληλη για χρήση σε βάθη άνω των 40 m και μπορεί να υποστηρίξει Α/Γ ισχύος 3-10 MW. [44]



Εικόνα 1.23 Η πλωτή Α/Γ Windfloat και το έρμα στο εσωτερικό ενός κυλίνδρου της [44][45]

Η Windfloat είναι εξοπλισμένη με μια Α/Γ ισχύος 2 MW η οποία στηρίζεται σε τριγωνική εξέδρα τύπου semi-submersible. Η πλωτή εξέδρα αποτελείται από τρεις κυλίνδρους, στη βάση των οποίων είναι προσαρτημένες οκταγωνικές πλάκες (heave plates). Οι πλάκες βελτιώνουν σημαντικά την υδροδυναμική συμπεριφορά της κατασκευής διότι προσθέτουν αδρανειακή αντίσταση και αποσβένουν την τυρβώδη ροή. Η πρόσδεση στον πυθμένα επιτυγχάνεται με τέσσερις αλυσιδωτές ή πολυεστερικές γραμμές αγκύρωσης συμβατικού τύπου, οι οποίες διατηρούν χαμηλή την πολυπλοκότητα και μικρό το κόστος της κατασκευής.

Μια καινοτομία της Windfloat είναι ο εξοπλισμός της με ένα σύστημα ελέγχου της διαγωγής (Εικόνα 1.23). Στο εσωτερικό του κάθε κυλίνδρου της τριγωνικής διάταξης, υπάρχουν δύο ειδών έρμα. Στο κατώτερο τμήμα υπάρχει το στατικό έρμα της

κατασκευής ενώ στο ανώτερο τμήμα υπάρχει το ‘δυναμικό’ έρμα. Το σύστημα διαγωγής λειτουργεί μεταφέροντας το ‘δυναμικό’ έρμα από τον έναν κύλινδρο στον άλλον ανάλογα με τις εκάστοτε αιολικές συνθήκες που αντιμετωπίζει η κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διατήρηση της παραγόμενης ενέργειας σε σχετικά σταθερά επίπεδα, παρά τα μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του ανέμου. [44]

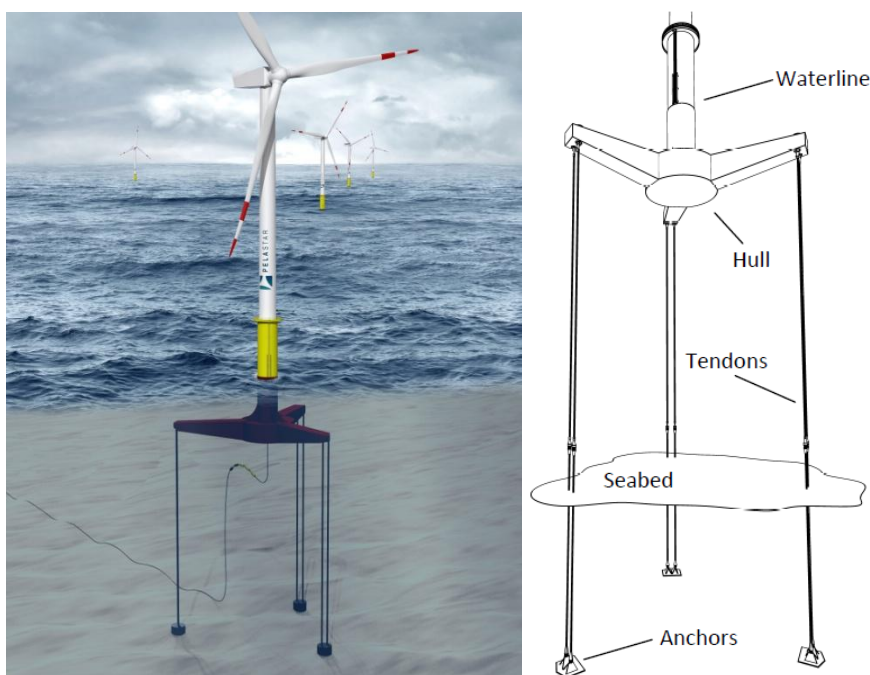


**Εικόνα 1.24** Συναρμολόγηση της Windfloat στη στεριά [46]

Επόμενο βήμα για την Principle Power (Pacific) είναι η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 30 MW, 15-18 μίλια από την ακτή Coos, στο Oregon των Η.Π.Α. Το αιολικό πάρκο θα αποτελείται από πέντε πλωτήρες Windfloat κάθε ένας από τους οποίους θα στηρίζει μια υπεράκτια Α/Γ των 6 MW κατασκευασμένη από τη Siemens, ενώ το βάθος στο σημείο εγκατάστασης είναι περίπου 350 m. Η ολοκλήρωση του πάρκου αναμένεται το 2017. [47]

## Pelastar

Ο πλωτήρας Pelastar σχεδιάστηκε από την εταιρία The Glosten Associates το 2006. Το 2011 επιλέχθηκε, μεταξύ πολλών σχεδιαστικών προτάσεων, από το Πανεπιστήμιο του Maine, με σκοπό να εγκατασταθεί στο πάρκο επίδειξης που ετοιμάζει για υπεράκτιες Α/Γ μεσαίας κλίμακας. Την ίδια χρονιά πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο Πανεπιστήμιο του Maine με μοντέλο κλίμακας 1:50 για την βελτιστοποίηση της κατασκευής. Ο πλωτήρας Pelastar αποτελεί την φθηνότερη λύση μεταξύ των πλωτήρων για υπεράκτιες Α/Γ. Πρόκειται για απλή κατασκευή χωρίς μηχανικά μέρη, η οποία συναρμολογείται εξ' ολοκλήρου στη στεριά πριν μεταφερθεί στο σημείο εγκατάστασης. Μπορεί να εγκατασταθεί σε σημεία με βάθος 50-200 m και να υποστηρίξει Α/Γ ισχύος 5-10 MW.

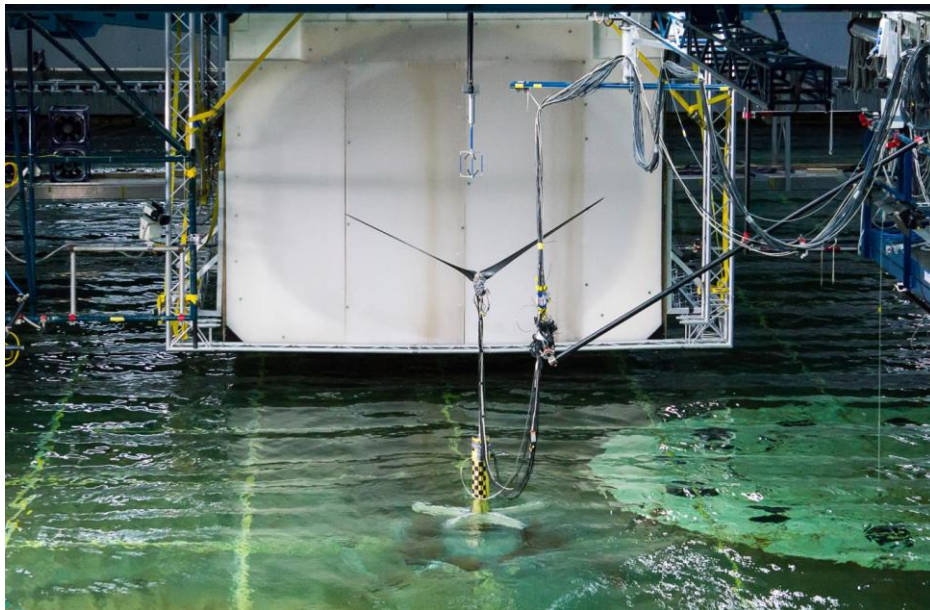


Εικόνα 1.25 Ηπλωτή Α/Γ Pelastar [48][49]

Ο πλωτήρας Pelastar είναι τύπου TLP και είναι κατασκευασμένος εξ' ολοκλήρου από χάλυβα. Έχει κατασκευαστεί από την Nippon Steel με τρόπο που να ελαχιστοποιείται το βάρος του και να έχει χρόνο ζωής 25-30 χρόνια. Το άνω τμήμα της γάστρας είναι κυλινδρικής μορφής και υποδέχεται τον πύργο της Α/Γ ενώ το κάτω τμήμα που είναι πλήρως βυθισμένο αποτελείται από τρεις βραχίονες ο καθένας από τους οποίους χωρίζεται με εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές κατά το μήκος του. Στους βραχίονες συνδέονται οι προτεταμένες γραμμές αγκύρωσης (tendons) μικρής διαμέτρου που θα

κατασκευάζονται από χάλυβα ή σύνθετα υλικά, οι οποίες εδράζονται στον πυθμένα μέσω αγκυρώσεων κατακόρυφης φόρτισης (vertical-load anchors).

Ο τρόπος με τον οποίον αγκυρώνεται ο πλωτήρας Pelastar εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα. Οι κινήσεις και επιταχύνσεις pitch, roll και heave είναι σχεδόν μηδενικές με αποτέλεσμα το μειωμένο ρυθμό φθοράς της κατασκευής και τη διατήρηση σταθερής και σε υψηλά επίπεδα παραγωγής ενέργειας. Έτσι, ο πλωτήρας αυτός μπορεί να υποστηρίξει οποιαδήποτε υπεράκτια Α/Γ χωρίς να απαιτούνται επιπρόσθετες προσαρμογές. <sup>[48][50]</sup>



**Εικόνα 1.26** Πειράματα στη δεξαμενή με το μοντέλο κλίμακας 1:50 <sup>[51]</sup>

Το 2013 η εταιρία The Glosten Associates υπέγραψε συμφωνία με το Ινστιτούτο Τεχνολογιών Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου (UK-based Energy Technologies Institute, ETI) σύμφωνα με την οποία θα γίνει πιλοτική εγκατάσταση ενός πλωτήρα Pelastar εξοπλισμένου με Α/Γ των 6 MW δυτικά του Η.Β., το 2015. Αν η λειτουργία κριθεί επιτυχής, το 2017 θα ακολουθήσει εγκατάσταση επιπλέον Α/Γ. <sup>[52]</sup>

## Hexicon

Η πλατφόρμα Hexicon σχεδιάστηκε από την ομώνυμη Σουηδική εταιρία. Από την πρώτη σχεδίαση μέχρι σήμερα έχουν μελετηθεί πολλές εναλλακτικές σχεδιάσεις, χωρίς καμία να έχει ακόμη εγκατασταθεί. Έχουν όλες κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Όλες οι σχεδιάσεις είναι πλατφόρμες τύπου floater/semi-submersible μεγάλου μεγέθους με χαρακτηριστικό τους ότι φιλοξενούν παραπάνω της μιας Α/Γ. Αυτό το χαρακτηριστικό τις κάνει πιο συμφέρουσες από τους πλωτήρες που υποστηρίζουν μία και μόνο Α/Γ από την άποψη εξοικονόμησης χώρου. Το μεγάλο τους μέγεθος επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε οποιοσδήποτε συνθήκες θάλασσας ενώ υπάρχει και η δυνατότητα μεταφοράς τους σε διαφορετική τοποθεσία είτε με ίδια μέσα (thrusters) είτε μέσω ρυμούλκησης.



**Εικόνα 1.27** Εξαγωνική πλατφόρμα Hexicon εξοπλισμένη με Α/Γ δύο μεγεθών [53]

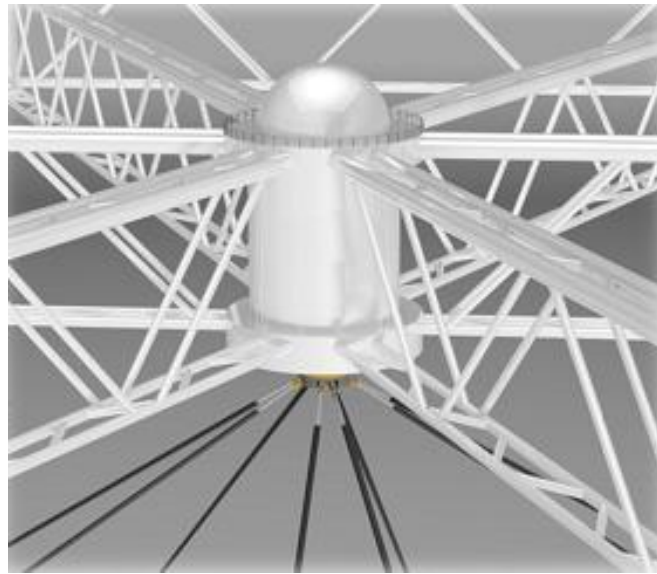
Οι Α/Γ δεν υποστηρίζονται από δικούς τους πύργους αλλά στηρίζονται απευθείας στους κυλίνδρους που ανήκουν στην πλατφόρμα και βρίσκονται στις κορυφές των ακμών. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα εντός των κυλίνδρων να τοποθετηθούν συστήματα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.

Ολόκληρη η κατασκευή προστατεύεται από μια πατενταρισμένη επίστρωση που την προστατεύει από τη διάβρωση, ταλαντώσεις και κόπωση, μονώνοντας ταυτόχρονα



τους εσωτερικούς χώρους. Ως αποτέλεσμα, η ανάγκες συντήρησης είναι μειωμένες και ο χρόνος ζωής μιας πλατφόρμας Hexicon υπερβαίνει τα 40 χρόνια.

Οι πλατφόρμες Hexicon χρησιμοποιούν σύστημα προτεταμένων αγκυρώσεων για την έδρασή τους στον πυθμένα. Επιπλέον, και σε αντίθεση με άλλες σχεδιάσεις, όλες οι γραμμές αγκύρωσης καταλήγουν σε έναν κεντρικό πυργίσκο όπου φιλοξενείται ένας ηλεκτρικός στροφέας (Εικόνα 1.28), ο οποίος επιτρέπει την περιστροφή ολόκληρης της πλατφόρμας έτσι ώστε οι Α/Γ να διατηρούν συνεχώς τη διεύθυνση του ανέμου. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται σε υψηλά επίπεδα η απόδοση του συστήματος. <sup>[54][55]</sup>



**Εικόνα 1.28** Ο ηλεκτρικός στροφέας στον οποίο προσδένονται οι προτεταμένες γραμμές αγκύρωσης <sup>[54]</sup>

### **Εναλλακτικές εφαρμογές**

- Εξαγωνική πλατφόρμα (Εικόνα 1.27) εξοπλισμένη με 6 Α/Γ οριζόντιου τύπου και ισχύος 6.5 MW η καθεμία και 30 Α/Γ κατακόρυφου τύπου και ισχύος 0.5 MW η καθεμία. Εκτός από 54 MW ισχύ προερχόμενη από το σύνολο των Α/Γ η πλατφόρμα μπορεί να εξοπλιστεί και με σύστημα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας το οποίο θα αποδίδει ισχύ 15 MW. Το μήκος της κατασκευής είναι 750 m και το πλάτος 530 m. Το βύθισμα της είναι περίπου 28 m. Αυτή η εκδοχή ενδεχομένως να εγκατασταθεί τα επόμενα χρόνια στα ανοιχτά της Μάλτας.
- Απλοποιημένη τριγωνική πλατφόρμα H3-18MW μήκους 330 m και πλάτους 190 m που θα είναι εξοπλισμένη με 3 Α/Γ ισχύος 6 MW η καθεμία (σύνολο 18 MW). Το βύθισμα της πλήρως εξοπλισμένης πλατφόρμας θα είναι 15 m και το ύψος των ατράκτων των Α/Γ, 105 m.

- Απλοποιημένη πλατφόρμα σχήματος τραπεζίου H4-24MW (Εικόνα 1.30) μήκους 480 m και πλάτους 200 m που θα είναι εξοπλισμένη με 4 Α/Γ ισχύος 6 MW η καθεμία (σύνολο 24 MW). Το βύθισμα της πλήρως εξοπλισμένης πλατφόρμας θα είναι 15-20 m και το ύψος των ατράκτων των Α/Γ, 120 m.
- Απλοποιημένη τετραγωνική πλατφόρμα H4-24MW-D με παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνη σχήματος τραπεζίου.
- Απλοποιημένη πλατφόρμα εξαγωνικού σχήματος H6-36MW (Εικόνα 1.29) μήκους 520 m και πλάτους 400 m που θα είναι εξοπλισμένη με 6 Α/Γ ισχύος 6 MW η καθεμία (σύνολο 36 MW). Το βύθισμα της πλήρως εξοπλισμένης πλατφόρμας θα είναι 15-20 m και το ύψος των ατράκτων των Α/Γ, 120 m.

Πρόσφατα, η εταιρία Hexicon δημιούργησε συνεργασία με την εταιρία SSAB που ειδικεύεται στον χάλυβα υψηλής αντοχής ώστε με τη βοήθειά της να κατασκευάσει κάποια από τις απλοποιημένες μορφές με σκοπό να γίνει πιλοτική εγκατάσταση σε κάποια τοποθεσία στα ανοιχτά της Σουηδίας, το 2017. <sup>[54]</sup>






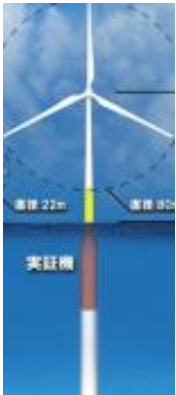
**Εικόνα 1.29** Η πλατφόρμα H6-36MW <sup>[54]</sup>

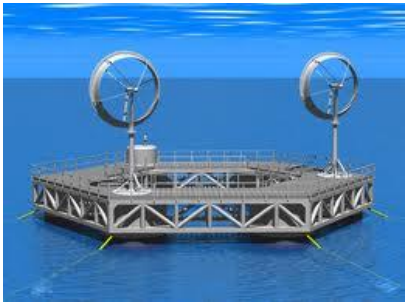



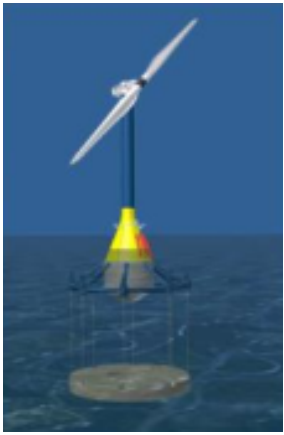
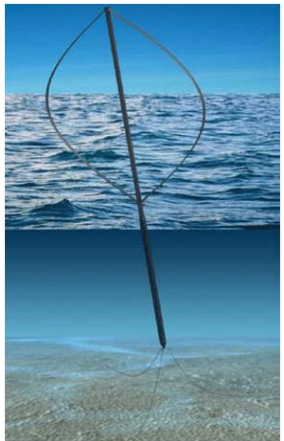
**Εικόνα 1.30** Η πλατφόρμα H4-24MW <sup>[54]</sup>



## Συγκεντρωτικός πίνακας πλωτών κατασκευών <sup>[37][52][56][57][58]</sup>

N	ΟΝΟΜΑ ΕΡΓΟΥ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΙΔΟΣ ΠΛΩΤΗΡΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ		ΠΡΟΤΥΠΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ		ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	
						Ισχύς Α/Γ	Έτος	Ισχύς Α/Γ	Έτος	Ισχύς Α/Γ	Έτος
<b>ΕΡΓΑ ΣΥΝΔΕΔΑΜΕΝΑ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ</b>											
1	<b>Hywind</b> 	Νορβηγία	Statoil	Spar-buoy	120-700 m	-	-	2.3 MW	2009-2012	3-7 MW	2016
2	<b>WindFloat</b> 	Πορτογαλία	Principle Power	Semi-sub	50 m	-	-	2 MW	2011	5-7 MW	2017

3	<p><b>DeepCWind</b></p> 	<p>Η.Π.Α.</p>	<p>Κοινοπραξία University of Maine, AEWC, Technip, NREL, MARIN κ.ά.</p>	<p>Semi-sub</p>	<p>-</p>	<p>Μοντέλο σε δεξαμενή</p>	<p>2011</p>	<p>20 kW</p>	<p>2013</p>	<p>6 MW</p>	<p>2017</p>
4	<p><b>Kabashima Island Spar, Kyushu</b></p> 	<p>Ιαπωνία</p>	<p>Min. of Environment, Kyoto University, Fuji Heavy Industries, Toda Construction, NMRI of Japan, Hitachi</p>	<p>Spar-buoy</p>	<p>100 m</p>	<p>100 kW</p>	<p>2012</p>	<p>2 MW</p>	<p>2013</p>	<p>-</p>	<p>-</p>




5	<b>Haikata Bay Wind Lens, Kyushu</b> 	Ιαπωνία	Kyushu University	Floater (hybrid)	-	2x3 kW	2011	-	-	-	-
ΣΧΕΔΙΑ/ΕΡΓΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΔΙΑ											
1	<b>Advanced Floating Turbine</b> 	Η.Π.Α.	Nautica Windpower	Spar-buoy	-	-	-	-	2012	5 MW	2014


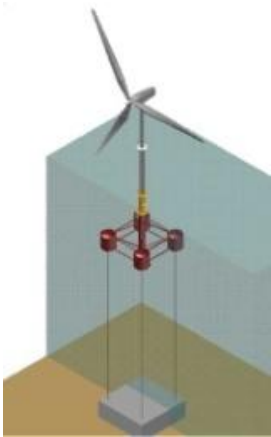
2	<b>Blue H TLP</b> 	Ολλανδία	Blue H	TLP	50 m	Υπό κλίμακα 5 MW	2008 2012	5-7 MW	2015	5-7 MW	2016
3	<b>Deepwind</b> 	Ευρώπη	Έργο της E.E.	Spar-buoy	-	-	-	1 kW	2012	5 MW	-
4	<b>DIWET</b>	Γαλλία	Pole Mer	Semi-sub	-	-	-	-	-	-	-

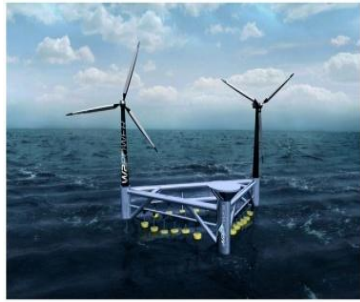

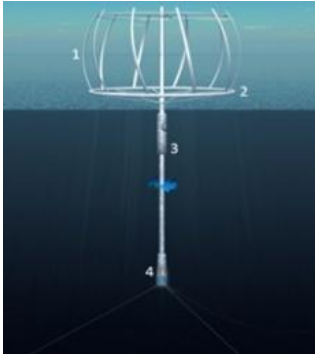
5	<b>EOLIA</b>			Spar-buy TLP Semi-sub	-	Μοντέλο κλίμακας 1:40 σε δεξαμενή	2011	-	-	5 MW	-	
6	<b>PelastarWave</b>		Ηνωμένο Βασίλειο	The Glosten Associates	TLP	65 m	Μοντέλο σε δεξαμενή	-	6 MW	2016	-	-
7	<b>FLOTTEK</b>		Ισπανία	Κοινοπραξία Gamesa, Iberdrola	TLP	-	Μοντέλο σε δεξαμενή	2012	2 MW	-	-	-

8	<p><b>GICON TLP</b></p> 	Γερμανία	GICON et al.	TLP	25 m	Μοντέλο κλίμακας 1:25 σε δεξαμενή	2013	2 MW	2014	-	2014
9	<p><b>Floating Haliade</b></p> 	Γαλλία	Alstom	TLP	50-80 m 80-300 m	-	-	6 MW	-	-	-








10	<b>FLOATGEN</b> 	Ισπανία	Κοινοπραξία Gamesa, IDEOL, Stuttgart University, AcconiaWind powerκ.ά.	Floater	35 m	-	-	-	2013	2 MW 3 MW	2015
11	<b>Hexicon platform</b> 	Σουηδία	Hexicon	Floater (hybrid)	26 m	-	-	-	-	54 MW wind/15 MW wave	2014-2015
12	<b>HiPRwind</b> 	Ευρώπη	Έργο της E.E.	Semi-Sub	80 m	-	-	1.5 MW	2013	-	2016

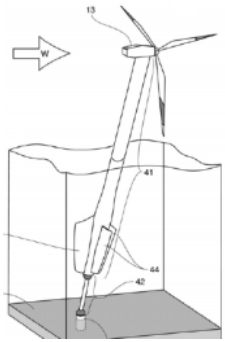
13	<p><b>SWAY</b></p> 	Νορβηγία	SWAY	Spar-buoy	55-400 m	1:6	2011	2.3 MW	-	2.5-5 MW	-
14	<p><b>Ocean Breeze</b></p> 	Ηνωμένο Βασίλειο	Xanthus Energy	TLP	60 m	Μοντέλο σε δεξαμενή	2011	-	-	-	-

15	<b>Pelagic Power</b> 	Νορβηγία	W2power	Floater (hybrid)	-	-	-	-	-	2x3.6 MW	2015
16	<b>Poseidon Floating Power</b> 	Δανία	Floating Power	Floater	40 m	-	-	6 MW	2014	-	-
17	<b>Sea Twirl</b> 	Σουηδία	Sea Twirl	Spar-buoy	-	1:50	-	-	-	-	-

18	<b>Trifloater Semi-sub</b> 	Ολλανδία	Gusto	Semi-sub	50 m	Μοντέλο σε δεξαμενή	2013	-	-	5 MW	-
19	<b>Vertiwind</b> 	Γαλλία	Technip, Nenuphar, EDF EN	Semi-sub	50 m			2 MW	2013	2 MW	2016

20	<b>University of Maine</b> 	Η.Π.Α.	University of Maine, Renewegy	Semi-sub	-	20 kW	2013	-	-	-	-
21	<b>WindSea floater</b> 	Νορβηγία	Force Technology, NLI Innovation	Semi-sub	45-120 m	Μοντέλο σε δεξαμενή	-	3x1 MW	-	3x3.6 MW	-
22	<b>WINFLO</b> 	Γαλλία	Nass& Wind, DCNS	Semi-sub	50 m	-	-	1 MW	2013	2.5 MW	2016

23	<b>Fukushima Offshore Wind</b> 	Ιαπωνία	Κοινοπραξία Fukushima Offshore Wind (Mitsubishi, Hitachi, Mitsui, Tokyo Univ.κ.ά.)	Semi-sub Spar-buoy Semi-sub	-	-	-	2 MW 7 MW 7 MW	2013 2014-2015 2014-2015	-	-
24	<b>Shimizu Semisub</b> 	Ιαπωνία	Shimizu Corporation, Univ. of Tokyo, Tokyo Electric Power, Penta Ocean	Semi-sub	25 m	-	-	-	-	-	2017
	<b>Mitsui TLP</b>	Ιαπωνία	Mitsui Zosen	TLP	60 m	-	-	-	-	5 MW	-
	<b>Hitachi Semi-sub</b>	Ιαπωνία	Hitachi Zosen, Toshiba	Semi-sub	-	-	-	7.5 MW	2016	-	-

<p><b>Japan Marine United Advanced Spar</b></p> 	<p>Ιαπωνία</p>	<p>Japan Marine United, Mitsubishi</p>	<p>Spar-buoy</p>	<p>50 m</p>	<p>Μοντέλο κλίμακας 1:50 σε δεξαμενή</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>2013</p>	<p>7 MW</p>	<p>2014-2015</p>
<p><b>NMRI of Japan Spar</b></p> 	<p>Ιαπωνία</p>	<p>National Maritime Research Institute of Japan</p>	<p>Spar-buoy</p>	<p>-</p>	<p>Μοντέλο σε δεξαμενή</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p><b>MODEC Skwid</b></p> 	<p>Ιαπωνία</p>	<p>Mitsui</p>	<p>Floater (hybrid)</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>500 kW</p>	<p>2013</p>	<p>-</p>	<p>2014-2015</p>

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**



## **2.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Η πλειονότητα των πλωτών κατασκευών είναι σύνθετες κατασκευές και επομένως η σχεδιάσή τους ώστε να αντεπεξέλθουν στις συνθήκες που θα επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης αποτελεί δύσκολη διαδικασία.

Η ασφάλεια της κατασκευής μπορεί να εξασφαλισθεί όταν προσδιορισθεί με επαρκή αξιοπιστία η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής και του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο θα λειτουργεί καθ' όλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της. Η αλληλεπίδραση αυτή προσδιορίζεται με υπολογισμό των εκτιμηθέντων φορτίων που θα 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 στις μέσες 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 πρότυπα κατασκευής τύπου spar-buoy και τύπου semi-submersible. Η κατασκευαστική αρχή που διέπει αυτές τις κατασκευές, 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, 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 υπεράκτιας 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 θαλασσιών ρευμάτων και των θαλασσιών κυματισμών. <sup>[59][60]</sup>

## Πεδίο ανέμου

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 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1 hr

$a, \beta$  : 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					
	1 hr	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 :

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

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=1800 m

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 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1 hr

## Θαλάσσια ρεύματα

Για τον προσδιορισμό της καθ' ύψος διανομής της ταχύτητας των θαλασσιών 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:

$$V_{\text{ρευμ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) + V_{\text{ανεμ}}(z) \quad (2.2.4)$$

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

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

$$V_{\text{ανεμ}}(z) = 0, z < -d_0 \quad (2.2.7)$$

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 παλίρροιες. 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 :

$$V_{\text{ανεμ}} = 0.02\bar{V}_{1hr10} \quad (2.2.8)$$

όπου τα μεγέθη  $V_{\text{ανεμ}}$  και  $\bar{V}_{1hr10}$  ορίστηκαν προηγουμένως.

## Θαλάσσιοι κυματισμοί

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

$\rho$ : η πυκνότητα

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

### Η εξίσωση συνέχειας

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

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:

- κατά τον σχηματισμό των κυμάτων λόγω του ανέμου, δεδομένου ότι τα πρώτα κύματα που εμφανίζονται είναι κύματα επιφανειακής τάσης και
- 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  $\Phi$  τέτοιο, ώστε :

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

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 :

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

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



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

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

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:

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

ή επειδή

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

Προκύπτει

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

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:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = \sigma \text{ ταθ.} \quad (2.2.18) \text{ για } z = \zeta(x, y, t)$$

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

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

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  $\lambda$ . 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:

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

Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

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

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  $\mathbf{z}=\mathbf{0}$  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 αυτόν τον τρόπο:

- λαμβάνουμε υπόψη μας κατά τη διατύπωση των οριακών συνθηκών τη μη γραμμικότητα
- τα 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  $\varepsilon$  αντίστοιχα, έχουμε:

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

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

(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  $\varepsilon$  πρέπει όλοι οι συντελεστές των δυνάμεων του  $\varepsilon$  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<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> 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

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

$$z=0$$

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

$$\frac{\partial\Phi^{(n)}}{\partial z} - \frac{\partial\zeta^{(n)}}{\partial t} = G^{(n-1)} \quad (2.2.32) \quad \text{για } z=0$$

και

$$\frac{\partial\Phi^{(n)}}{\partial t} + g\zeta^{(n)} = F^{(n-1)} \quad (2.2.33) \quad \text{για } z=0$$

όπου οι συναρτήσεις  $G^{(n-1)}$  και  $F^{(n-1)}$  είναι συνδυασμός των λύσεων 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup>, (n-1) τάξης.

Οι συναρτήσεις  $\Phi^{(n)}$  που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του ζητούμενου δυναμικού της ροής  $\Phi$  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:

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

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

## Γραμμική Θεωρία – απλοί αρμονικοί κυματισμοί

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σα λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1<sup>ης</sup> 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  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\lambda$ : το μήκος κύματος

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

$d$ : το βάθος του νερού

$\theta$ : 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 περιγράφουν 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.

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

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

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)

- Ίδιο βάρος
- Βάρος εξοπλισμού
- Στατικά/δυναμικά φορτία από εκτέλεση εργασιών
- Δυνάμεις άντωσης

### Φορτία από τη δράση του περιβάλλοντος (environmental loads)

#### Άμεση δράση

- Άνεμος
- Θαλάσσια ρεύματα
- Θαλάσσιοι κυματισμοί
- Σεισμοί

#### 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.



## Φορτία από θαλάσσιους κυματισμούς

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<sup>ης</sup> τάξης, σαν λύση του γραμμικού προβλήματος και σε δυνάμεις 2<sup>ης</sup> και ανώτερης τάξης όταν λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικοί όροι του προβλήματος (πχ. υπολογισμός αγκυρώσεων).

## **Επίδραση δυνάμεων αναφορικά με το είδος της κατασκευής**

Εξαιτίας των πολλών και διαφορετικών γεωμετριών και διαστάσεων των θαλάσσιων κατασκευών καθώς και των διαφορετικών συνθηκών εγκατάστασής 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  $(H, \lambda, d)$ , 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

$\rho$ : η πυκνότητα του νερού

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$H$ : το ύψος του κύματος

$\lambda$ : το μήκος του κύματος

$\mu$ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού

Εφαρμόζοντας το θεώρημα  $\pi$  της μηχανικής ομοιότητας, η σχέση αδιαστατοποιείται ως εξής:

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

Παρατηρούμε πως ο λόγος  $\frac{\mu}{\rho \sqrt{gD^3}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}}$  ( $\nu$ : 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:

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

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

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

οπότε

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

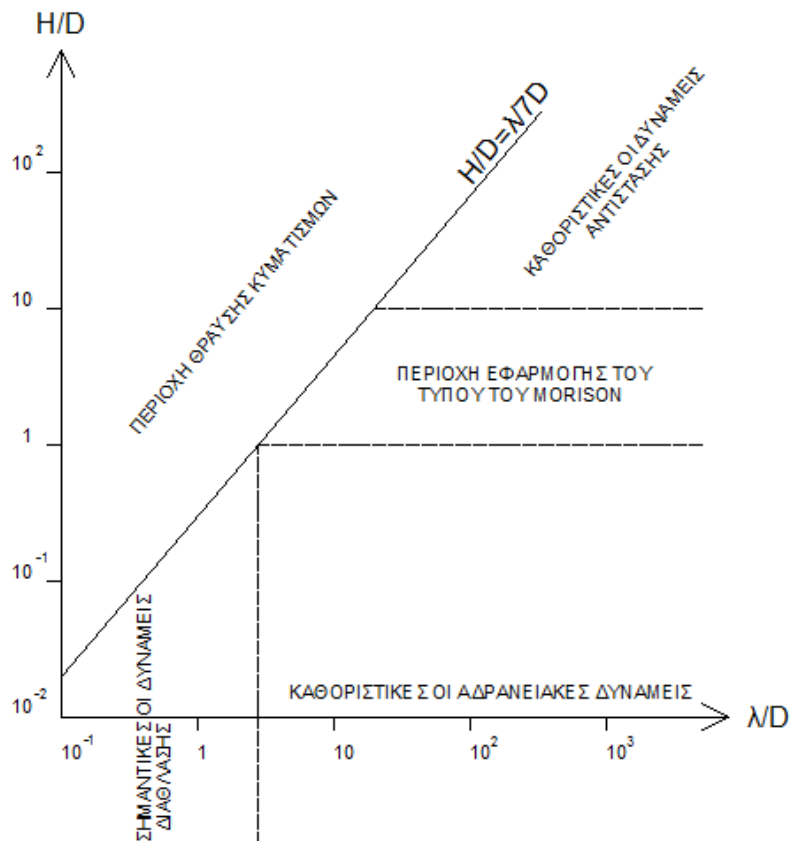
Αν θελήσουμε να εισάγουμε και την τραχύτητα  $k$  του κυλίνδρου, φθάνουμε σε άλλη συναρτησιακή σχέση που είναι απαραίτητη για μη λείους κυλίνδρους:

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

Στην Εικόνα 2.1 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

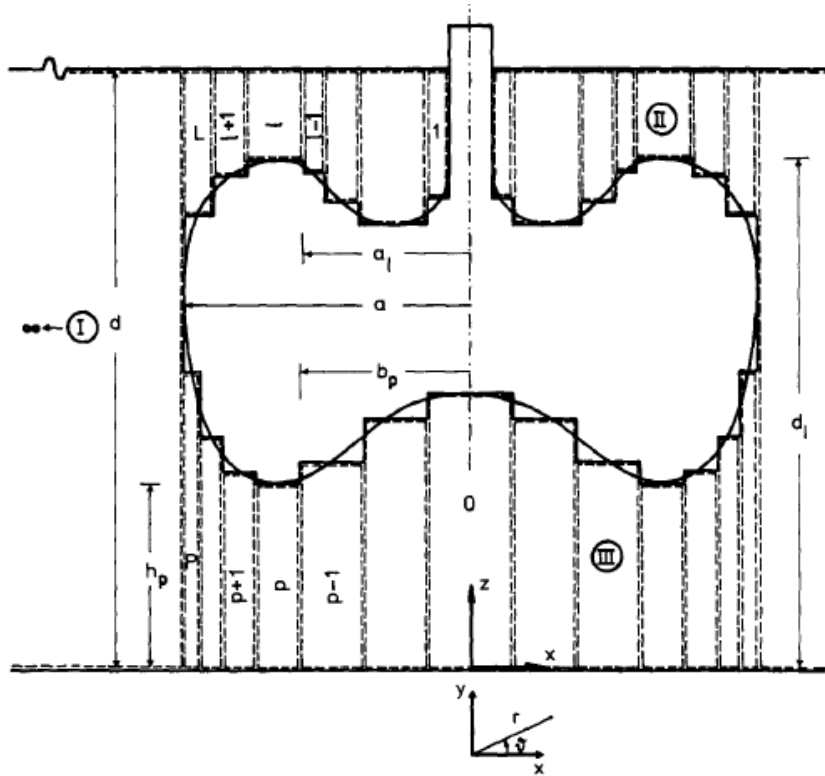
Στο όριο  $\frac{\lambda}{D} < 5$  που εμφανίζεται στο παραπάνω σχήμα, γίνεται ο διαχωρισμός των κατασκευών σε υδροδυναμικά «ογκώδεις» και «λεπτές».

## 2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ

### Συμπεριφορά κατακόρυφων σωμάτων υπό την επίδραση κυματισμών

Η θεωρητική προσέγγιση των πειραμάτων βασίζεται αρχικά στην μελέτη της συμπεριφοράς κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς. Παρακάτω, χάριν πληρότητας, παρουσιάζεται μια ημιαναλυτική προσέγγιση για την υδροδυναμική ανάλυση μεγάλων κατακόρυφων σωμάτων σε νερό πεπερασμένου βάθους. Πρόκειται για την προσέγγιση η οποία αναπτύχθηκε στις δημοσιεύσεις **Behavior of vertical bodies of revolution in waves (1986)** των **Kokkinowrachos, K., Mavrakos, S., Asorakos, S.** και **Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves (1987)** των **Mavrakos, S., Koumoutsakos, P.** <sup>[62][63]</sup>

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 (Εικόνα 2.2).



**Εικόνα 2.2** 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. 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.

### Διατύπωση των προβλημάτων περίθλασης και ακτινοβολίας

Θεωρούμε ένα πλωτό στερεό σώμα που εκτείνεται κατά τον κατακόρυφο άξονα και που εκτίθεται σε απλό αρμονικό κυματισμό, (Εικόνα 2.2). Για αυτόν τον τύπο κατασκευής επιλέγεται κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων  $(r, \theta, Z)$  και στην περίπτωση μας ορίζεται η αρχή των αξόνων του στον πυθμένα της θάλασσας. Το ρευστό θεωρείται ασυμπιεστο 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:

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

όπου  $\varphi_0 e^{-i\omega t}$ : το δυναμικό ταχύτητας του αρμονικού κυματισμού πρόσπτωσης

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

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

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

Το πρόβλημα περίθλασης είναι εκφρασμένο από το δυναμικό ταχύτητας:

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

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

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

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

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

Η συχνότητα  $\omega$  και αριθμός κύματος  $k$  συνδέονται με την εξίσωση διασποράς

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

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.4.3) το ολικό δυναμικό ταχύτητας του πεδίου ροής γύρω από τη σταθερή κατασκευή μπορεί να γραφεί στη μορφή:

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

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:

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

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

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

Στις συναρτήσεις  $\Psi_{jm}$  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  $\Psi_{Dm}$ , ( $m = 0,1,2 \dots$ ),  $\Psi_{11}$ ,  $\Psi_{30}$  και  $\Psi_{51}$  παραμένουν οι κύριοι άγνωστοι του προβλήματος.

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

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

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

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

Επιπλέον, τα δυναμικά  $\varphi_j$  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:

$$\left. \frac{\partial \varphi_7}{\partial n} \right|_{s_0} = - \left. \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \right|_{s_0} \quad \dot{\eta} \quad \left. \frac{\partial \varphi_D}{\partial r} \right|_{s_0} = 0 \quad (2.4.14)$$

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 (Εικόνα 2.2), 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 περίθλασης ( $j = D$ ) και ακτινοβολίας ( $j = 1,3,5$ ) ως εξής:

#### Οριζόντιες οριακές συνθήκες

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

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

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

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

Κατακόρυφες οριακές συνθήκες

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

όταν  $r = a$  για  $h_p \leq z \leq d_L$

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

όταν  $r = b_p$  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  $\frac{\partial \varphi_j}{\partial r}$  ( $j = D, 1, 3, 5$ ), πρέπει να είναι συνεχείς στα κατακόρυφα όρια των γειτονικών μακροστοιχείων, (Εικόνα 2.2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

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

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

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

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

$$\psi_{jm}^1(a_l, z) = \psi_{jm}^{(l-1)}(a_{l-1}, z), \text{ για } \max\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq d \quad (2.4.25)$$

$l = 2, 3, \dots, L$

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

$l = 2, 3, \dots, L$

$$\psi_{jm}^{(p)}(b_p, z) = \psi_{jm}^{(p-1)}(b_{p-1}, z), \text{ για } 0 \leq z \leq \min\{h_p, h_{p-1}\} \quad (2.4.27)$$

$p = 1, 2, \dots, P$

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

Στο συμβολισμό που χρησιμοποιούμε, οι δείκτες I και p ορίζουν ποσότητες που αντιστοιχούν στα I και p μακροστοιχεία των τύπων II και III, αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης I 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  $\Psi_{Dm}$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ),  $\Psi_{11}$ ,  $\Psi_{30}$  και  $\Psi_{51}$  όπως ορίζονται στις εξισώσεις (2.4.6) - (2.4.9).

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

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

όπου

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

$$g_{11}^I(r, z) = g_{30}^I(r, z) = g_{51}^I(r, z) = 0 \quad (2.4.31)$$

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

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  $a$  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).

### Δυνάμεις διέγερσης και υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης

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

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

για  $k=1,3$

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

όπου

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

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:

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

$$\text{και} \quad F'_5(t) = M'_1(t) + M'_3(t)$$

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

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

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:

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

$$\begin{aligned}
M_{1j} = & \pi \delta_j \left\{ \alpha \sum_a \frac{1}{\alpha} N_{\alpha}^{-1/2} F_{j,1\alpha} \left[ \frac{1}{a} \cos(ah_L) + h_L \sin(ah_L) - \frac{1}{a} \cos(ah_p) - h_p \sin(ah_p) \right] + \right. \\
& + \sum_{l=1}^l \left\{ m_{1,j}^{(l)} + \alpha_1 (\mu - \lambda) \sum_{\alpha_\mu} \frac{1}{\alpha_\mu} N_{\alpha_\mu}^{-1/2} F_{j,1\alpha_\mu} \left[ \frac{1}{a_\mu} \cos(a_\mu (d_\lambda - d_\mu)) + d_\lambda \sin(a_\mu (d_\lambda - d_\mu)) - \frac{1}{a_\mu} \right] \right\} + \\
& + \sum_{p=1}^p \left\{ m_{1,j}^p + \frac{1}{2} (h_\mu^2 - h_\lambda^2) b_p (\mu - \lambda) F_{j,10_\mu} + 2b_p (\mu - \lambda) \sum_{n_\mu=1}^{n_\mu} \frac{h_\mu}{n_\mu \pi} F_{j,n_\mu} \right. \\
& \times \left. \left[ \frac{h_\mu}{n_\mu \pi} \left( (-1)^{n_\mu} - \cos \left( \frac{n_\mu \pi h_\lambda}{h_\mu} \right) - h_\lambda \sin \left( \frac{n_\mu \pi h_\lambda}{h_\mu} \right) \right) \right] \right\} - e F_{1j}
\end{aligned}$$

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

KΩ

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



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  $j = 1, 3, 5$

για  $S = 0, 1, 2, \dots, P$  ή  $S = 1, 2, \dots, L$

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

### Αλληλεπίδραση κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων που εκτίθενται σε κυματισμούς

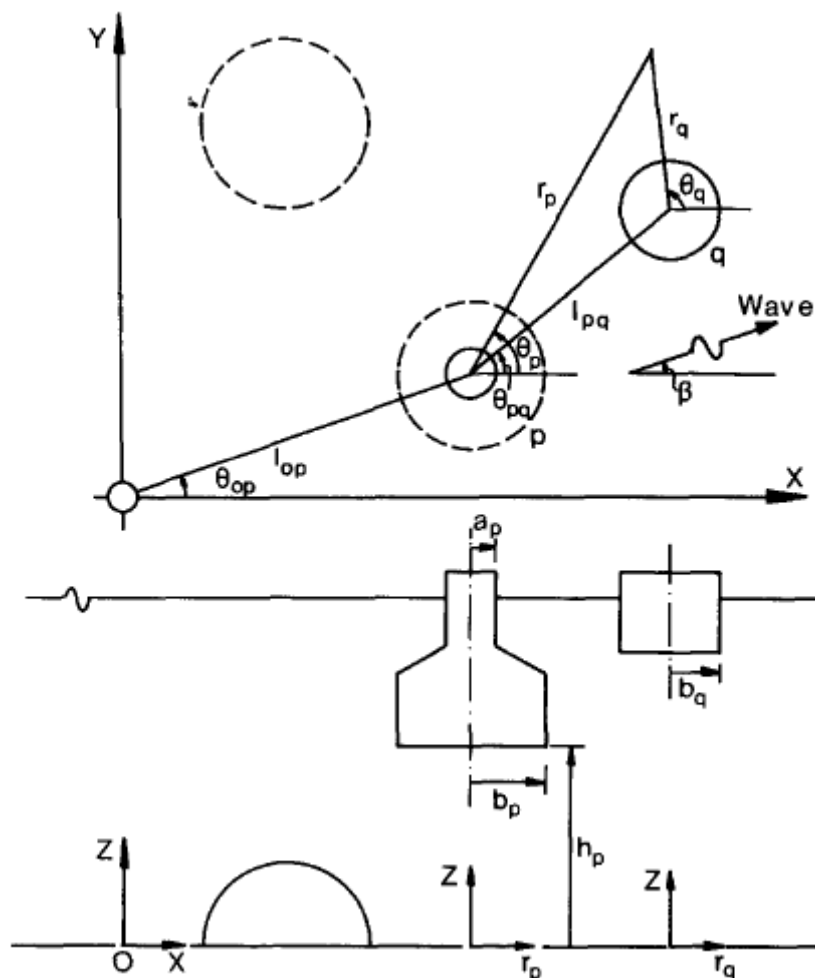
Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης μεταξύ επιπλεόντων σωμάτων είναι ιδιαίτερης σημασίας για τον σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών σύνθετης μορφής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων της εξεταζόμενης κατασκευής επηρεάζονται από την παρουσία των γειτονικών σωμάτων. 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, χάριν πληρότητας, θα παρουσιαστεί η επίλυση του υδροδυναμικού προβλήματος αλληλεπίδρασης μεταξύ κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων σταθερών ως προς προσπίπτοντες αρμονικούς κυματισμούς όπως αυτή αναπτύχθηκε στη δημοσίευση **Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves (1987)** των **Mavrakos, S., Koumoutsakos, P.** <sup>[63]</sup>

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.

### Διατύπωση του προβλήματος περίθλασης

Ένας αρμονικός κυματισμός πλάτους  $H/2$ , συχνότητας  $\omega$  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  $O$ - $XYZ$  με αρχή των αξόνων στον πυθμένα και τη φορά του κατακόρυφου άξονα  $Oz$  προς τα πάνω (Εικόνα 2.3). Τα επιμέρους  $N$  κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων  $(r_p, \theta_p, z)$ ,  $p = 1, 2, \dots, N$  ορίζονται επίσης με την αρχή των αξόνων τους στον πυθμένα.



Εικόνα 2.3 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**  $\Phi_I$  και του **δυναμικού διάθλασης**  $\Phi_B$  του πεδίου κυματισμών:

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_B \quad (2.4.42)$$

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

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

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

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

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  $\Phi_B$  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 προσπιπτόνων κυματισμών,  $\Phi_I$ , που διαδίδεται με γωνία  $\beta$  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

$$\frac{1}{d} \Psi_{l,m}(r_p, z) = \frac{e^{ikl_0p \cos(\theta_{0p}-\beta)} Z_0(z)}{dZ'_0(d)} J_m(kr_p) e^{-im\beta} \quad (2.4.48)$$

όπου  $J_m(kr_p)$ : η m-στης τάξης συνάρτηση Bessel πρώτου είδους

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

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

$Z'_0(d)$  η παράγωγος για  $z = d$

Η συχνότητα  $\omega$  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  $(r_p, \theta_p, z)$  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<sup>η</sup> 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<sup>ης</sup> τάξης της περίθλασης» από τα υπόλοιπα σώματα («2<sup>η</sup> τάξη της διέγερσης» για το p-στο σώμα), το p-στο σώμα ακτινοβολεί ένα κύμα της «2<sup>ης</sup> τάξης της περίθλασης», ώστε και πάλι να ικανοποιείται η εξίσωση του ολικού δυναμικού (2<sup>ης</sup> 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, περιθλασης και το ολικό δυναμικό θα είναι:

$${}^s\Phi_j^{(p)} = \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{pq})^{s-1} \Phi_B^{(q)}(r_p, \theta_p, z), \quad s \geq 2 \quad (2.4.53)$$

$${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z), \quad {}^s\Phi^{(p)} = {}^s\Phi_I^{(p)} + {}^s\Phi_B^{(p)}$$

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 περιθλασης  ${}^s\Phi_B^{(p)}(r_p, \theta_p, z)$ , 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  $K_m$ : η δευτέρου είδους τροποποιημένη συνάρτηση Bessel  $m$  τάξης

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

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

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

$$a_j: \quad \text{είναι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης} \frac{\omega^2}{g} + a_j \tan(a_j d) = 0 \quad (2.4.61)$$

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.

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  $p$ .

Μόλις οι συντελεστές αυτοί έχουν προσδιοριστεί, το δυναμικό  ${}^s\Phi^{(p)}$  γύρω από το σώμα  $p$ , ( $p = 1, 2, \dots, N$ ), 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  $(r_q, \theta_q, z)$  μπορούν να μετατραπούν και να εκφραστούν ως προς το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς  $(r_p, \theta_p, z)$ . 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 p-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

$${}^sQ_{j,m}^{(p)} = \sum_{q=1}^N (1 - \delta_{qp}) \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} i^{m+\nu} \frac{K_{m-\nu}(a_j I_{qp})}{K_\nu(a_j b_p)} I_m(a_j b_p) \times {}^{s-1}F_\nu^{(q)} e^{i(\nu-m)\theta_{qp}},$$

$$s \geq 2 \quad (2.4.66)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (2.4.65) αντιπροσωπεύει την συμβολή του προσπίπτοντος κύματος s-της τάξης,  ${}^s\Phi_I^{(p)}$ , στο δυναμικό  ${}^s\Phi^{(p)}$ . Ειδικά για την αλληλεπίδραση 1<sup>ης</sup> τάξης,  $s = 1$ , το δυναμικό αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού,  ${}^1\Phi_I^{(p)}$ , 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:

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

Γνωρίζουμε όμως 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

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

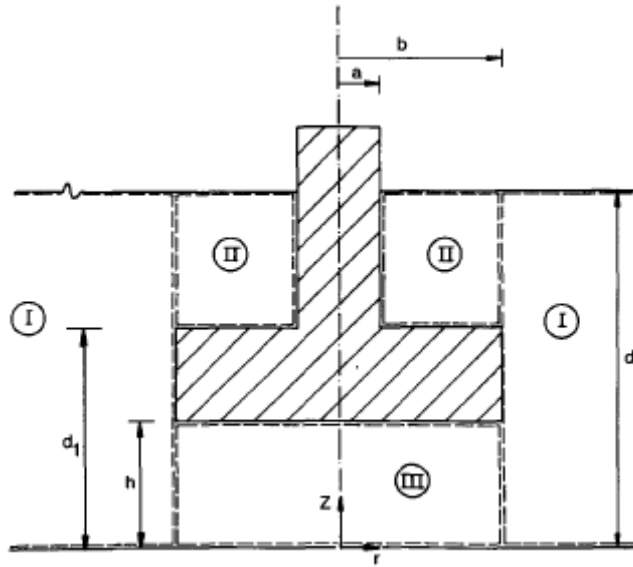
Έτσι, το ολικό δυναμικό ταχύτητας γύρω από το  $p$ -στο σώμα της διάταξης προκύπτει από την υπέρθεση του αδιατάρακτου προσπίπτοντος κυματισμού με τις περιθλάσεις διαφόρων τάξεων, οι οποίες οφείλονται στο  $p$  σώμα καθώς και τα υπόλοιπα της διάταξης. Με τον τρόπο αυτό, η σχέση (2.4.69) μας επιτρέπει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

### Προσδιορισμός των συντελεστών περίθλασης $s$ -τάξης

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 (Εικόνα 2.4) που μελετάται στην παρούσα ανάλυση.





**Εικόνα 2.4** 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 (Εικόνα 2.4), 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 στην Εικόνα 2.4. 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 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 (Εικόνα 2.4) 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 p-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,  $\mu_l$  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  $\mu_0 = -ik_{II}$ .

$\epsilon_n$  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 (Εικόνα 2.4) 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  $\{ {}^s Q \}$  δίνεται από την (2.4.67).

Τώρα, προσθέτοντας τις διάφορες τάξεις των συντελεστών Fourier  ${}^s F_{mj}^I$ , το ολικό δυναμικό ταχύτητας στην πρώτη περιοχή του ρευστού κάθε σώματος,  $\Phi^I$ , μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση (2.4.69). Στη συνέχεια, μπορούμε να υπολογίσουμε τους άγνωστους συντελεστές  ${}^s F_{ml}^{II}$  και  ${}^s F_{ml}^{III}$ , 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

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

όπου  $Q_{mj}$  και  $F_{mj}^I$  ορίζονται από την εξίσωση (2.4.70).

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:

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

και

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

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**

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

## 3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### Πειραματική δεξαμενή και εξοπλισμός

Τα εργαστηριακά πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην ειδική δεξαμενή (Towing Tank) του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Παρακάτω περιγράφονται ο βασικός εξοπλισμός και τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων.

#### **Δεξαμενή**

Η πειραματική δεξαμενή έχει 100 μέτρα συνολικό μήκος, 91 μέτρα μήκος διαθέσιμο για τη διεξαγωγή πειραμάτων, 4.56 μέτρα πλάτος και περίπου 3 μέτρα μέγιστο βάθος. Η μακρόστενη δεξαμενή γεμίζει με νερό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης (μέσω γεώτρησης). Για την αποφυγή ανάπτυξης μικροοργανισμών στο νερό είναι στεγασμένη και απομονωμένη από το φυσικό φως, ενώ είναι εξαρτημένη και με ειδικό φίλτρο ανακύκλωσης νερού. Επιπλέον, κάθε τρία χρόνια πραγματοποιείται πλήρης αντικατάσταση του νερού και συντήρηση.

Στις δύο πλευρές κατά μήκος της δεξαμενής υπάρχουν τοιχώματα πάνω στα οποία έχουν κατασκευαστεί μεταλλικές ράγες οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα κύλισης φορείου και κατ' επέκταση του πειραματικού μοντέλου που προσδένεται στο τελευταίο. Στο ένα άκρο της έχει εγκατασταθεί κυματιστήρας, ενώ στο άλλο άκρο αποσβεστήρας. Περίπου στο μέσο του μήκους της δεξαμενής έχουν διαμορφωθεί παράθυρα σε μήκος 18 μέτρων, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα παρατήρησης κάτω από την επιφάνεια του νερού.



**Εικόνα 3.1** Άποψη της πειραματικής δεξαμενής

## **Φορείο**

Το φορείο δοκιμών κινείται κατά μήκος των μεταλλικών ραγών και φιλοξενεί όλον τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τη λήψη και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων. Έχει βάρος 5.5 τόνους και τη δυνατότητα κύλισης και προς τις δύο κατευθύνσεις με μέγιστη πρόσω ταχύτητα 5.5 m/s. Η ταχύτητά του μετριέται με ειδικό τροχό με φωτοηλεκτρικό σύστημα με παρεχόμενη ακρίβεια 1mm/s.

Στο κύριο κατάστρωμα του φορείου στεγάζεται ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος ελέγχει την κίνησή του και καταγράφει τις μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στο φορείο προσδένεται επίσης το κατάλληλο δυναμόμετρο, στο οποίο με τη σειρά του προσδένεται το πειραματικό μοντέλο. Επιπλέον υπάρχει κατάστρωμα παρατήρησης σε βολική θέση για την πρόσδεση του μοντέλου στο δυναμόμετρο αλλά και για παρατήρηση των κινήσεών του. Τέλος, στο πρυμναίο μέρος του το φορείο διαθέτει τη λεγόμενη «σιδερώστρα». Πρόκειται για κεκλιμένη προς την επιφάνεια του νερού επιμήκη μεταλλική επιφάνεια με δυνατότητα κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα με σκοπό την άμεση απόσβεση των κυματισμών που προκαλεί το μοντέλο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Η απόσβεση πραγματοποιείται κατά την επιστροφή του φορείου στη θέση εκκίνησης μόλις ολοκληρωθεί ένα πείραμα και με τη μετακίνηση της σιδερώστρας στο ύψος της επιφάνειας του νερού.





**Εικόνα 3.2** Άποψη του φορείου με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό

### **Κυματιστήρας**

Ο κυματιστήρας είναι μια γεννήτρια κυματισμών που βρίσκεται στο ένα άκρο της δεξαμενής. Είναι τύπου πτερυγίου (flap type) και μπορεί να δημιουργήσει απλούς αρμονικούς κυματισμούς συχνοτήτων από 0.3 έως 1.4 Hz και μήκους από 0.5 έως 13 μέτρα.

Αποτελείται από ένα πτερύγιο ανοξείδωτου χάλυβα (flap) πλάτους 4.56 μέτρων (ίσο με το πλάτος της δεξαμενής) και ύψους 2 μέτρων, το οποίο είναι εδρασμένο σε ύψος 1.3 μέτρων πάνω από τον πυθμένα της δεξαμενής και ενός υδραυλικού συστήματος ισχύος 15 KW.

Η λειτουργία του κυματιστήρα ρυθμίζεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που βρίσκεται στο φορείο. Κατά τη διάρκειά της αντλείται νερό από τη δεξαμενή και δίνεται η κατάλληλη κίνηση στο πτερύγιο.



**Εικόνα 3.3** Η γεννήτρια κυματισμών

## Αποσβεστήρας

Πρόκειται για ξύλινη κεκλιμένη διάταξη στο άλλο άκρο της δεξαμενής. Ο ρόλος της είναι η απόσβεση των κυματισμών αφού διανύσουν τη διαδρομή κατά μήκος της οποίας καταγράφονται οι μετρήσεις. Έχει μήκος 11.1 m και μέσο συντελεστή απόσβεσης 95%. Στην πλευρά που βρίσκεται ο αποσβεστήρας υπάρχει και θερμομέτρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής καθώς και η αντλία που καθαρίζει τα επιφανειακά στρώματα νερού της δεξαμενής από την άλγη που δημιουργείται.



*Εικόνα 3.4 Ο αποσβεστήρας και ειδικοί φελλοί ταχύτερης απόσβεσης κυματισμών*

## Γερανοί

Η πειραματική δεξαμενή διαθέτει δύο γεραμούς ανυψωτικής ικανότητας 5 τόνων, οι οποίοι διευκολύνουν την τοποθέτηση των πρότυπων μοντέλων και των δυναμόμετρων εντός και εκτός της δεξαμενής. Δίπλα στον ένα γερανό υπάρχει και η ζυγαριά του εργαστηρίου.

## Δυναμόμετρα

Τα δυναμόμετρα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του εξοπλισμού πειραμάτων καθώς σε αυτά είναι εγκατεστημένοι οι αισθητήρες που λαμβάνουν μετρήσεις και τις αποστέλλουν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε χρήση δύο διαφορετικών δυναμόμετρων, του R35 και του R47.

Στο δυναμόμετρο R35 πακτώνεται το μοντέλο και περιορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του. Χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα κατά τα οποία δεν μετρήθηκαν οι κινήσεις του μοντέλου παρά μόνον η οριζόντια δύναμη αντίστασης του μοντέλου

στους κυματισμούς, μέσω των προσαρτημένων straingages που μετατρέπουν τις οριζόντιες δυνάμεις σε τάση.



**Εικόνα 3.5** Το δυναμόμετρο R35

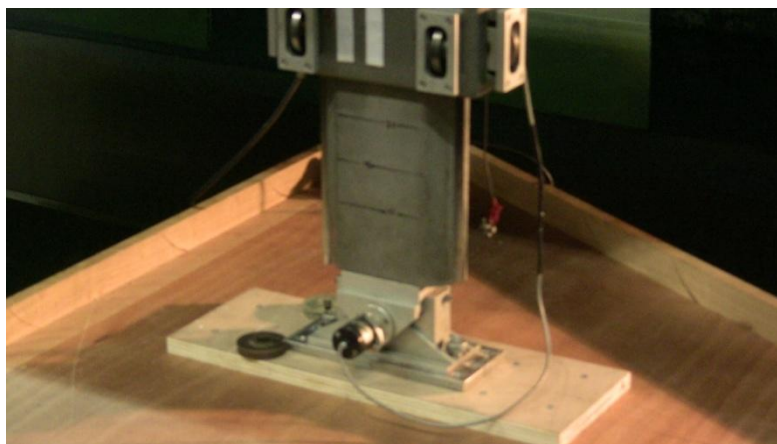
Το δυναμόμετρο R47 έχει τη δυνατότητα να προσφέρει στο μοντέλο τρεις βαθμούς ελευθερίας (κίνηση κατά τον διαμήκη άξονα, κίνηση κατά τον κατακόρυφο άξονα καθώς και περιστροφή περί τον ίδιο) και κατ' επέκταση επιτρέπει τη μέτρηση της οριζόντιας αντίστασης, της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού.

Το δυναμόμετρο αυτό αποτελείται από τρία τμήματα. Ένα μόνιμα σταθερό, ένα εν δυνάμει σταθερό που κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παραμένει σταθερό και ένα κινούμενο τμήμα.

Η μέτρηση της αντίστασης πραγματοποιείται μέσω μιας γέφυρας Wheat stone, η οποία αποτελείται από τέσσερα strain gages που συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν κύκλωμα. Το τμήμα του δυναμόμετρου που είναι σταθερό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έχει τη δυνατότητα να εκτελεί απειροστά μικρές κινήσεις κατά το διαμήκη άξονα της δεξαμενής ως προς το μόνιμα σταθερό τμήμα, οι οποίες οφείλονται στην αντίσταση που συναντάει το μοντέλου κατά την κίνησή του στη δεξαμενή. Οι απειροστές αυτές κινήσεις εντοπίζονται από τον αισθητήρα και με αυτόν τον τρόπο γίνεται η μέτρηση της αντίστασης.

Η καταγραφή της ανύψωσης του κέντρου μάζας του μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρήση ως αισθητήρα ενός γραμμικού ποτενσιόμετρου (είδος μεταβλητής αντίστασης). Το ποτενσιόμετρο καταγράφει τη σχετική κατακόρυφη κίνηση μεταξύ

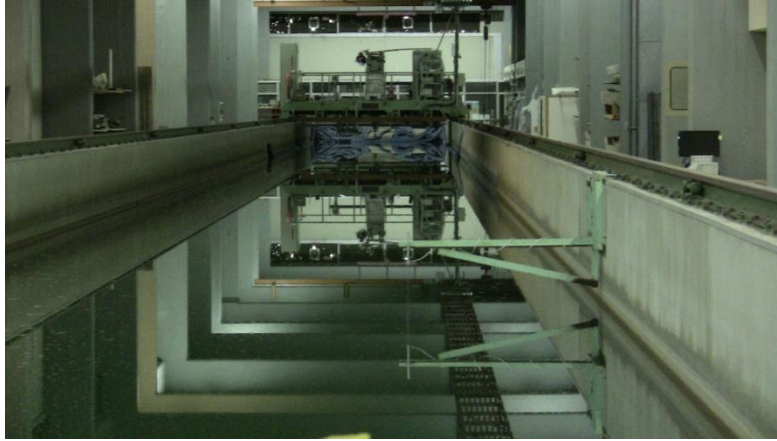
του κινούμενου και του σταθερού κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τμήματος του δυναμόμετρου, μεταβάλλοντας την αντίστασή του με αποτέλεσμα και την μεταβολή του διαρρέοντος μέσω αυτού ρεύματος. Η μεταβολή του ρεύματος μεταφράζεται στη συνέχεια σε μεταβολή τάσης και μετρείται από τον ενισχυτή. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της μετρούμενης τάσης κυμαίνεται από 0 έως 10 Volt.



**Εικόνα 3.6** Το δυναμόμετρο R47

### **Αισθητήρες ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού**

Οι αισθητήρες ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (waveprobes) καταγράφουν τις μεταβολές της στάθμης του νερού τοπικά σε συνάρτηση με το χρόνο. Ο κάθε αισθητήρας αποτελείται από δύο παράλληλα τοποθετημένα λεπτά σύρματα κάθετα ως προς την επιφάνεια του νερού. Τα σύρματα ενώνονται στο άνω άκρο τους μέσω κυκλώματος ενώ στο κάτω άκρο τους υπάρχει ασυνέχεια. Το κύκλωμα κλείνει μέσω της επιφάνειας του νερού. Η κατακόρυφη ανύψωση της επιφάνειας του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του βρεχόμενου μέρους των συρμάτων και κατ' επέκταση τη μεταβολή της ολικής αντίστασης του κυκλώματος και άρα και της τάσης που μετράει ο αισθητήρας.



**Εικόνα 3.7** Σε πρώτο πλάνο φαίνονται τα waveprobes της δεξαμενής

Wave probes (μήκους 40 cm) υπάρχουν σε ένα σημείο εντός της δεξαμενής πλησίον της γεννήτριας κυματισμών τα οποία μας επιτρέπουν να συγκρίνουμε τους πραγματικά παραγόμενους κυματισμούς με αυτούς που ζητήσαμε να παραχθούν μέσω του λογισμικού που βρίσκεται στον Η/Υ του φορείου. Wave probes (μήκους περίπου 50 cm) τοποθετήθηκαν επίσης και στα δύο μοντέλα τα οποία μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ακριβής θέση των οποίων παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα.

## **Πειραματικά μοντέλα**

### **Σχεδίαση των μοντέλων**

Για τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, με σκοπό να εξεταστούν ως πιθανές σχεδιάσεις πλωτήρων οι οποίοι θα υποστηρίξουν μια ανεμογεννήτρια ισχύος 5 MW.

Η βασική πλωτή διάταξη που κατασκευάστηκε είναι τύπου semi-submersible (ημιβυθισμένη εξέδρα) σχήματος ισοπλεύρου τριγώνου με προσαρτημένους τρεις σύνθετους κυλίνδρους στις κορυφές του (έναν σε κάθε κορυφή) οι οποίοι εξασφαλίζουν την άντωση που απαιτείται για να επιπλέει το σύστημα. Ο κάθε σύνθετος κύλινδρος αποτελείται από δύο κυλίνδρους διαφορετικής διαμέτρου, έναν ημιβυθισμένο και έναν πλήρως βυθισμένο μικρότερου ύψους και μεγαλύτερης διαμέτρου. Ως δεύτερο μοντέλο για το οποίο πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο ένας από του σύνθετους κυλίνδρους της προηγούμενης τριγωνικής διάταξης, προσομοιάζοντας μια σύνθετη εξέδρα τύπου spar-buoy.

Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του τριγωνικού μοντέλου βασίστηκαν σε μια πρότυπη ημιβυθισμένη εξέδρα που μελετήθηκε από την κοινοπραξία DeeCwind του πανεπιστημίου του Maine, την **UMaine Semi-Submersible** (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 Η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα UMaineSemi<sup>[64]</sup>

Η εξέδρα **UMaine Semi-Submersible** αποτελείται από έναν κεντρικό κύλινδρο στον οποίο στηρίζεται ο πύργος της Α/Γ, και ο οποίος περιβάλλεται από τρεις σύνθετους κυλίνδρους σε ισόπλευρη τριγωνική διάταξη που είναι συνδεδεμένοι με τον κεντρικό μέσω αρκετά λεπτότερων κυλινδρικών δικτυωμάτων. Οι σύνθετοι κύλινδροι εξέχουν της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και το βύθισμα της κατασκευής είναι 20 m. Το σύστημα αγκύρωσης αποτελείται από τρεις συμβατικές γραμμές αγκύρωσης, προσδεμένες κοντά στο κατώτερο σημείο του κάθε σύνθετου κυλίνδρου. Η επίτευξη ευστάθειας γίνεται κυρίως μέσω της ισάλου επιφάνειας αλλά και λόγω του έρματος το οποίο περιέχει και του σχετικά μεγάλου βυθίσματος. Η εν λόγω εξέδρα συγκρίθηκε με άλλες πέντε πλωτές εξέδρες διαφορετικού τύπου και τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η συμπεριφορά της έχει τις περισσότερες ομοιότητες με τις εξέδρες τύπου spar. Ωστόσο η ημιβυθισμένη εξέδρα παρουσιάζει πιο έντονες κινήσεις κατά τον κατακόρυφο άξονα (heave) και λιγότερο έντονο προνευτασμό (pitch).<sup>[64]</sup>

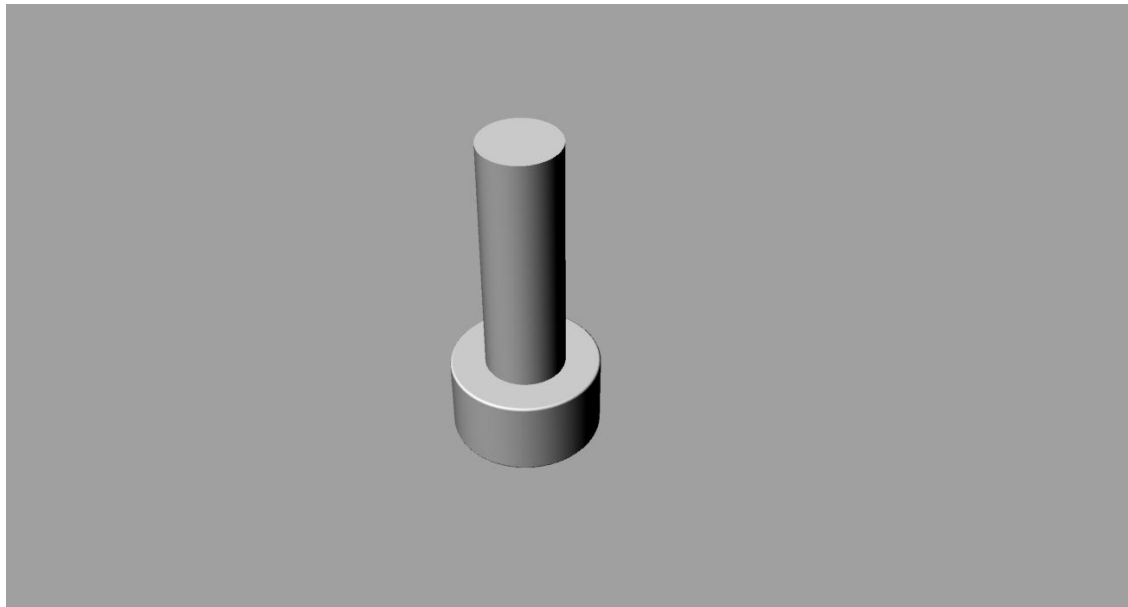
Ως Α/Γ στόχος για την οποία κατασκευάστηκαν τα πειραματικά μοντέλα επιλέχθηκε η πρότυπη Α/Γ ισχύος 5 MW που έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (NREL, National Renewable Energy Laboratory) με σκοπό να διευκολυνθούν οι έρευνες για την ανεύρεση κατάλληλων σχεδιάσεων πλωτών εξεδρών για τη στήριξη Α/Γ. Η πρότυπη Α/Γ είναι τύπου ανάντη (upwind),

μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητού βήματος και αποτελείται από 3 πτερύγια. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της. <sup>[65]</sup>

Ονομαστική ισχύς	5 MW
Ονομαστική ταχύτητα ρότορα/γεννήτριας	12.1 rpm/1173,7 rpm
Μέγιστη ταχύτητα μεταβολής γωνίας πτερυγίων	8 deg/s
Ονομαστική ροπή γεννήτριας	43093 Nm
Μέγιστη ροπή γεννήτριας	47402 Nm
Ύψος πλήμνης	90 m
Διάμετρος ρότορα/πλήμνης	126 m/3 m
Διάμετρος βάσης/άνωτερου τμήματος πύργου	6 m/3.87 m
Συνολική μάζα	697.46 tons
Μάζα ρότορα	110 tons
Μάζα ατράκτου	240 tons
Μάζα πύργου	347.46 tons

**Πίνακας 3.1** Κύρια χαρακτηριστικά πρότυπης NREL ανεμογεννήτριας 5 MW <sup>[65]</sup>

Τα μοντέλα επιλέχθηκε να κατασκευαστούν υπό **κλίμακα 1:40**. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναπαραστάσεις των μοντέλων έτσι όπως σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια των λογισμικών AutoCAD και Rhino. Παρουσιάζονται επίσης πίνακες με τα κύρια χαρακτηριστικά του **σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου** και της **τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων**.

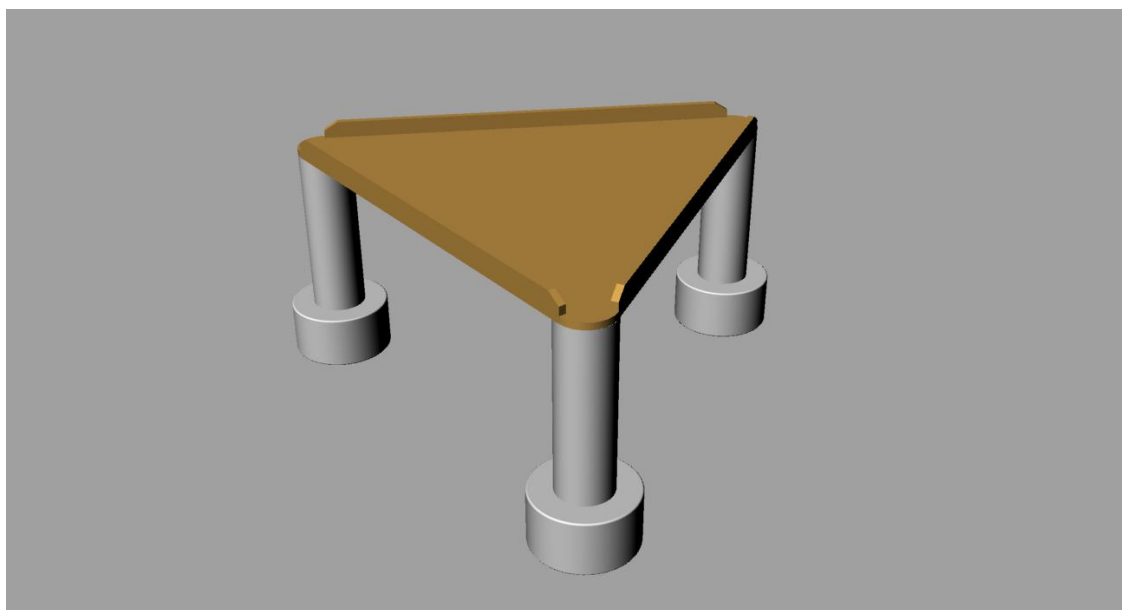


**Εικόνα 3.9** Τρισδιάστατη αναπαράσταση του πρότυπου μοντέλου σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου

Κλίμακα	1:40	1:1
Διάμετρος ημιβυθισμένου κυλίνδρου	16 cm	6.4 m
Ύψος ημιβυθισμένου κυλίνδρου	50 cm	20 m
Διάμετρος πλήρως βυθισμένου κυλίνδρου	30 cm	12 m
Ύψος πλήρως βυθισμένου κυλίνδρου	16 cm	6.4 m
Βύθισμα I	45 cm	18 m
Βύθισμα II	50 cm	20 m

**Πίνακας 3.2** Κύρια χαρακτηριστικά σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου





**Εικόνα 3.10** Τρισδιάστατη αναπαράσταση του πρότυπου μοντέλου τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων

Κλίμακα	1:40	1:1
Διάμετρος ημιβυθισμένων κυλίνδρων	16 cm	6.4 m
Ύψος ημιβυθισμένων κυλίνδρων	50 cm	20 m
Διάμετρος πλήρως βυθισμένων κυλίνδρων	30 cm	12 m
Ύψος πλήρως βυθισμένων κυλίνδρων	16 cm	6.4 m
Ισαπόσταση κυλίνδρων	125 cm	50 m
Βύθισμα	50 cm	20 m

**Πίνακας 3.3** Κύρια χαρακτηριστικά τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων

## Κατασκευή των μοντέλων

Το βασικότερο στάδιο των πειραματικών μετρήσεων είναι η άρτια κατασκευή των μοντέλων, έτσι ώστε να προσομοιάζει (υπό κλίμακα) όσο τον δυνατόν καλύτερα την πραγματική κατασκευή.

Η κατασκευή των μοντέλων έγινε εξ' ολοκλήρου με ξύλο. Τόσο οι ημιβυθισμένοι όσο και οι πλήρως βυθισμένοι κύλινδροι κατασκευάστηκαν από σουηδικό πεύκο μέσης πυκνότητας  $0.49 \text{ tons/m}^3$ . Η κατασκευή τους έγινε σε ξυλοτορνευτικό εργαστήριο σε ιδιώτη, καθώς υπήρχε απαίτηση μεγάλου τόρνου που δεν ήταν διαθέσιμος στο Ε.Ν.Θ.Υ.. Κατά την κατασκευή τους πονταρίστηκαν στα κέντρα τους για να διευκολυνθεί η σύνδεση τους στη συνέχεια. Ακολούθως, λειάνθηκαν όσο το δυνατόν καλύτερα και χρωματίστηκαν με πολλαπλές στρώσεις ειδικού αδιάβροχου χρώματος. Το επόμενο βήμα ήταν η σύνδεσή τους ανά ζεύγη ημιβυθισμένου-πλήρους βυθισμένου συμπαγούς κυλίνδρου. Η σύνδεση έγινε με τη χρήση μιας ντίζας για κάθε ζεύγος την οποία υποδέχτηκαν διαμορφωμένες φωλιές στο κέντρο του κάθε κυλίνδρου.

Για την κατασκευή τριγωνικού καταστρώματος, το οποίο είχε αποφασιστεί ότι θα αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ των τριών σύνθετων κυλινδρικών σωμάτων, αγοράστηκε ορθογώνια πλάκα κόντρα πλακέ πάχους 2 cm. Από την ορθογώνια πλάκα κόπηκε ισόπλευρο τρίγωνο κατάλληλων διαστάσεων.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις με τον μονό σύνθετο κατακόρυφο κύλινδρο, ακολούθησε η ένωση κοχλιωτά των σύνθετων κυλινδρικών σωμάτων με το τριγωνικό κατάστρωμα, σε κάθε μία από τις κορυφές του. Διαμορφώθηκαν επίσης τρία ενισχυτικά σχήματος τραπεζίου από κόντρα πλακέ τα οποία τοποθετήθηκαν στις πλευρές του τριγωνικού καταστρώματος.



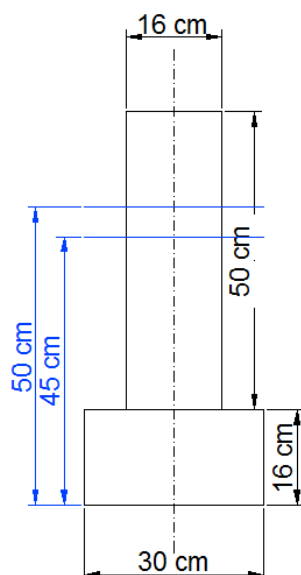
**Εικόνα 3.11** Ένωση των κυλινδρικών σωμάτων με το κατάστρωμα και ενισχυτικά

Κατασκευή	Βάρος μοντέλου	Βάρος φυσικού μεγέθους
Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος	0.00821 ton	525.44ton
Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων	0.055 ton	3520ton

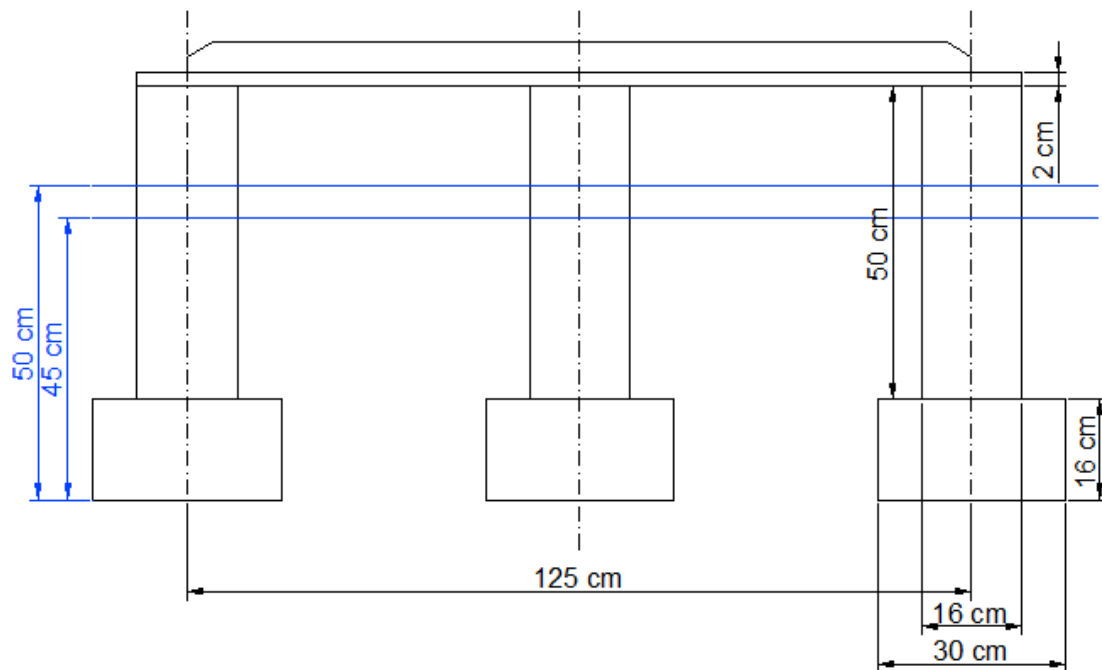
**Πίνακας 3.4** Βάρη μοντέλων και κατασκευών φυσικού μεγέθους

### Προετοιμασία των μοντέλων

Στον καθένα από τους ημιβυθισμένους κυλίνδρους έγινε χάραξη των επιθυμητών βυθισμάτων, δηλαδή των ισάλων γραμμών του πρότυπου μοντέλου. Στον κύλινδρο που αποτελούσε μέρος του μονού κατακόρυφου σύνθετου κυλινδρικού σώματος έγινε χάραξη δύο γραμμών, μία για βύθισμα  $T = 45$  cm και μία για βύθισμα  $T = 50$  cm. Στα άλλα δύο κυλινδρικά σώματα που αποτελούσαν τμήματα της τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων, έγινε χάραξη μίας γραμμής, για βύθισμα  $T = 50$  cm. Τα βυθίσματα που χαράχτηκαν φαίνονται στις παρακάτω προσόψεις των μοντέλων.

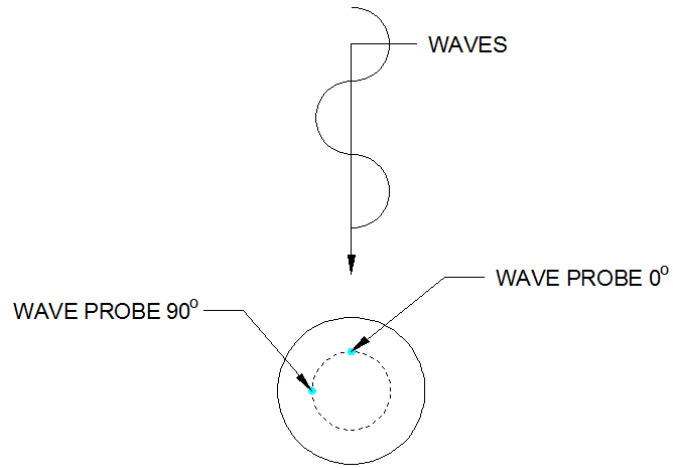


**Εικόνα 3.12** Πρόσωση πρότυπου μοντέλου σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου στην οποία φαίνονται τα δύο βυθίσματα για τα οποία έγιναν πειραματικές μετρήσεις

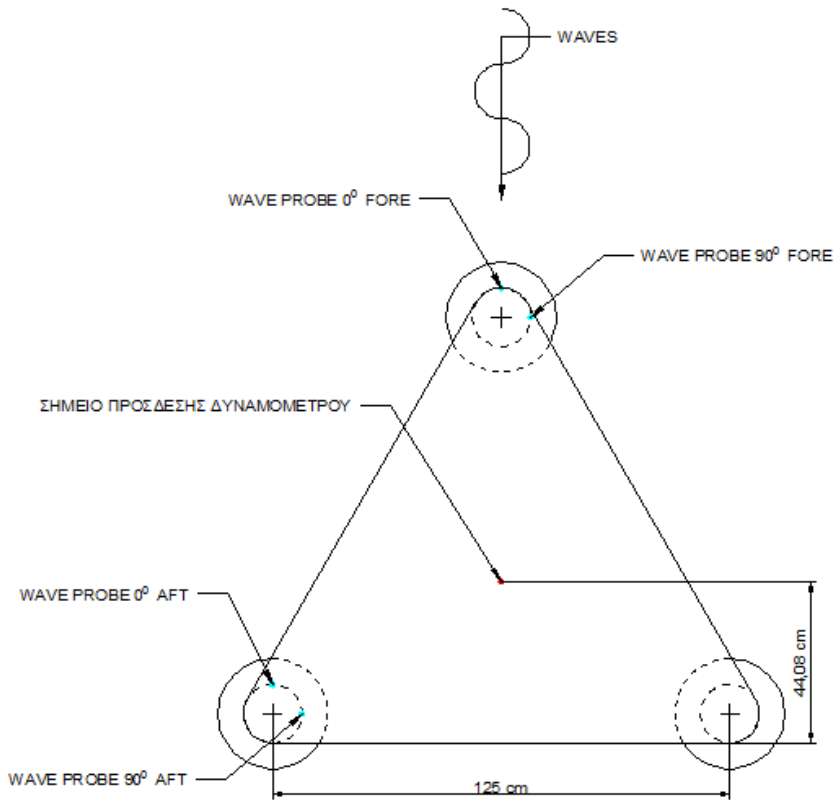


**Εικόνα 3.13** Πρόσωση πρότυπου μοντέλου τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων στην οποία φαίνονται τα δύο βυθίσματα για τα οποία έγιναν πειραματικές μετρήσεις

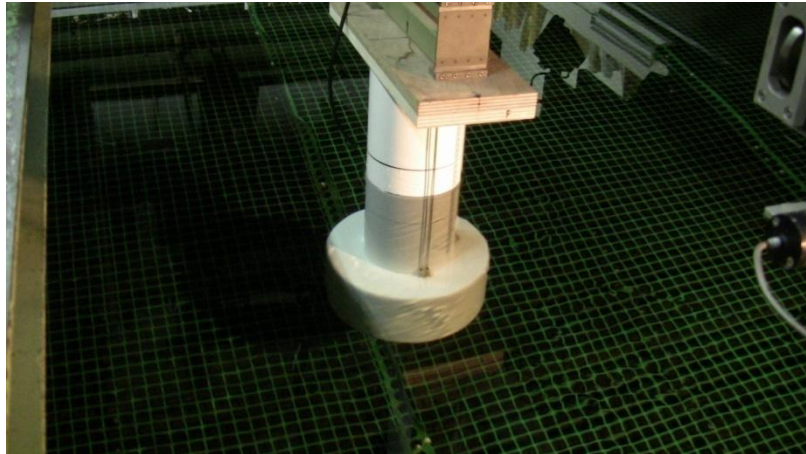
Σε δύο από του ημιβυθισμένους κυλίνδρους τοποθετήθηκαν διπλά σύρματα μήκους περίπου 50 cm στις 0 μοίρες και στις 90 μοίρες ως προς την διεύθυνση των κυματισμών. Τα σύρματα στερεώθηκαν με τη βοήθεια σιλικόνης και βιδών και αποτελούσαν τα wavergrobes που μετρούσαν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Η ακριβής τους θέση φαίνεται στις παρακάτω κατόψεις των μοντέλων.



**Εικόνα 3.14** Κάτοψη πρότυπου μοντέλου σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου στην οποία φαίνεται η θέση των δύο waveprobes

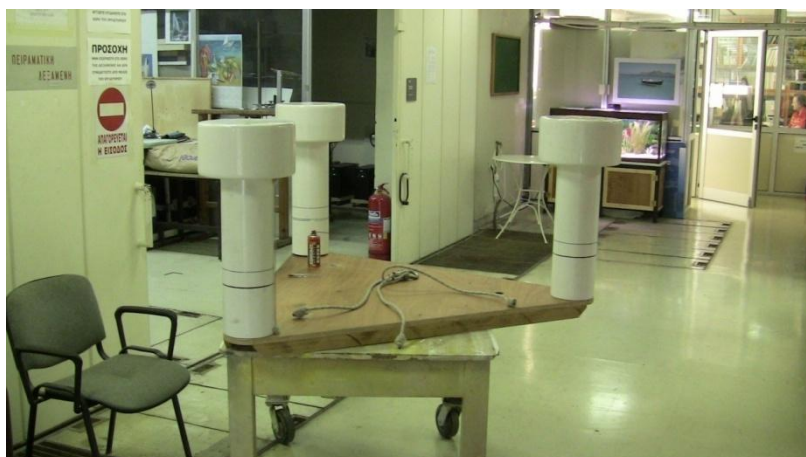


**Εικόνα 3.15** Κάτοψη πρότυπου μοντέλου τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κυλίνδρων στην οποία φαίνεται η θέση των τεσσάρων waveprobes και το σημείο πρόσδεσης των δυναμόμετρων



**Εικόνα 3.16** Οι γραμμές βυθισμάτων και τα waneprobes στον σύνθετο κατακόρυφο κύλινδρο, λίγο πριν την εκκίνηση των πειραμάτων

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σιλικόνη περιμετρικά σε όλες τις ενώσεις των κατασκευών για την πλήρη αδιαβροχοποίηση των ευαίσθητων περιοχών, ενώ έγινε και επικόλληση αδιάβροχων ταινιών σε σημεία όπου το ξύλο παρουσίαζε ατέλειες-πόρους, για να αποφευχθεί εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του. Τέλος, διαμορφώθηκαν επίσης οπές-υποδοχές σε τρία σημεία στο τριγωνικό κατάστρωμα ώστε το μοντέλο τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων να μπορεί να ανυψωθεί με τη βοήθεια σχοινιών και του γερανού και να τοποθετηθεί εντός της δεξαμενής.



**Εικόνα 3.17** Τα σχοινιά ανύψωσης και οι γραμμές βυθισμάτων στην τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων

Πριν από τα πειράματα έγινε καταγραφή του βάρους των μοντέλων και των τμημάτων τους, ενώ κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων γινόταν καθημερινός έλεγχος για ασυνέχειες (cracks) του χρώματος των μοντέλων και στο τέλος κάθε ημέρας πειραμάτων σκουπίζονταν καλά ώστε να μην παραμείνει υγρασία.

## 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### Βαθμονομήσεις

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων έγινε χρήση αισθητήρων αντίστασης (δυναμόμετρων), αισθητήρων ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (wave probes) και αισθητήρα κατακόρυφης μετατόπισης των μοντέλων (αισθητήρας heave). Οι αισθητήρες είναι μετρητικά όργανα που αντιλαμβάνονται τις μεταβολές κάποιου μεγέθους ως μεταβολές ρεύματος και τις καταγράφουν ως μεταβολές τάσης, σε μονάδες Volt. Για να μεταφραστούν αυτές οι μεταβολές στις πραγματικές μονάδες του μεγέθους που εκφράζουν, απαιτείται μια συνάρτηση μεταφοράς για το κάθε μέγεθος.

Μια συνάρτηση μεταφοράς είναι μια γραμμική συνάρτηση της μορφής  $y = ax + b$  όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το μετρούμενο μέγεθος σε Volt και η εξαρτημένη μεταβλητή αποκτά τις πραγματικές μονάδες του μεγέθους όπως αυτές καθορίζονται από το σύστημα S.I.. Η διαδικασία που απαιτείται ώστε να παραχθούν οι κατάλληλες εξισώσεις μεταφοράς ονομάζεται βαθμονόμηση και αφορά στην αντιστοίχιση γνωστών τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής με τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Προκύπτουν, έτσι, ζεύγη τιμών εξαρτημένης-ανεξάρτητης μεταβλητής, με τη βοήθεια των οποίων καθορίζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς.

Ο κάθε αισθητήρας έχει διαφορετική ευαισθησία και επηρεάζεται από διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες, δεδομένα από τα οποία εξαρτάται και η συχνότητα πραγματοποίησης βαθμονόμησης. Επιπλέον, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καλό είναι να λαμβάνονται μηδενικές τιμές σε κατάσταση ηρεμίας τόσο του νερού όσο και της κατασκευής ώστε να ελέγχονται οι αποκρίσεις των αισθητήρων και να καταγράφονται οι μηδενικές φυσικές τιμές των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο έλεγχος των συναρτήσεων μεταφοράς.

Παρακάτω παρουσιάζονται, η διαδικασία βαθμονόμησης για κάθε αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις, η συχνότητα πραγματοποίησης τους καθώς και ενδεικτικά αποτελέσματα.



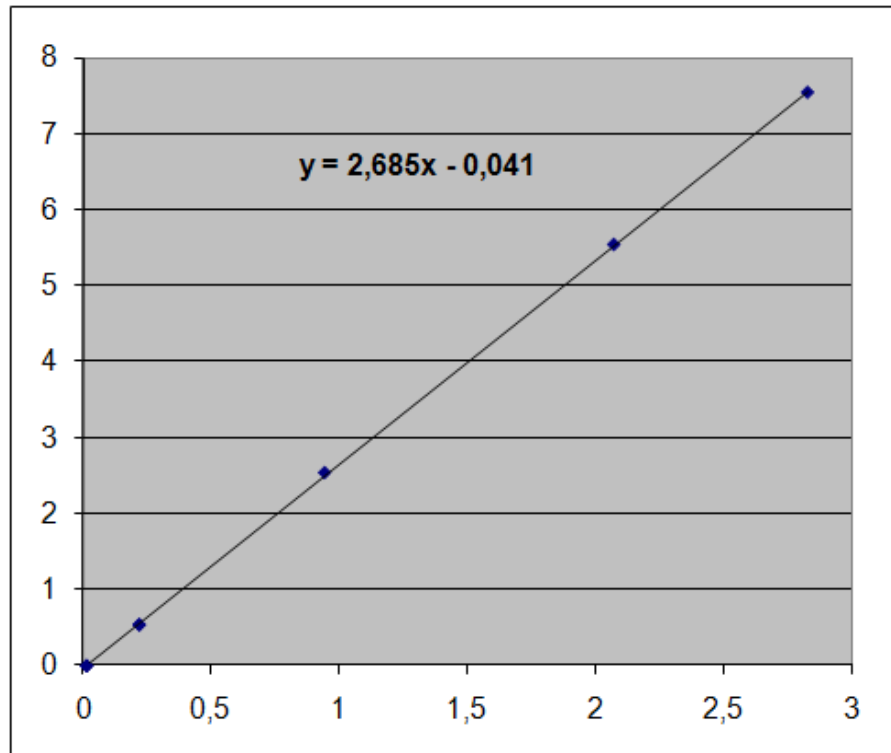
## Βαθμονόμηση αισθητήρων αντίστασης

Τα δυναμόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν (R35 και R47) βαθμονομήθηκαν δύο φορές το καθένα για κάθε διεύθυνση φόρτισης. Στην περίπτωση του αισθητήρα αντίστασης R35 που δεν επιτρέπει ελευθερία κίνησης, δεν ήταν εφικτή η βαθμονόμηση με το μοντέλο προσδεμένο σε αυτό. Γι' αυτόν το λόγο η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε εκτός δεξαμενής και με ανάρτηση πρότυπων βαρών στον πρόβολο του δυναμόμετρου σε οριζόντια θέση με τη βοήθεια τροχαλίας. Στην περίπτωση του αισθητήρα αντίστασης R47, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε εντός πειραματικής δεξαμενής, πάλι με την χρήση πρότυπων βαρών, με το μοντέλο προσδεμένο σε αυτό.

Παρακάτω φαίνεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα αντίστασης R35 που πραγματοποιήθηκε στις 6 Ιουνίου 2012, λίγες μέρες πριν την έναρξη της περιόδου πειραμάτων.

<b>Βαθμονόμηση αισθητήρα: Resist. 35</b>	
<b>Ημερομηνία: 6/6/2012</b>	
<b>Volts</b>	<b>kg</b>
0,017	0,00
0,221	0,54
0,945	2,54
2,074	5,54
2,830	7,54
0,222	0,54
0,016	0,00

**Πίνακας 3.5** Βαθμονόμηση αισθητήρα αντίστασης (*resistance*) R35



Εικόνα 3.18 Συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα αντίστασης (resistance) R35

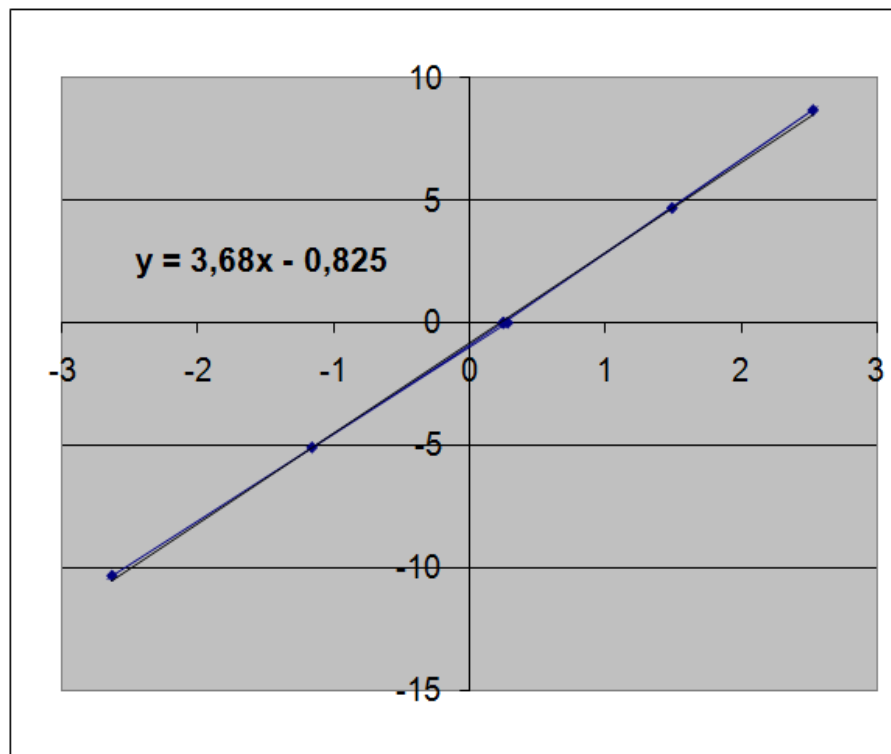
### Βαθμονόμηση waveprobes

Για τους αισθητήρες ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού γινόταν βαθμονόμηση κάθε πρωί πριν την έναρξη των πειραμάτων, ώστε η κατάσταση του νερού να είναι όσο το δυνατόν πιο ήρεμη. Για τα waveprobes που ήταν κολλημένα στα υπό μελέτη μοντέλα η βαθμονόμηση γινόταν χειροκίνητα με την κατακόρυφη μετακίνηση ολόκληρων των μοντέλων γύρω από τη μηδενική θέση αναφοράς (το βύθισμα σχεδίασης). Για εκείνα που είναι τοποθετημένα στη δεξιαμενή και βρίσκονται πλησίον της γεννήτριας κυματισμών, η βαθμονόμηση γινόταν με την κατακόρυφη μετακίνηση του αισθητήρα σε σχέση με έναν αποστάτη με οπές ανά δύο εκατοστά. Σε κάθε οπή στερεωνόταν ο αισθητήρας και καταγραφόταν το ζεύγος τιμών.

Παρακάτω φαίνεται η βαθμονόμηση του WP0° (waveprobe του σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου που ήταν τοποθετημένο στη διεύθυνση των κυματισμών) που πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουνίου 2012.

Βαθμονόμηση αισθητήρα: WP0°	
Ημερομηνία: 11/6/2012	
Volts	cm
0,253	0,00
1,494	4,70
2,533	8,70
0,247	0,00
-1,161	-5,10
-2,635	-10,35
0,282	0,00

Πίνακας 3.6 Βαθμονόμηση WP0°



Εικόνα 3.19 Συνάρτηση μεταφοράς WP0°

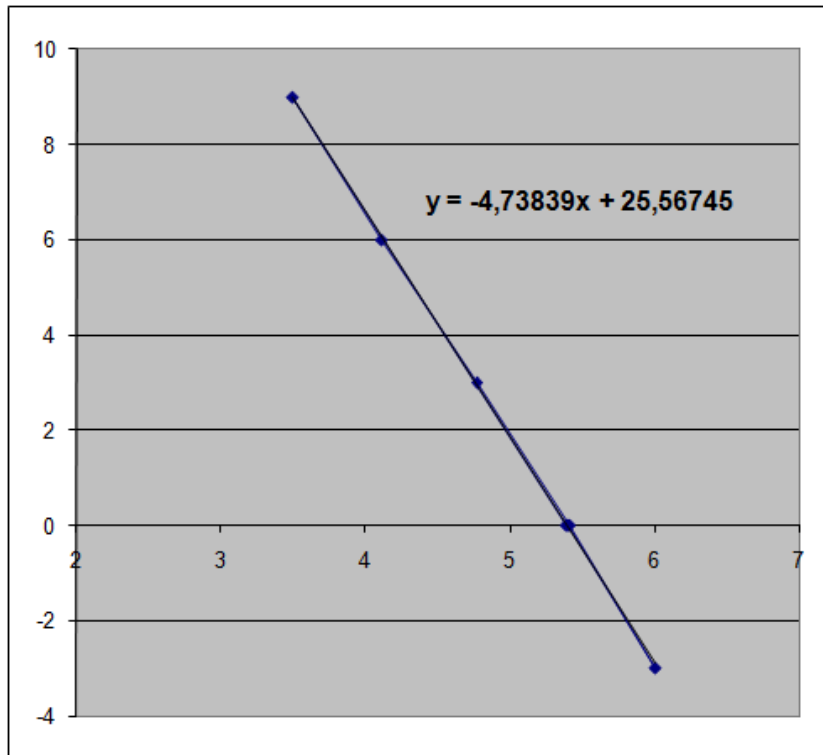
## Βαθμονόμηση αισθητήρα κατακόρυφης μετατόπισης

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα heave πραγματοποιήθηκε μία φορά στο δυναμόμετρο R47 πριν από τα πειράματα με ελευθερία κατακόρυφης κίνησης που αφορούσαν την τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων. Η διαδικασία βαθμονόμησης βασίζεται στη σχετική μετατόπιση μεταξύ του κινούμενου και του σταθερού μέρους του δυναμόμετρου. Πιο συγκεκριμένα, το εν δυνάμει σταθερό μέρος του δυναμόμετρου μετατοπίζοταν κατά τον κατακόρυφο άξονα προκαλώντας διαφορετικές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ αυτού και του κινητού μέρους. Η σχετική μετακίνηση γίνεται με κοχλία και η ακριβής μετακίνηση διαβάζεται από προσαρτημένο χάρακα.

Παρακάτω φαίνεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα heave που πραγματοποιήθηκε στις 20 Ιουνίου 2012.

<b>Βαθμονόμηση αισθητήρα: Heave</b>	
<b>Ημερομηνία: 20/6/2012</b>	
<b>Volts</b>	<b>cm</b>
5,404	0
6,008	-3
5,417	0
4,769	3
4,116	6
3,497	9
5,394	0

**Πίνακας 3.7** Βαθμονόμηση αισθητήρα heave



**Εικόνα 3.20** Συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα heave

## Πειραματικές μετρήσεις

Σκοπός των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των πρότυπων μοντέλων τα οποία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ώστε να αποτελέσουν πλωτές εξέδρες που θα φέρουν ανεμογεννήτριες. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πρότυπα μοντέλα, ένας **σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος** και μια **τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων**.

Η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής. Η διάρκεια των πειραμάτων ήταν δύο εβδομάδες και συγκεκριμένα από τη Δευτέρα 11 Ιουνίου 2012 μέχρι και την Παρασκευή 22 Ιουνίου 2012.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετρήθηκαν τα εξής:

- Η **αντίσταση του μοντέλου**, δηλαδή η οριζόντια δύναμη που δέχεται σε αρμονικούς κυματισμούς, που μετρήθηκε με τη βοήθεια των δυναμόμετρων R35 και R47. Η αντίσταση του μοντέλου μετρήθηκε σε όλα τα πειράματα.
- Η **ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού** που μετρήθηκε μέσω των waveprobes (τα προσαρτημένα στα μοντέλα και αυτό που βρίσκεται στη δεξαμενή κοντά στον κυματιστήρα). Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μετρήθηκε σε όλα τα πειράματα.
- Η **κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου (heave)**, που μετρήθηκε με τη βοήθεια του δυναμόμετρου R47. Η κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου μετρήθηκε σε κάποια από τα πειράματα με την τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων.

Τα παραπάνω μεγέθη μετρήθηκαν τόσο σε ήρεμο νερό όσο και κατά την ύπαρξη κυματισμών, οι οποίοι παράγονταν από τον κυματιστήρα με την κατάλληλη εντολή λογισμικού και κυμαίνονταν από 0.40 Hz έως 0.80 Hz σε συχνότητα και είχαν πλάτη 4 cm, 6 cm και 8 cm. Επιπλέον, τα μοντέλα ήταν είτε ακίνητα είτε κινούμενα με την επιθυμητή πρόσω ή πίσω ταχύτητα, μέσω της κίνησης του φορείου στο οποίο ήταν προσδεμένο το δυναμόμετρο και κατ' επέκταση και τα ίδια τα μοντέλα.



**Εικόνα 3.21** Ο Η/Υ του φορείου μέσω του οποίου ελέγχονταν οι πειραματικές μετρήσεις

Η κάθε πειραματική μέτρηση με κυματισμούς είχε διάρκεια 60 δευτερόλεπτα. Πριν την έναρξη της μέτρησης γινόταν εισαγωγή των δεδομένων του επιθυμητού κυματισμού (συχνότητα και πλάτος) στο λογισμικό του φορείου, το οποίο έδινε εντολή έναρξης παραγωγής κυματισμών στον κυματιστήρα. Όταν οι κυματισμοί προσπερνούσαν το μοντέλο ξεκινούσε η καταγραφή των μεγεθών. Στις περιπτώσεις στις οποίες το φορείο (άρα και το μοντέλο) είχε πρόσω ή πίσω κίνηση η καταγραφή των μεγεθών ξεκινούσε μετά την σταθεροποίηση της ταχύτητας στην επιθυμητή τιμή. Μετά το πέρας κάθε πειραματικής μέτρησης δινόταν εντολή να διακοπεί η παραγωγή κυματισμών, το φορείο επέστρεφε στην αρχική του θέση (στις περιπτώσεις όπου υπήρχε κίνηση) και η κεκλιμένη μεταλλική επιφάνεια στο πρυμναίο τμήμα του φορείου (σιδερώστρα) κατέβαινε στο επίπεδο της επιφάνειας του νερού με σκοπό την απόσβεση των κυματισμών. Για την ταχύτερη απόσβεση των κυματισμών σε ένα μέρος των πειραμάτων τοποθετήθηκαν κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων της δεξαμενής από την ειδική ξύλινη διάταξη απόσβεσης κυματισμών (αποσβεστήρα) μέχρι και λίγα μέτρα πριν το φορείο, ειδικοί φελλοί. Μεταξύ δύο πειραματικών μετρήσεων υπήρχε αναμονή 20 λεπτών (17 λεπτών στην περίπτωση που ήταν τοποθετημένοι οι ειδικοί φελλοί) ώστε να ηρεμήσει πλήρως η επιφάνεια του νερού. Τέλος, ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβανόταν μέτρηση των επιθυμητών μεγεθών σε κατάσταση πλήρους ηρεμίας του νερού, διάρκειας 10 δευτερολέπτων.

Παρακάτω περιγράφονται οι υποπεριπτώσεις πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για το καθένα από τα δύο πειραματικά μοντέλα.

## **Σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος**

Με τον σύνθετο κατακόρυφο κύλινδρο εκτελέστηκαν μόνο πειράματα κατά τα οποία το μοντέλο ήταν πακτωμένο στο δυναμόμετρο (δυναμόμετρο R35). Αυτό σημαίνει πως το μοντέλο δεν είχε κανένα βαθμό ελευθερίας. Τα πειράματα αυτά προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες εγκατεστημένης και αγκυρωμένης πλωτής εξέδρας.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα τόσο με πλήρη ακινησία του μοντέλου όσο και με μικρή σταθερή πρόσω και πίσω ταχύτητα. Η κίνηση του μοντέλου προερχόταν ουσιαστικά από την κίνηση του φορείου πάνω στο οποίο ήταν προσδεμένο το δυναμόμετρο και προσομοίαζε τα θαλάσσια ρεύματα.

Για την συγκεκριμένη κατασκευή μελετήθηκαν δύο διαφορετικά βύθισμα,  $T = 45$  cm και  $T = 50$  cm.

## **Τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων**

Με την τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων εκτελέστηκαν πειράματα με δύο διαφορετικά δυναμόμετρα. Σε πρώτη φάση το μοντέλο ήταν πακτωμένο στο δυναμόμετρο (δυναμόμετρο R35) ενώ σε δεύτερη φάση το μοντέλο είχε ελευθερία κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα (δυναμόμετρο R47). Τα πειράματα με το δυναμόμετρο R47 πραγματοποιήθηκαν για την ανεύρεση της συχνότητας συντονισμού της κατασκευής, δηλαδή της συχνότητας κυματισμού κατά την οποία η κατασκευή παραμένει σταθερή παρά την ελευθερία κίνησής της κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα τόσο με πλήρη ακινησία του μοντέλου όσο και με μικρή σταθερή πρόσω και πίσω ταχύτητα.

Για τη συγκεκριμένη κατασκευή μελετήθηκε ένα βύθισμα,  $T = 50$  cm.

Ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες με το σύνολο των πειραμάτων με κυματισμούς χωρισμένα ανά πρότυπο μοντέλο, δυναμόμετρο και βύθισμα.



**ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 45 cm**

Αριθμός Πειράματος N [-]	Ταχύτητα Συστήματος V [m/s]	Πλάτος Κυματισμού H/2 [cm]	Συχνότητα Κυματισμού f [Hz]
1	0,000	6	0,40
2	0,000	6	0,50
3	0,000	6	0,60
4	0,000	6	0,70
5	0,000	6	0,80
6	+0,060	6	0,40
7	+0,060	6	0,50
8	+0,060	6	0,60
9	+0,060	6	0,70
10	+0,060	6	0,80
11	-0,060	6	0,40
12	-0,060	6	0,50
13	-0,060	6	0,60
14	-0,060	6	0,70
15	-0,060	6	0,80

**ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Αριθμός Πειράματος N [-]	Ταχύτητα Συστήματος V [m/s]	Πλάτος Κυματισμού H/2 [cm]	Συχνότητα Κυματισμού f [Hz]
16	0,000	4	0,40
17	0,000	4	0,45
18	0,000	4	0,50
19	0,000	4	0,60
20	0,000	4	0,70
21	0,000	4	0,80
22	0,000	6	0,40
23	0,000	6	0,45
24	0,000	6	0,50
25	0,000	6	0,60
26	0,000	6	0,70
27	0,000	6	0,80
28	0,000	8	0,50
29	0,000	8	0,60
30	0,000	8	0,70
31	0,000	8	0,80
32	+0,060	4	0,40
33	+0,060	4	0,45
34	+0,050	4	0,50
35	+0,060	4	0,60
36	+0,060	4	0,70
37	+0,060	4	0,80
38	+0,085	4	0,40
39	+0,085	4	0,45
40	+0,085	4	0,50
41	+0,085	4	0,60
42	+0,085	4	0,70
43	+0,085	4	0,80
44	+0,085	6	0,40
45	+0,085	6	0,45
46	+0,085	6	0,50
47	+0,085	6	0,60

48	+0,085	6	0,70
49	+0,085	6	0,80
50	+0,120	6	0,40
51	+0,120	6	0,45
52	+0,120	6	0,50
53	+0,120	6	0,60
54	+0,120	6	0,70
55	+0,120	6	0,80
56	-0,060	4	0,40
57	-0,060	4	0,45
58	-0,060	4	0,50
59	-0,060	4	0,60
60	-0,060	4	0,70
61	-0,060	4	0,80
62	-0,085	6	0,40
63	-0,085	6	0,45
64	-0,085	6	0,50
65	-0,085	6	0,60
66	-0,085	6	0,70
67	-0,085	6	0,80

**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ (R35) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Αριθμός Πειράματος N [-]	Ταχύτητα Συστήματος V [m/s]	Πλάτος Κυματισμού H/2 [cm]	Συχνότητα Κυματισμού f [Hz]
68	0,000	4	0,40
69	0,000	4	0,45
70	0,000	4	0,50
71	0,000	4	0,55
72	0,000	4	0,60
73	0,000	4	0,70
74	0,000	4	0,80
75	0,000	6	0,40
76	0,000	6	0,45
77	0,000	6	0,50
78	0,000	6	0,55
79	0,000	6	0,60
80	0,000	6	0,70
81	0,000	6	0,80 <sup>(1)</sup>
82	0,000	6	0,80 <sup>(2)</sup>
83	0,000	8	0,50
84	0,000	8	0,55
85	0,000	8	0,60
86	0,000	8	0,70
87	0,000	8	0,80
88	+0,060	4	0,40
89	+0,060	4	0,45
90	+0,060	4	0,50
91	+0,060	4	0,60
92	+0,060	4	0,70
93	+0,060	4	0,80
94	+0,060	6	0,40
95	+0,060	6	0,45
96	+0,060	6	0,50
97	+0,060	6	0,60
98	+0,060	6	0,70

99	+0,060	6	0,80
100	+0,085	4	0,40
101	+0,085	4	0,45
102	+0,085	4	0,50
103	+0,085	4	0,60
104	+0,085	4	0,70
105	+0,085	4	0,80
106	+0,085	6	0,40
107	+0,085	6	0,45
108	+0,085	6	0,50
109	+0,085	6	0,60
110	+0,085	6	0,70
111	+0,085	6	0,80
112	+0,120	6	0,40
113	+0,120	6	0,45
114	+0,120	6	0,50
115	+0,120	6	0,60
116	+0,120	6	0,70
117	+0,120	6	0,80
118	-0,060	4	0,40
119	-0,060	4	0,45
120	-0,060	4	0,50
121	-0,060	4	0,60
122	-0,060	4	0,70
123	-0,060	4	0,80

**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΙΝΗΣΗ (R47) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Αριθμός Πειράματος N [-]	Ταχύτητα Συστήματος V [m/s]	Πλάτος Κυματισμού H/2 [cm]	Συχνότητα Κυματισμού f [Hz]
124	0,000	4	0,40
125	0,000	4	0,45
126	0,000	4	0,50
127	0,000	4	0,53
128	0,000	4	0,54
129	0,000	4	0,55
130	0,000	4	0,60
131	0,000	4	0,65
132	0,000	4	0,70
133	0,000	4	0,80
134	0,000	6	0,40
135	0,000	6	0,45
136	0,000	6	0,50
137	0,000	6	0,52
138	0,000	6	0,53 <sup>(1)</sup>
139	0,000	6	0,53 <sup>(2)</sup>
140	0,000	6	0,53 <sup>(3)</sup>
141	0,000	6	0,535
142	0,000	6	0,54 <sup>(1)</sup>
143	0,000	6	0,54 <sup>(2)</sup>
144	0,000	6	0,54 <sup>(3)</sup>
145	0,000	6	0,545
146	0,000	6	0,55
147	0,000	6	0,552
148	0,000	6	0,553 <sup>(1)</sup>
149	0,000	6	0,553 <sup>(2)</sup>

150	0,000	6	0,553 <sup>(3)</sup>
151	0,000	6	0,555
152	0,000	6	0,60
153	0,000	6	0,65
154	0,000	6	0,70
155	0,000	6	0,80
156	0,000	8	0,40
157	0,000	8	0,45
158	0,000	8	0,50
159	0,000	8	0,53
160	0,000	8	0,54
161	0,000	8	0,55
162	0,000	8	0,60
163	0,000	8	0,65
164	0,000	8	0,70
165	0,000	8	0,80

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## 4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων μετρήθηκαν, η δύναμη αντίστασης (resistance), η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και η κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου (heave) σε κάποια από τα πειράματα της τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πάρθηκαν αρχικά σε Volt και με τη βοήθεια των συναρτήσεων μεταφοράς που προέκυψαν από τη διαδικασία της βαθμονόμησης, μετατράπηκαν στις πραγματικές τους μονάδες.

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης αφορούσε τη δημιουργία διαγραμμάτων συναρτήσεων του χρόνου (χρονικές ιστορίες) καθώς και πινάκων με υπολογισμό της ελάχιστης τιμής, της μέγιστης τιμής, της τυπικής απόκλισης, της μέσης τιμής και της διαμέσου του κάθε μεγέθους. Η παραπάνω διαδικασία έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Office Excel.

Οι παρακάτω συντομεύσεις χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της κάθε πειραματικής μέτρησης:

<b>T [cm]</b>	Βύθισμα μοντέλου
<b>H/2 [cm]</b>	Πλάτος κυματισμού
<b>f [Hz]</b>	Συχνότητα κυματισμού
<b>V [m/s]</b>	Ταχύτητα φορείου (και μοντέλου)

Οι παρακάτω συντομεύσεις χρησιμοποιήθηκαν για τα στατιστικά μεγέθη:

<b>MIN</b>	Minimum	Ελάχιστη Τιμή
<b>MAX</b>	Maximum	Μέγιστη Τιμή
<b>STDEV</b>	Standard Deviation	Τυπική Απόκλιση
<b>MEAN</b>	Mean	Μέση Τιμή
<b>MEDIAN</b>	Median	Διάμεσος

Τέλος, οι παρακάτω συντομεύσεις χρησιμοποιήθηκαν για τα μετρούμενα μεγέθη ανάλογα με το μετρητικό όργανο (οι θέσεις των waveprobes φαίνονται στις Εικόνα 3.14 και Εικόνα 3.15 στη σελ. 120):

<b>R<sub>x</sub></b> <b>[N]</b>	Resistance	Οριζόντια δύναμη αντίστασης, από το δυναμόμετρο R35 ή R47
<b>WGen</b> <b>[cm]</b>	Wave Generator	Ανύψωση νερού, από το waveprobe που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή πλησίον του κυματιστήρα
<b>Heave</b> <b>[cm]</b>	Heave Motion	Κατακόρυφη κίνηση του μοντέλου, από το δυναμόμετρο R35 ή R47
<b>WP 0°</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 0°	Ανύψωση νερού, από waveprobe στις 0° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών
<b>WP 90°</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 90°	Ανύψωση νερού, από waveprobe στις 90° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών
<b>WP 0° F</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 0° Fore	Ανύψωση νερού, από πωραίο waveprobe στις 0° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών
<b>WP 90° F</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 90° Fore	Ανύψωση νερού, από πωραίο waveprobe στις 90° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών
<b>WP 0° A</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 0° Aft	Ανύψωση νερού, από πρυμναίο waveprobe στις 0° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών
<b>WP 90° A</b> <b>[cm]</b>	Wave Probe 90° Aft	Ανύψωση νερού, από πρυμναίο waveprobe στις 90° ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών

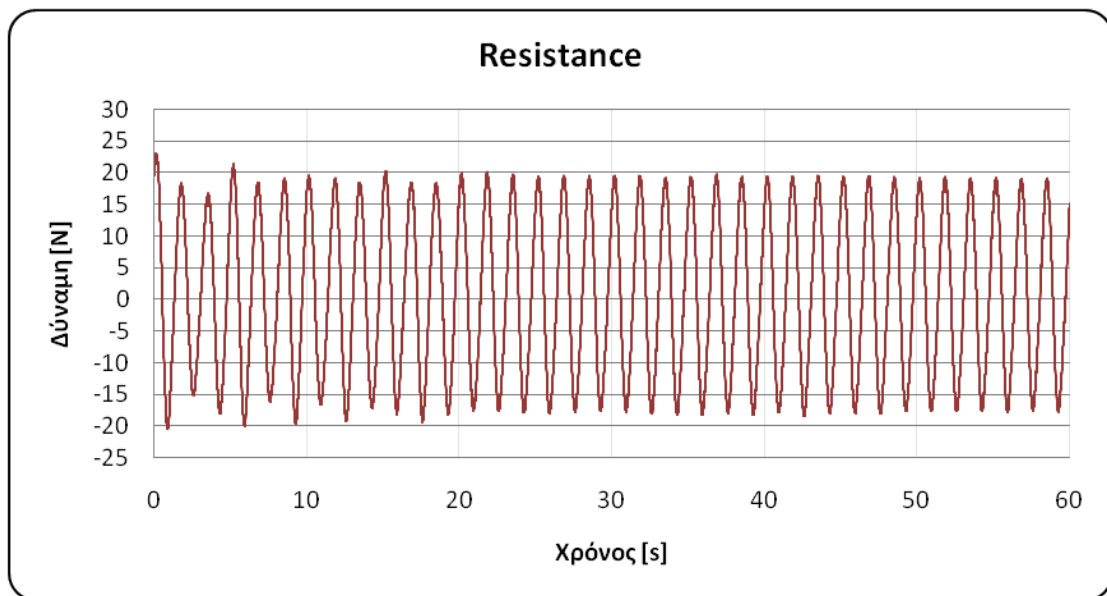
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης κάποιων πειραματικών μετρήσεων. Η ανάλυση του συνόλου των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται στο **Παράρτημα Α**.

**ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 45 cm**

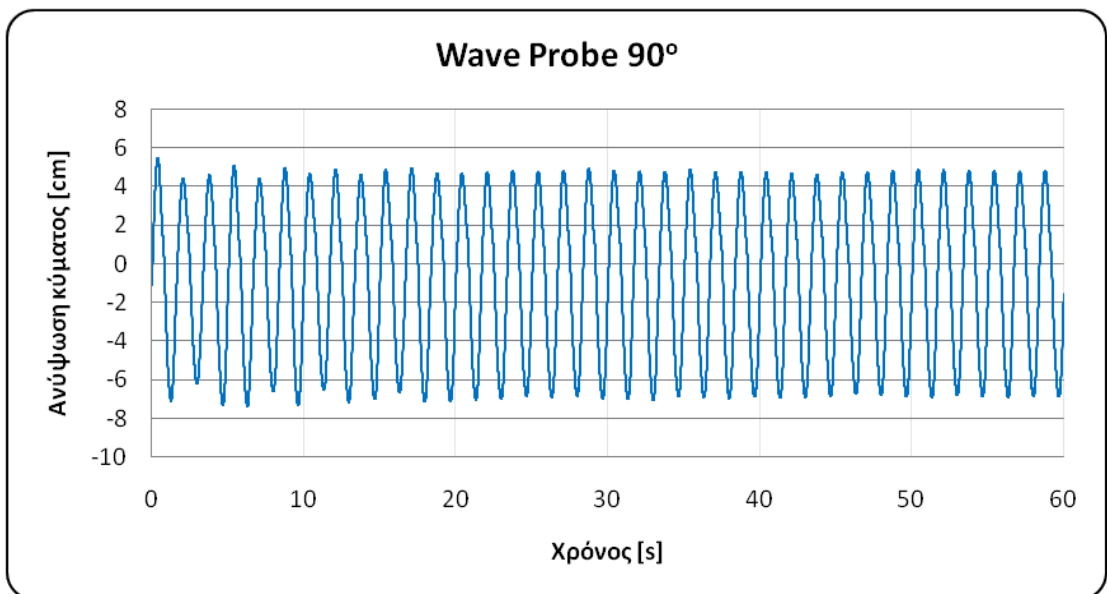
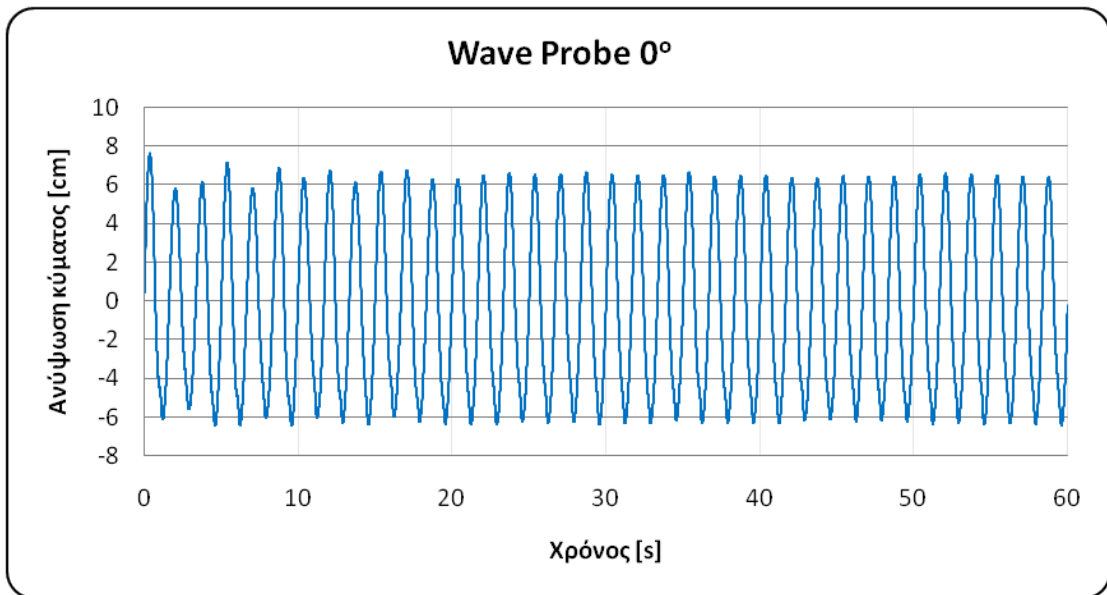
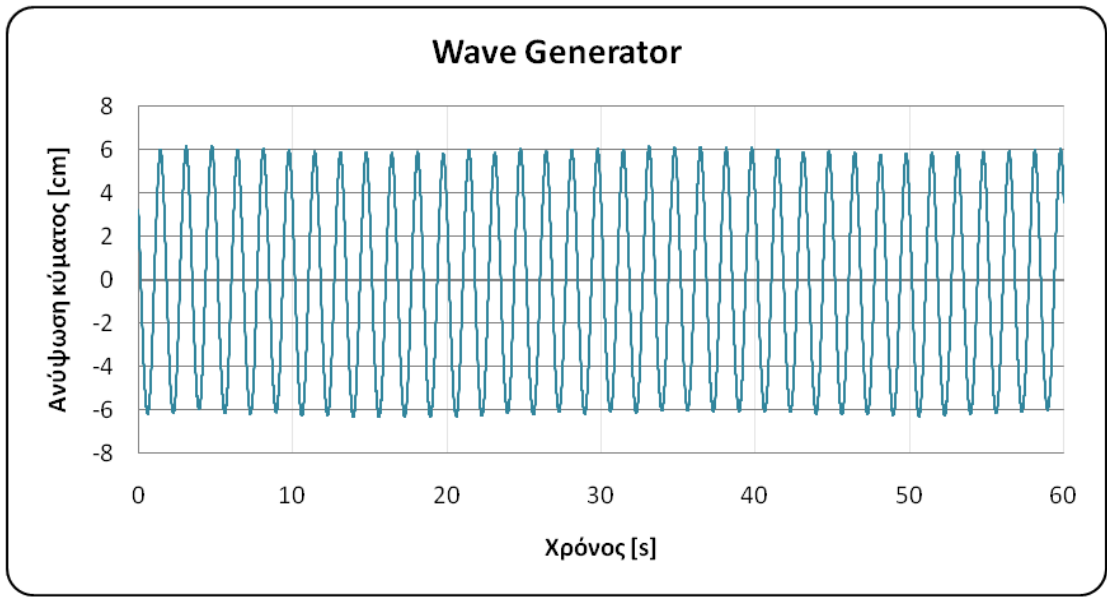
Πείραμα 3

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
<b>45</b>	<b>6</b>	<b>0,60</b>	<b>0,000</b>

	<b>R<sub>x</sub> [N]</b>	<b>WGen [cm]</b>	<b>WP 0° [cm]</b>	<b>WP90° [cm]</b>
<b>MIN</b>	-20,435	-6,347	-6,438	-7,360
<b>MAX</b>	22,939	6,171	7,615	5,469
<b>STDEV</b>	12,800	4,243	4,442	4,085
<b>MEAN</b>	0,773	-0,356	-0,248	-0,900
<b>MEDIAN</b>	0,704	-0,509	-0,895	-0,399



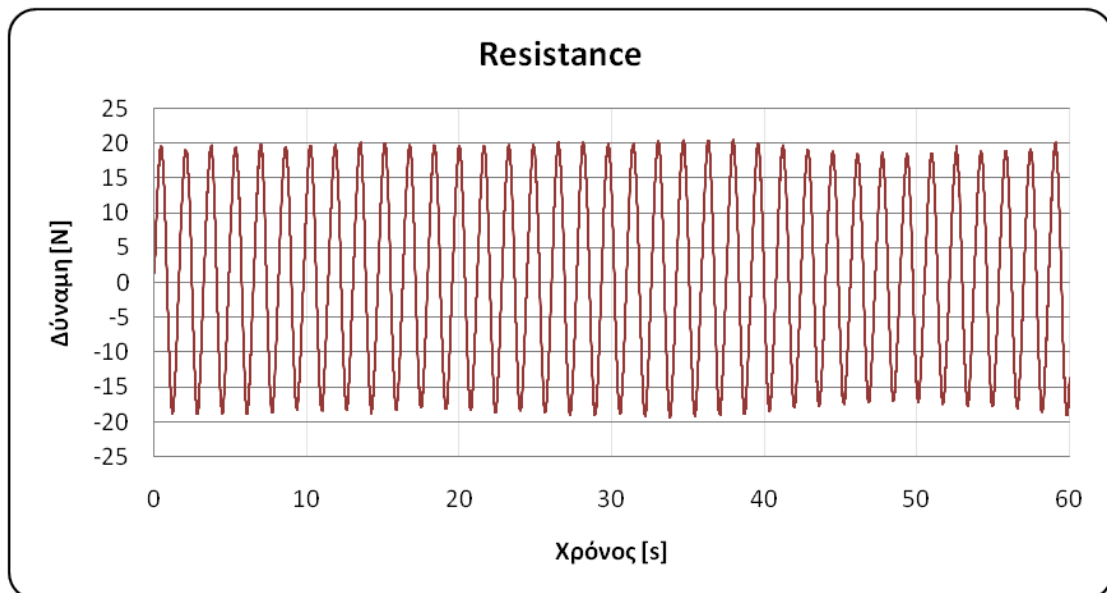


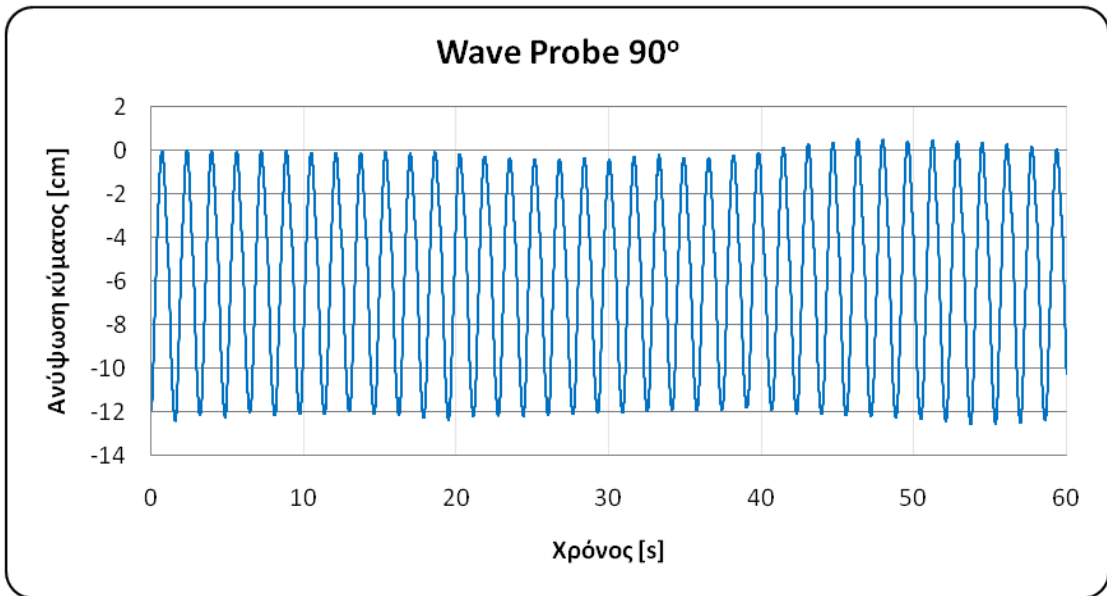
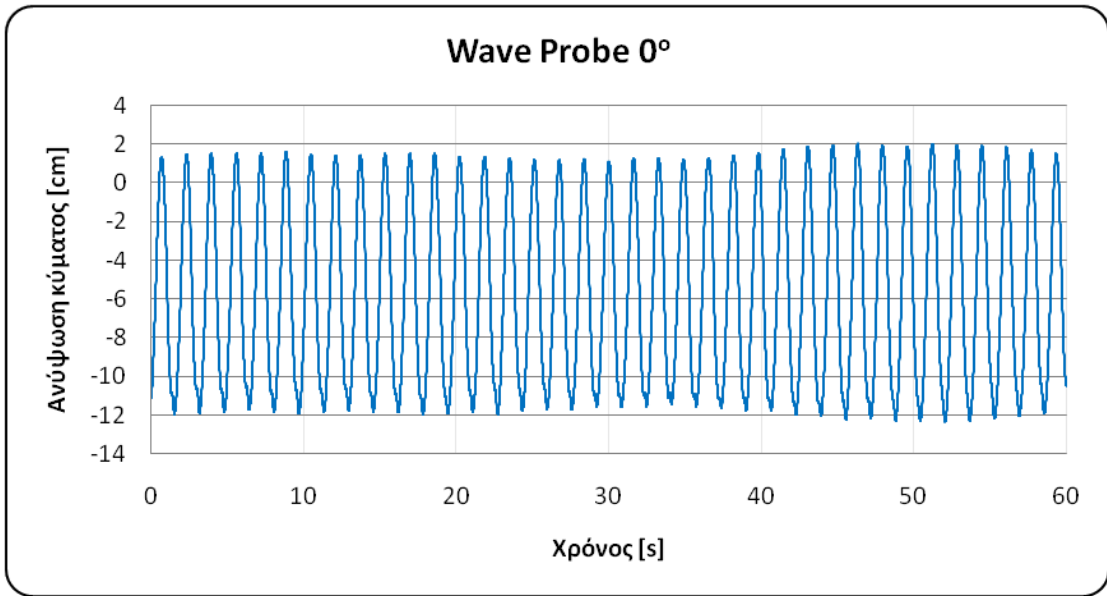
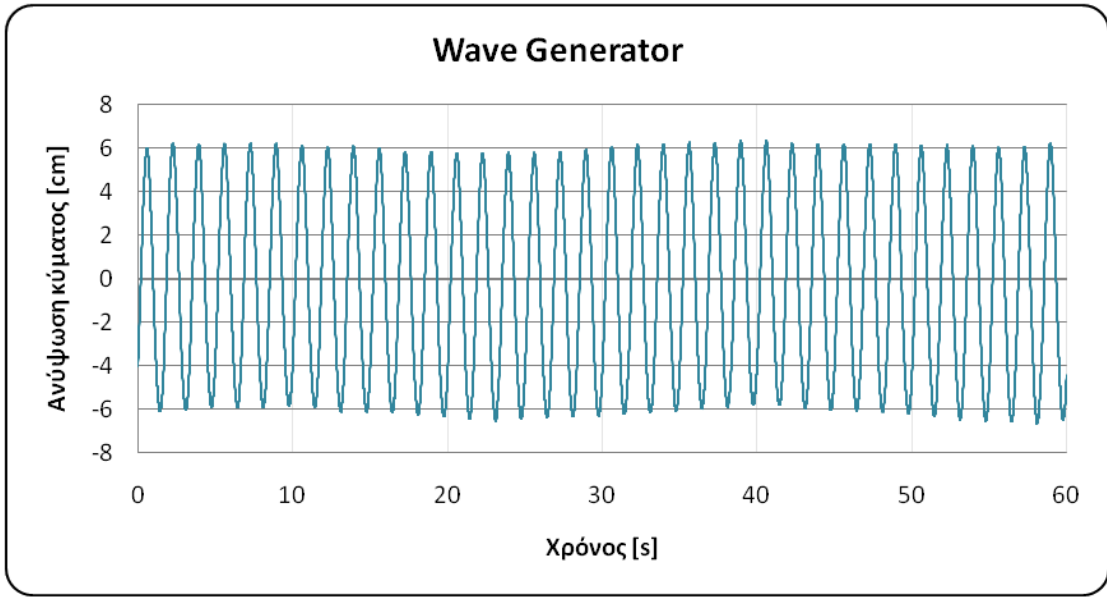


## Πείραμα 8

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
45	6	0,60	0,060

	R <sub>x</sub> [N]	WGen [cm]	WP 0° [cm]	WP90° [cm]
MIN	-19,337	-6,679	-12,338	-12,572
MAX	20,460	6,332	2,010	0,491
STDEV	13,070	4,303	4,759	4,199
MEAN	1,015	-0,296	-5,704	-5,862
MEDIAN	1,313	-0,493	-6,364	-5,330



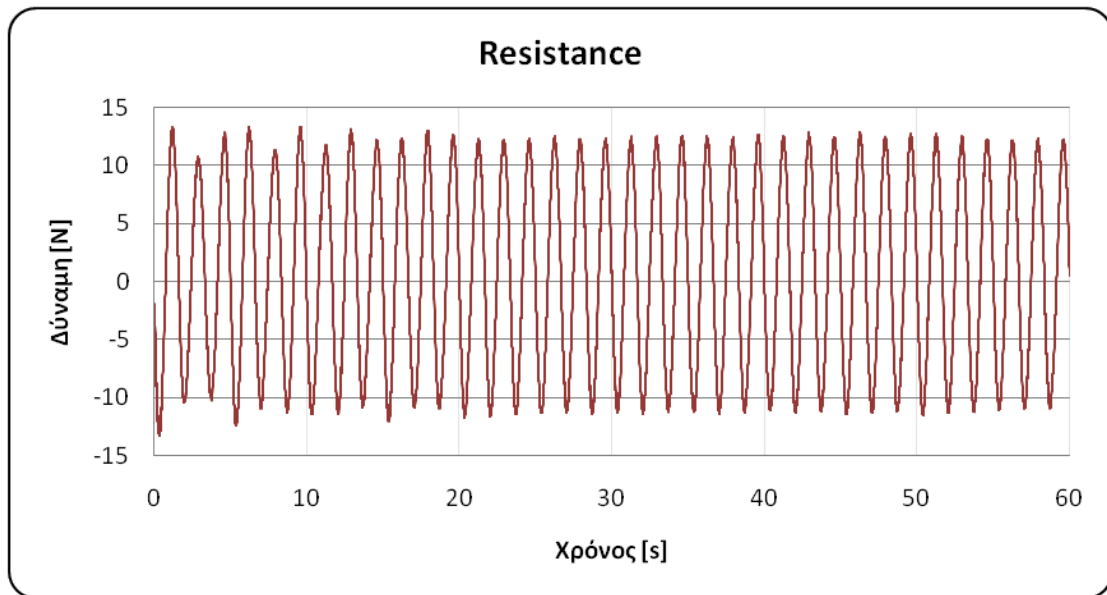


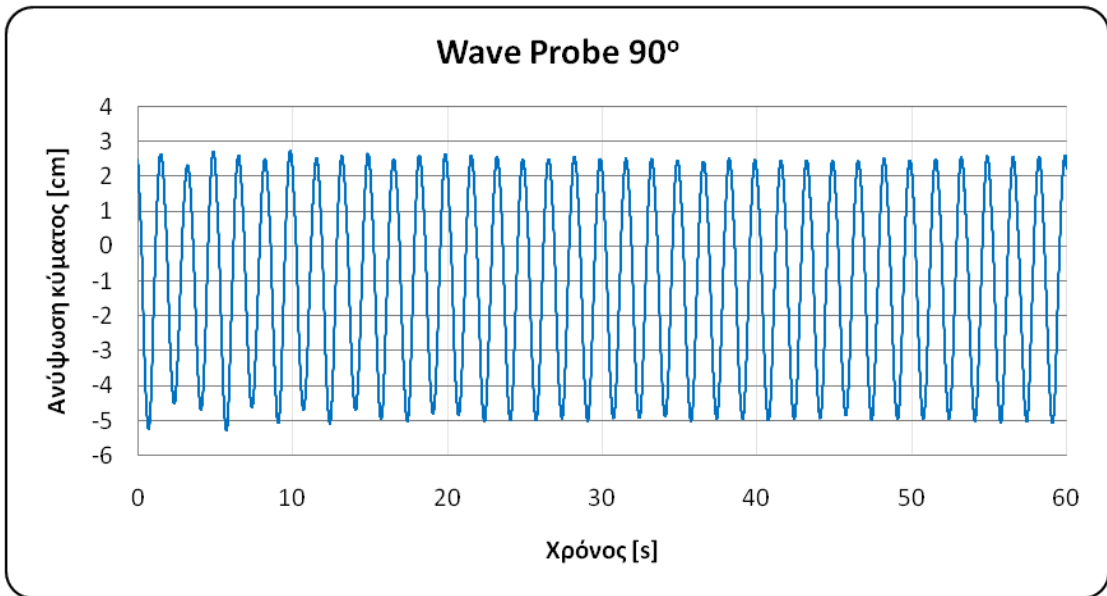
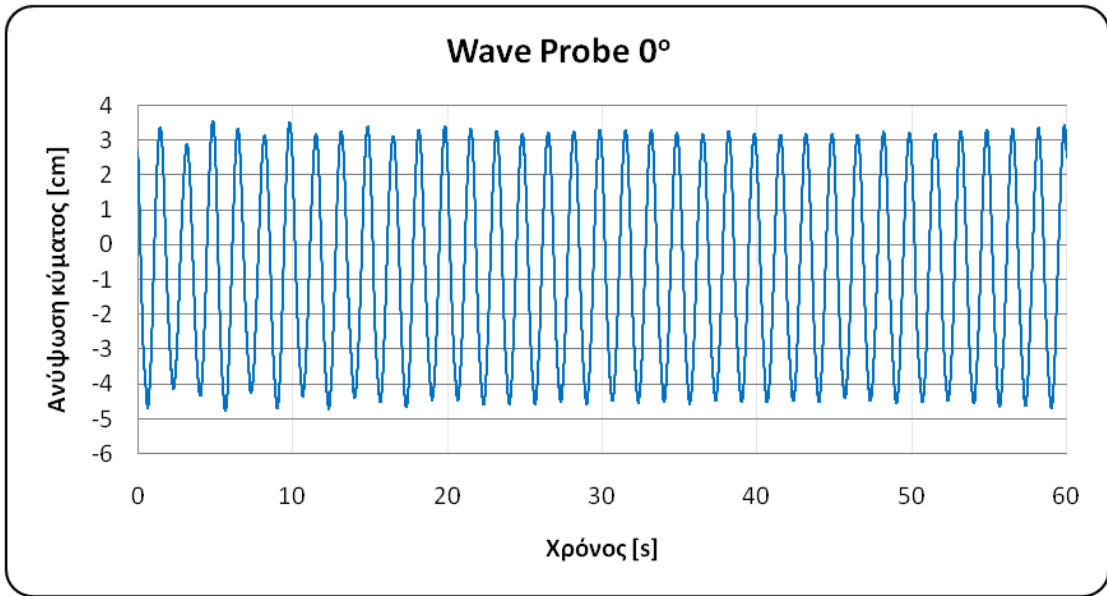
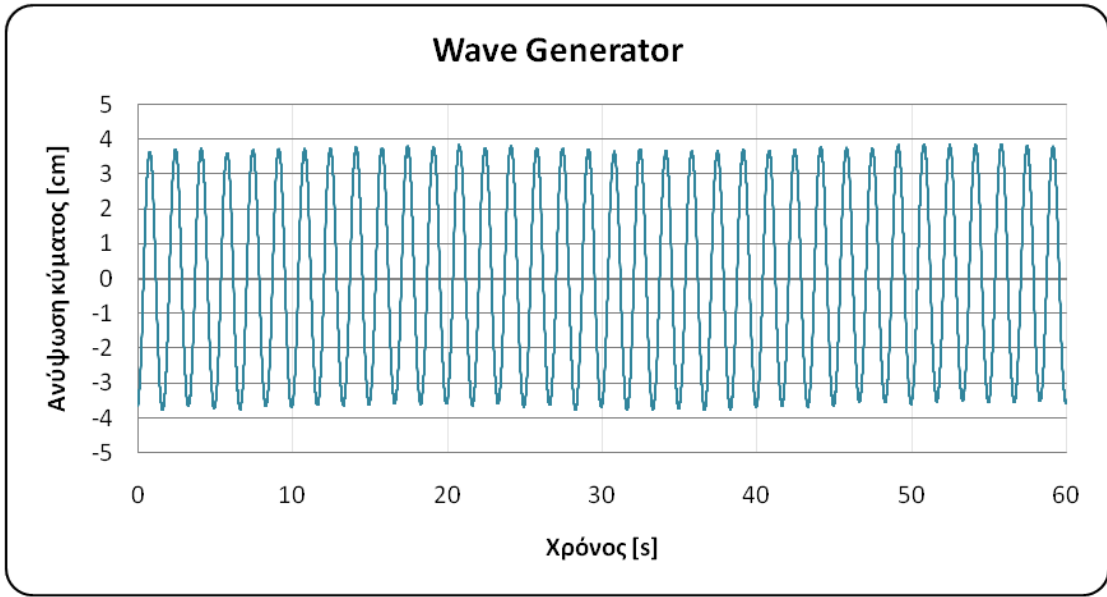
**ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 50cm**

Πείραμα 19

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
<b>50</b>	<b>4</b>	<b>0,60</b>	<b>0,000</b>

	R <sub>x</sub> [N]	WGen [cm]	WP 0° [cm]	WP90° [cm]
<b>MIN</b>	-13,280	-3,768	-4,759	-5,279
<b>MAX</b>	13,326	3,839	3,543	2,715
<b>STDEV</b>	8,225	2,665	2,727	2,630
<b>MEAN</b>	0,705	-0,026	-0,742	-1,068
<b>MEDIAN</b>	0,805	-0,138	-0,899	-0,880

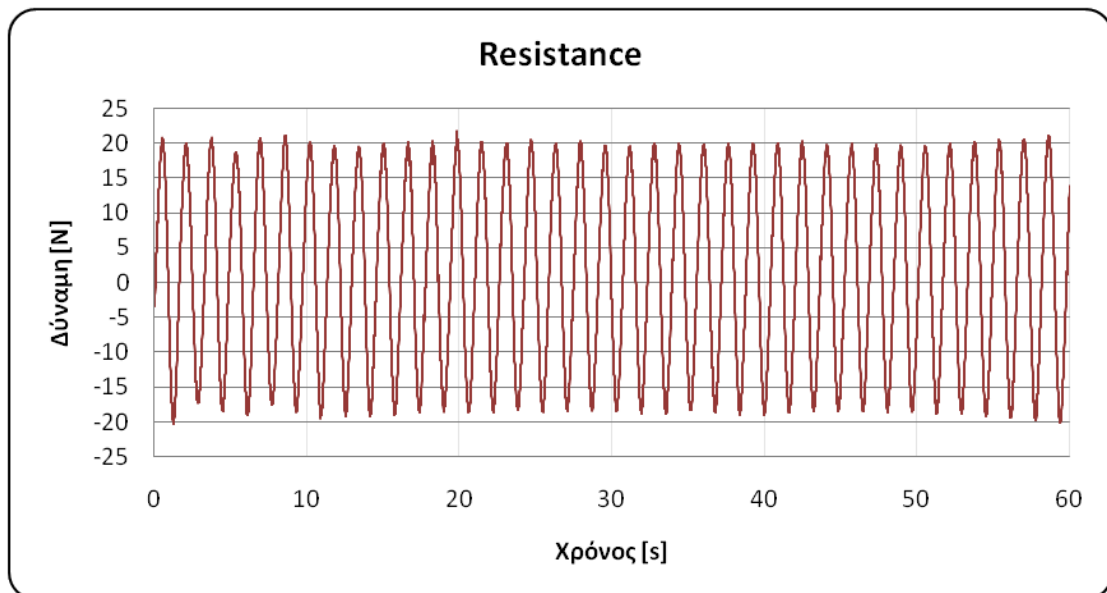


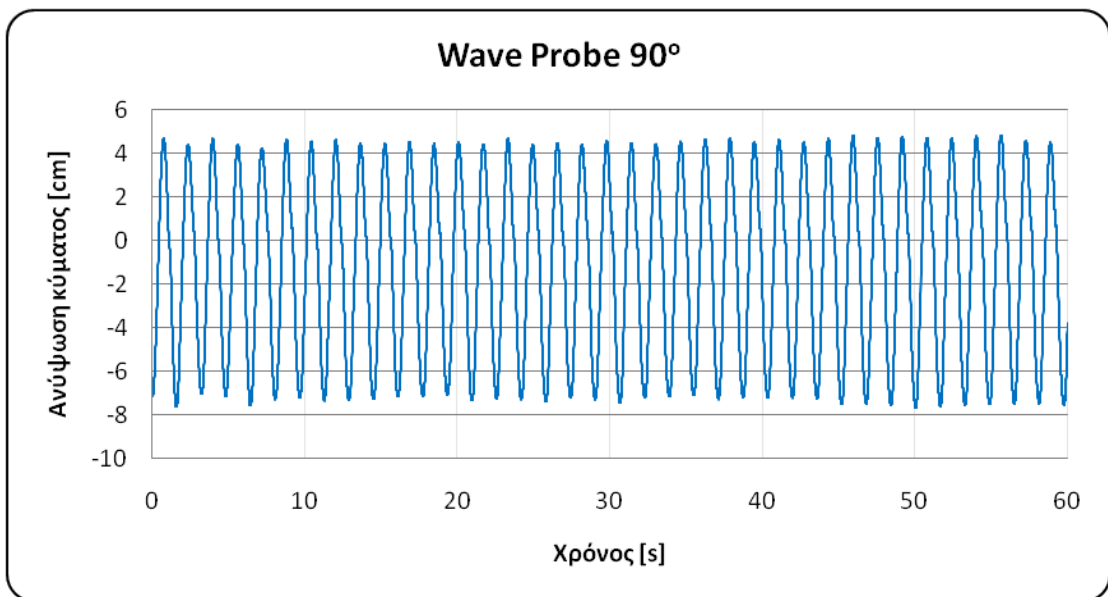
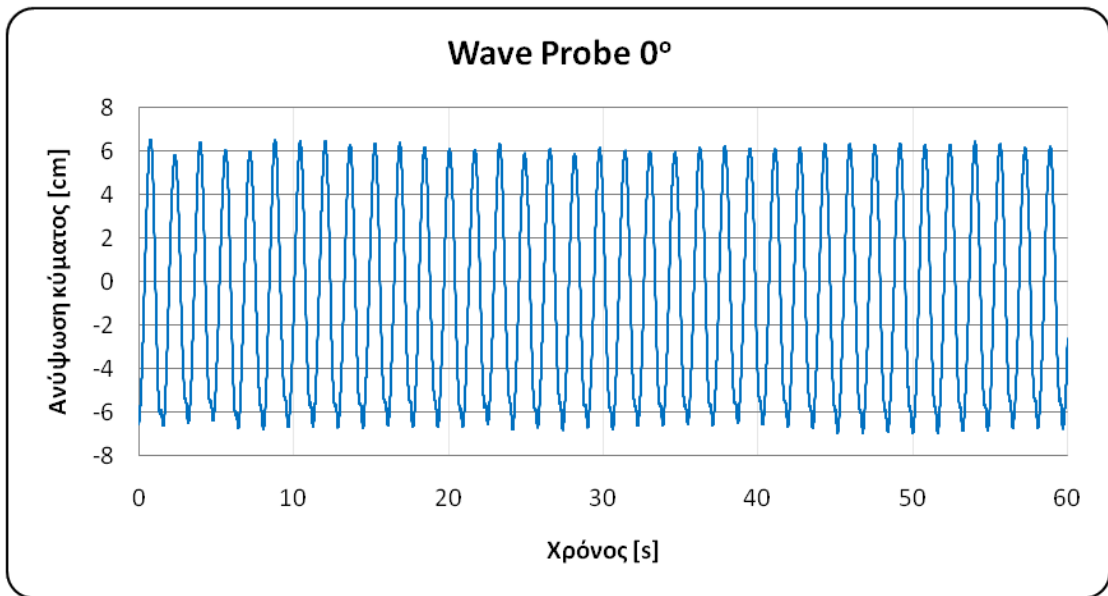
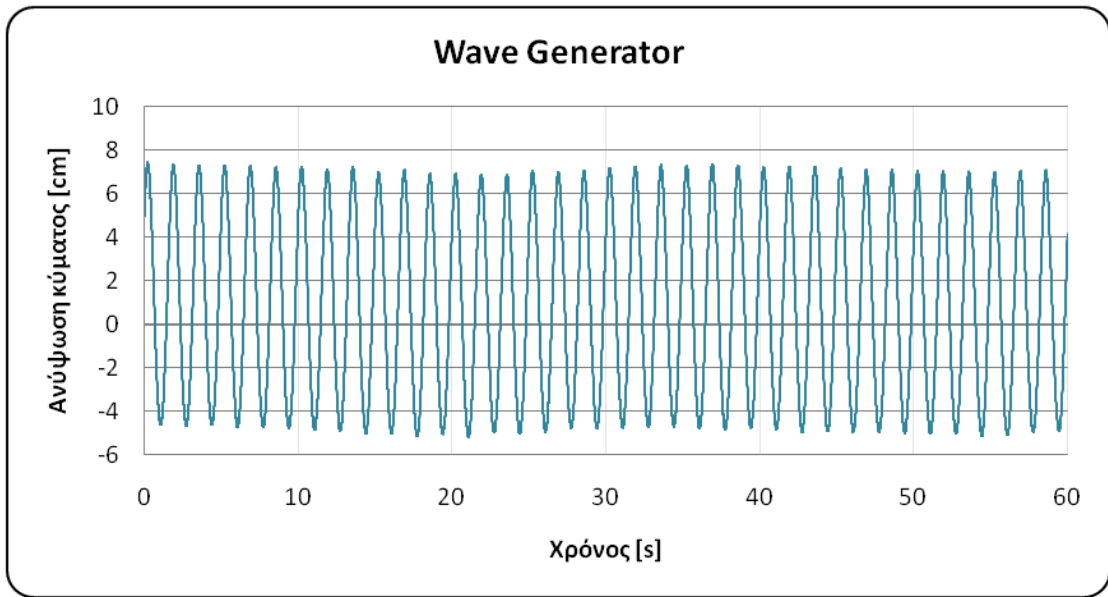


## Πείραμα 47

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	6	0,60	0,085

	R <sub>x</sub> [N]	WGen [cm]	WP 0° [cm]	WP90° [cm]
MIN	-20,231	-5,175	-6,969	-7,680
MAX	21,659	7,429	6,517	4,815
STDEV	13,313	4,204	4,556	4,118
MEAN	1,251	0,865	-0,727	-1,298
MEDIAN	1,699	0,687	-1,289	-0,829



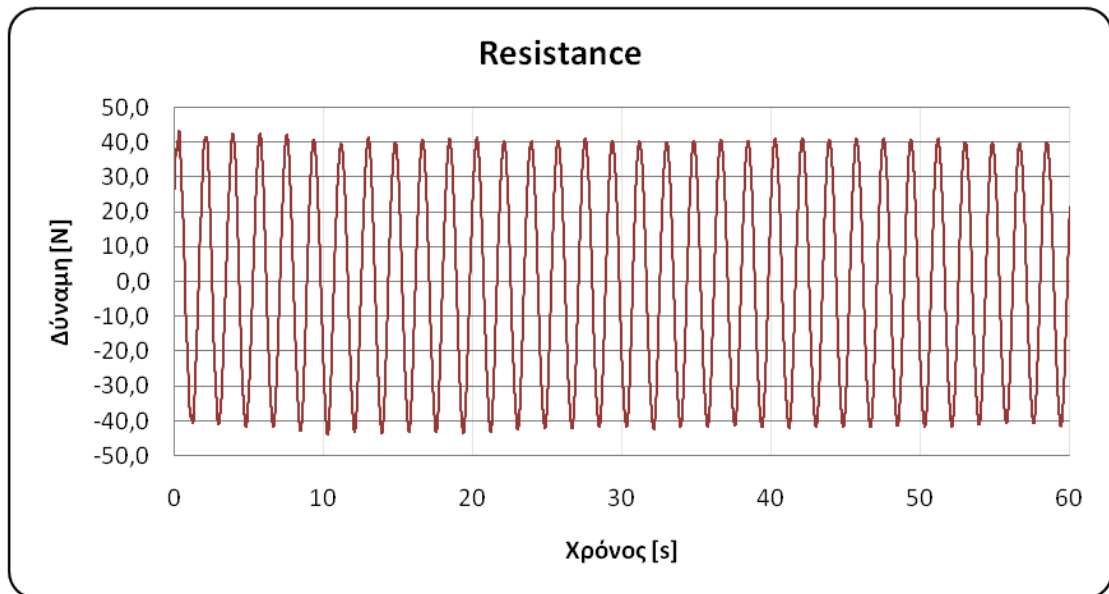


**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ (R35) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Πείραμα 78

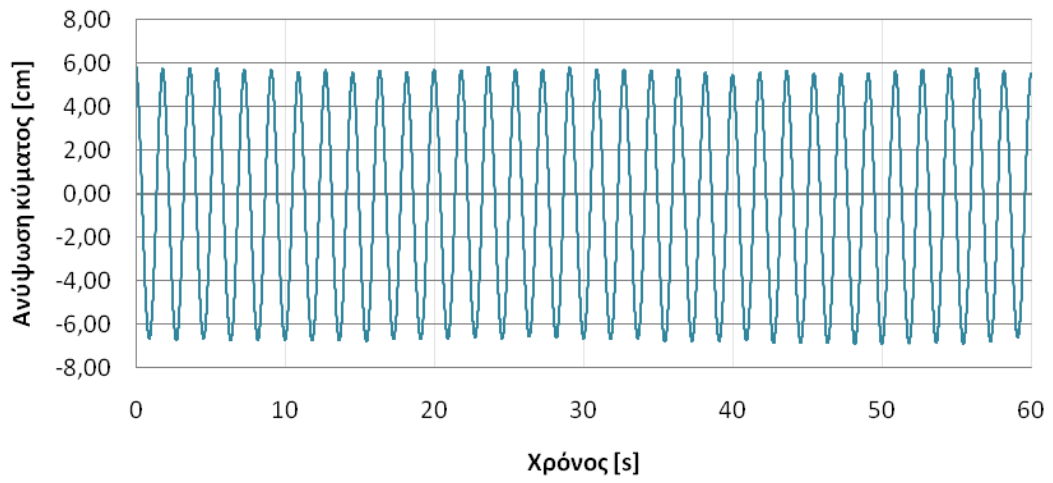
T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
<b>50</b>	<b>6</b>	<b>0,55</b>	<b>0,000</b>

	<b>R<sub>x</sub> [N]</b>	<b>WGen [cm]</b>	<b>WP0°F [cm]</b>	<b>WP 90°F [cm]</b>	<b>WP0°A [cm]</b>	<b>WP 90°A [cm]</b>
<b>MIN</b>	-43,951	-6,930	-6,680	-7,161	-6,575	-7,785
<b>MAX</b>	43,183	5,767	6,009	5,243	6,582	5,057
<b>STDEV</b>	29,030	4,351	4,253	4,215	4,447	4,332
<b>MEAN</b>	-0,034	-0,716	-0,724	-0,835	-0,519	-0,954
<b>MEDIAN</b>	0,317	-0,845	-1,214	-0,713	-1,135	-0,518

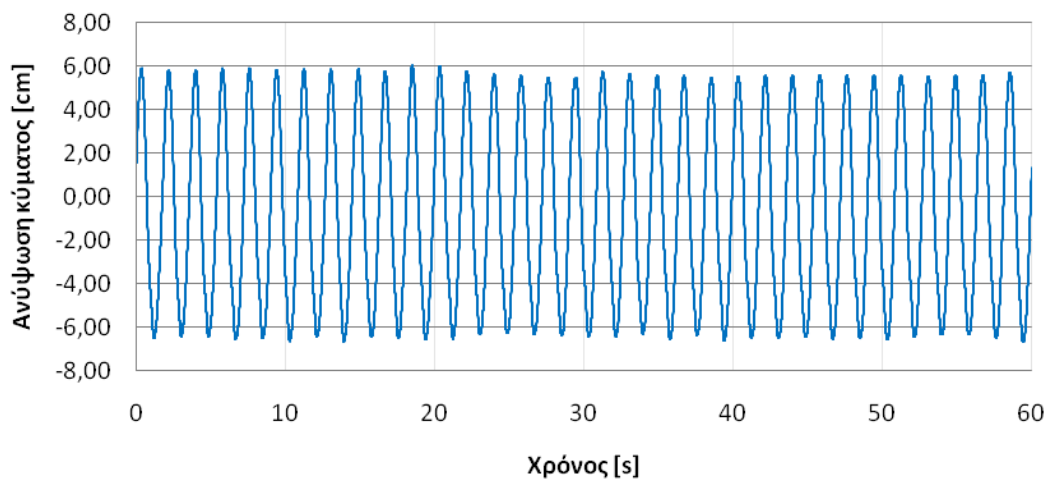




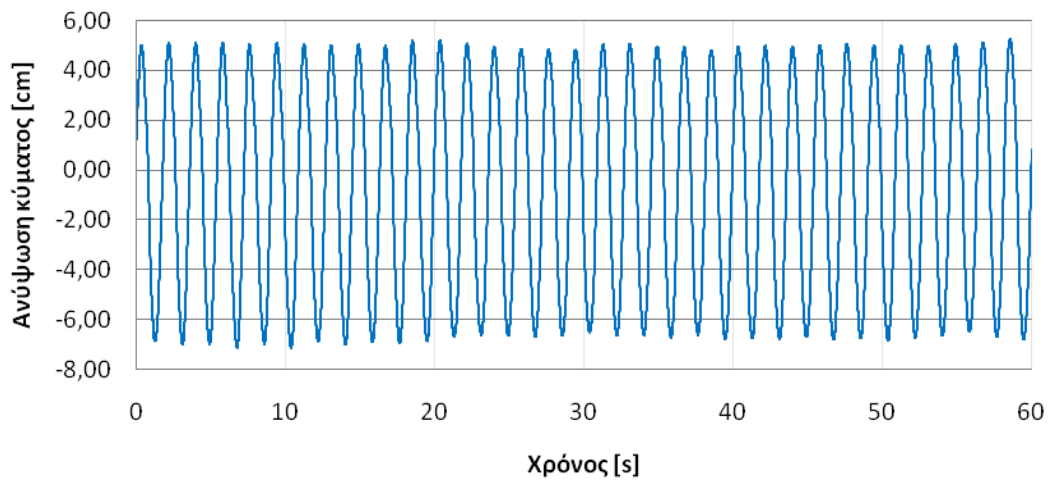
### Wave Generator

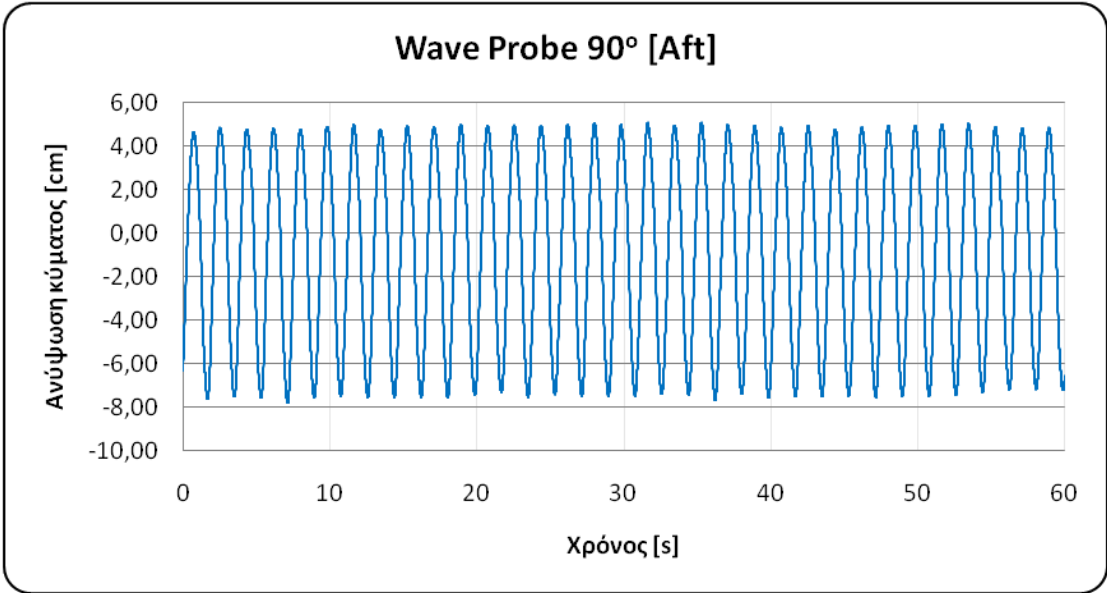
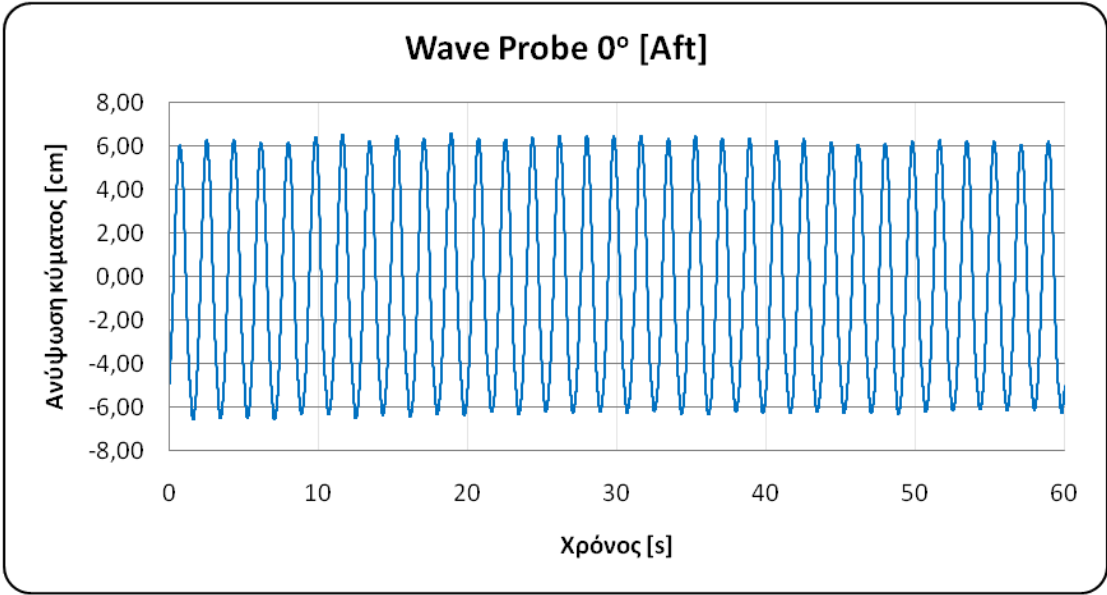


### Wave Probe 0° [Fore]



### Wave Probe 90° [Fore]

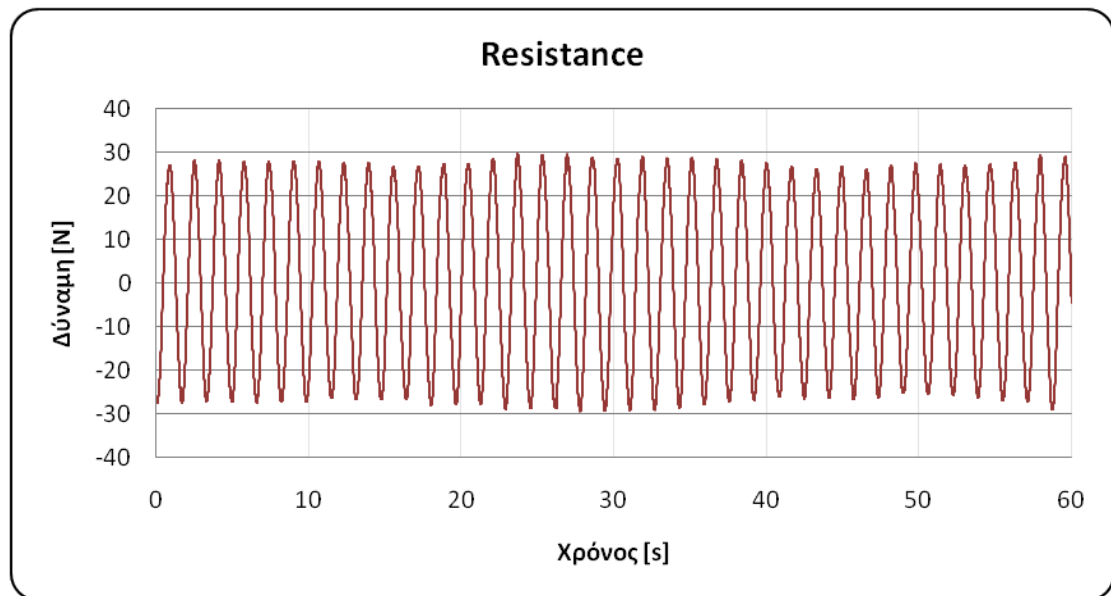




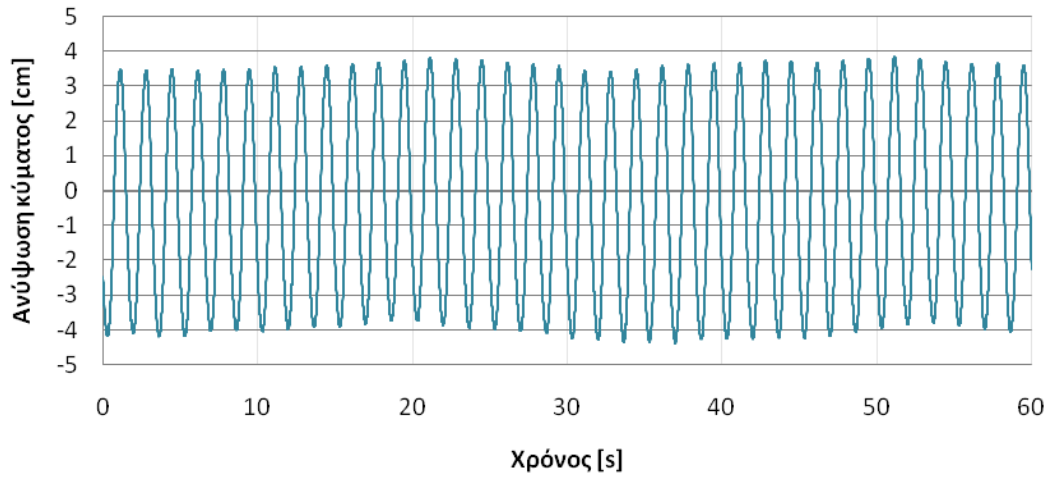
## Πείραμα 91

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	4	0,60	0,060

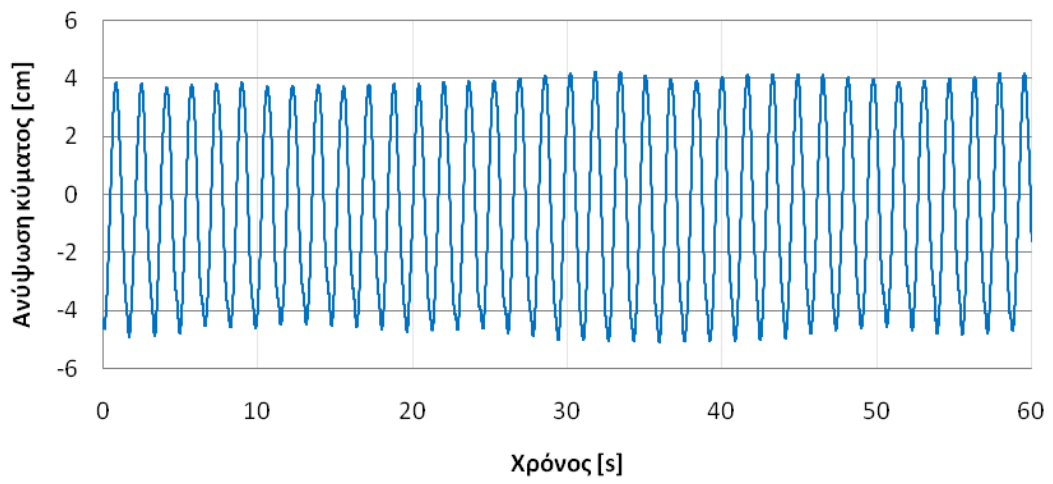
	R <sub>x</sub> [N]	WGen [cm]	WP0°F [cm]	WP 90°F [cm]	WP0°A [cm]	WP 90°A [cm]
MIN	-29,358	-4,389	-5,082	-5,208	-4,432	-4,523
MAX	29,484	3,826	4,206	3,316	4,918	4,000
STDEV	19,417	2,760	3,063	2,754	2,976	2,698
MEAN	0,584	-0,314	-0,505	-0,683	-0,051	-0,085
MEDIAN	1,110	-0,454	-0,708	-0,341	-0,388	0,240



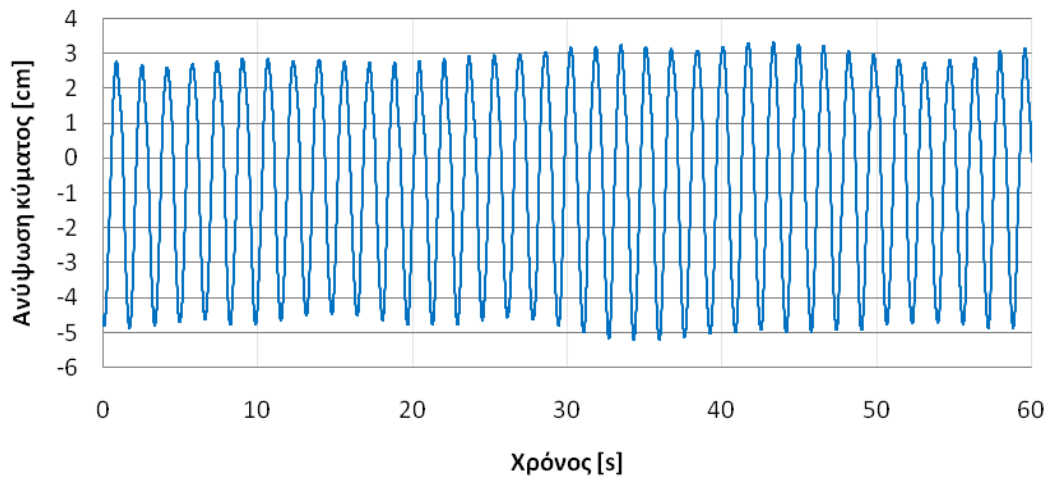
### Wave Generator

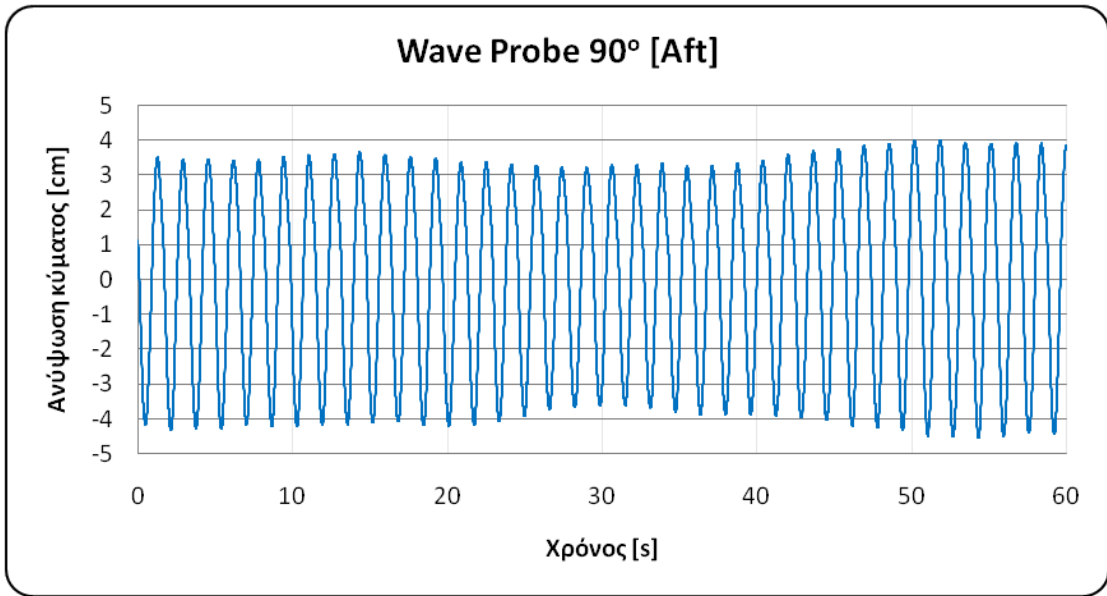
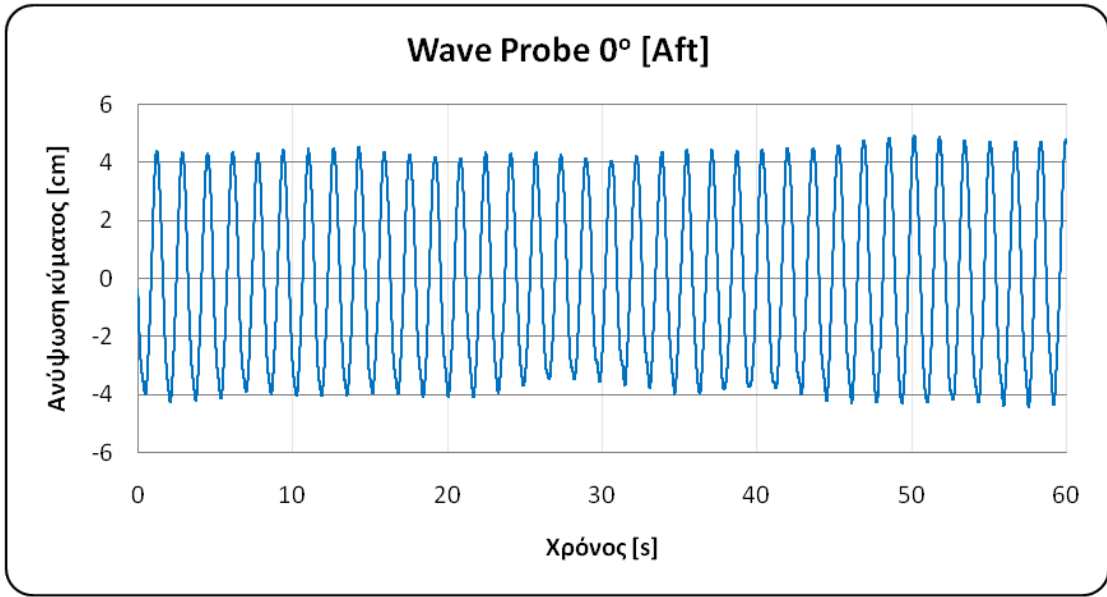


### Wave Probe 0° [Fore]



### Wave Probe 90° [Fore]



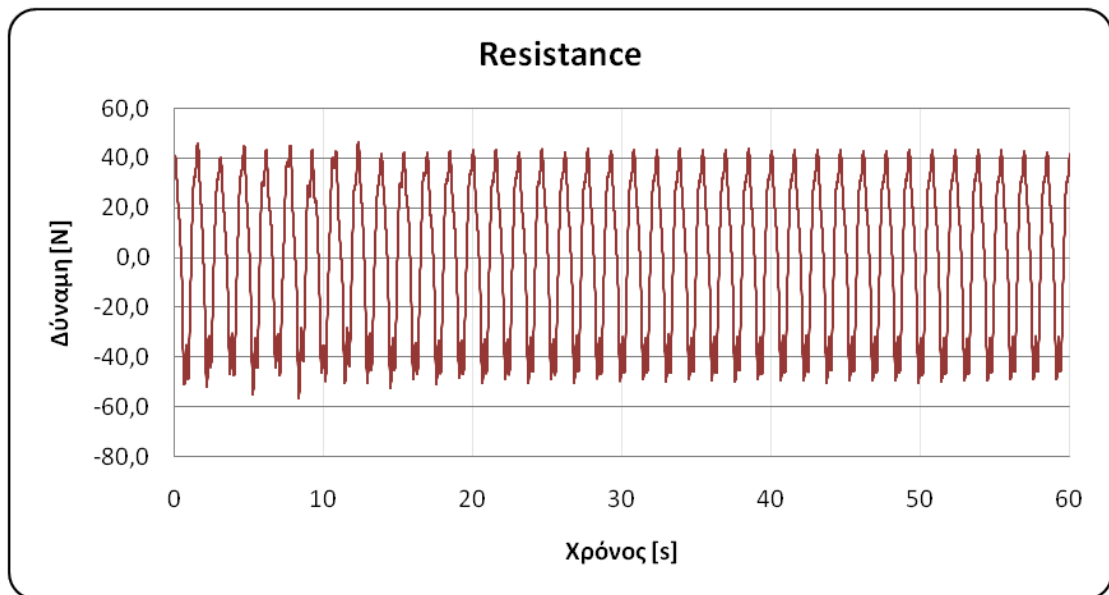


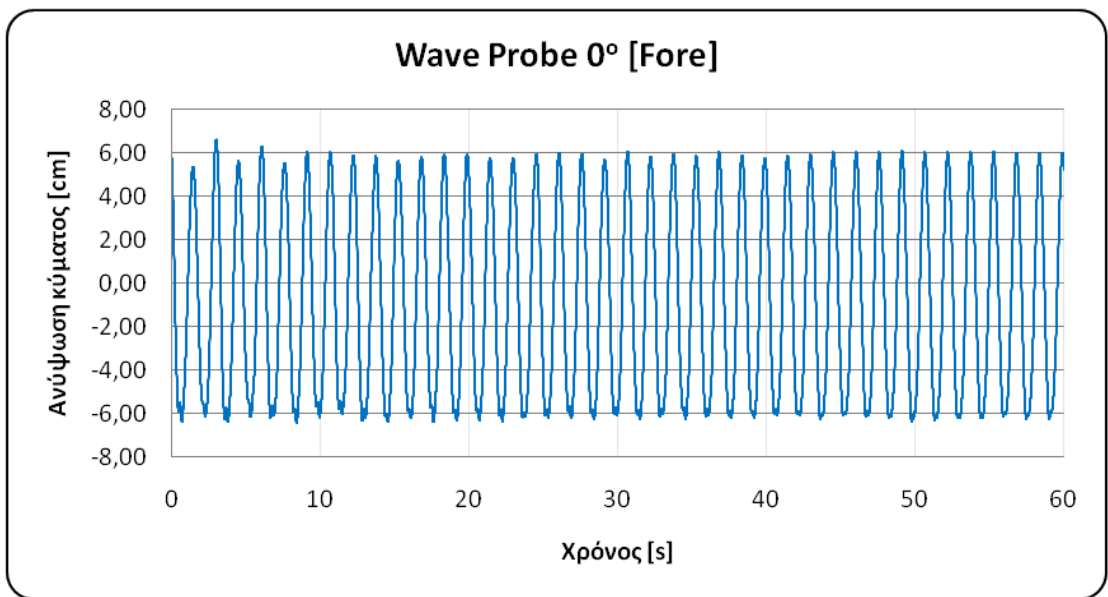
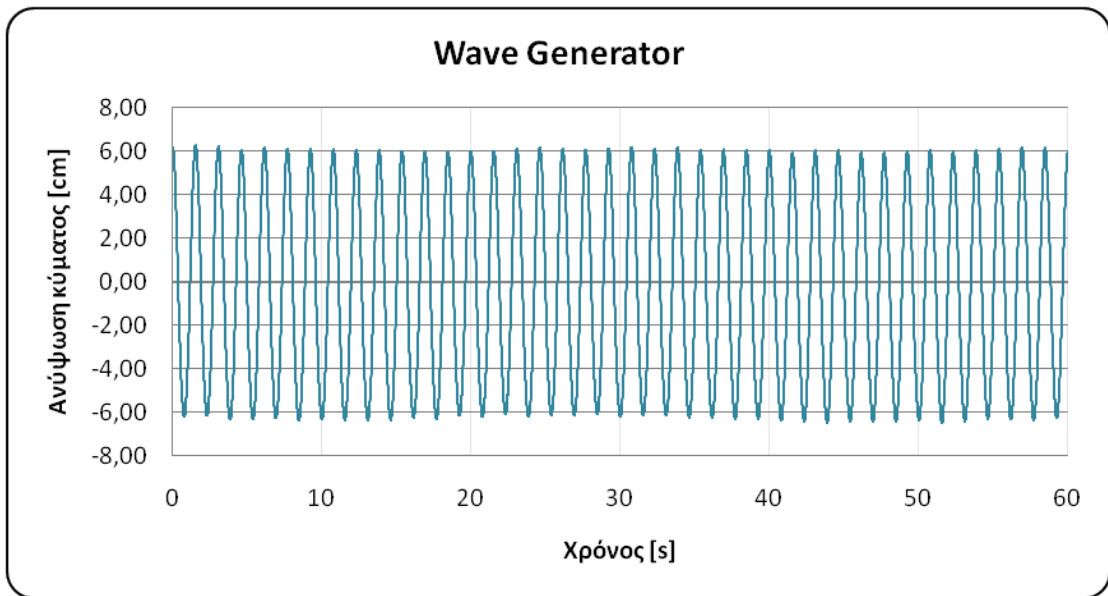
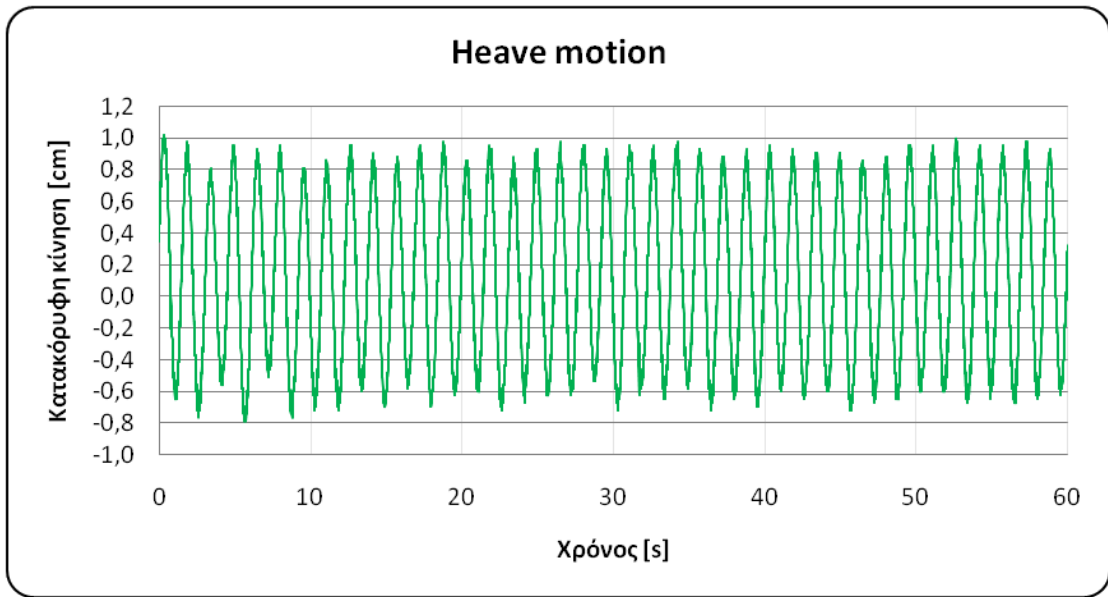
**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΙΝΗΣΗ (R47) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

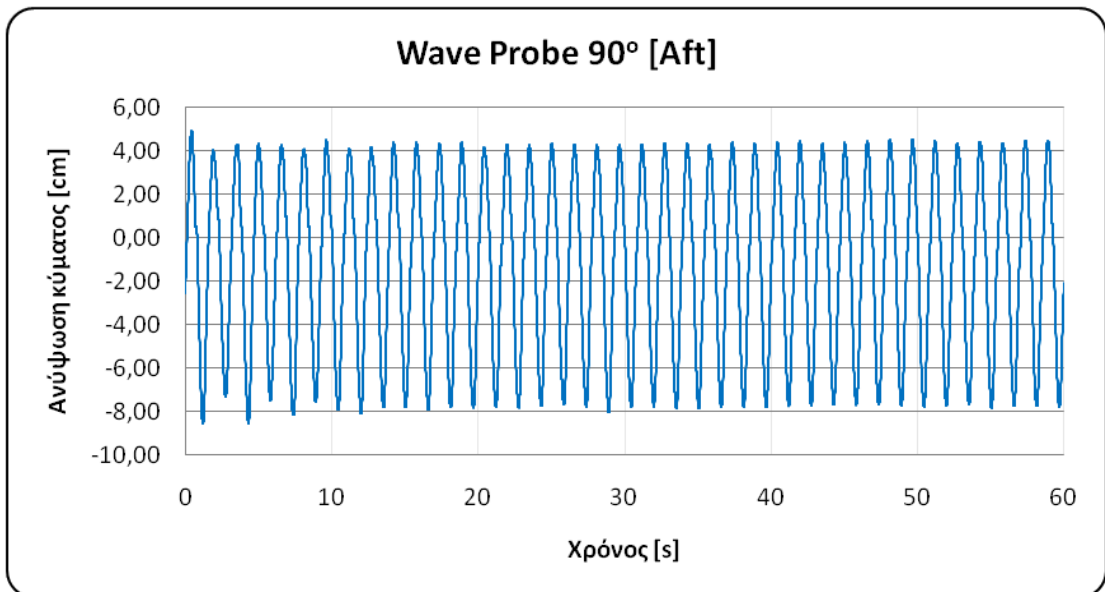
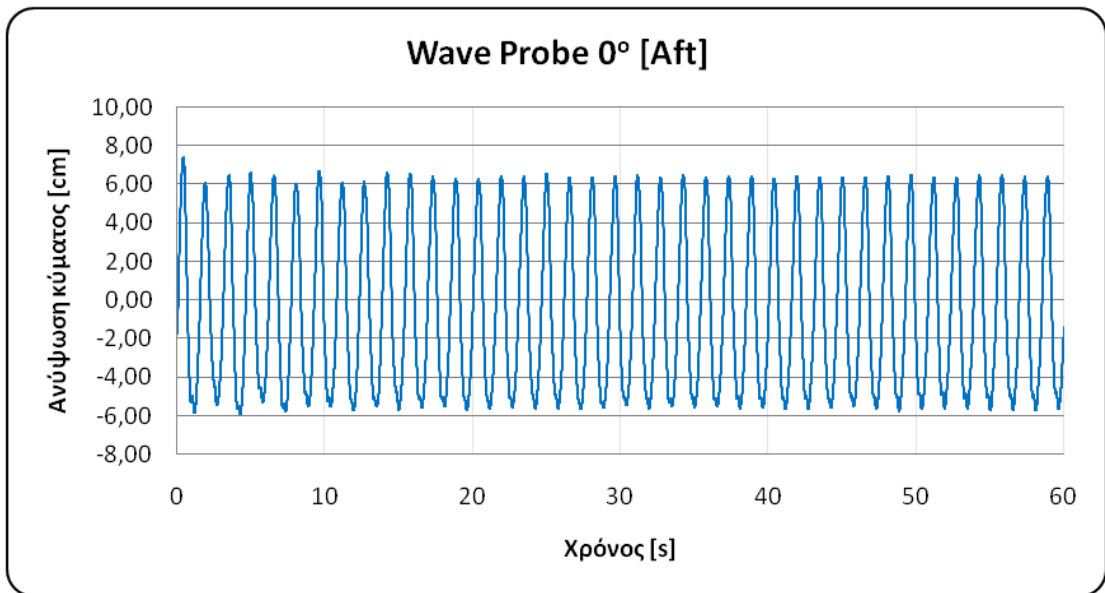
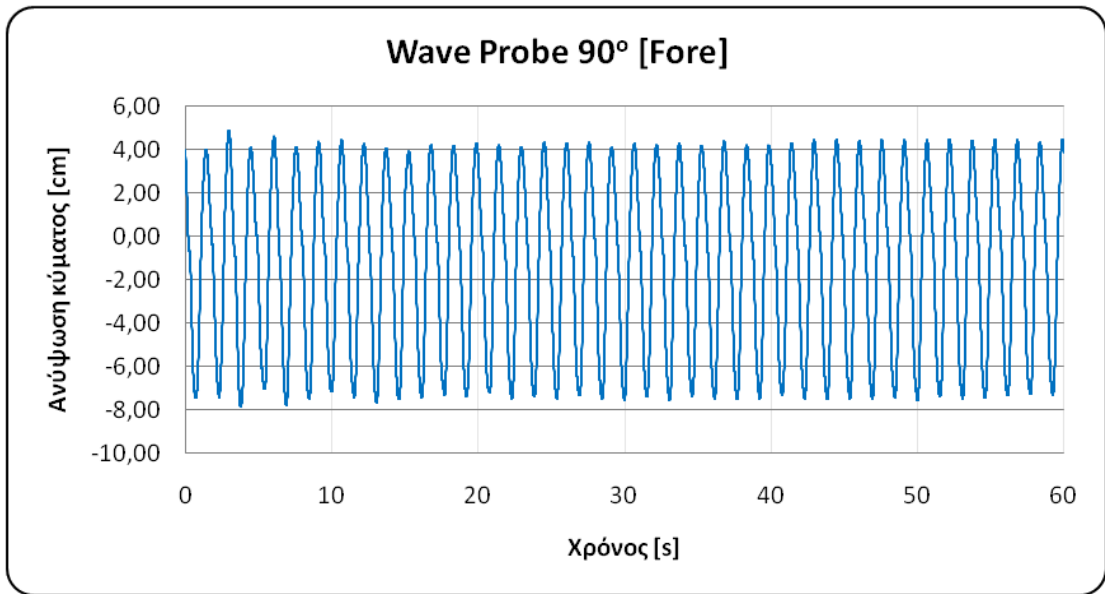
Πείραμα 153

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
<b>50</b>	<b>6</b>	<b>0,65</b>	<b>0,000</b>

	<b>R<sub>x</sub> [N]</b>	<b>Heave [cm]</b>	<b>WGen [cm]</b>	<b>WP0°F [cm]</b>	<b>WP 90°F [cm]</b>	<b>WP0°A [cm]</b>	<b>WP 90°A [cm]</b>
<b>MIN</b>	-56,457	-0,787	-6,482	-6,421	-7,867	-5,896	-8,574
<b>MAX</b>	46,392	1,018	6,249	6,587	4,868	7,395	4,931
<b>STDEV</b>	31,180	0,531	4,374	4,404	4,099	4,274	4,092
<b>MEAN</b>	-0,260	0,128	-0,358	-0,866	-1,301	-0,529	-1,309
<b>MEDIAN</b>	5,963	0,118	-0,611	-1,503	-0,661	-1,560	-0,669









## 4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο επόμενο βήμα της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων έγινε στατιστική ανάλυση των μετρημένων μεγεθών. Βασικό εργαλείο της στατιστικής ανάλυσης στον τομέα του σχεδιασμού πλοίων και πλωτών κατασκευών είναι ο συντελεστής **RAO (Response Amplitude Operator)**, 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 λογισμικά που είναι διαθέσιμα στο Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης. Τα λογισμικά αυτά είναι το MATLAB, το MINITAB και το Office Excel. Έχει όμως ελεγχθεί πως και τα τρία προγράμματα έχουν ακριβώς την ίδια ακρίβεια στον υπολογισμό στατιστικών μεγεθών. Στη στατιστική επεξεργασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε να γίνει χρήση του κώδικα **FFTOM.m** και του λογισμικού MATLAB. <sup>[66]</sup>

Ο κώδικας FFTOM.m έχει γραφτεί από τον Θ. Π. Μαζαράκο, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. (2010) και Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Μηχανικό του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης. Ο κώδικας τρέχει στο λογισμικό MATLAB και κάνει στατιστική επεξεργασία πειραμάτων. Αρχικά σχεδιάζει τις χρονικές ιστορίες του εκάστοτε μετρούμενου μεγέθους (δύναμη διέγερσης, κινήσεις, ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, air-gap, δυνάμεις έκπτωσης, τάσεις σε σχοινιά, κτλ.) και στη συνέχεια υπολογίζει τα βασικά στατιστικά μεγέθη: minimum, maximum, mean, standarddeviation για το κάθε μέγεθος. Τέλος κάνει **Fast Fourier Transformation (FFT)** για το κάθε μέγεθος. <sup>[67][68]</sup>

Για κάθε πειραματική μέτρηση, εκτελείται η ακόλουθη ανάλυση μέσω του κώδικα FFTOM.m:

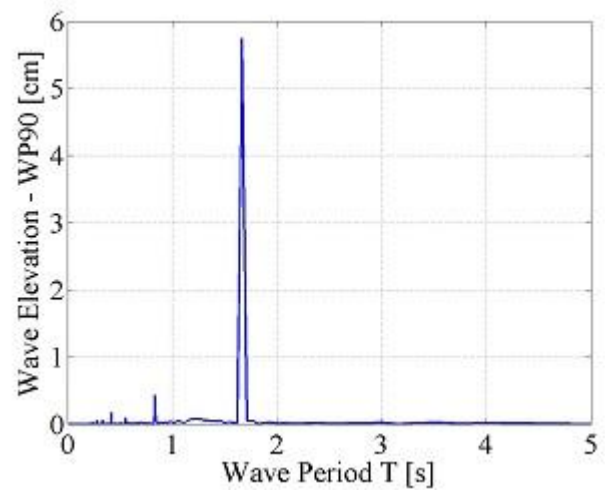
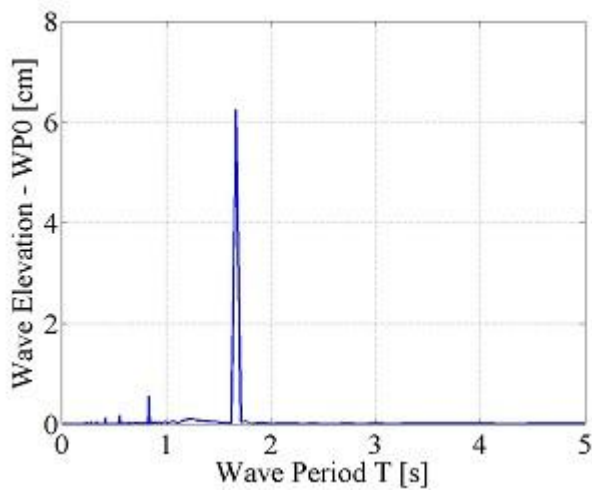
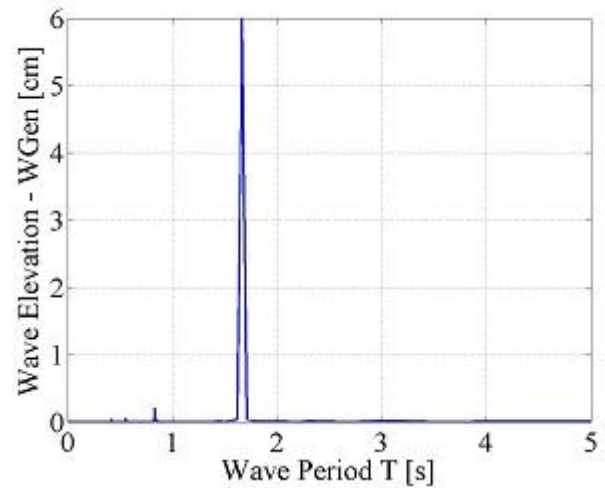
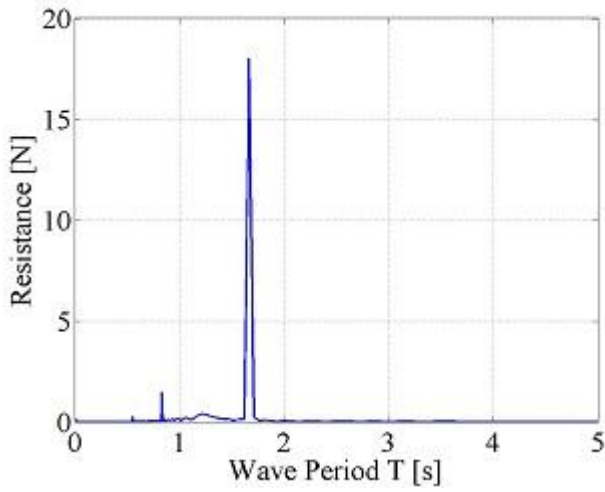
1. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για την αρχή της πειραματικής μέτρησης (5s για τους απλούς αρμονικούς κυματισμούς και 1s στο ήρεμο νερό). Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: **Zmin, Zmax, Zmean, Zstd**.
2. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για επιλεγμένο διάστημα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: **Vmin, Vmax, Vmean, Vstd**.

3. 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 ίδιων πειραματικών μετρήσεων που παρουσιάστηκαν και στην προηγούμενη ενότητα. Η στατιστική ανάλυση του συνόλου των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται στο **Παράρτημα Β**.

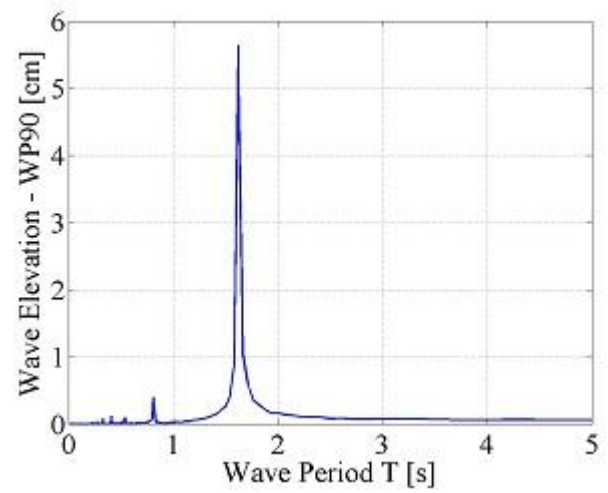
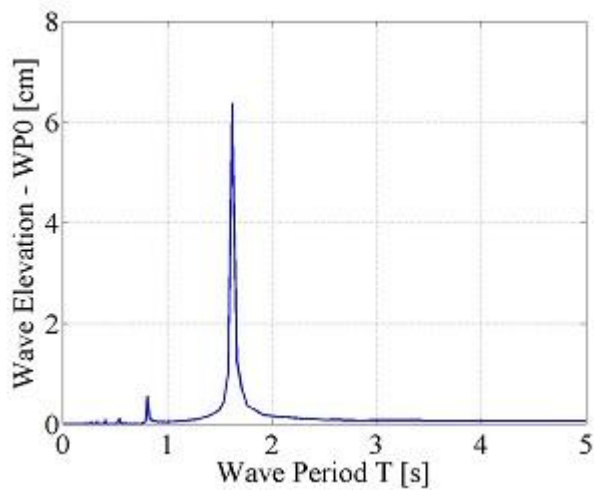
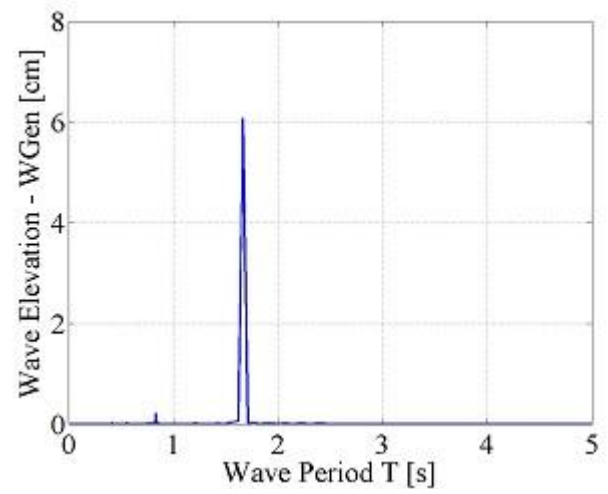
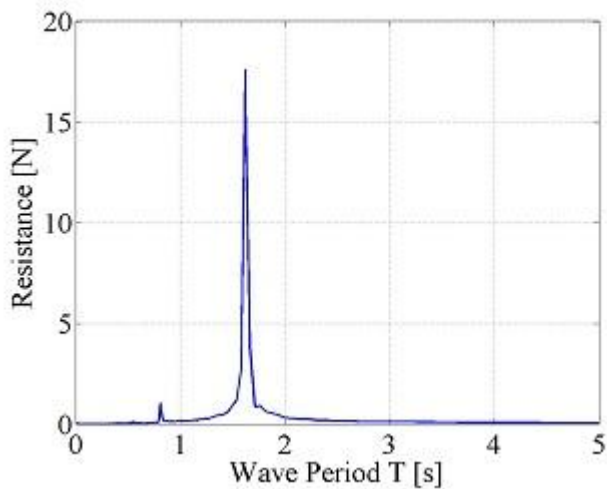
Πείραμα 3

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
45	6	0,60	0,000



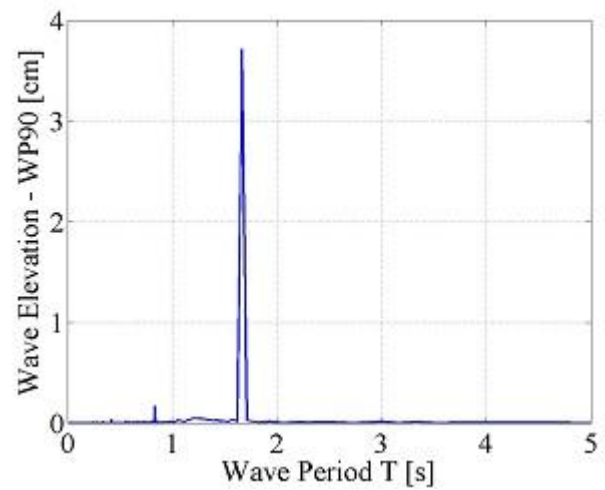
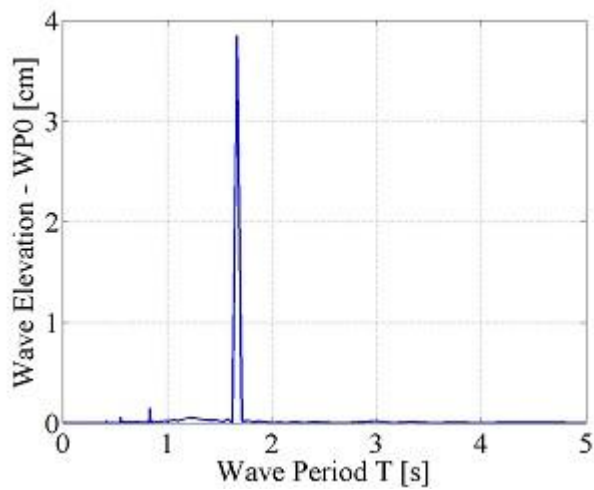
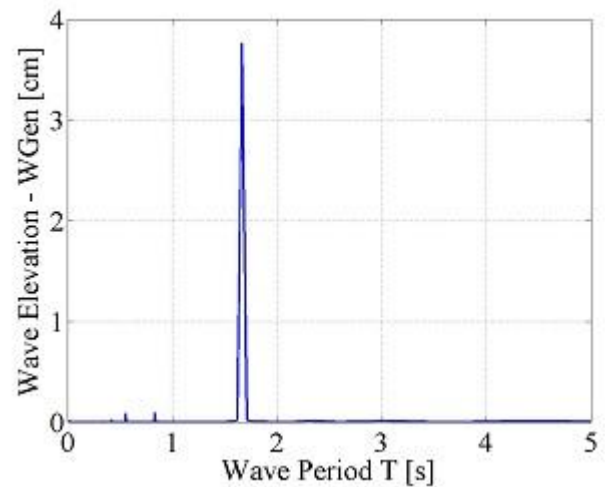
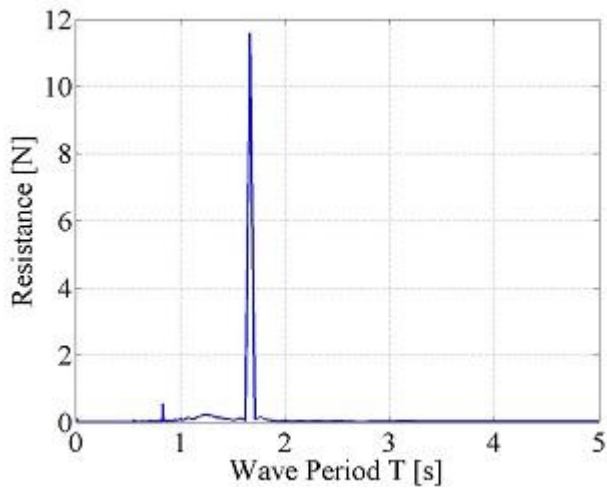
## Πείραμα 8

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
45	6	0,60	0,060



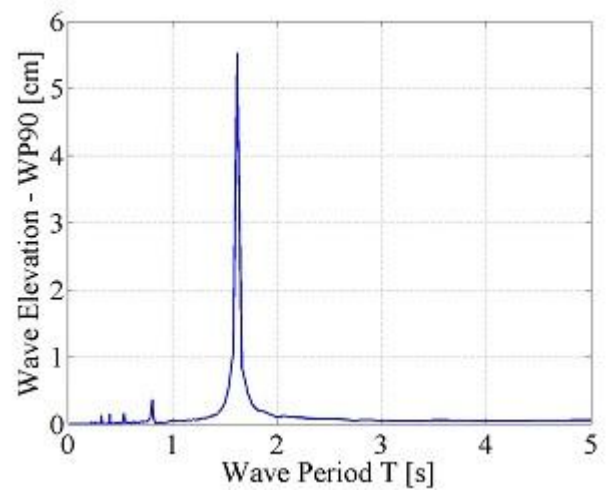
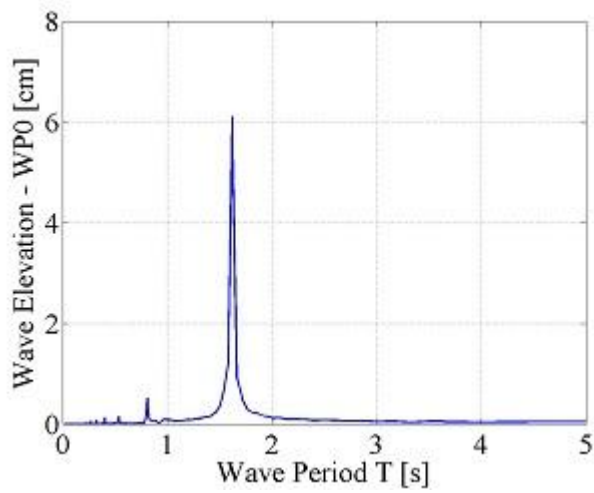
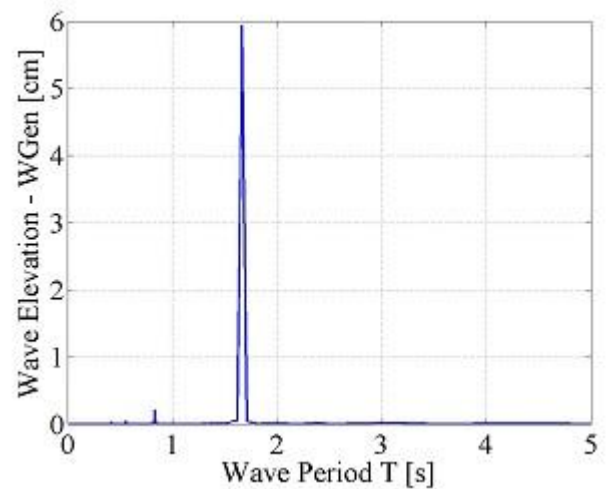
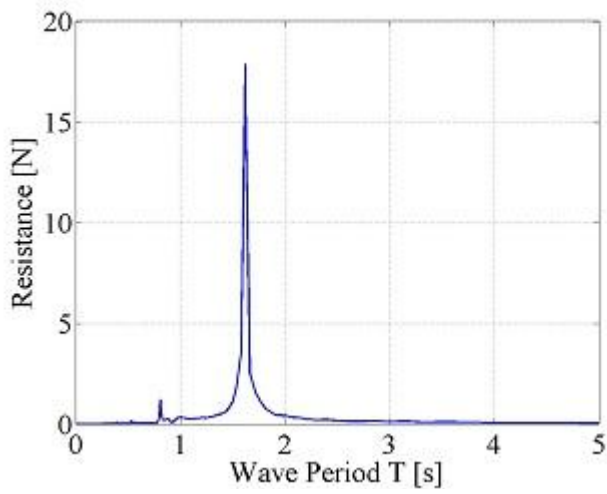
Πείραμα 19

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	4	0,60	0,000



## Πείραμα 47

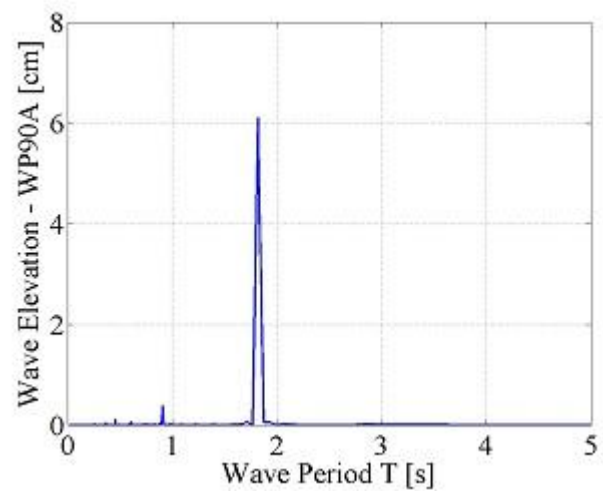
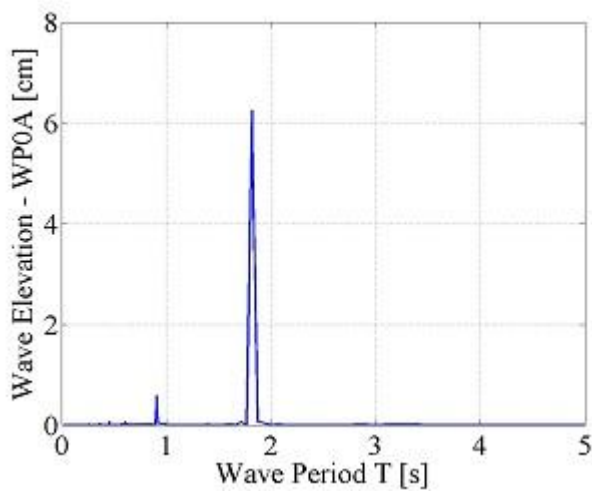
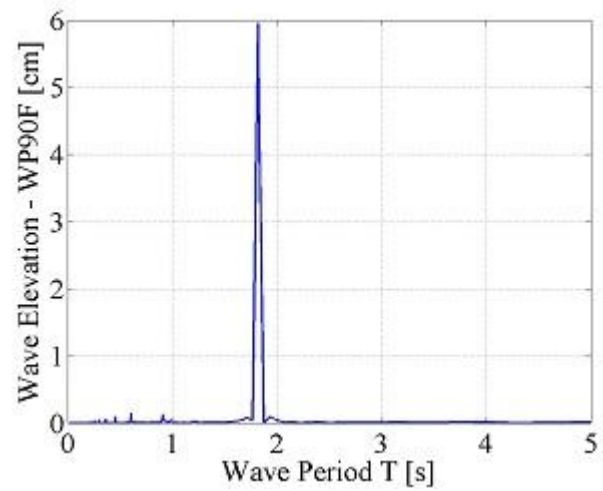
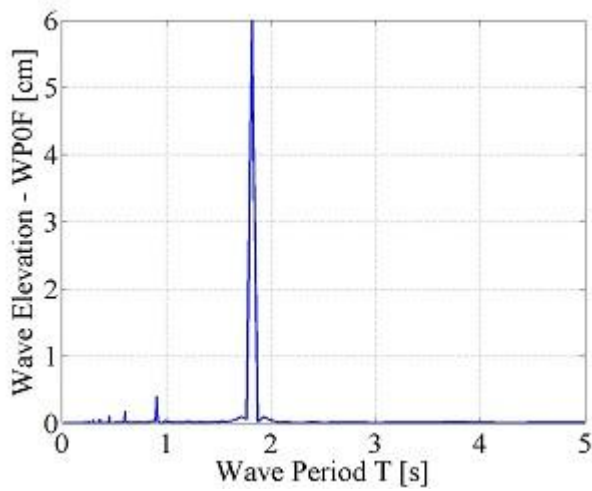
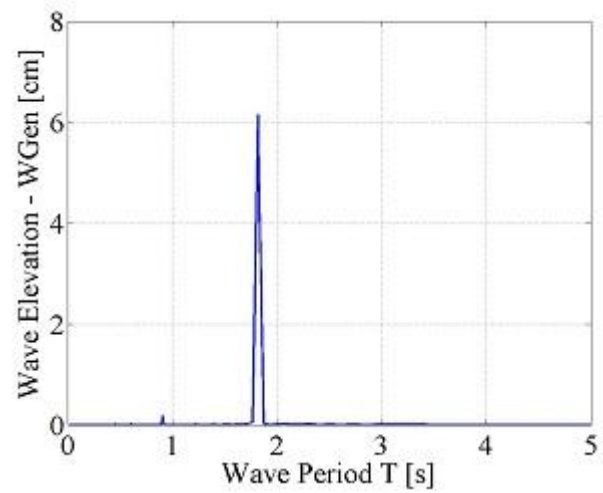
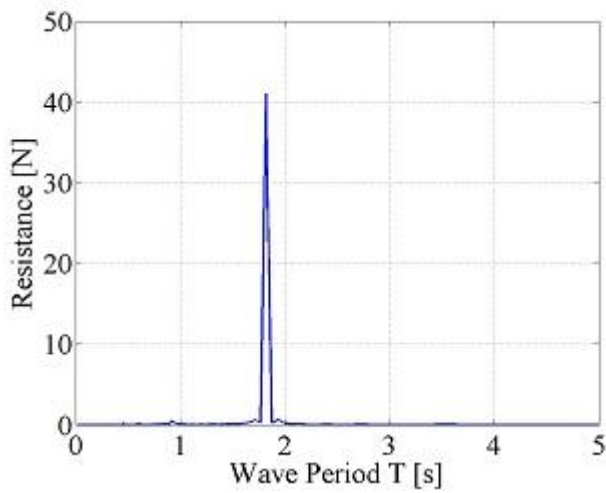
T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	6	0,60	0,085



ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ (R35)  
 – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm

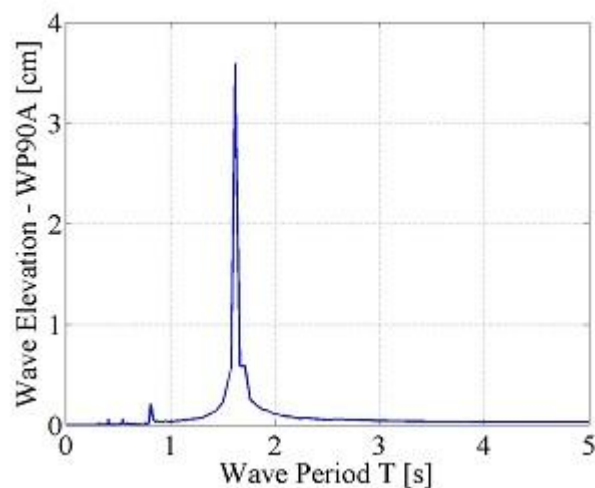
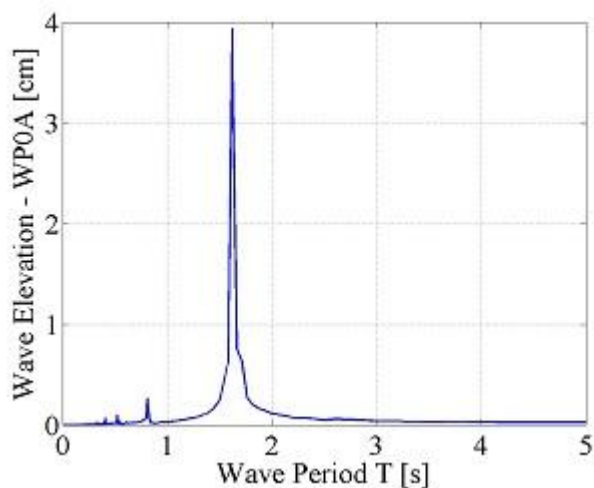
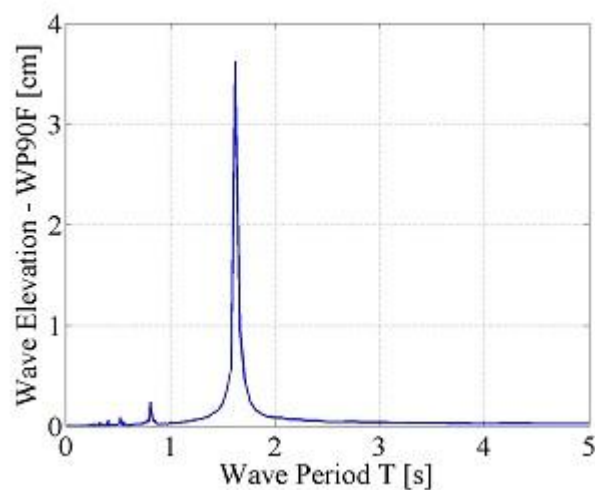
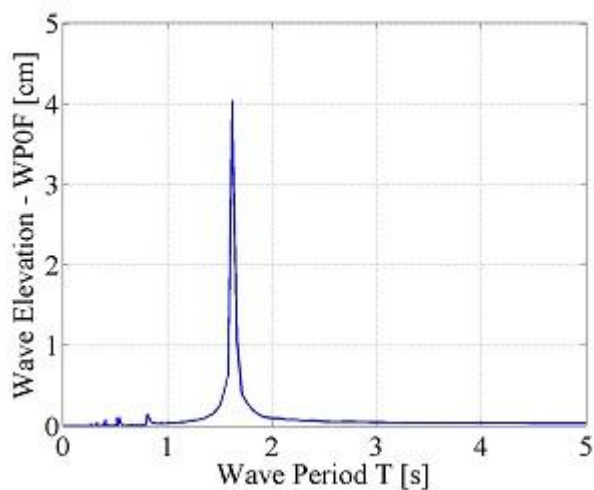
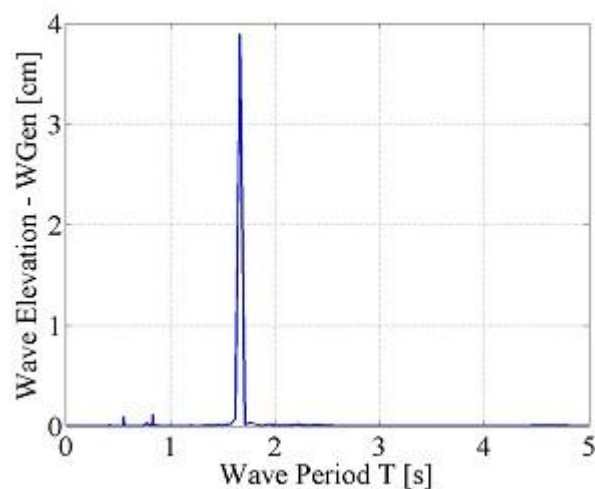
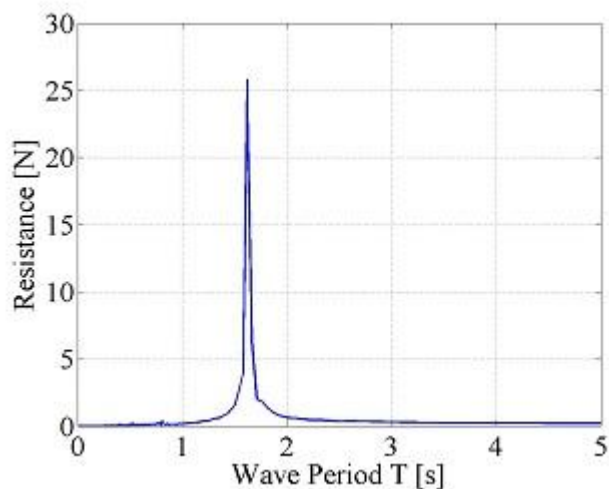
Πείραμα 78

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	6	0,55	0,000



# Πείραμα 91

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	4	0,60	0,060

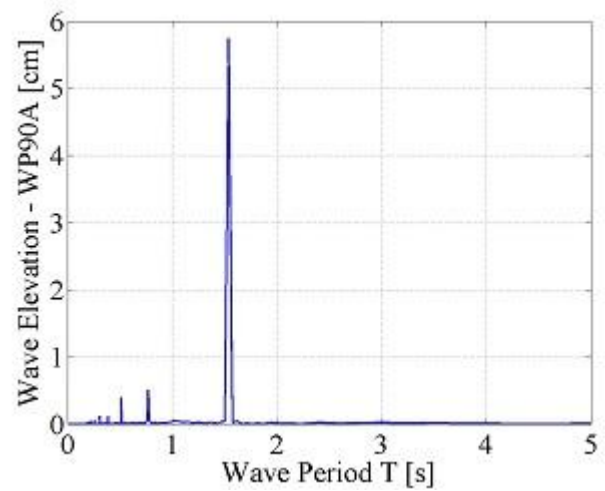
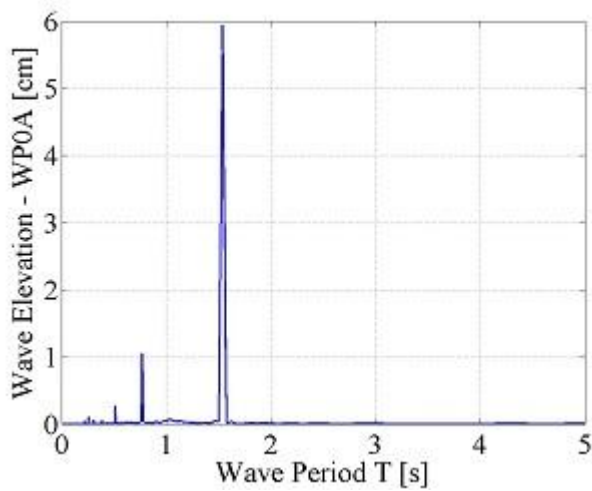
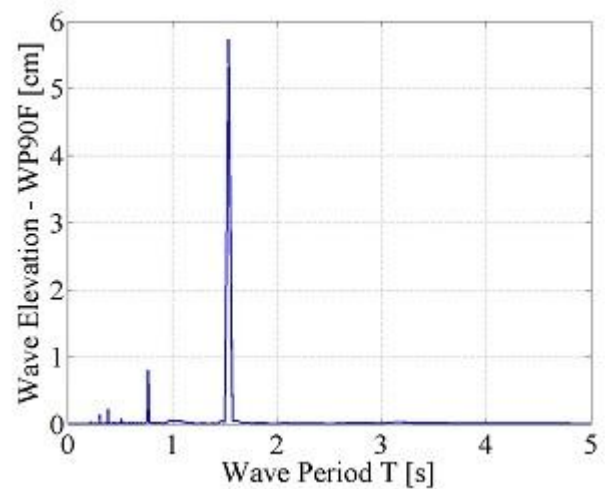
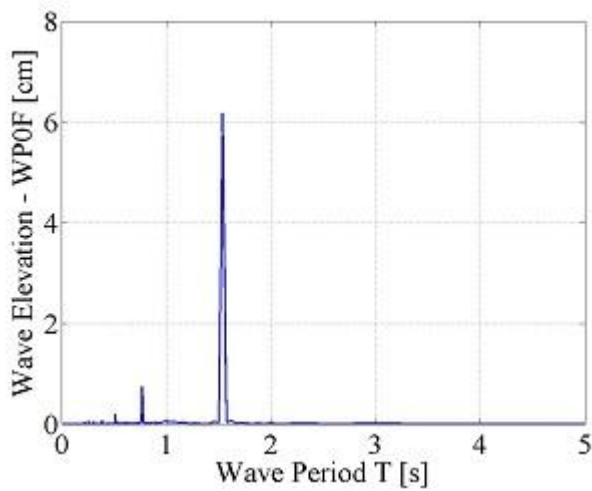
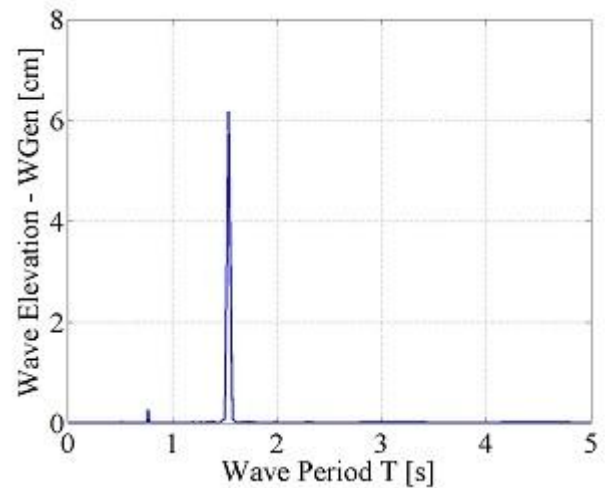
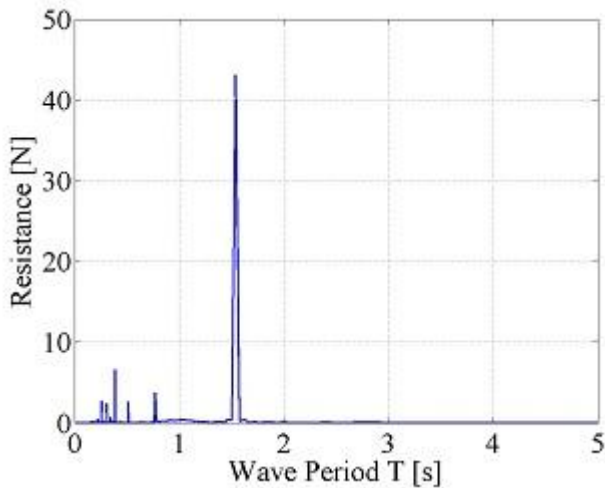


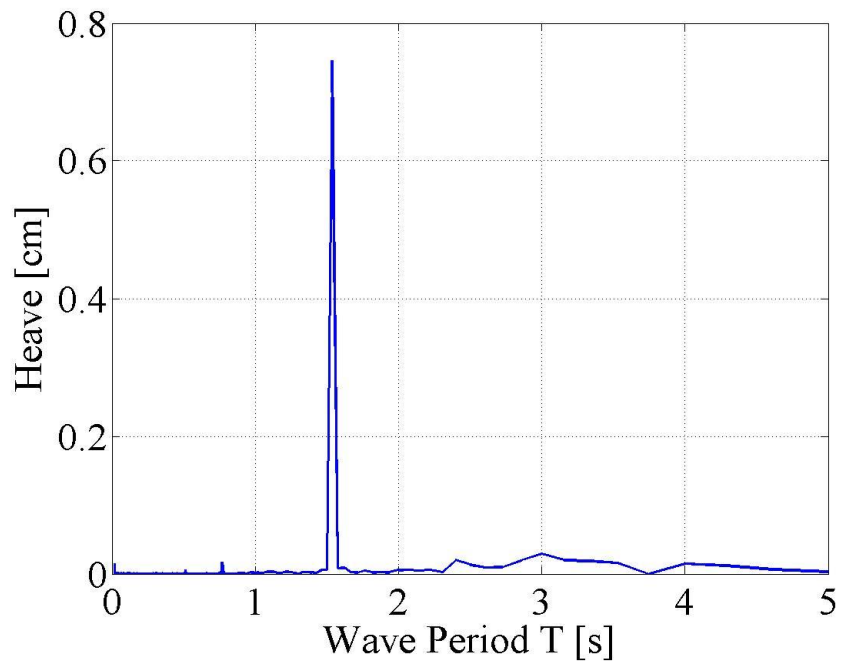


**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΣΤΗΝ  
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΙΝΗΣΗ (R47) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Πείραμα 153

T [cm]	H/2 [cm]	f [Hz]	V [m/s]
50	6	0,65	0,000





## 4.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για να καταστούν συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων διαφορετικού πλάτους κυματισμού και διαφορετικών ταχυτήτων φορείου (και άρα και μοντέλου) ήταν απαραίτητη η αδιαστατοποίηση του κάθε μεγέθους.

Η αδιαστατοποιήσεις έγιναν με τον εξής τρόπο:

- Για τη δύναμη αντίστασης  $F_x$ :

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

- Για τη δύναμη Drift  $F_{dx}$ :

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

- Για τη δύναμη 2<sup>ης</sup> τάξης  $F_{2x}$ :

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

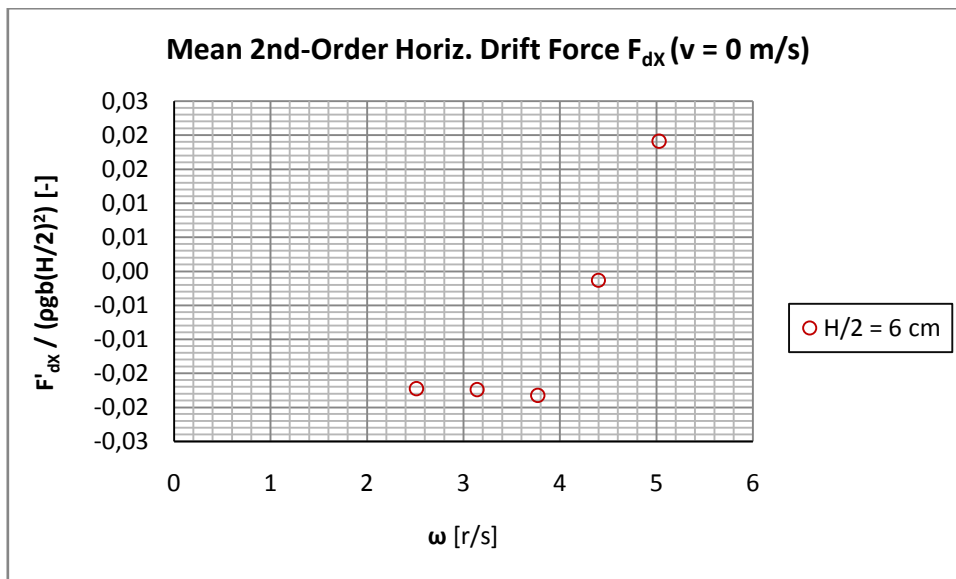
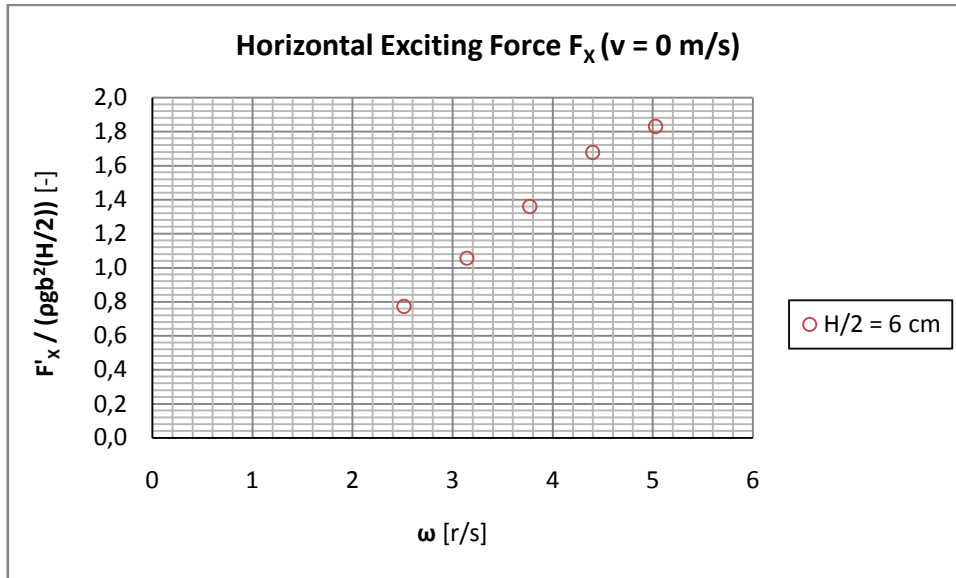
- Για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και για την κατακόρυφη κίνηση της κατασκευής J:

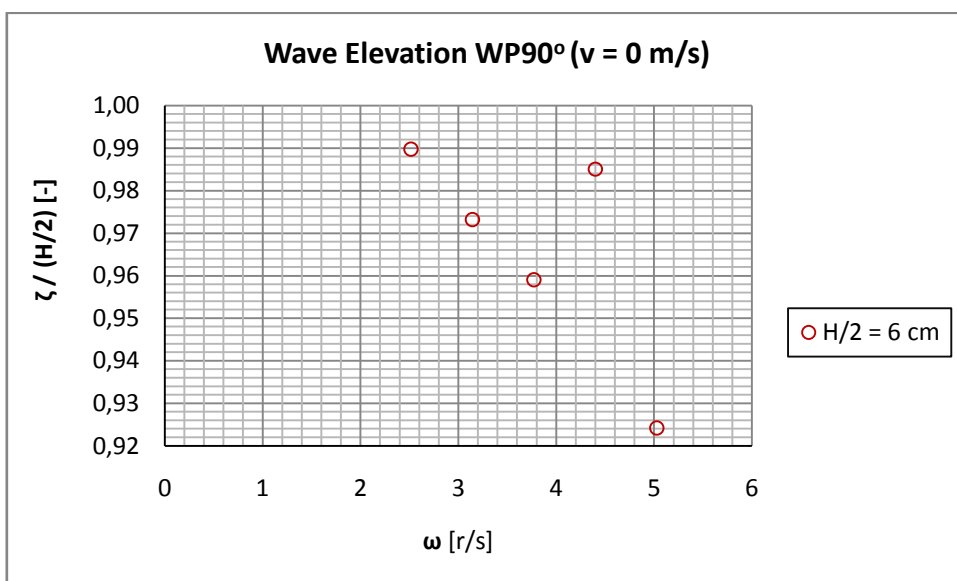
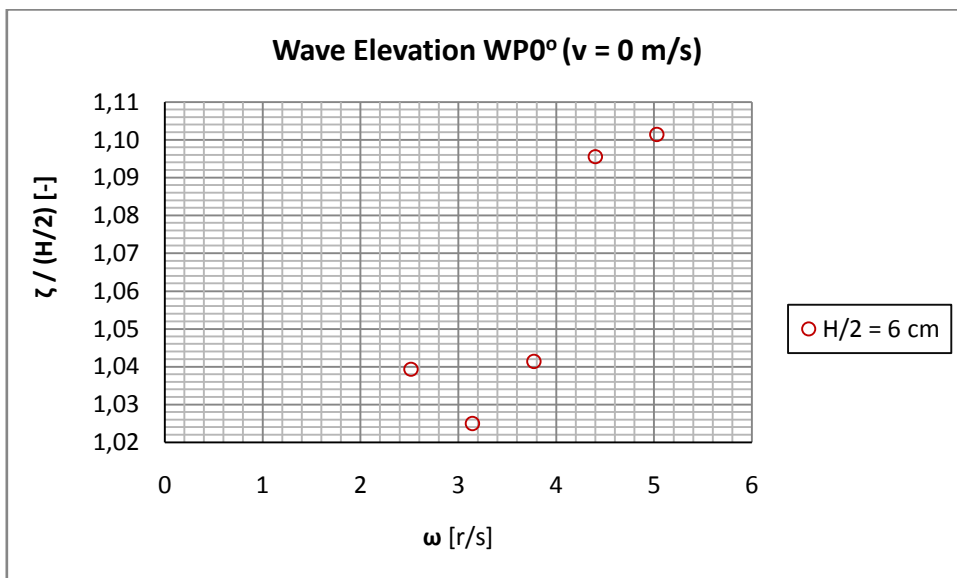
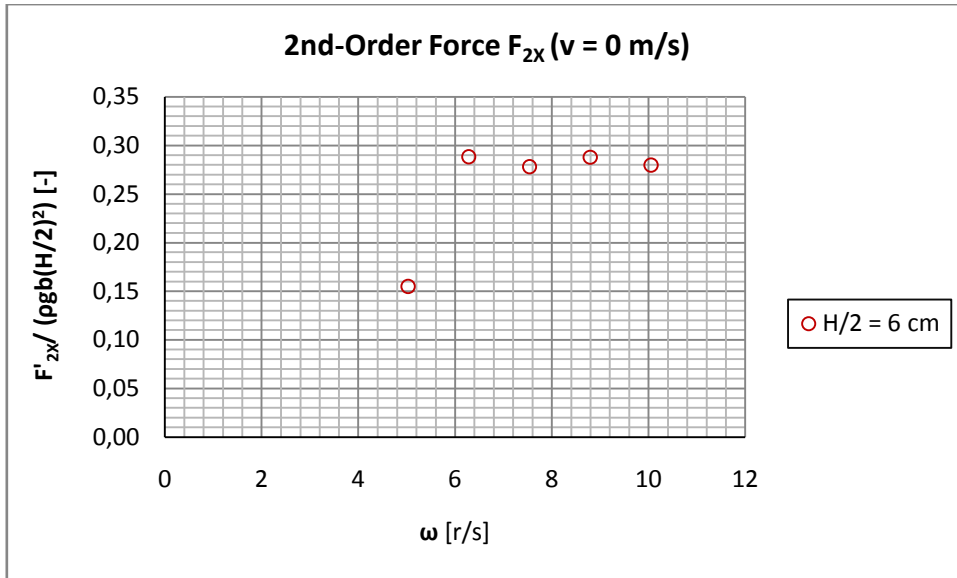
$$\zeta = \frac{\zeta'}{\left(\frac{H}{2}\right)} \rightarrow [-]$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ομαδοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε κοινά διαγράμματα συναρτήσεως της **συχρότητας κυματισμών** [r/s]. Για κάθε μοντέλο συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για ίδιες συχρότητες και διαφορετικά πλάτη κυματισμών, καθώς και για ίδιες συχρότητες και διαφορετικές πρόσω ή πίσω ταχύτητες. Τα ομαδοποιημένα συγκριτικά διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω.

ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 45 cm

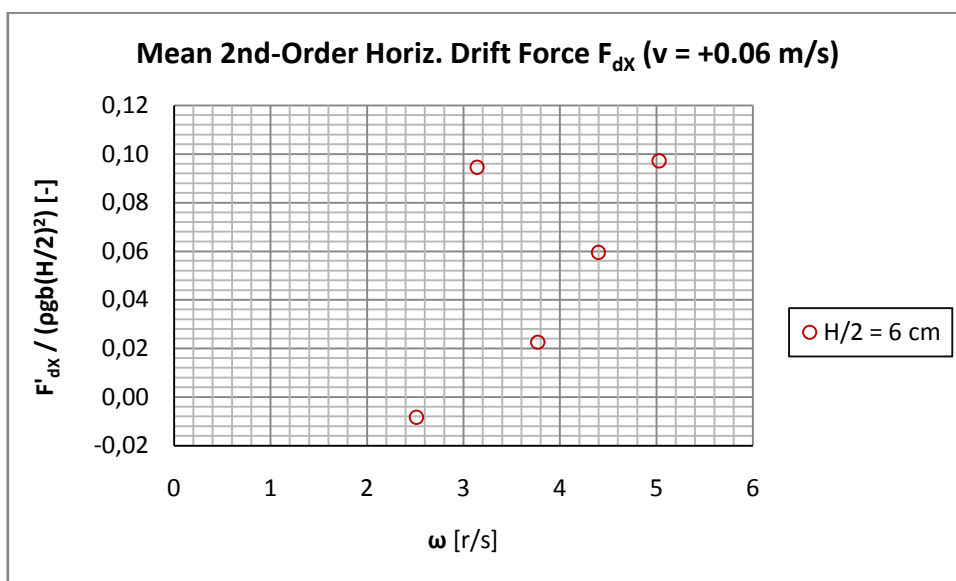
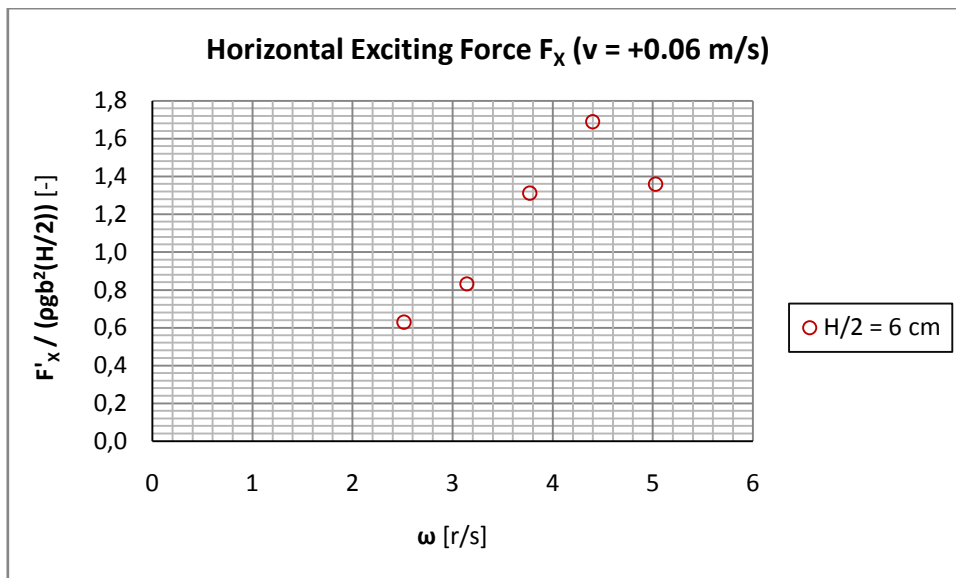
Ακίνητη κατασκευή [πειράματα 1-5]

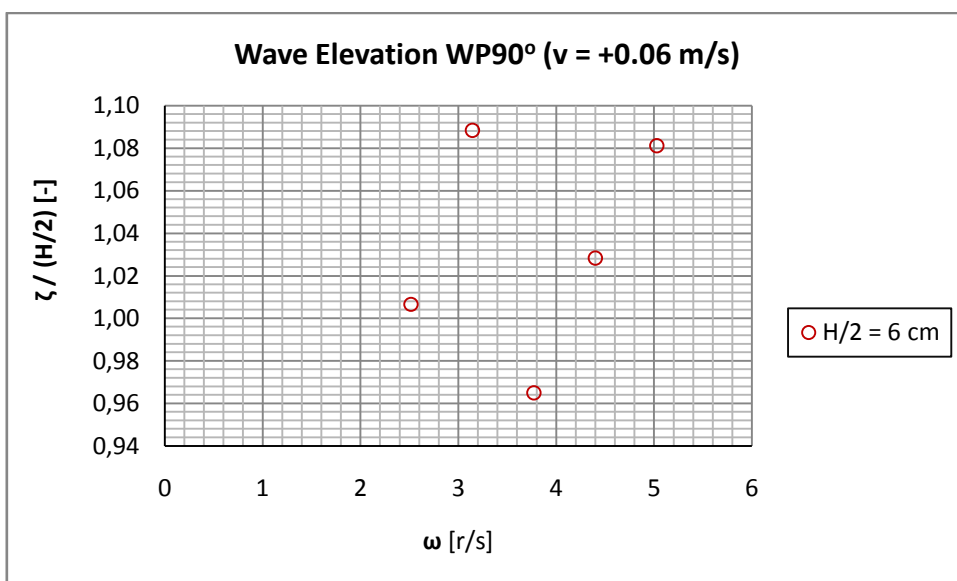
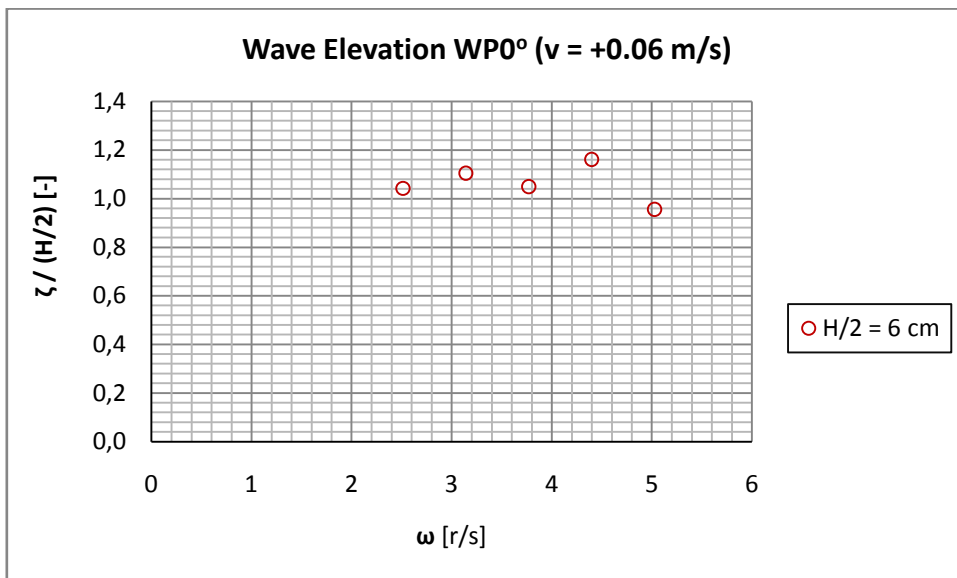
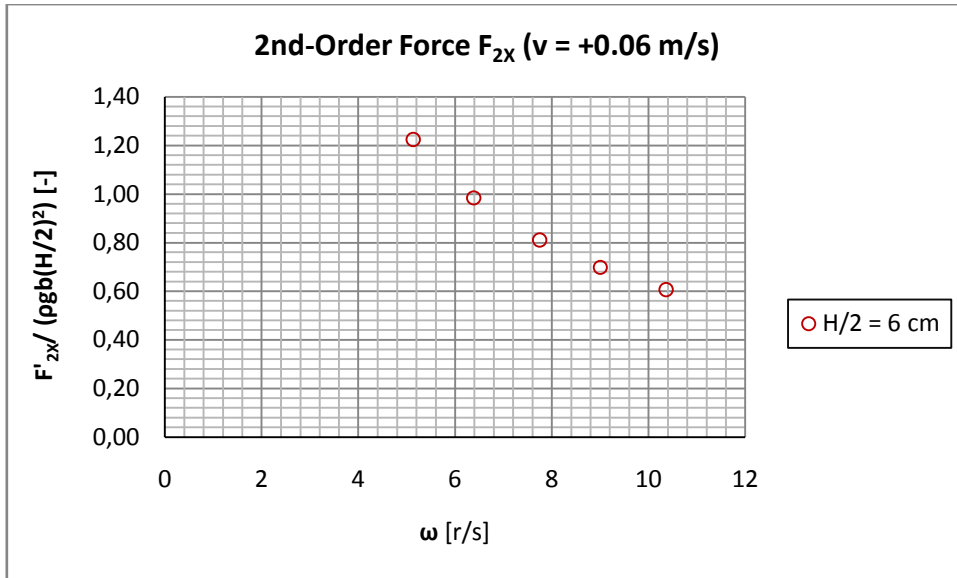




## Κινούμενη κατασκευή [πειράματα 6-15]

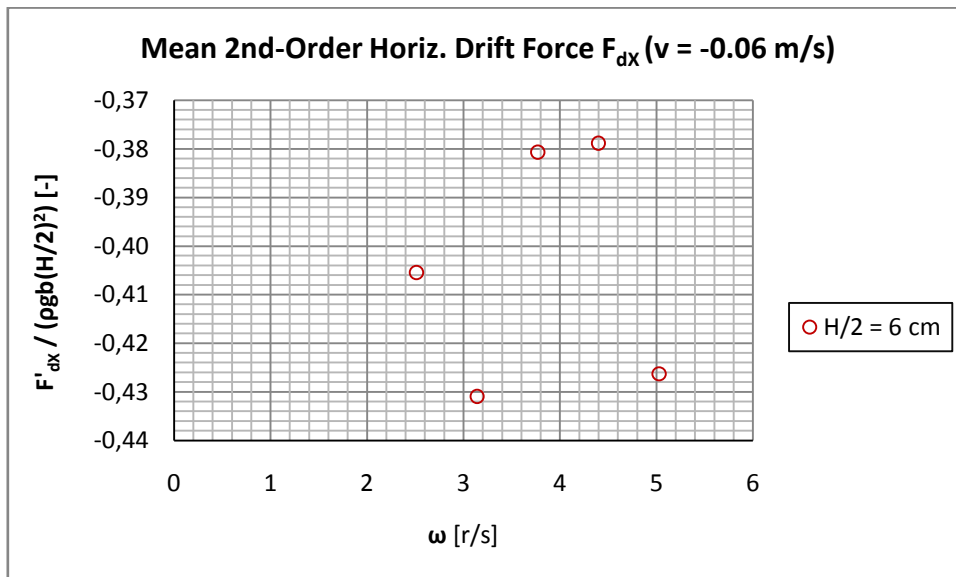
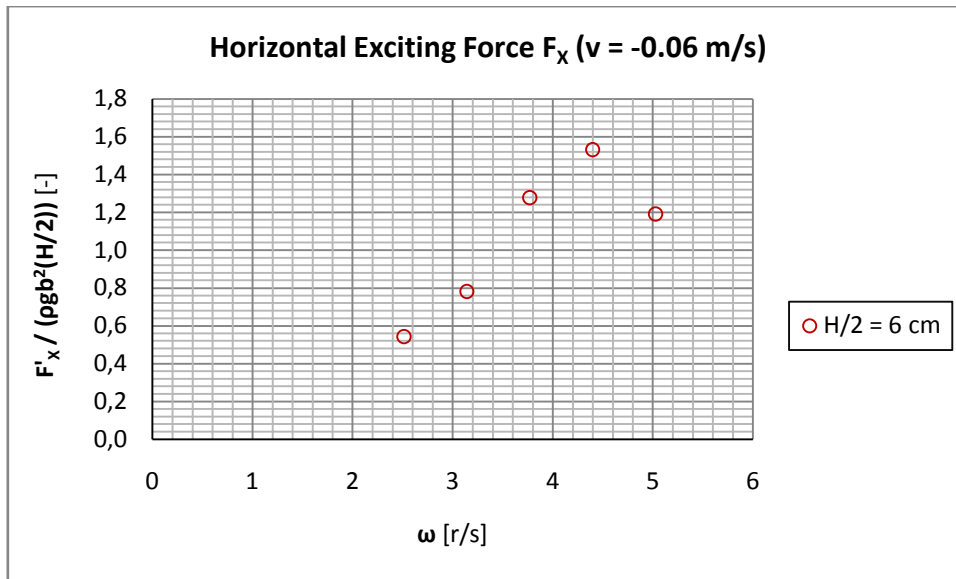
### Πρόσω ταχύτητα

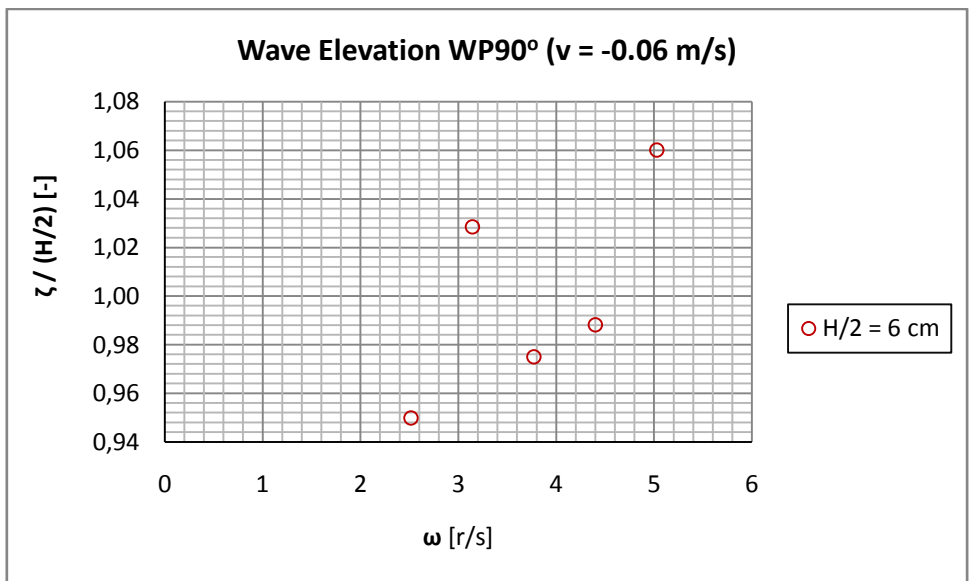
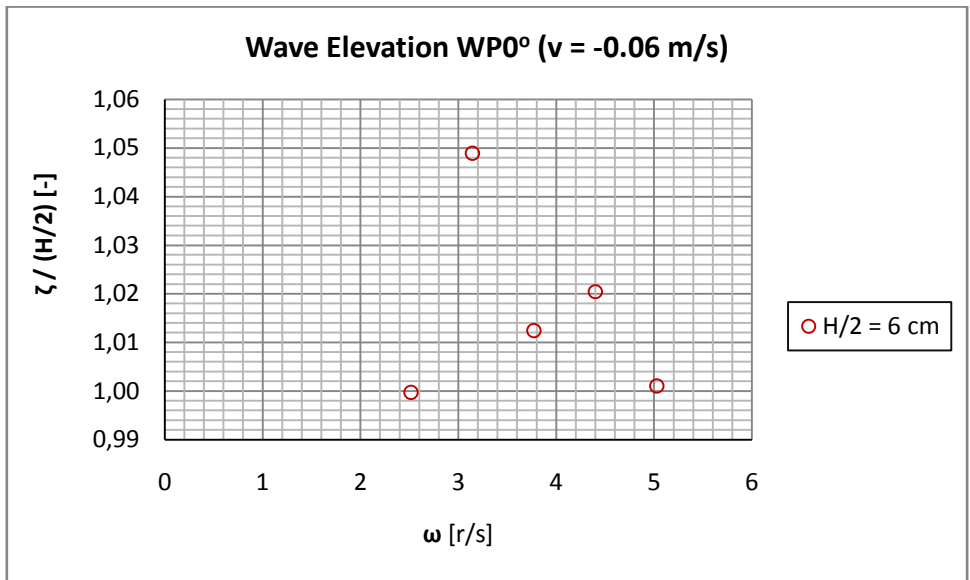
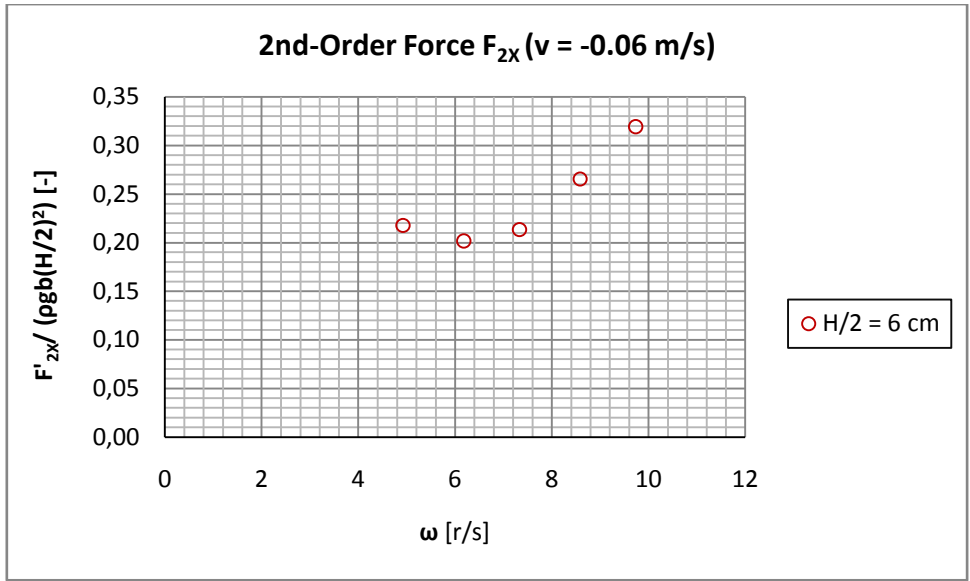






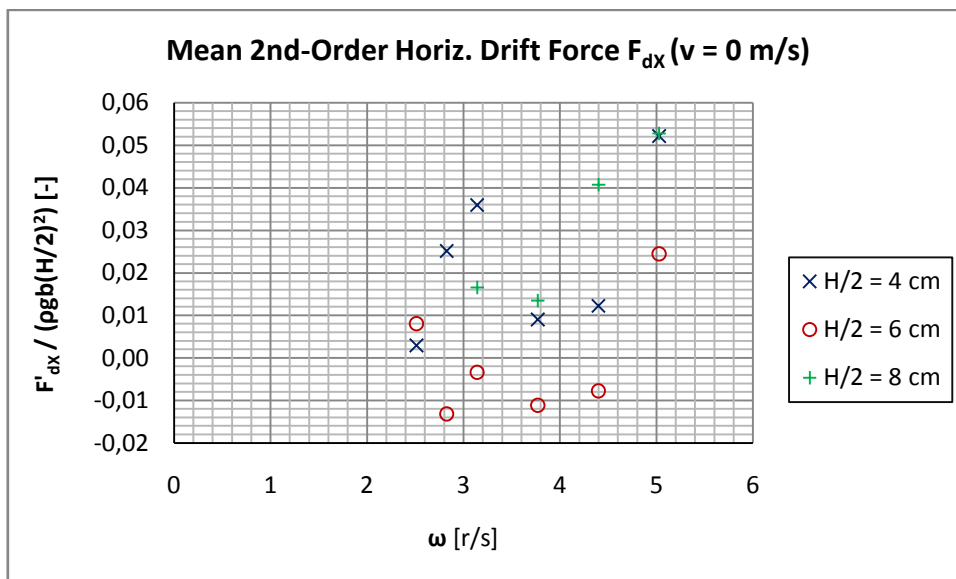
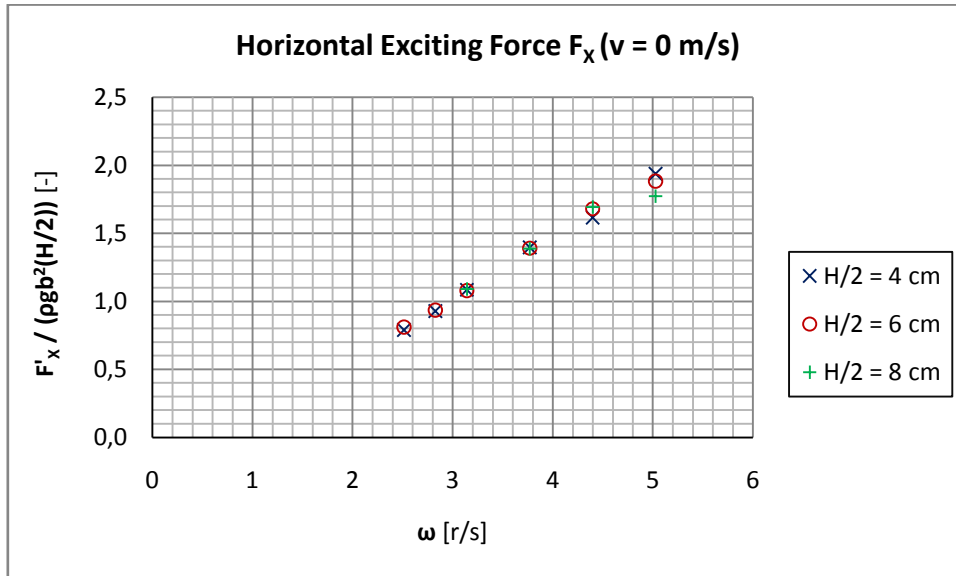
Πίσω ταχύτητα

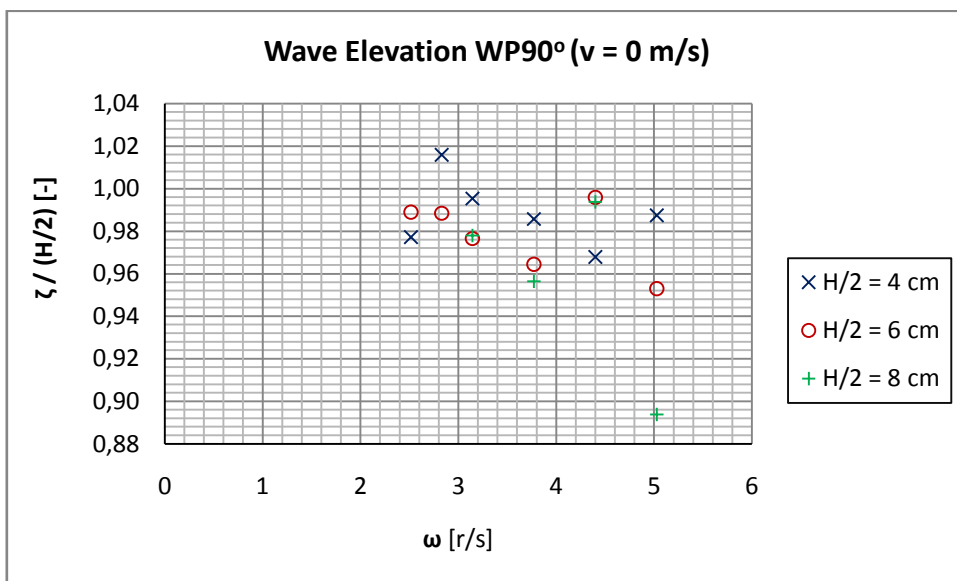
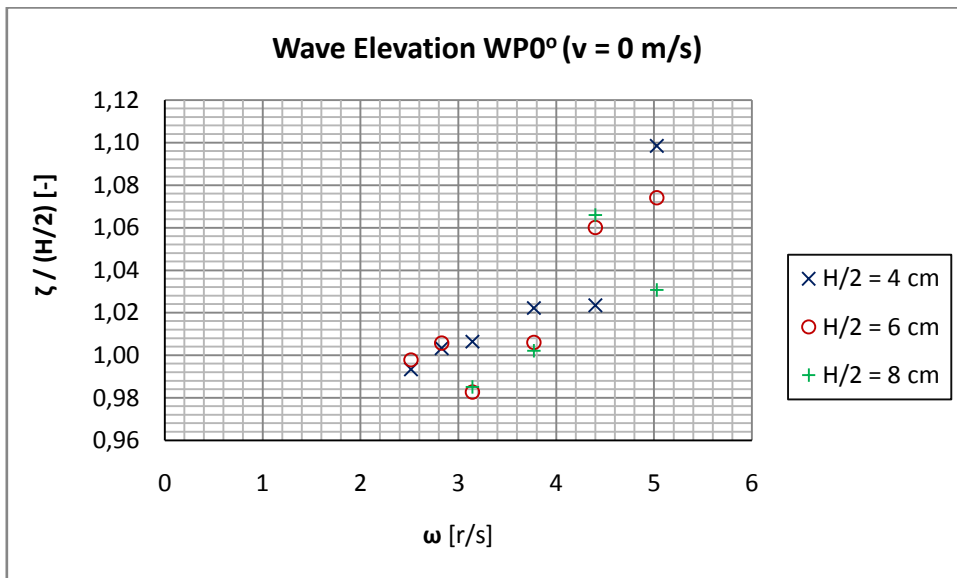
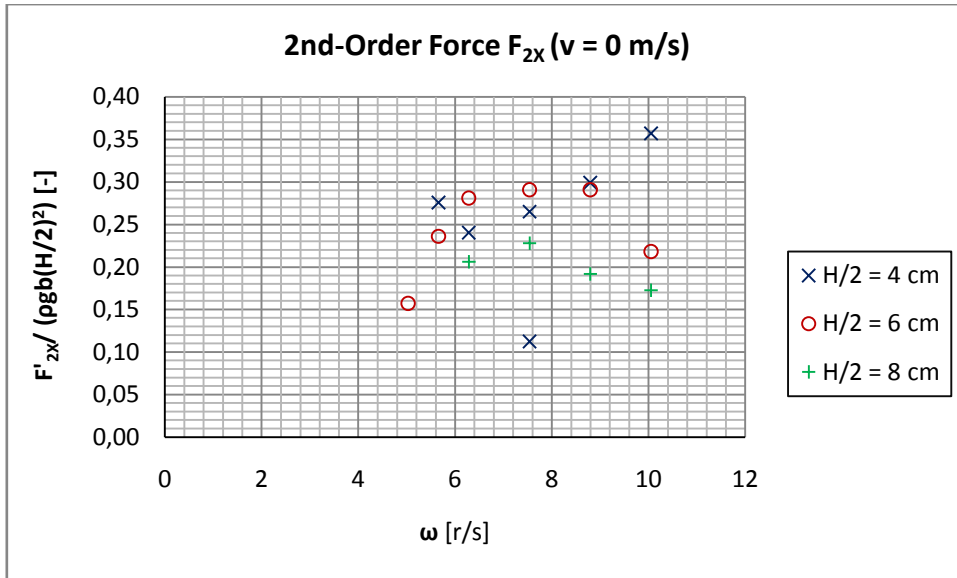




ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 50cm

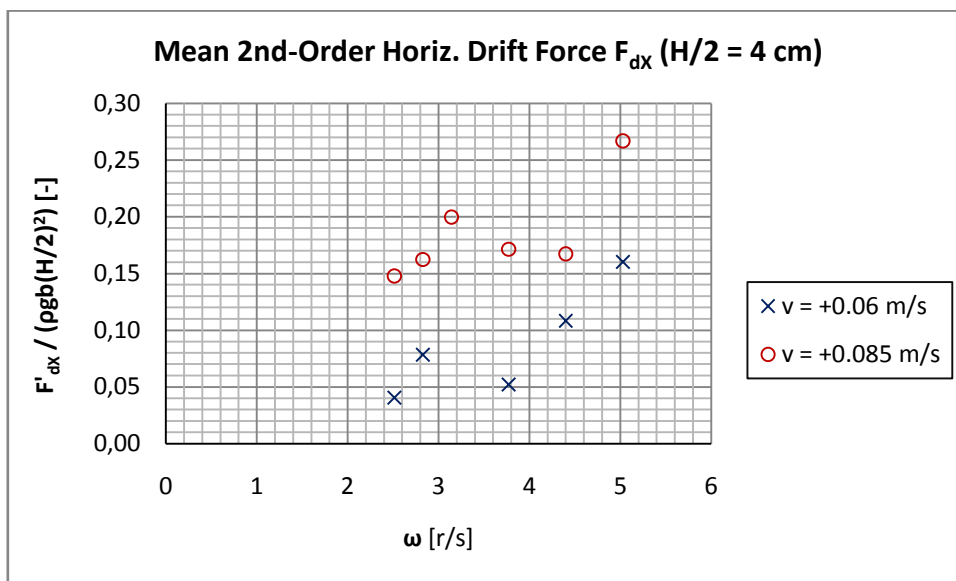
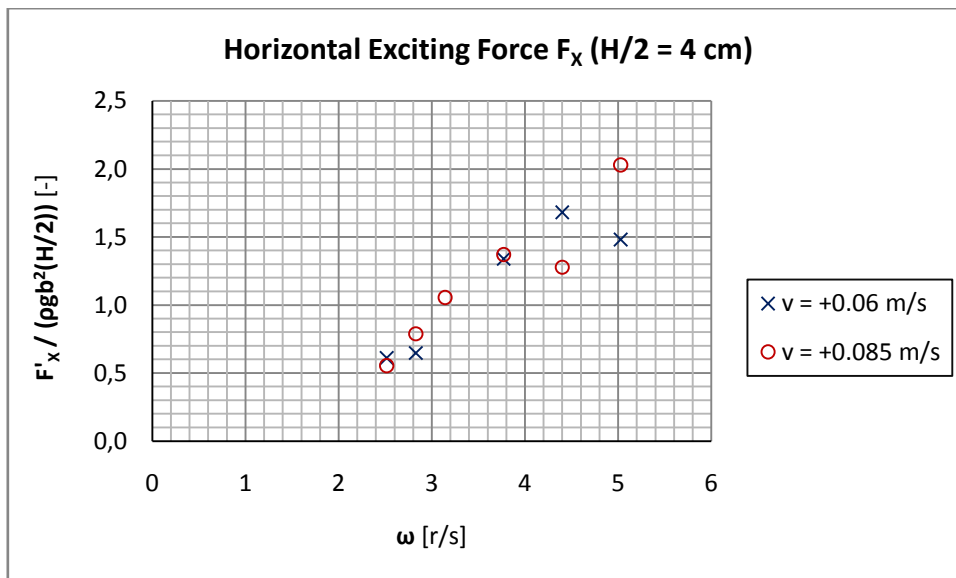
Ακίνητη κατασκευή [πειράματα 16-31]

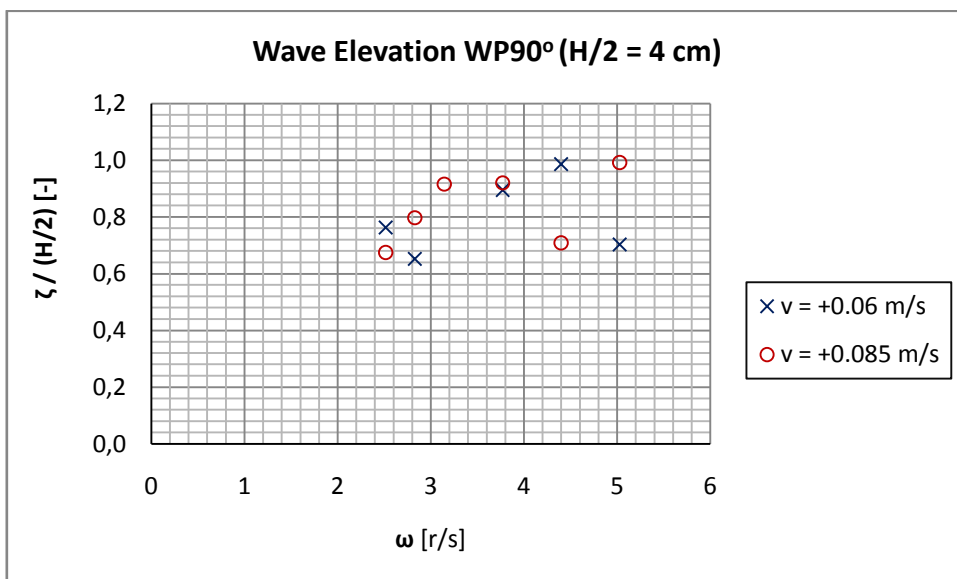
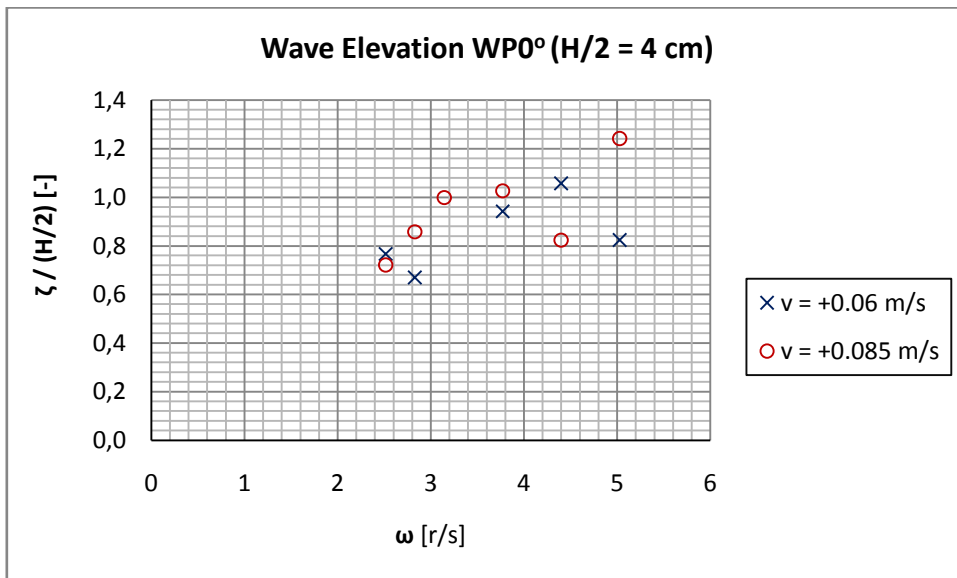
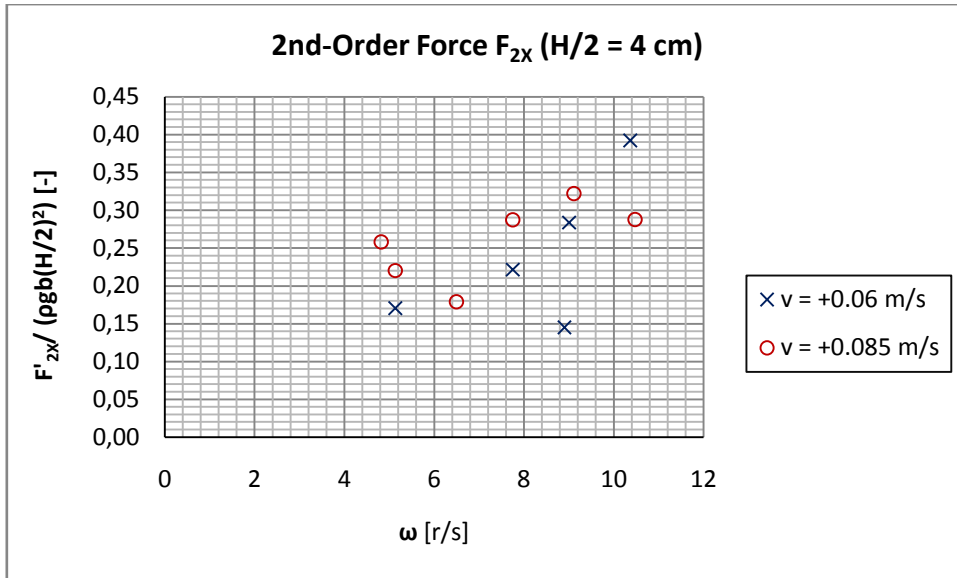


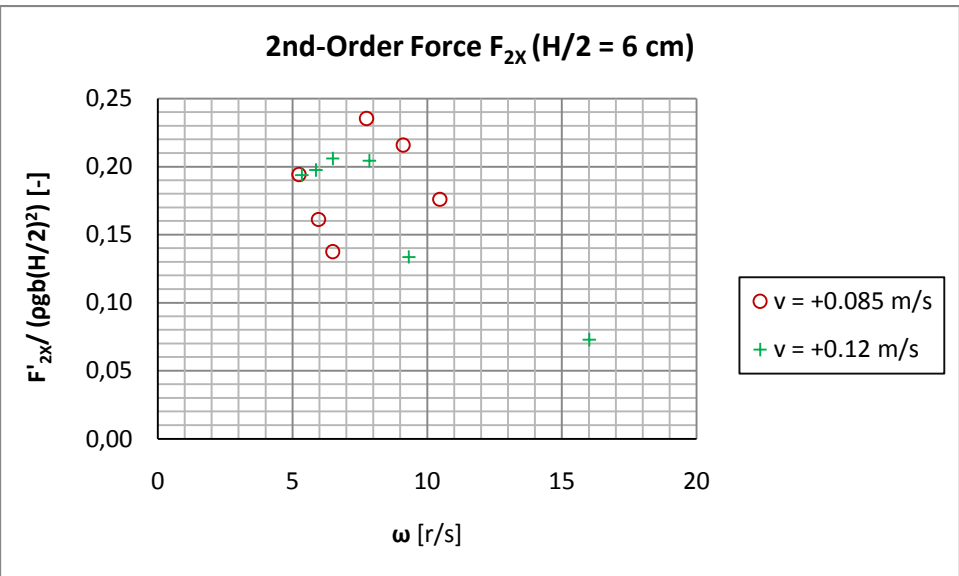
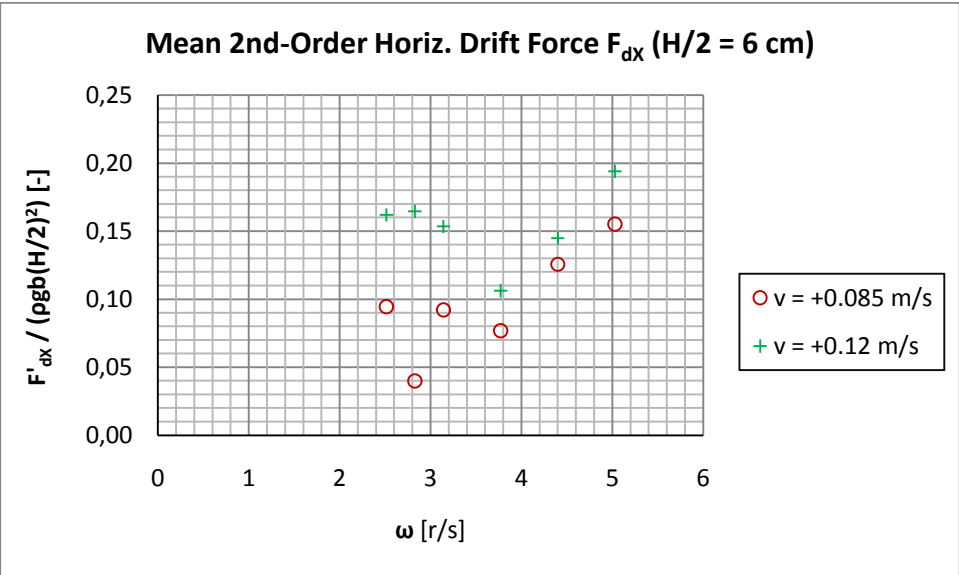
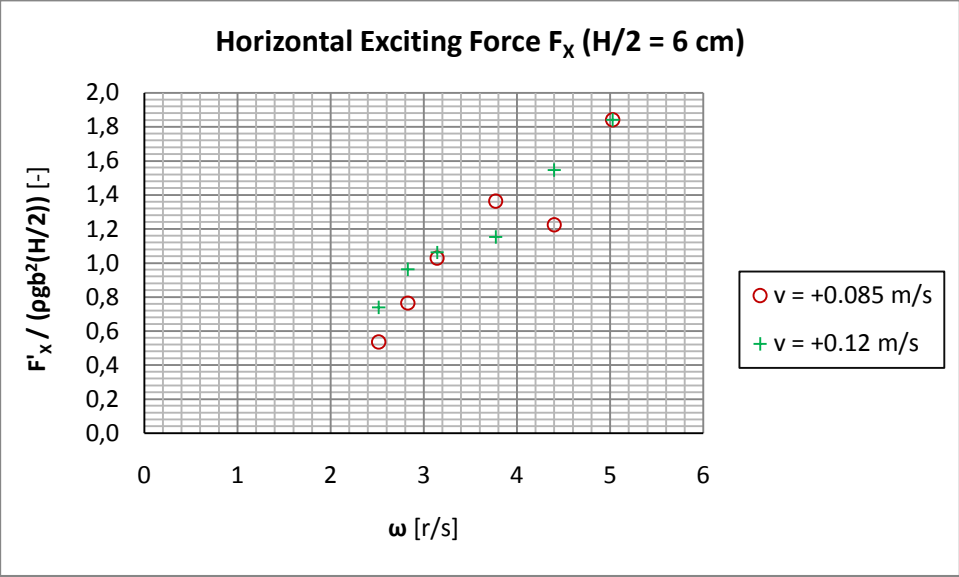


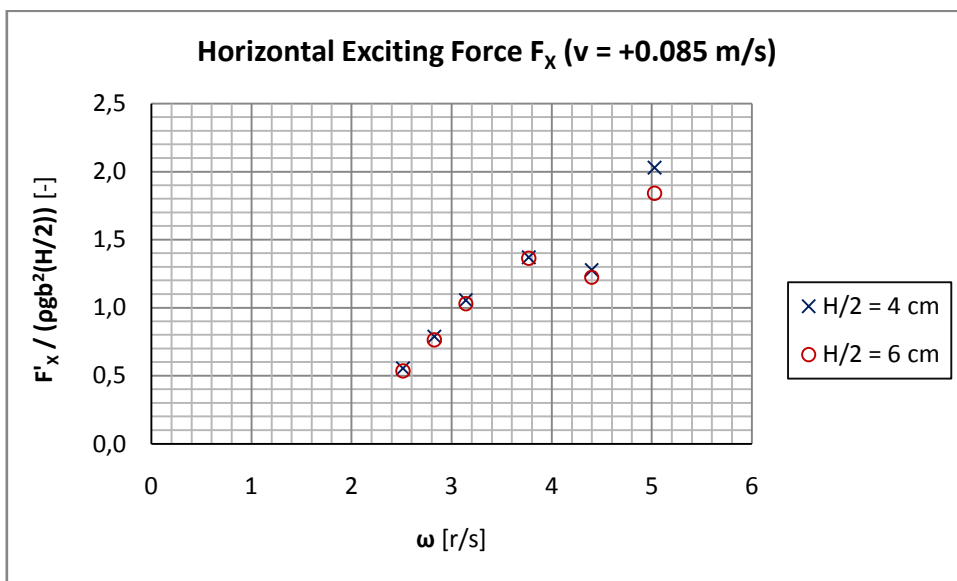
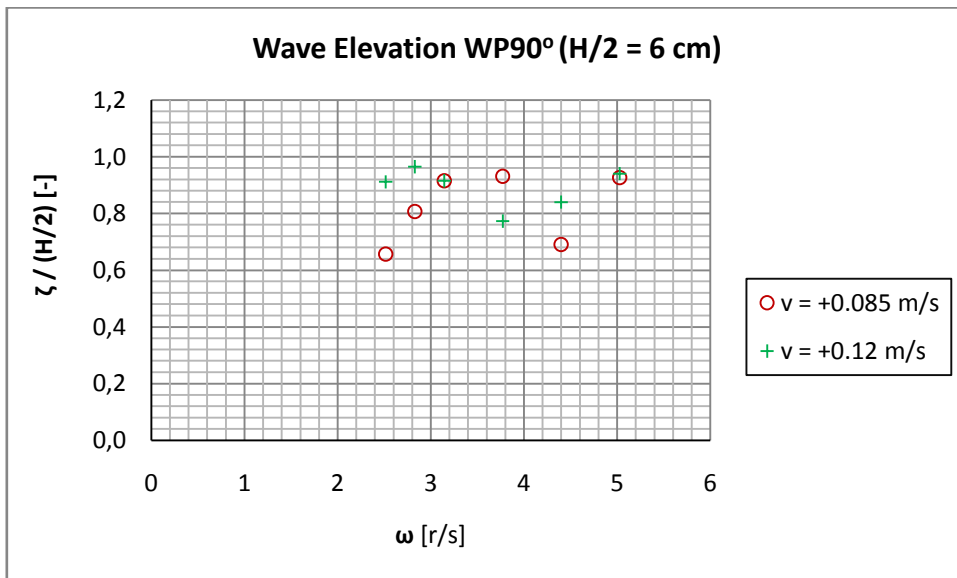
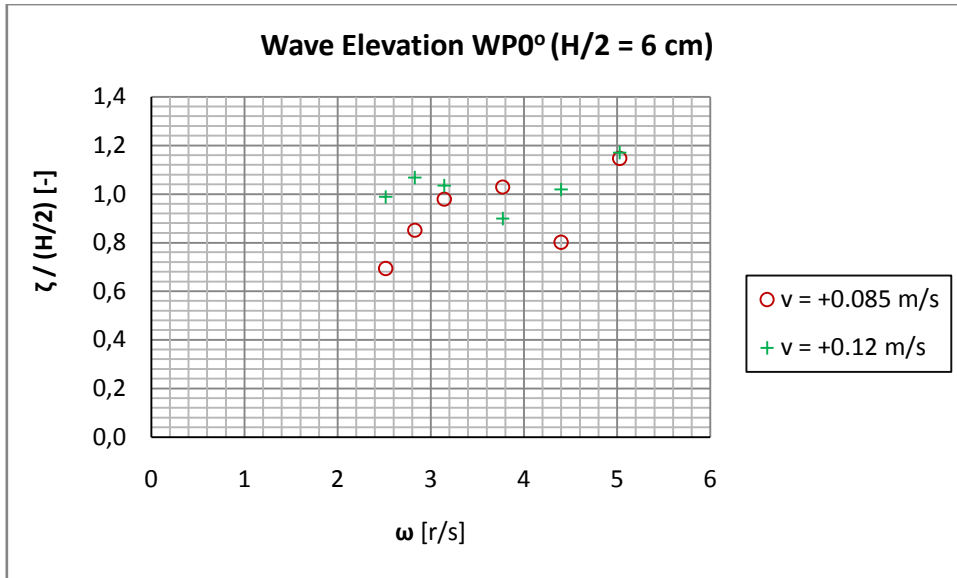
## Κινούμενη κατασκευή [πειράματα 32-67]

### Πρόσω ταχύτητες

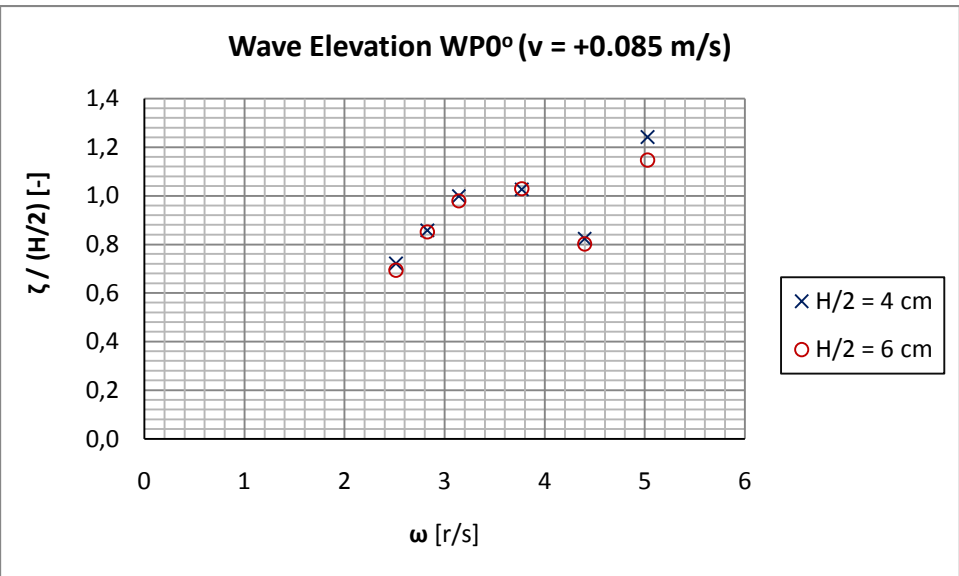
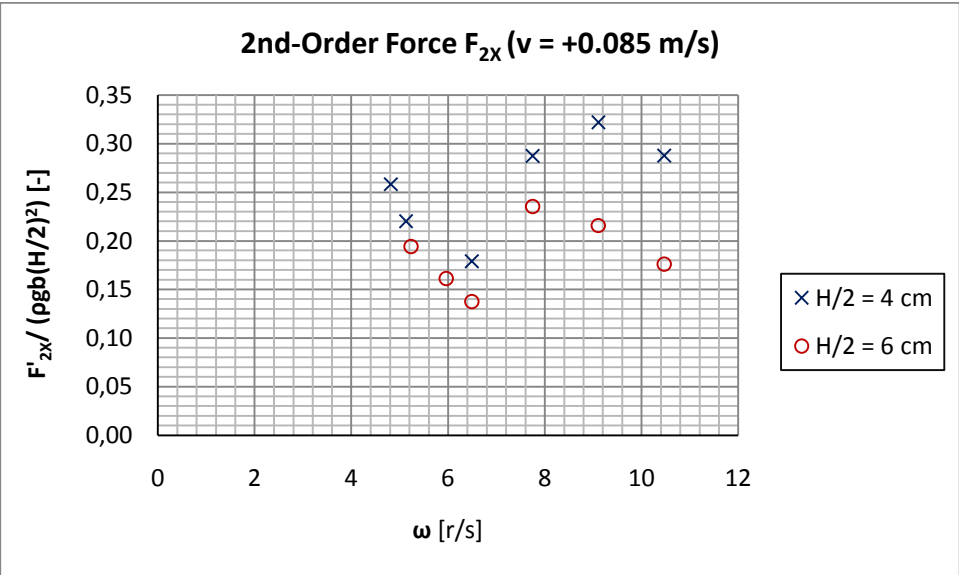
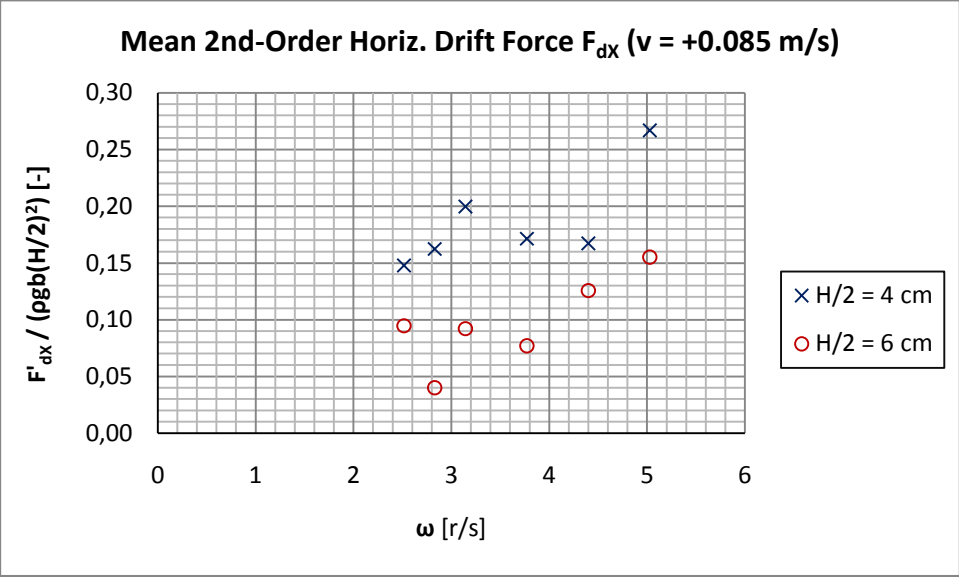


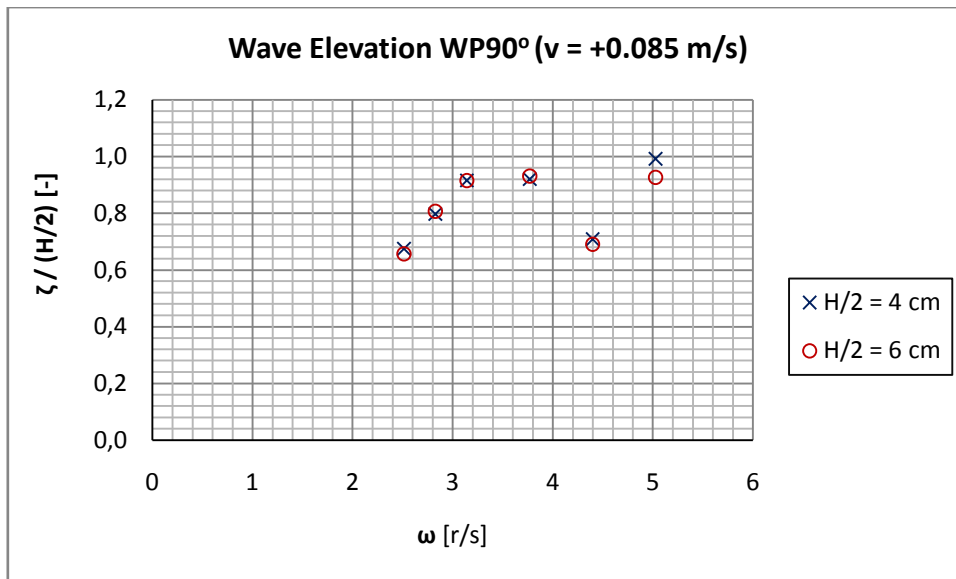




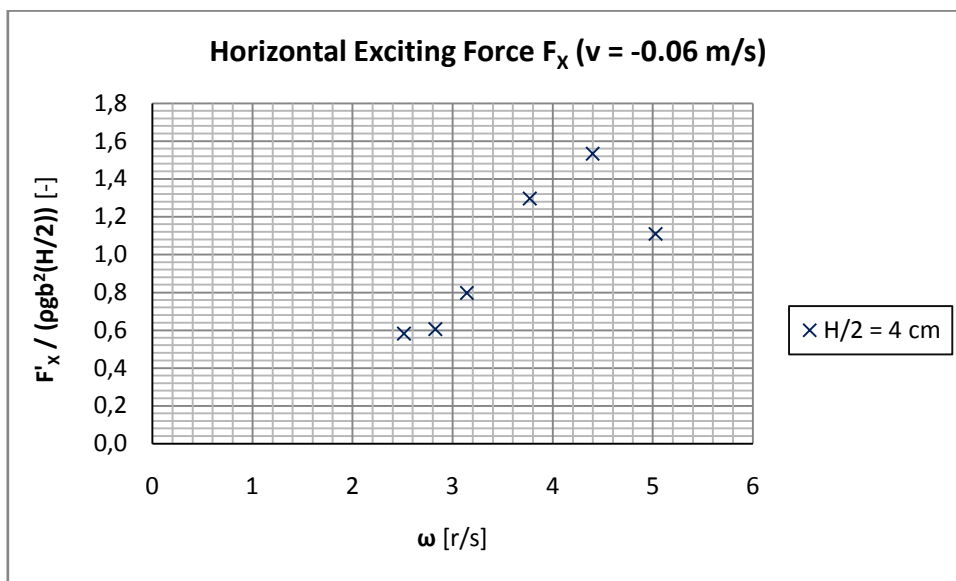


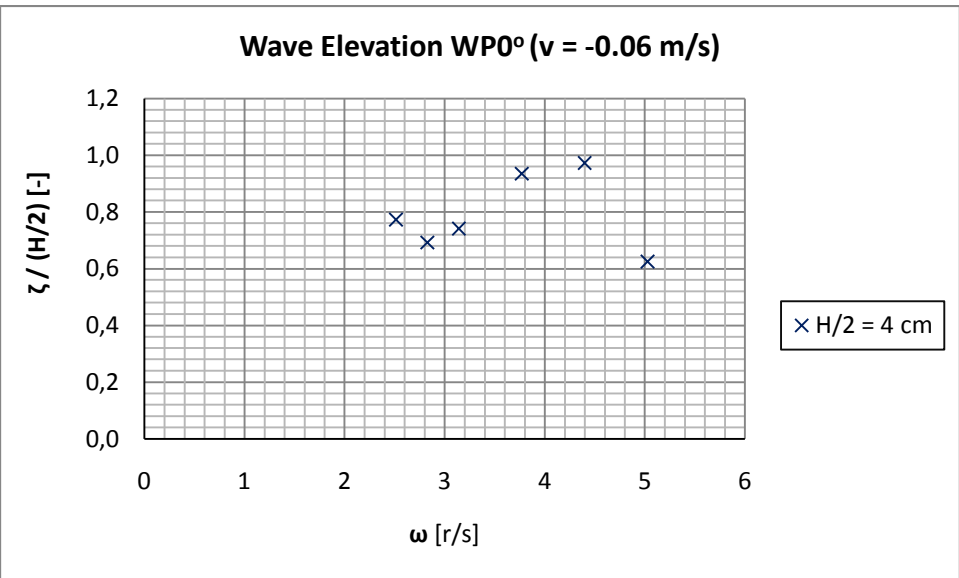
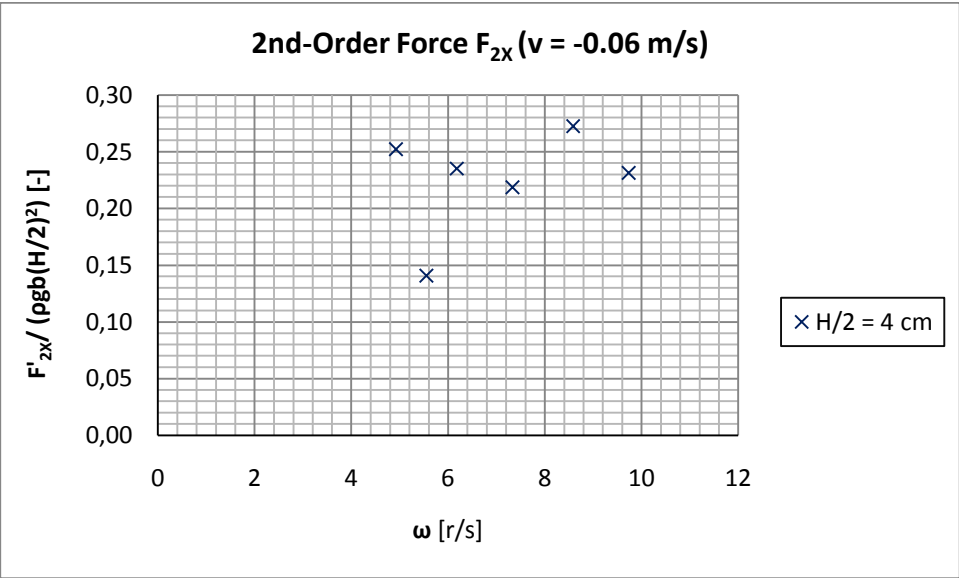
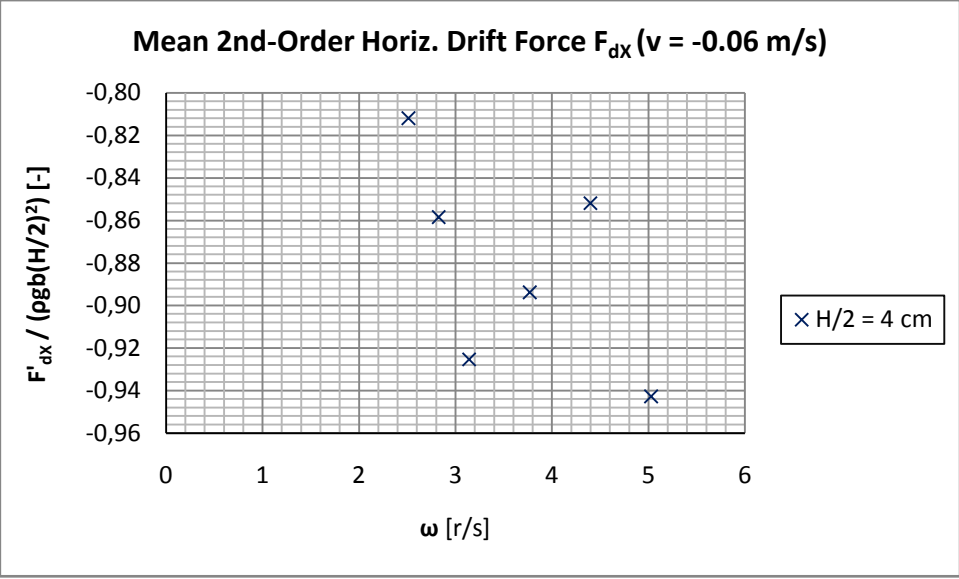


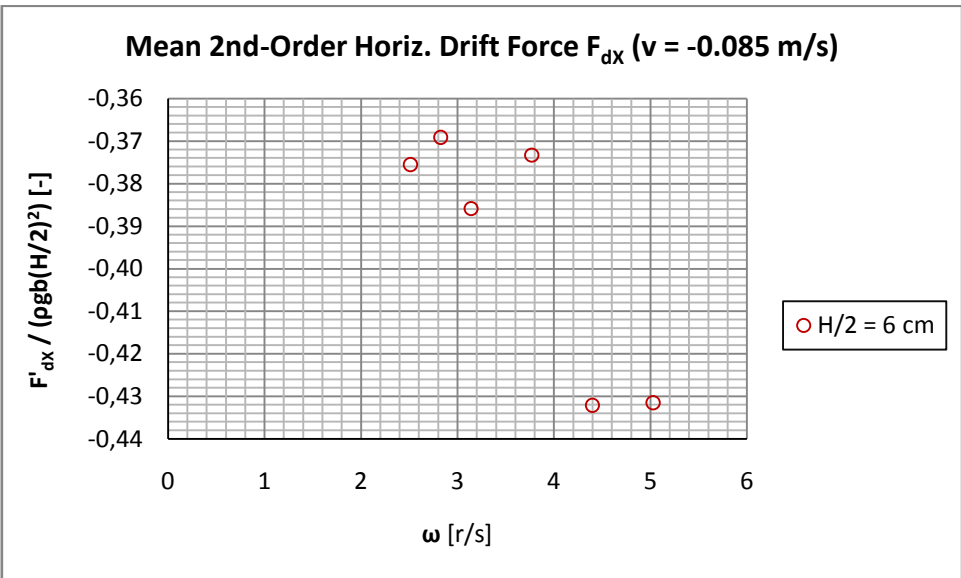
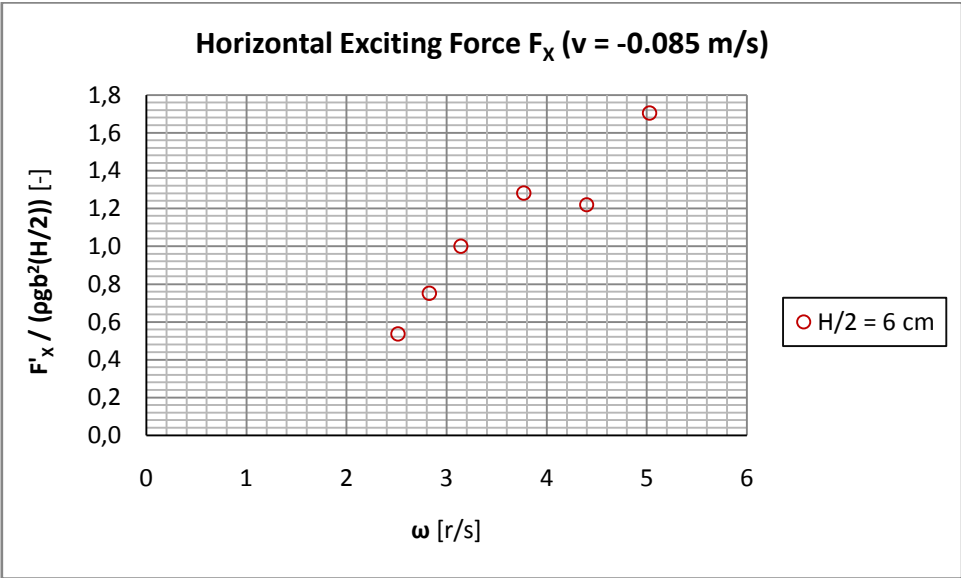
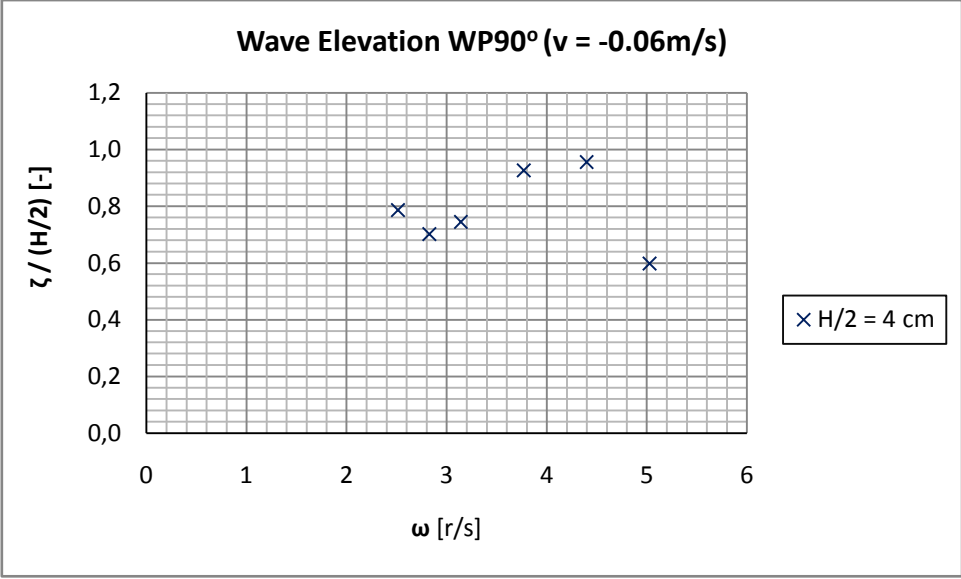


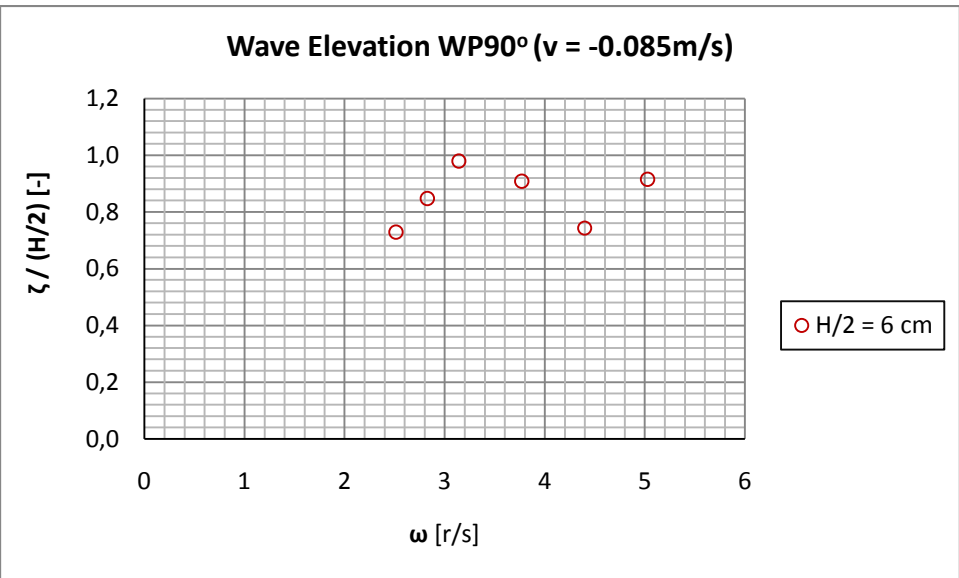
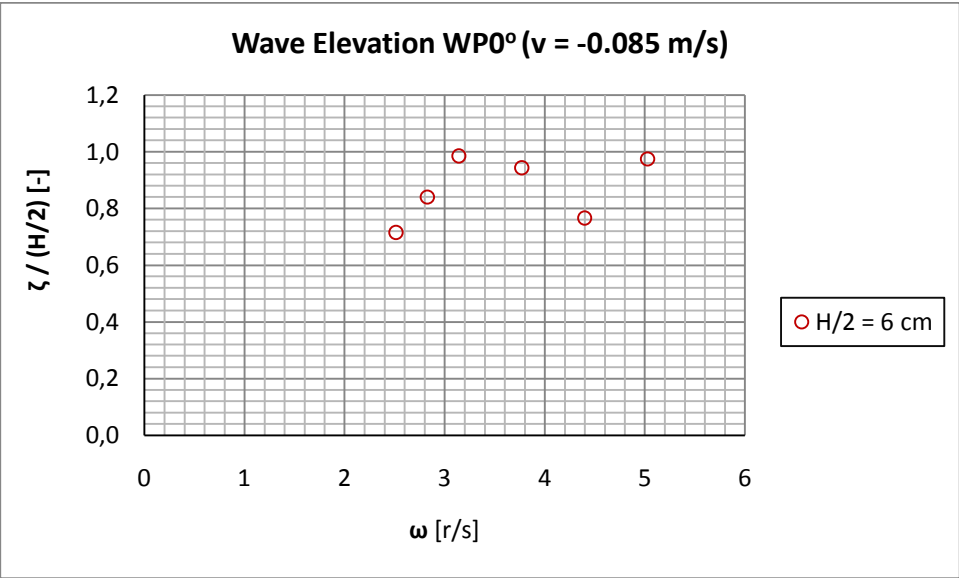
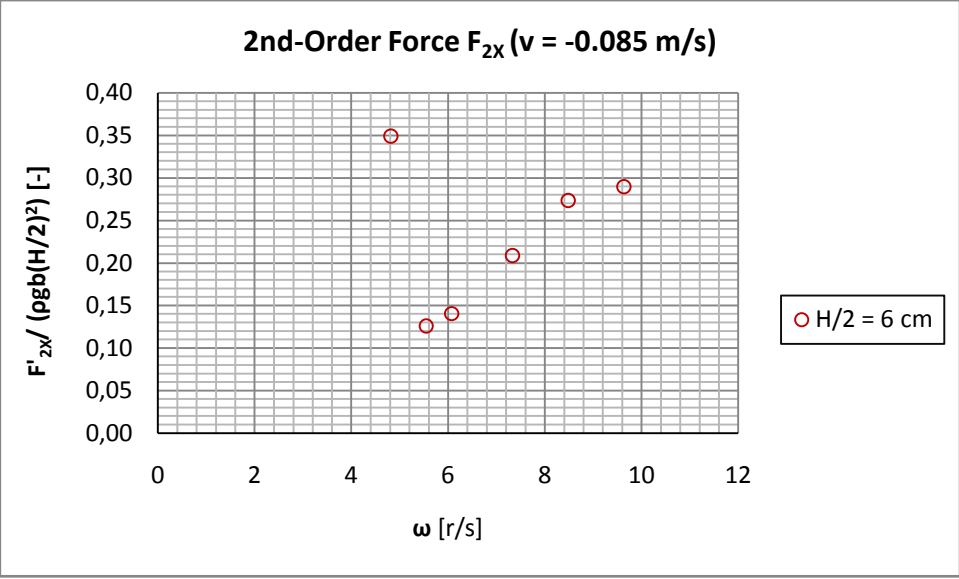


Πίσω ταχύτητες



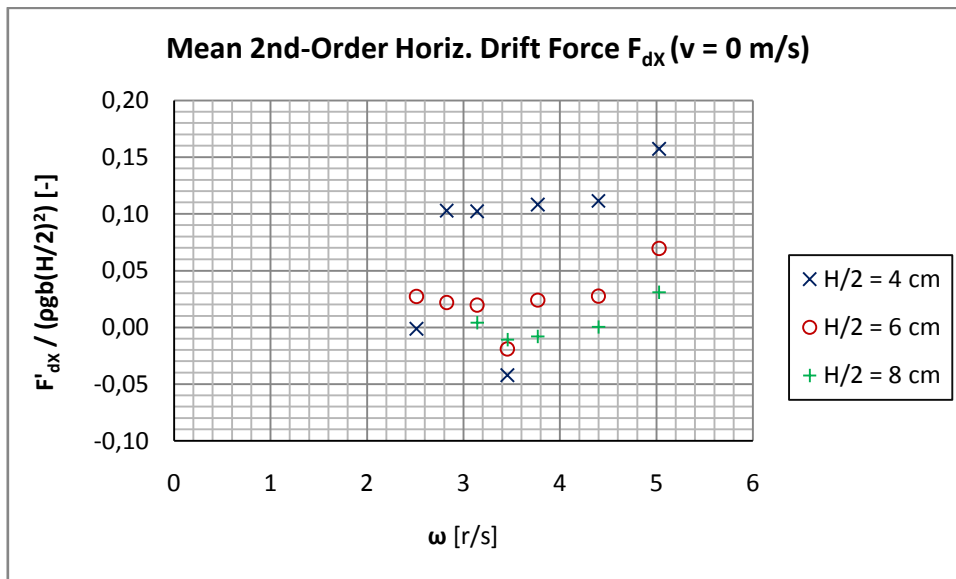
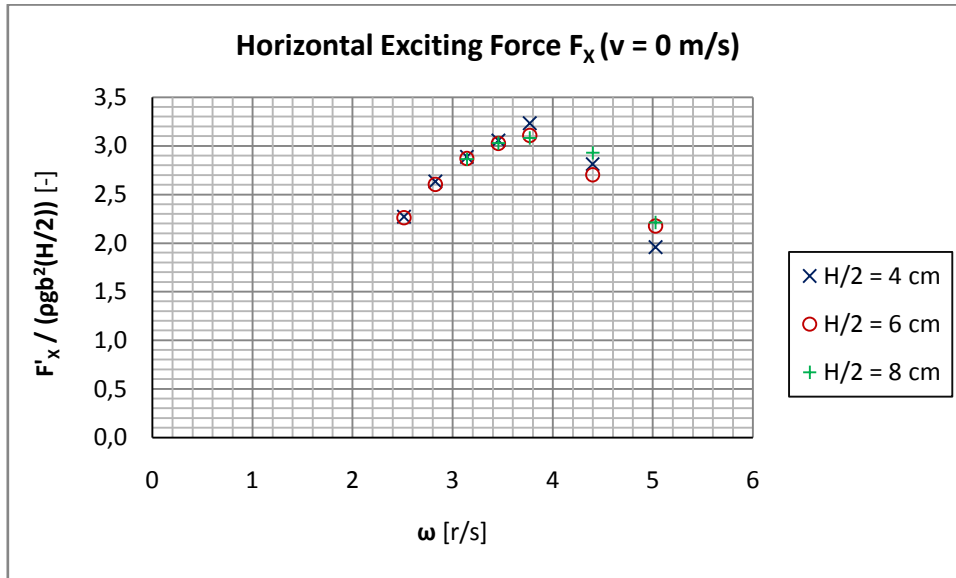


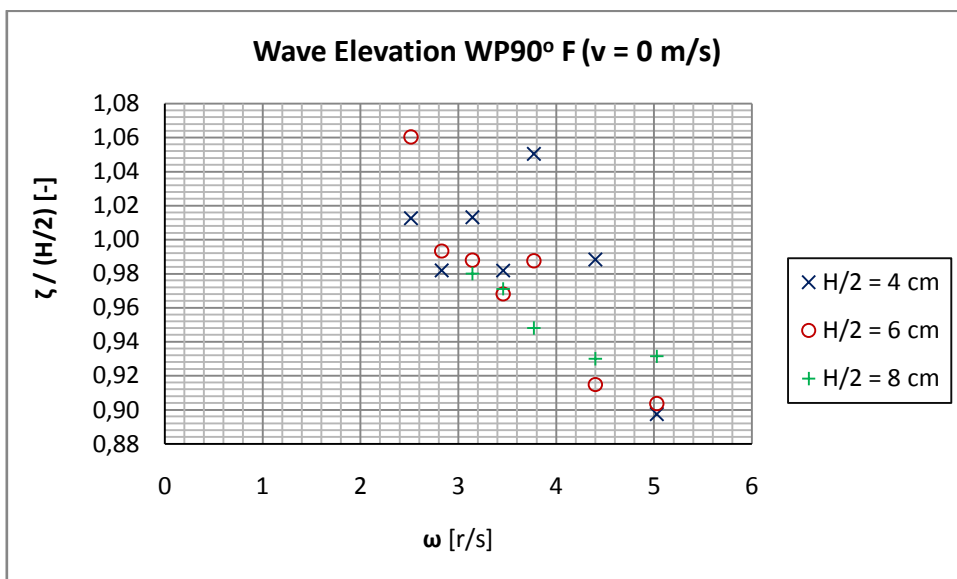
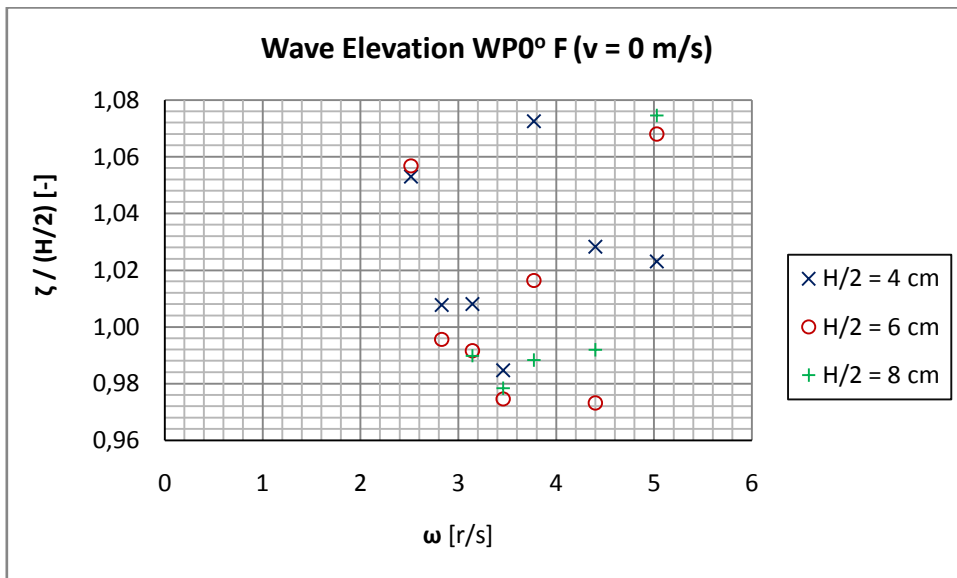
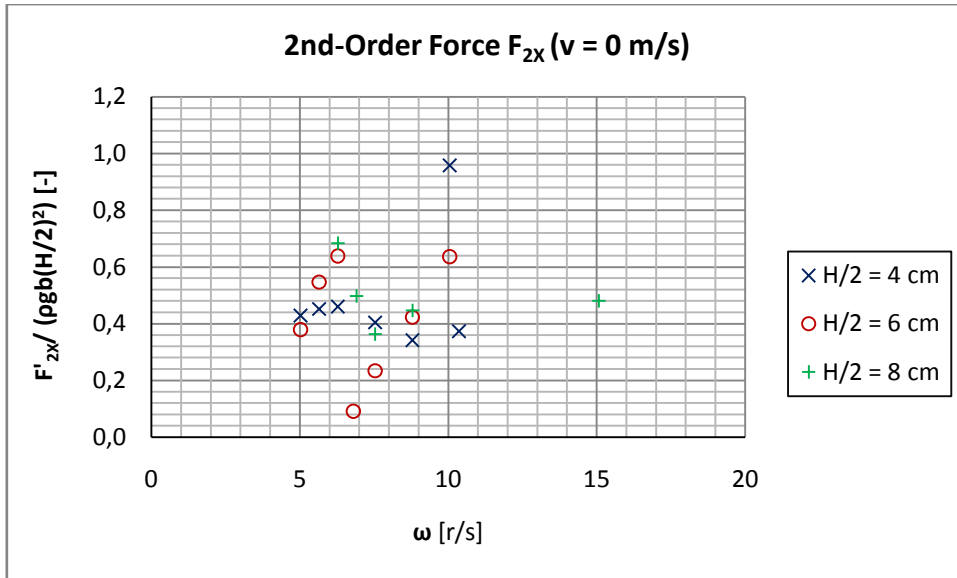


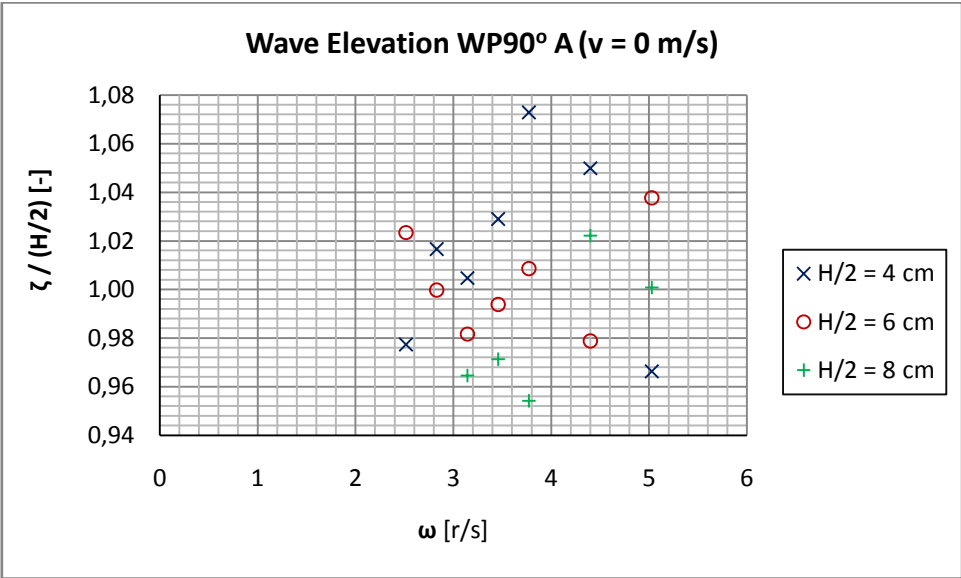
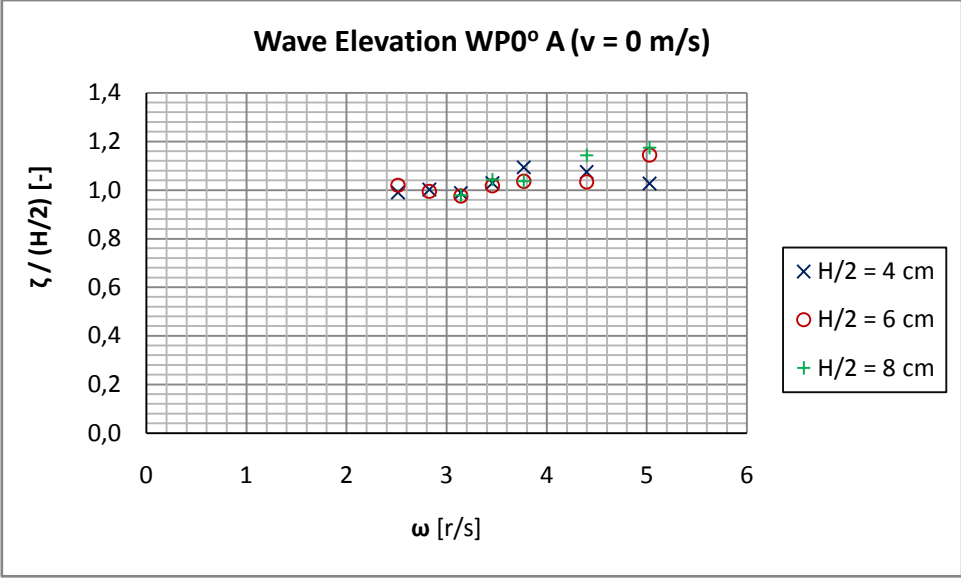


**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ (R35) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Ακίνητη κατασκευή [πειράματα 68-87]



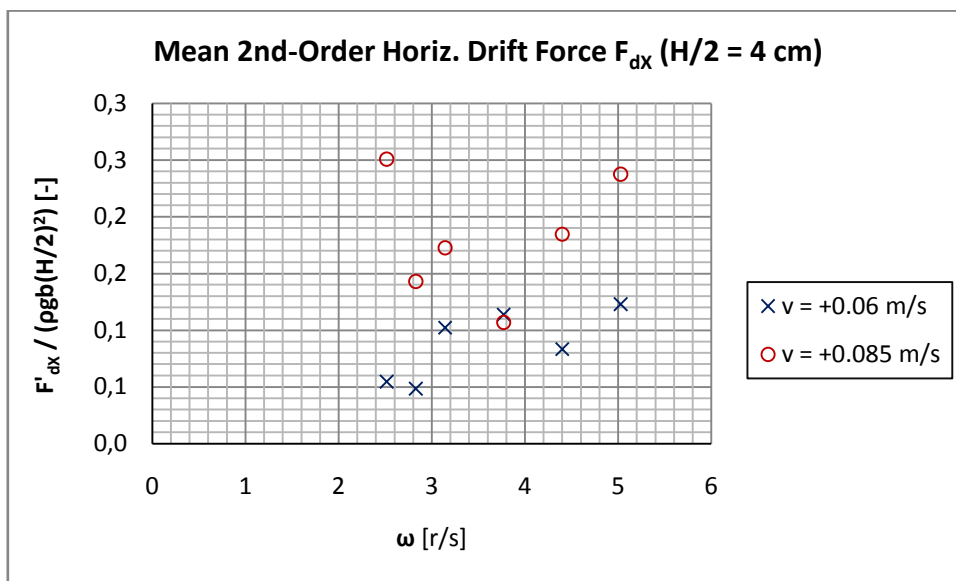
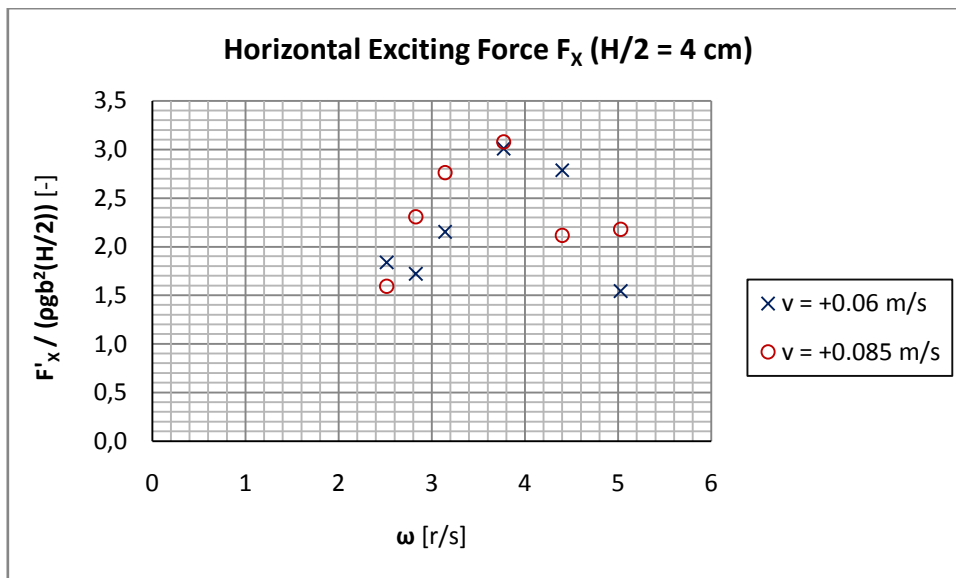


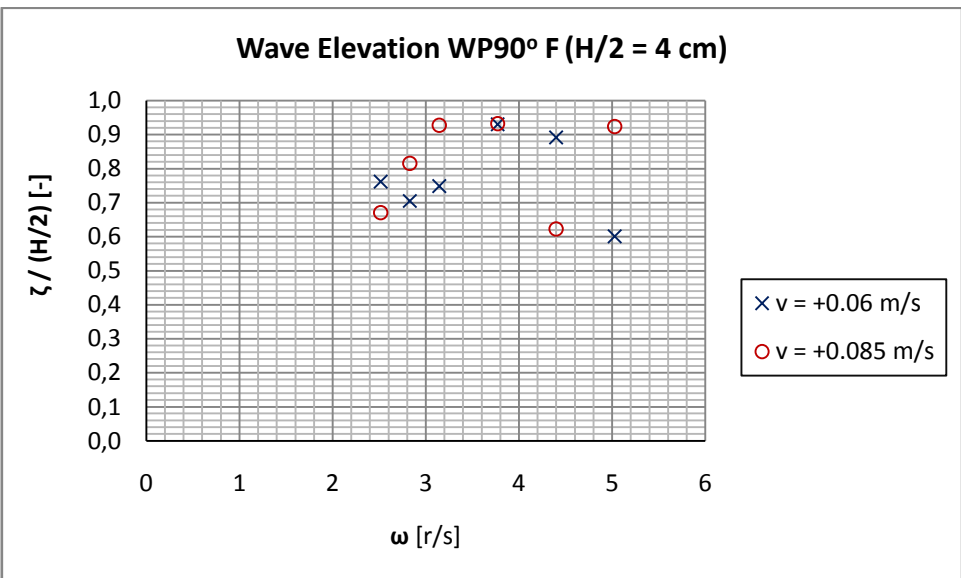
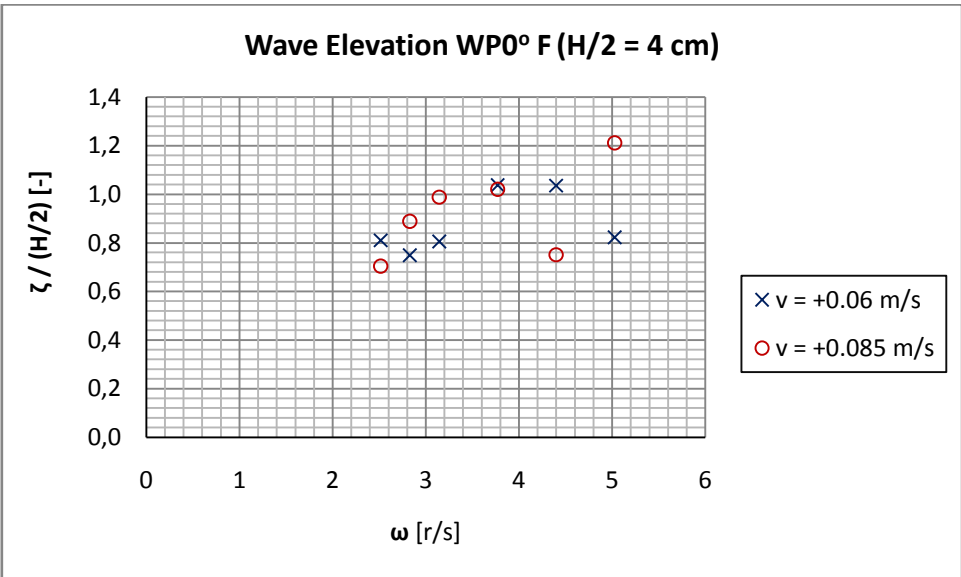
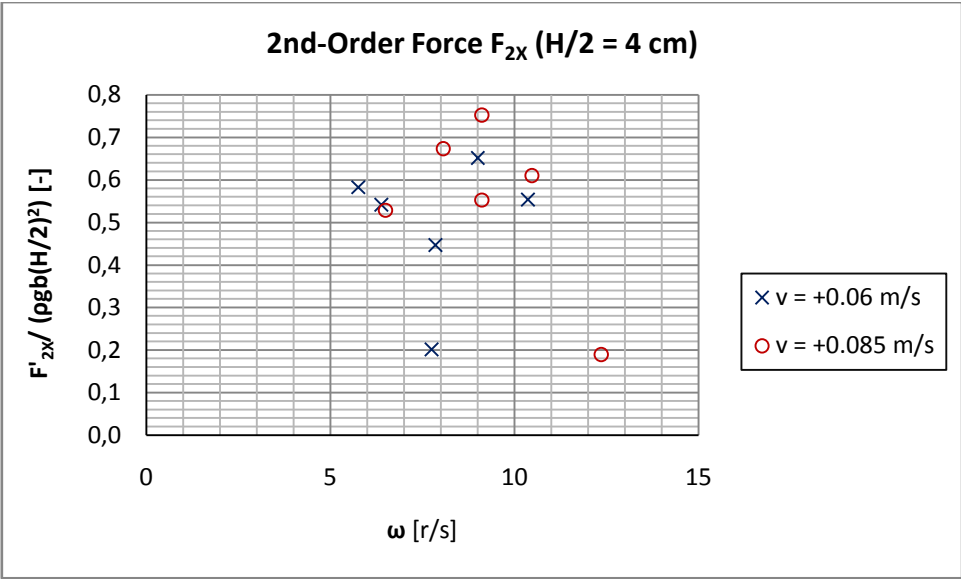


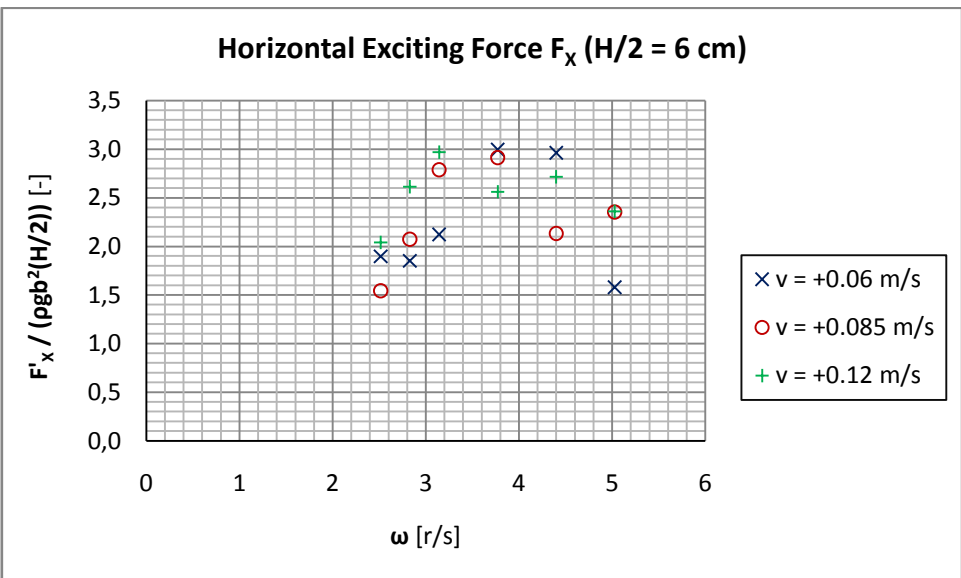
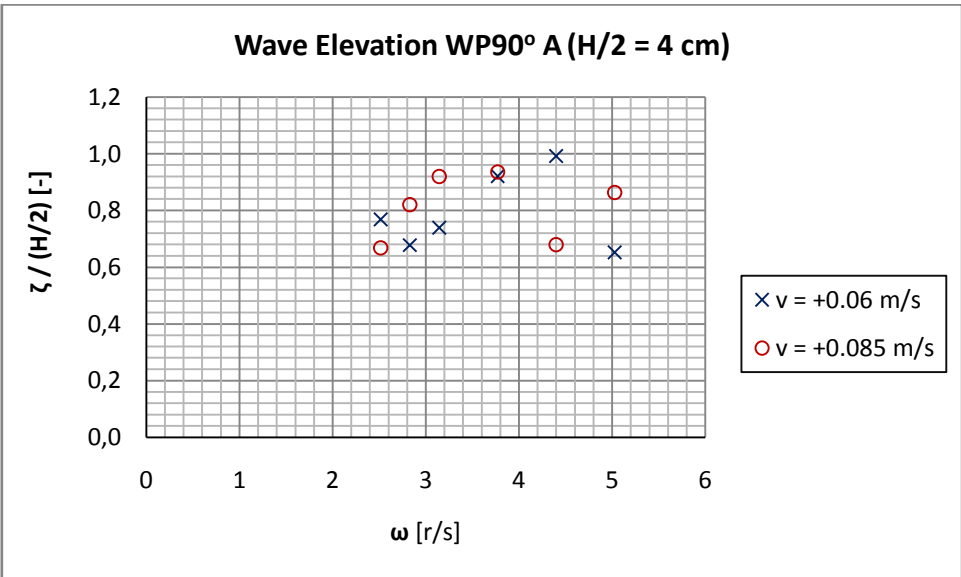
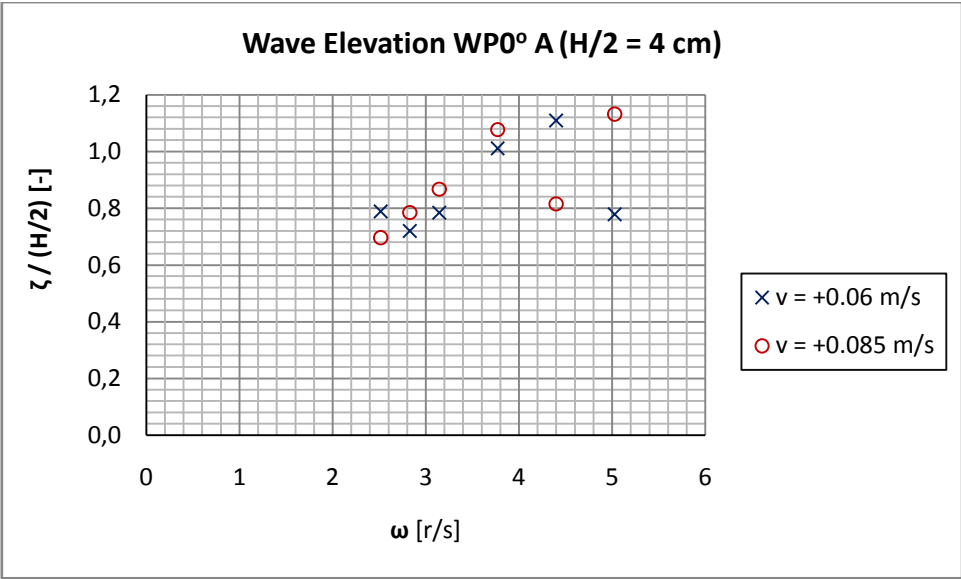


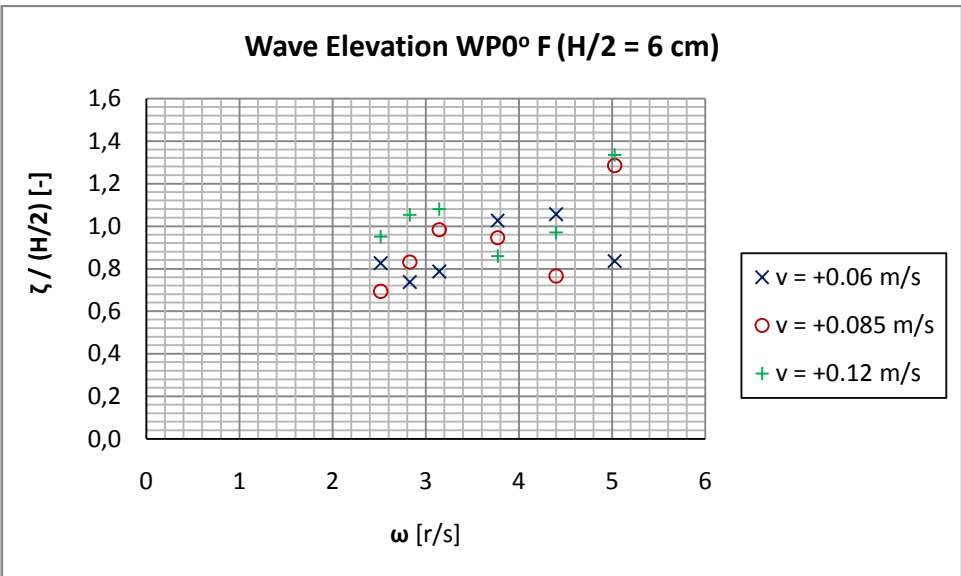
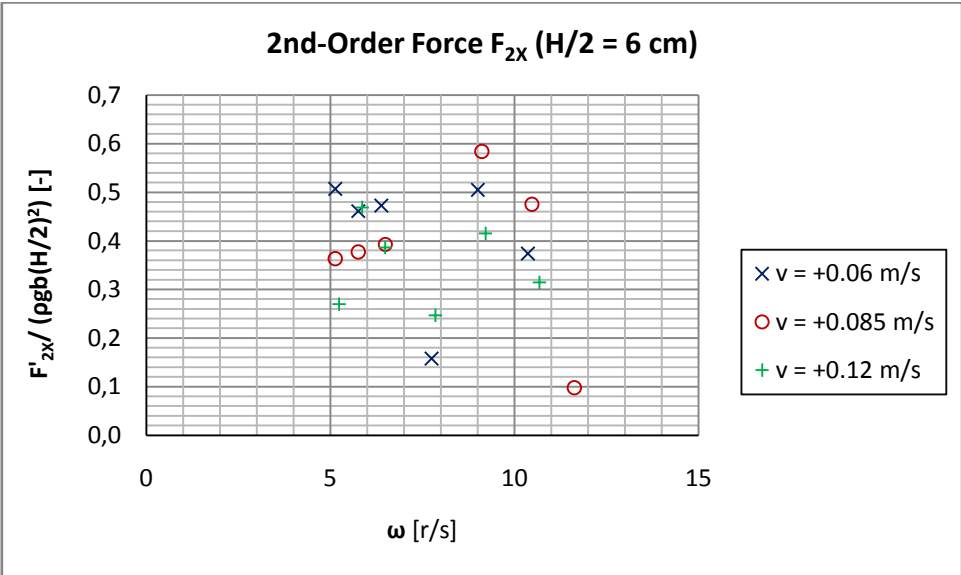
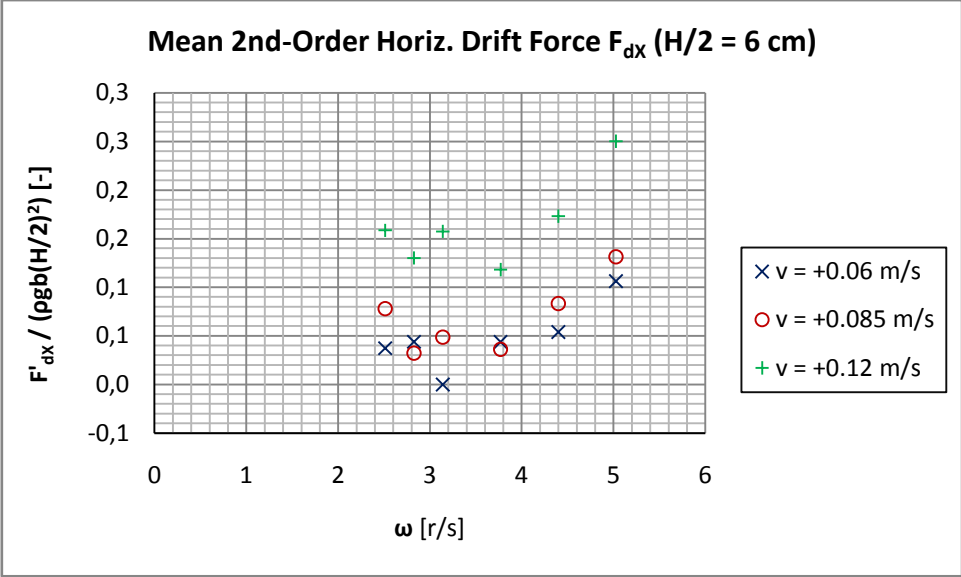
# Κινούμενη κατασκευή [πειράματα 88-123]

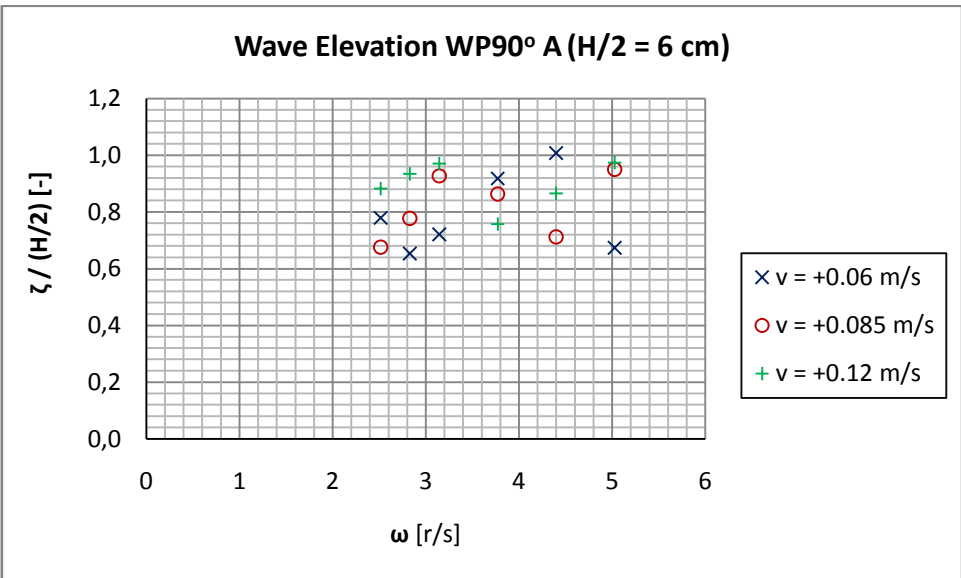
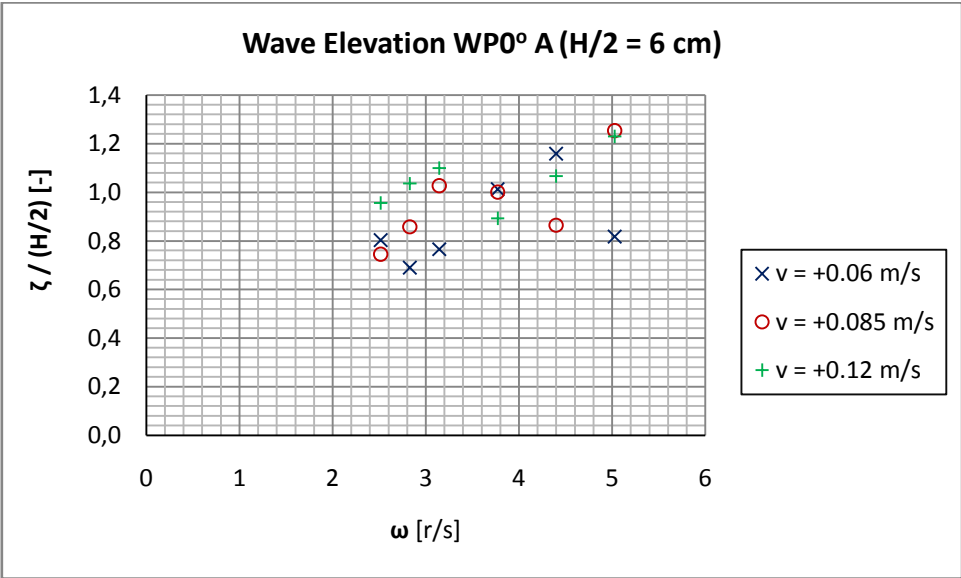
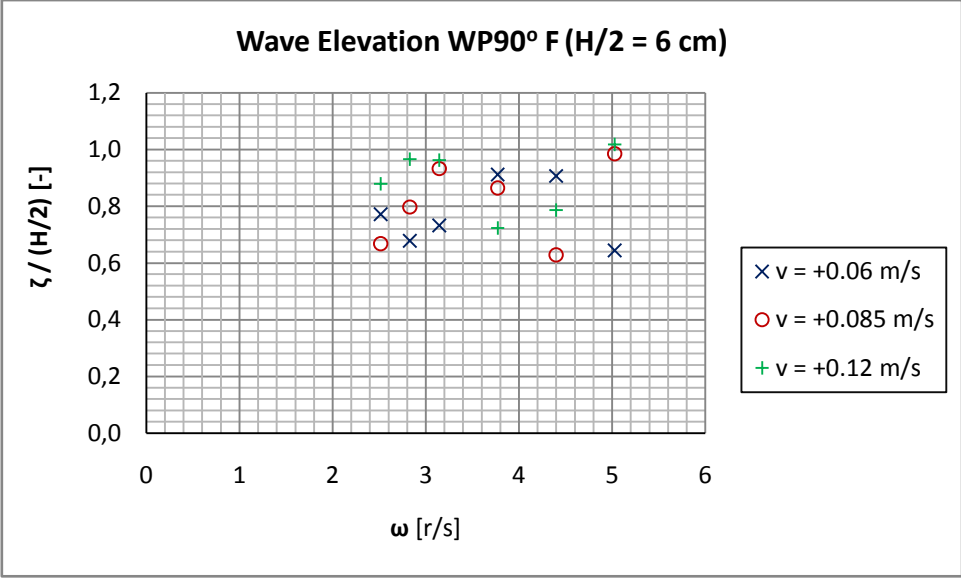
## Πρόσω ταχύτητες

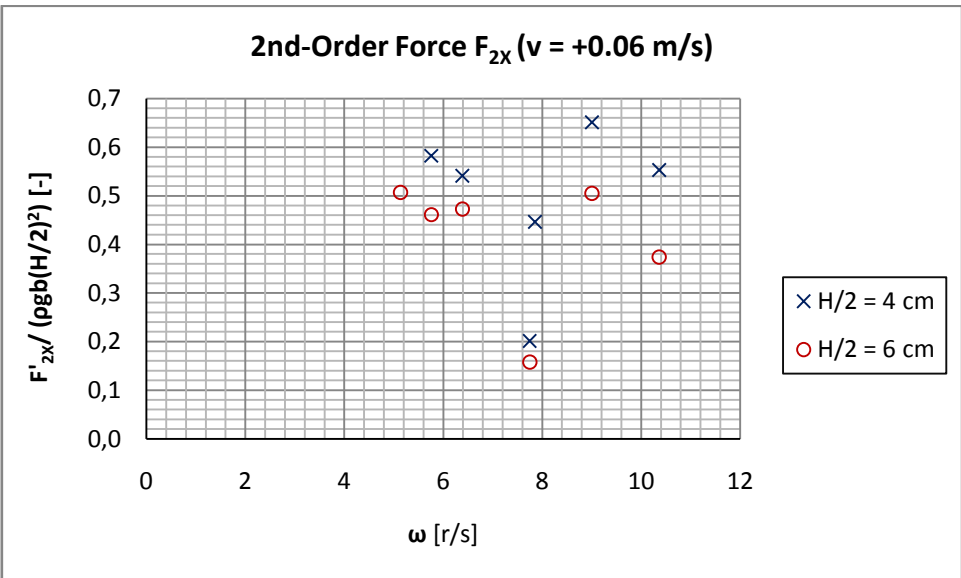
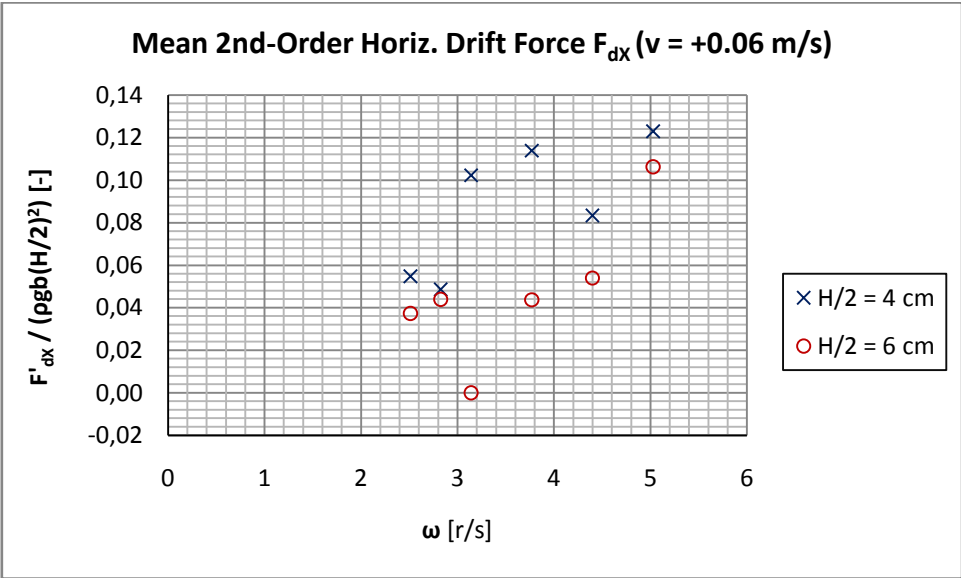
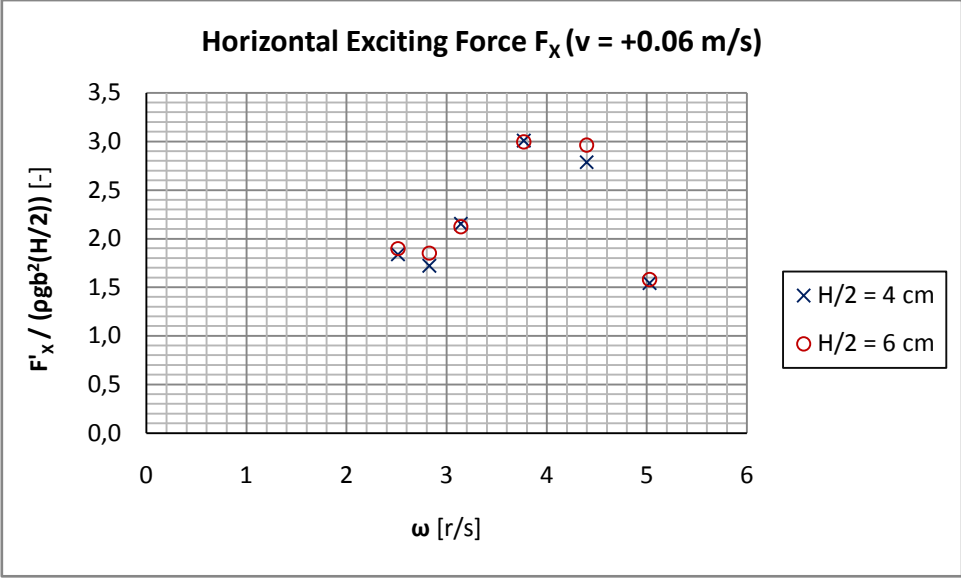


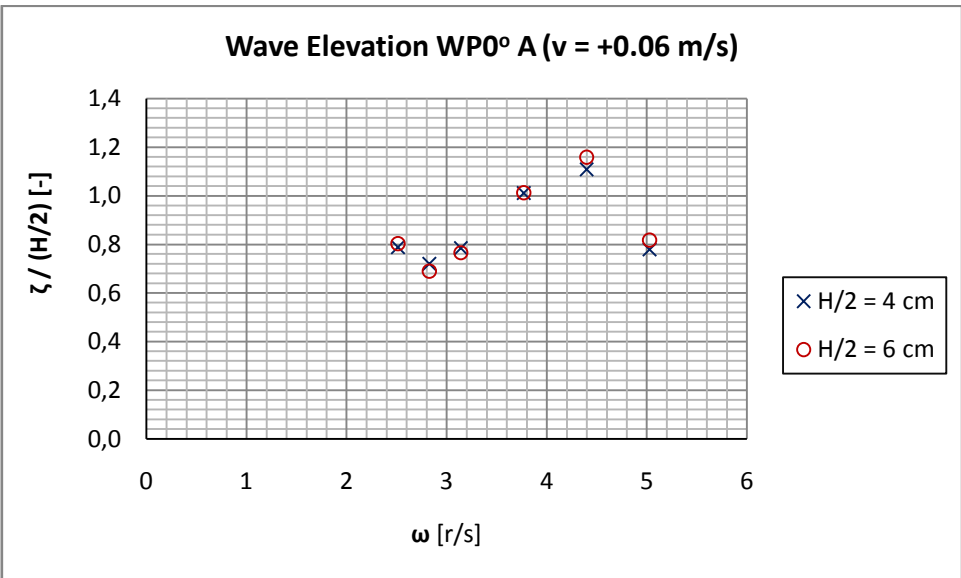
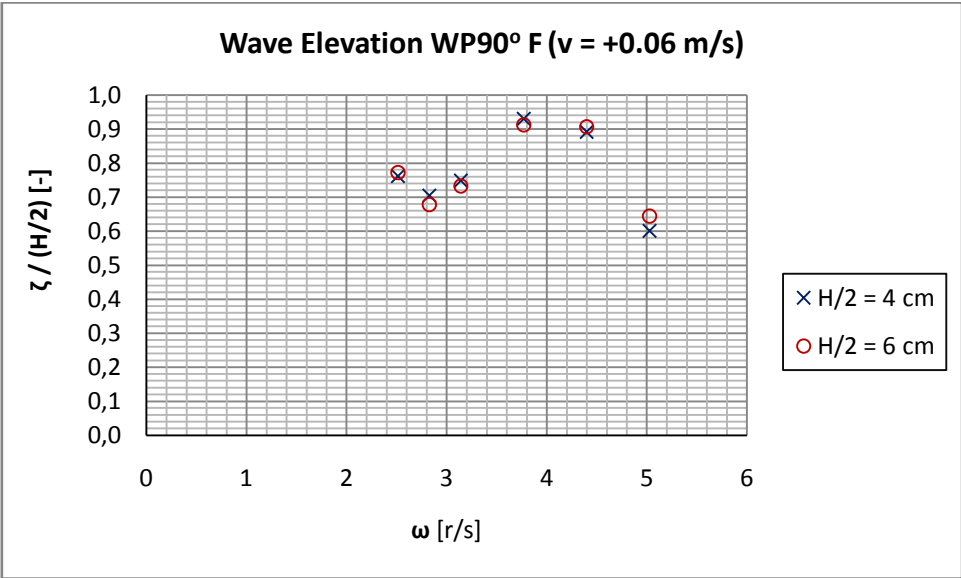
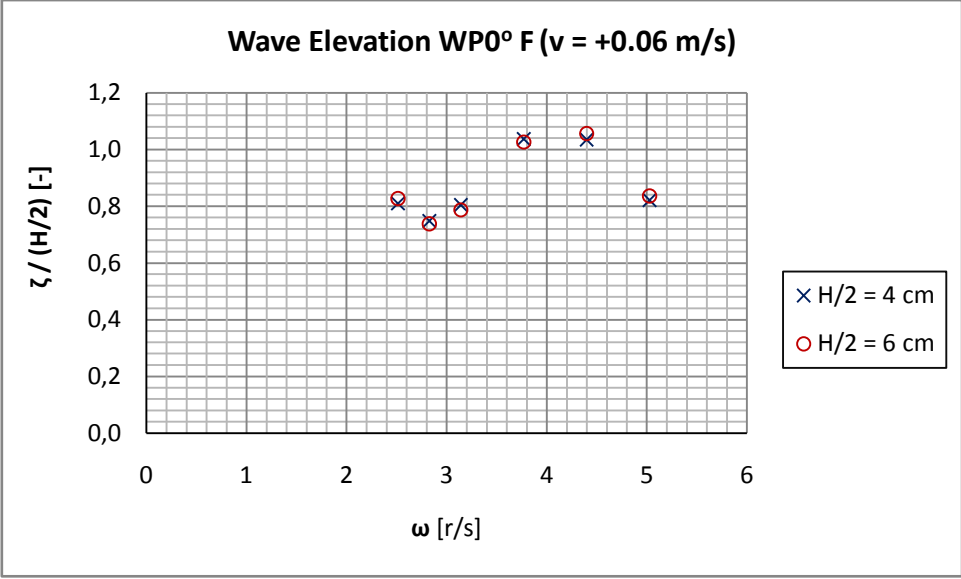


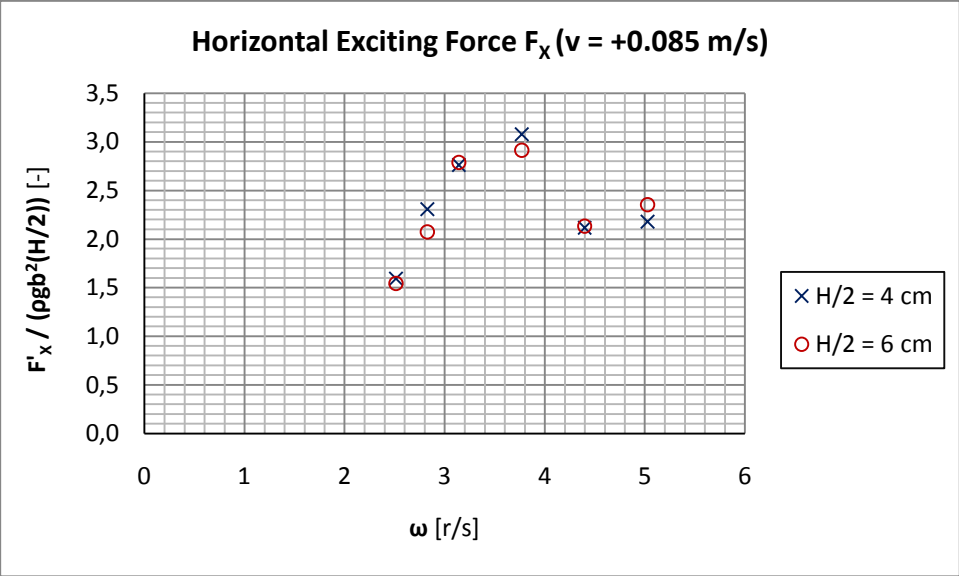
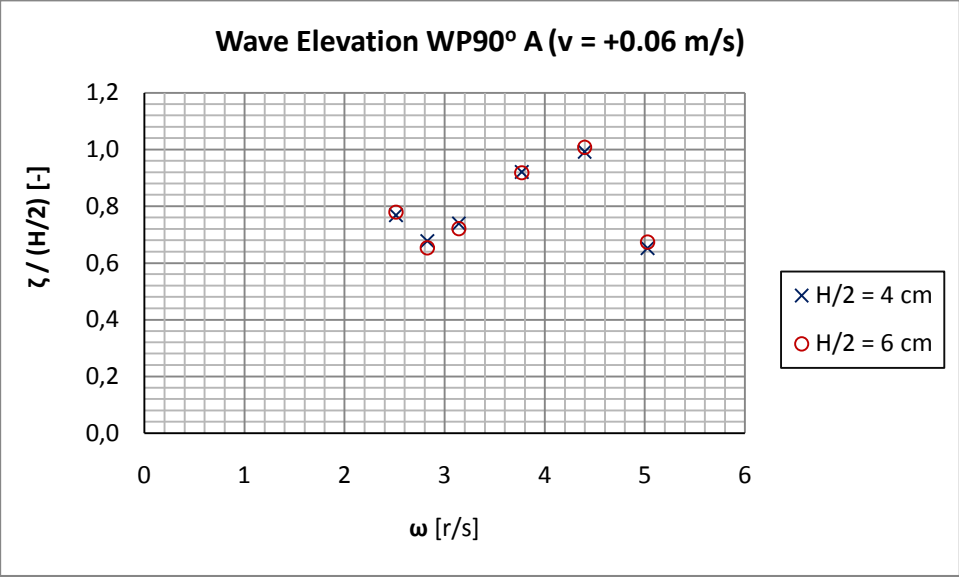




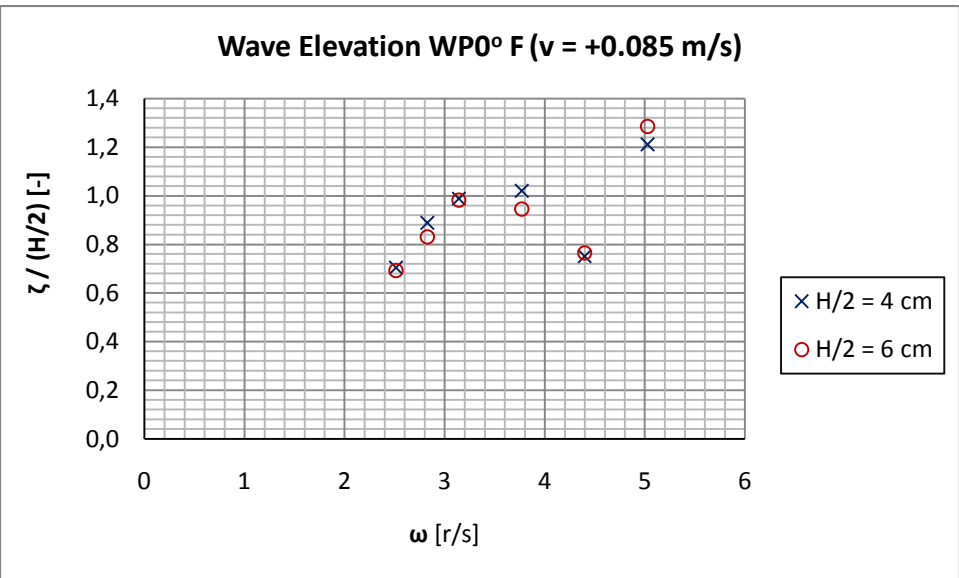
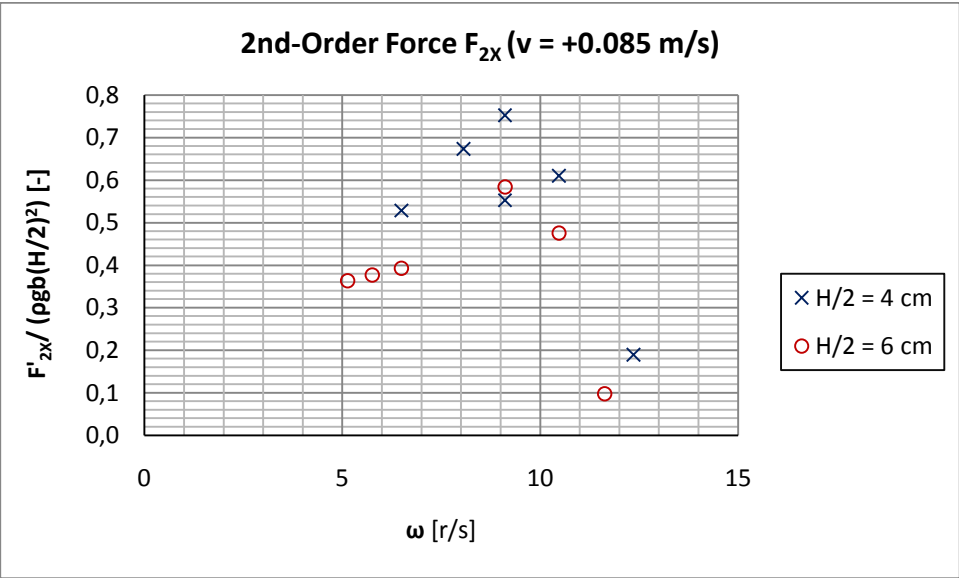
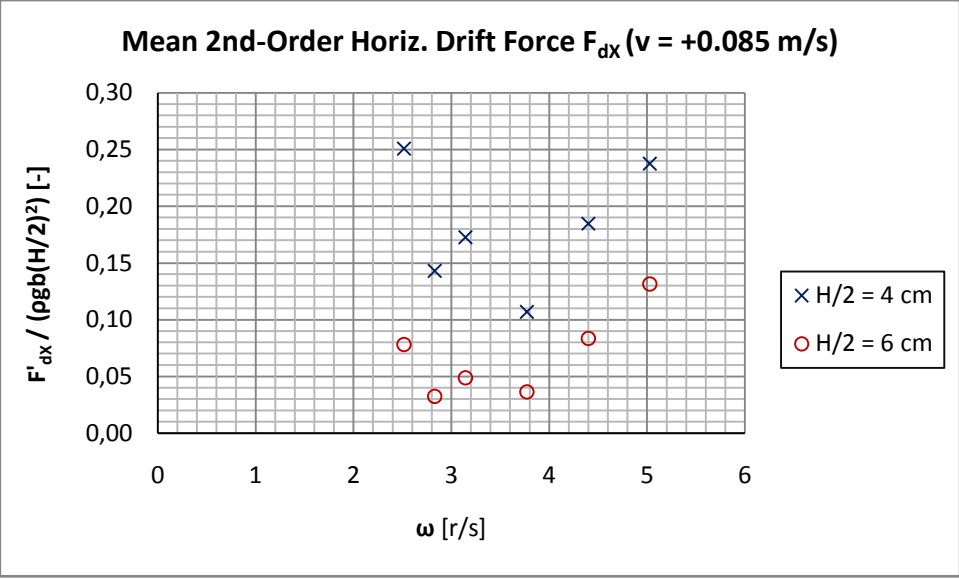


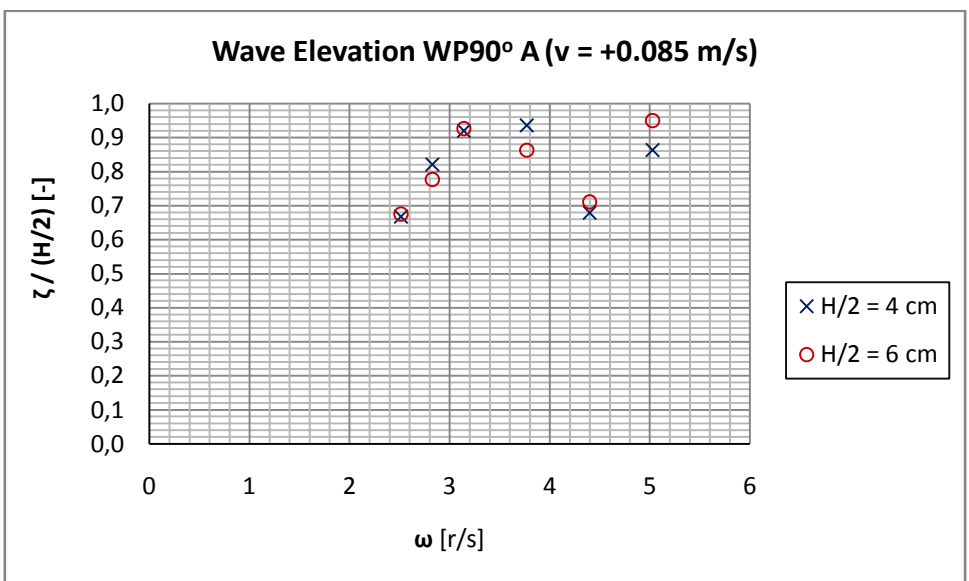
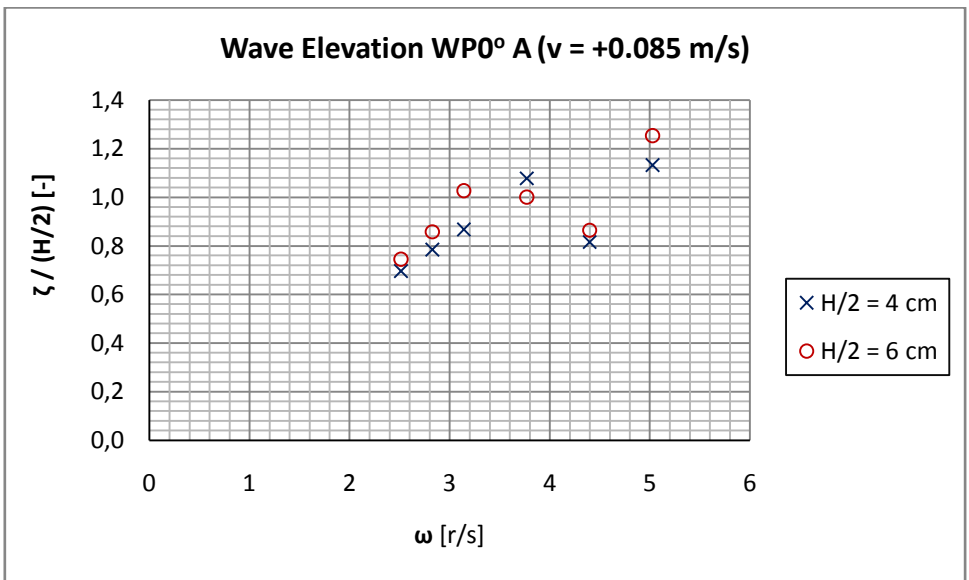
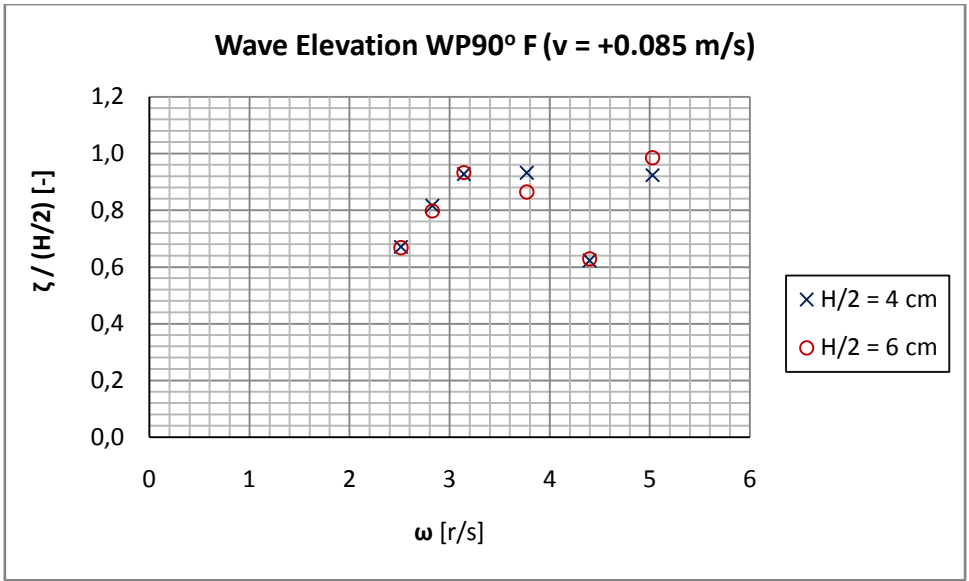




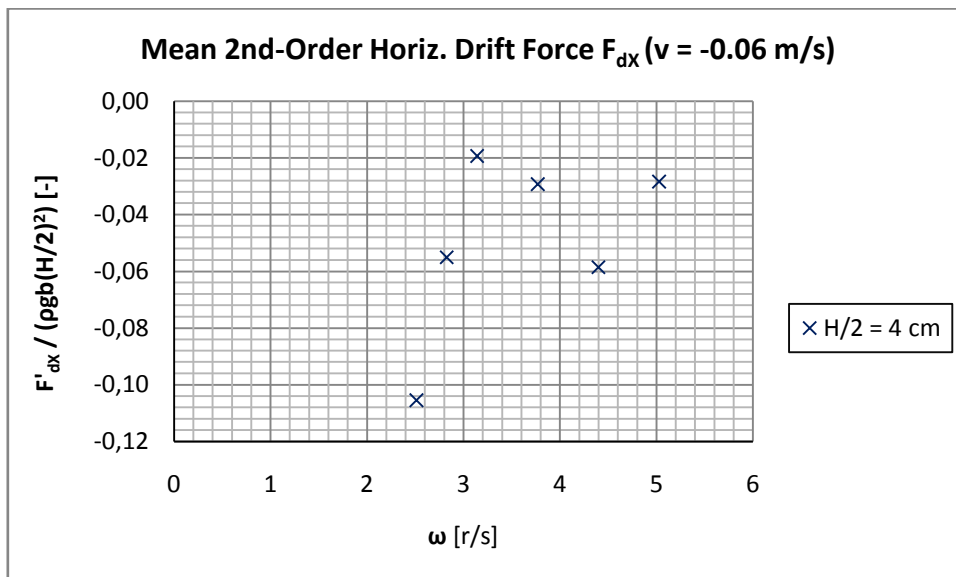
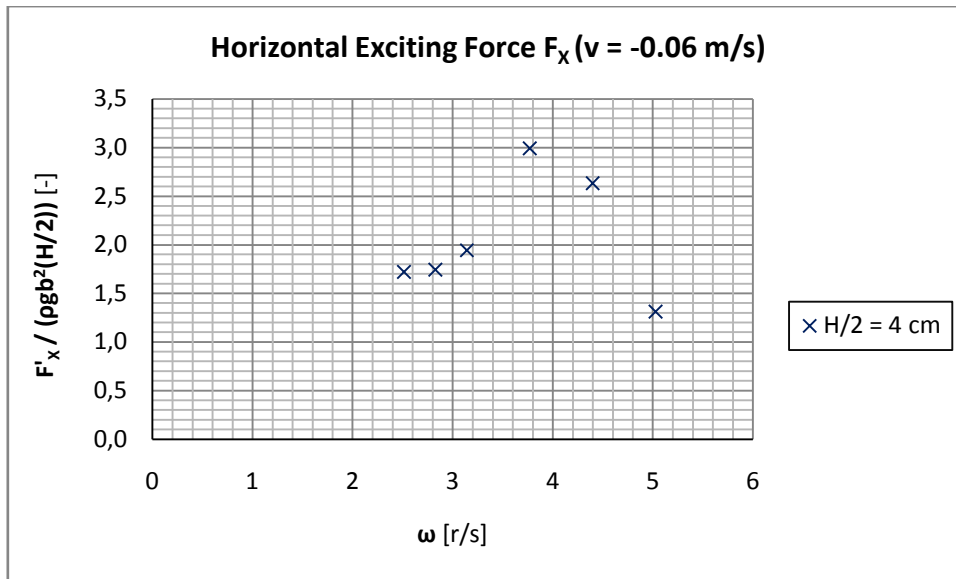


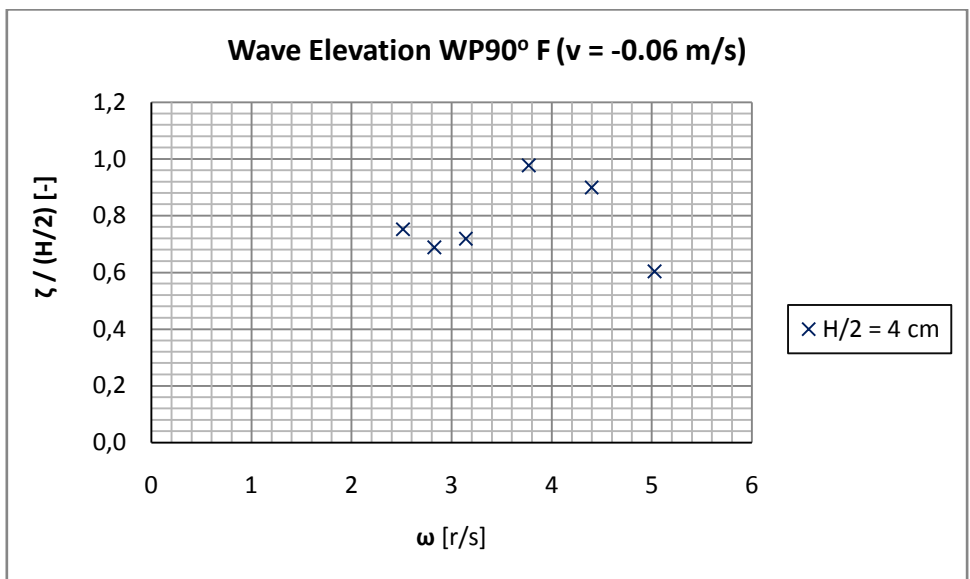
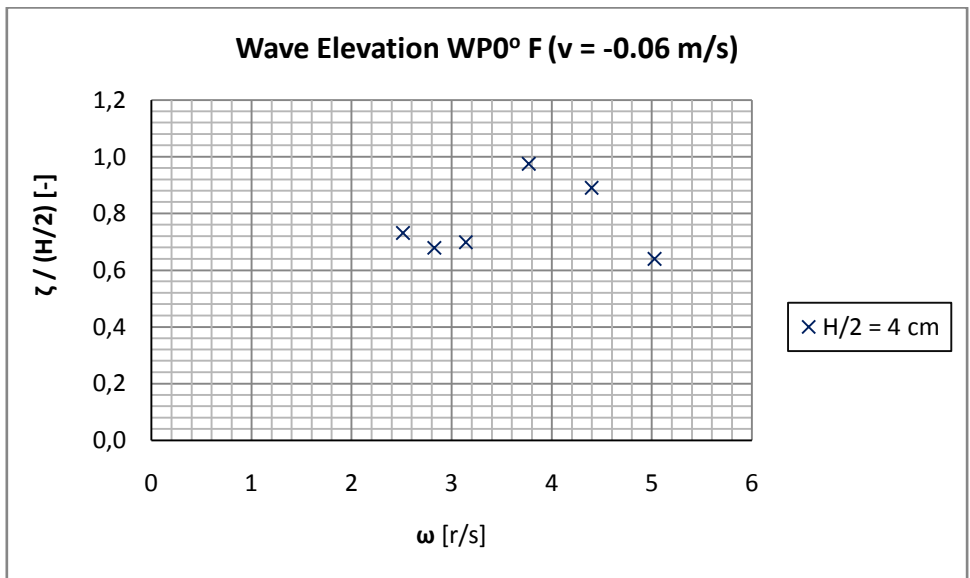
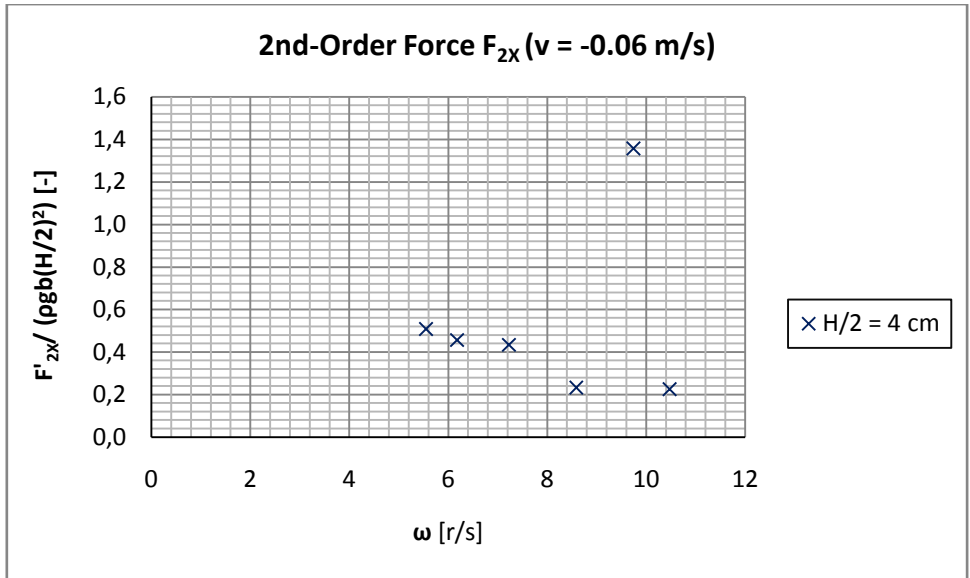


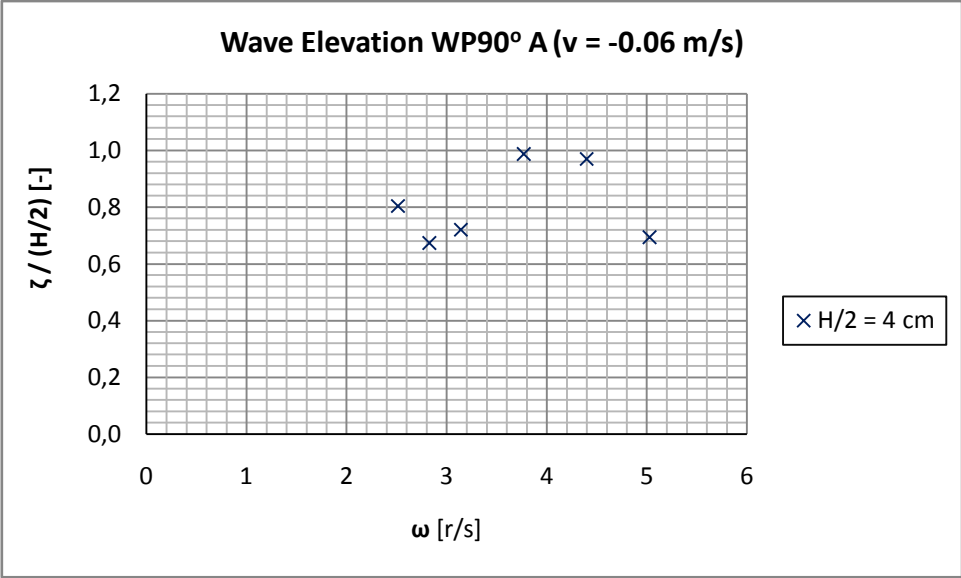
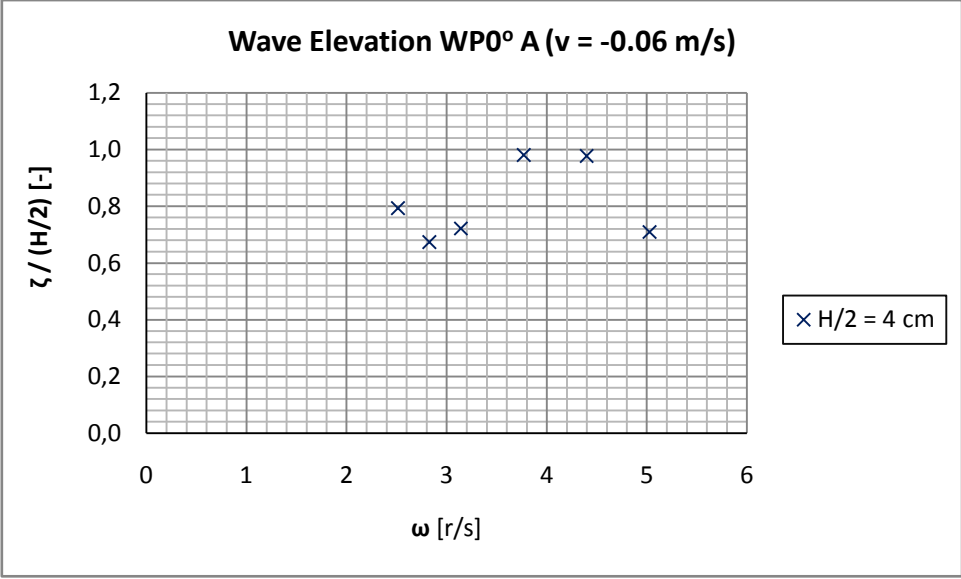




Πίσω ταχύτητα

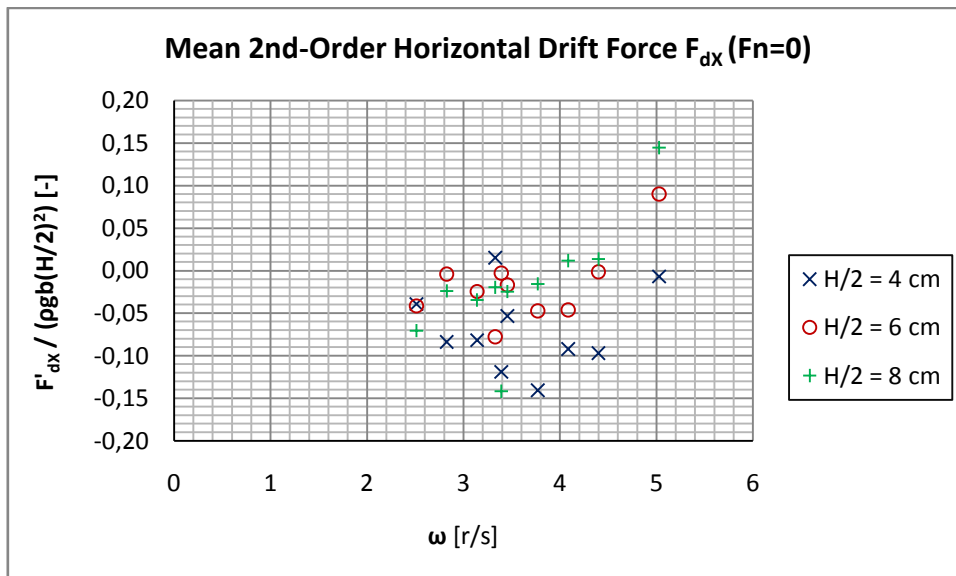
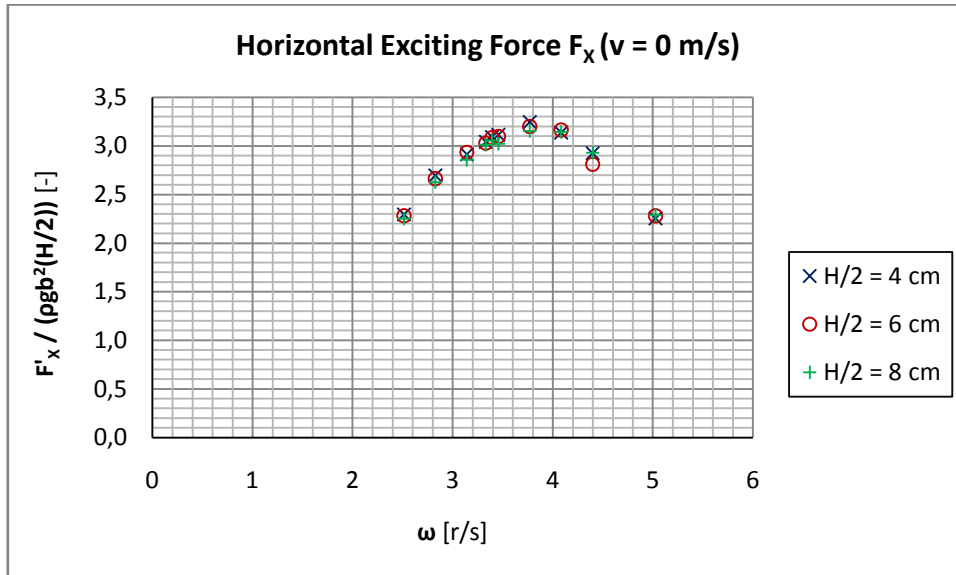


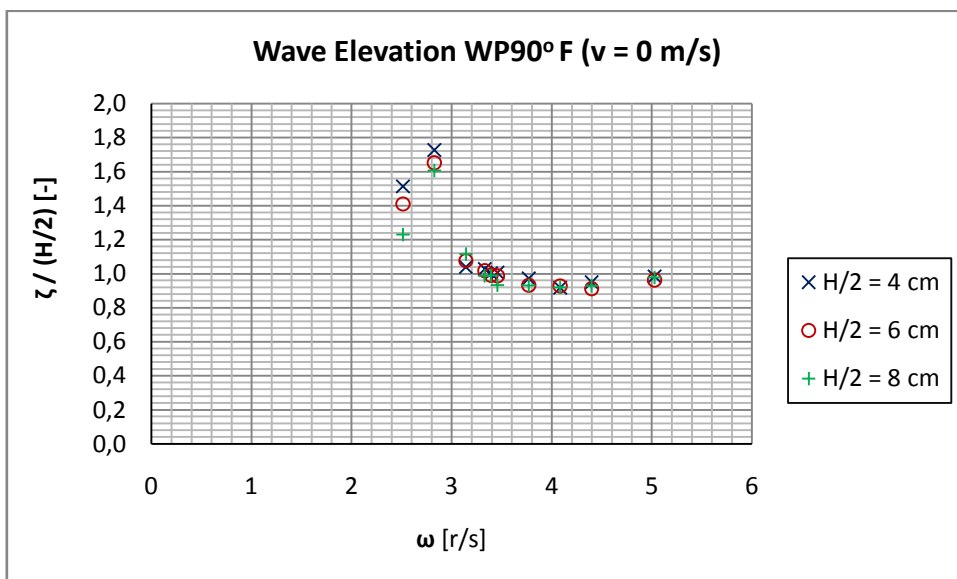
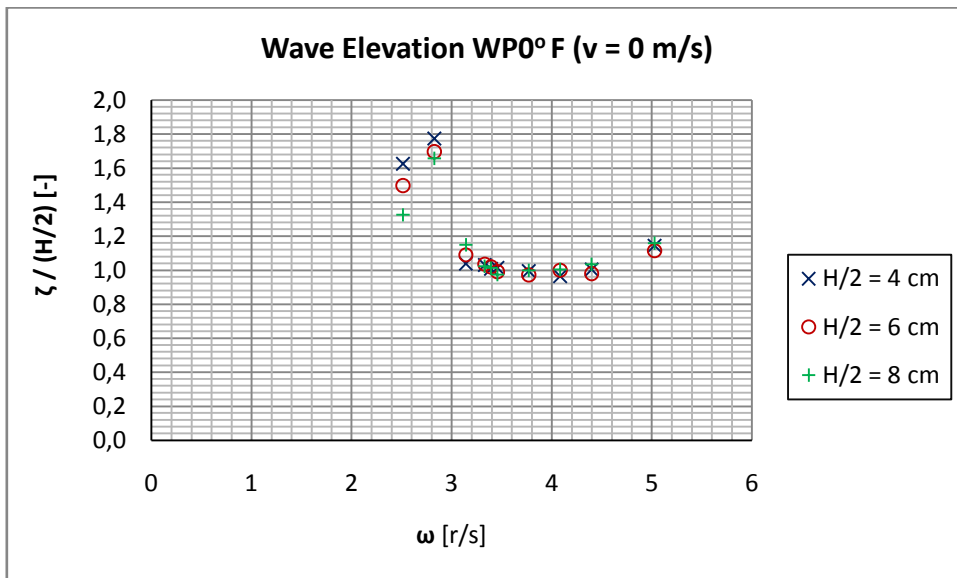
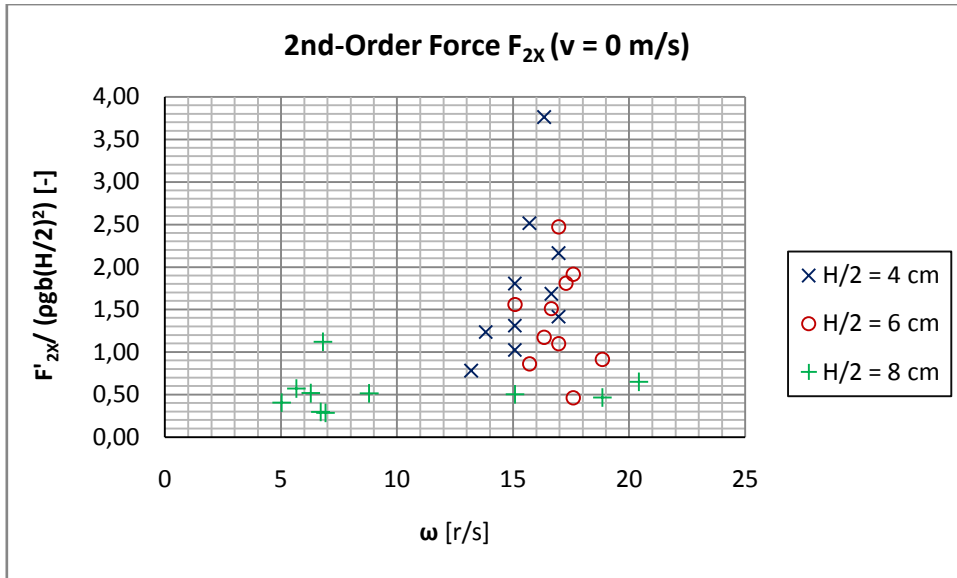


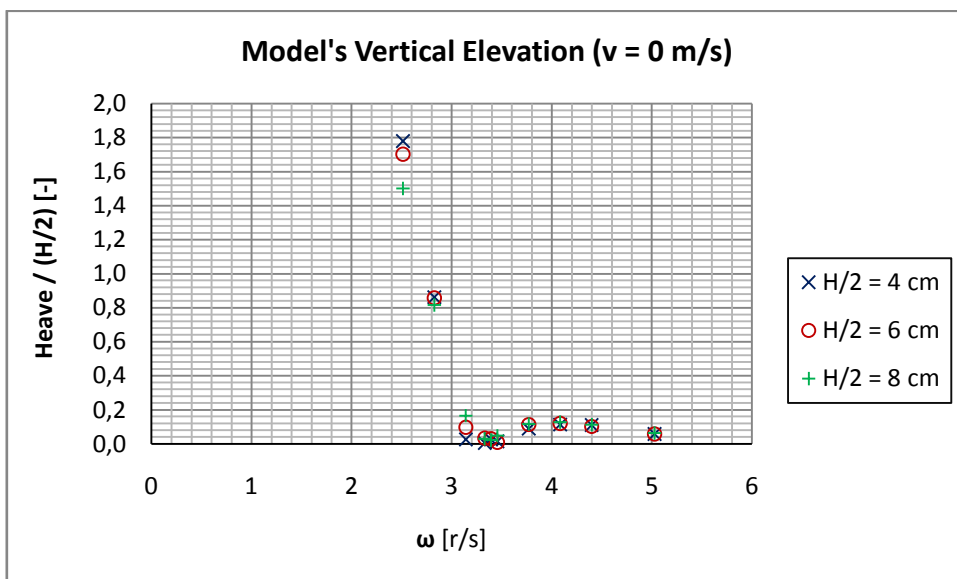
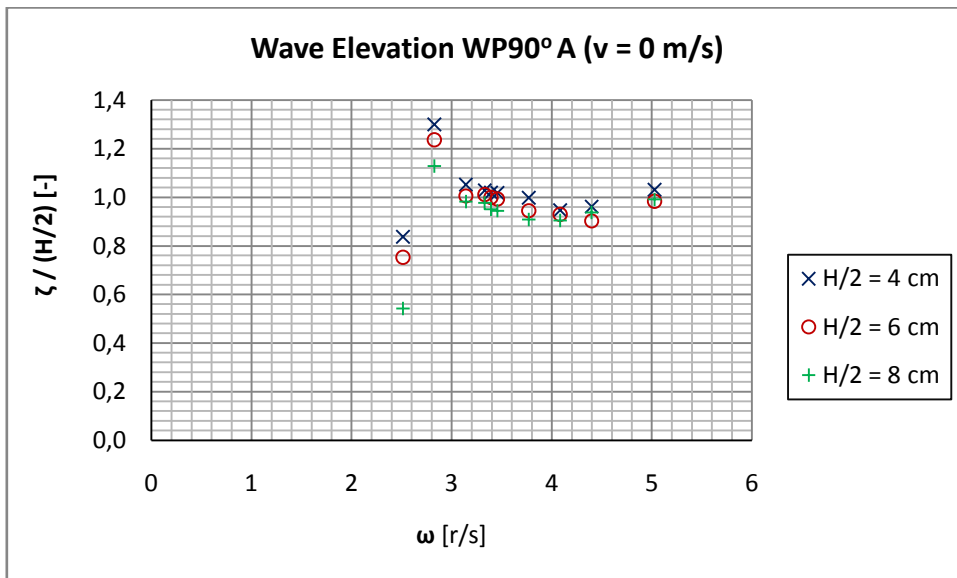
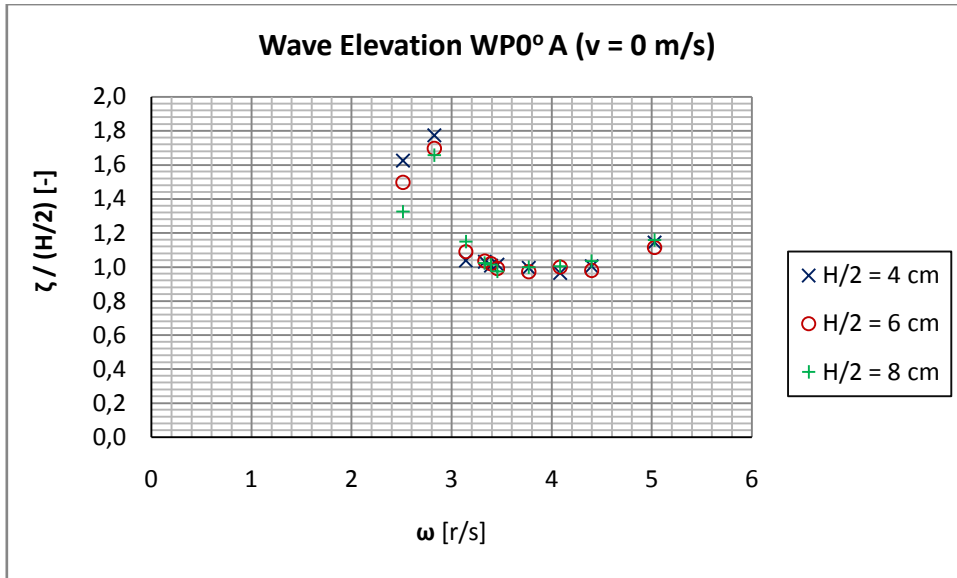


ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΙΝΗΣΗ (R47) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm

Ακίνητη κατασκευή [πειράματα 124-165]









## 4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εκτός των πειραματικών μετρήσεων με τη χρήση μοντέλων, έχουν αναπτυχθεί και διάφορα υπολογιστικά προγράμματα προσομοίωσης για την πρόβλεψη των φορτίων και δυνάμεων που ασκούνται σε πλωτές κατασκευές υπό την επίδραση κυματισμών. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το **HAMVAB (Hydrodynamic Analysis of Multiple Vertical Axisymmetric Bodies)**, που έχει αναπτυχθεί από τον Σ. Α. Μαυράκο, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. στον Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών.<sup>[69]</sup>

Το πρόγραμμα αυτό παρέχει τις πρώτης τάξης δυνάμεις διέγερσης λόγω κυματισμών καθώς 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 υπολογίζονται στη συνολική διάταξη που αποτελείται από πολλαπλά σώματα αλλά και σε κάθε σώμα ξεχωριστά, κάνοντας χρήση απειροστών όγκων ελέγχου γύρω από κάθε μέρος της διάταξης. Τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων υπολογίζονται συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά κάθε σώματος ξεχωριστά μέσω 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 συνέχειας 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.

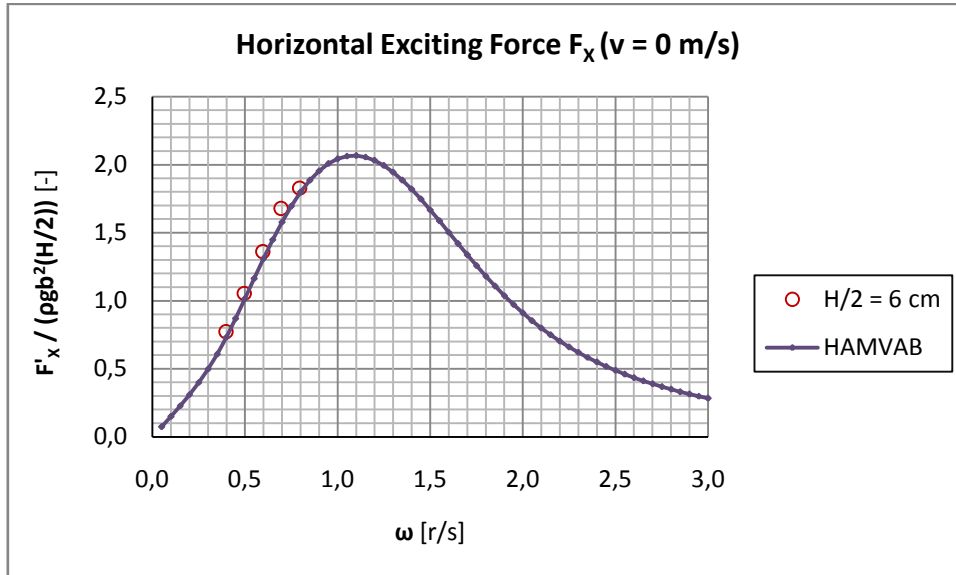
Εισάγοντας τα χαρακτηριστικά του πρότυπου μοντέλου στο πρόγραμμα, προέκυψαν τα θεωρητικά αποτελέσματα για την οριζόντια δύναμη διέγερσης και τη δύναμη έκπτωσης, καθώς και για την ανύψωση περί την κατακόρυφη διεύθυνση (heave) της κατασκευής. Τα αποτελέσματα εισήχθησαν σε διαγράμματα συναρτήσεως της συχνότητας κυματισμών  $\omega$  [1/s] σε φυσική κλίμακα, ώστε να συγκριθούν με τα

αντίστοιχα που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

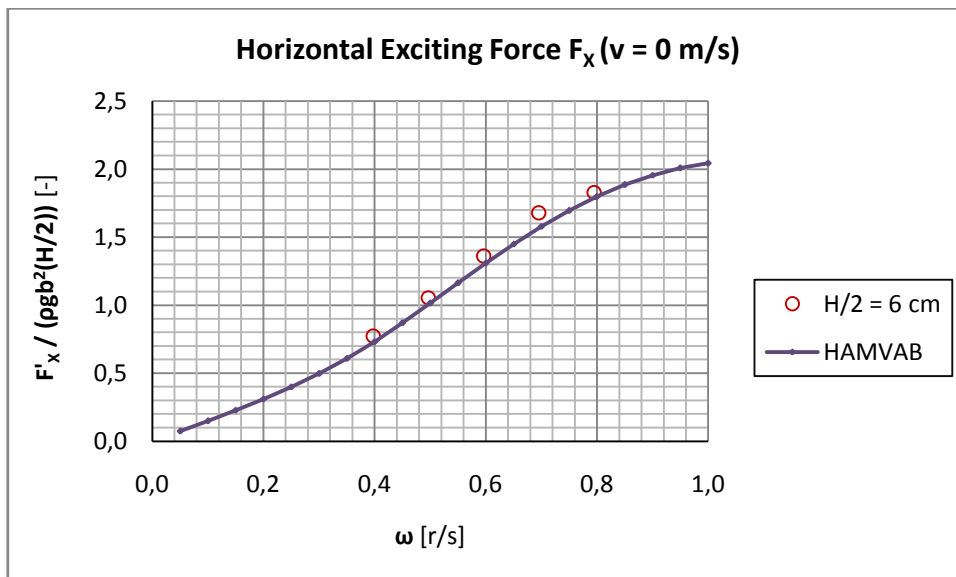
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το σύνολο των συγκριτικών διαγραμμάτων.

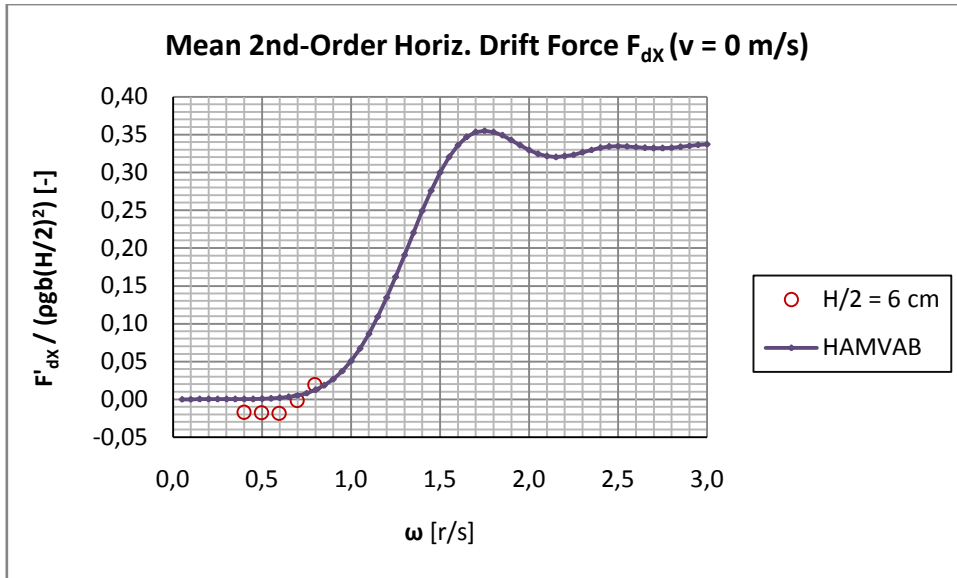
ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 45cm

Πειράματα 1-5

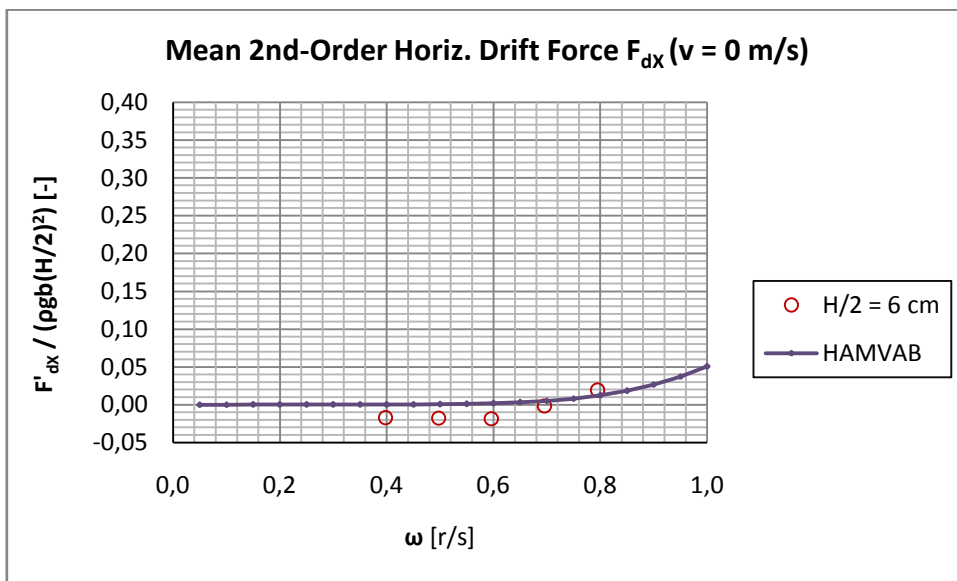


Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος



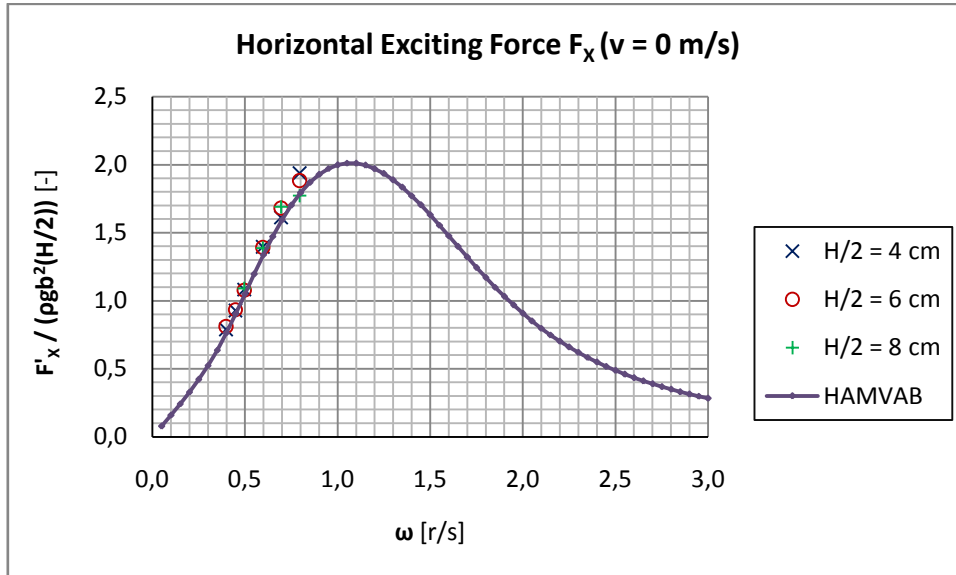


*Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος*

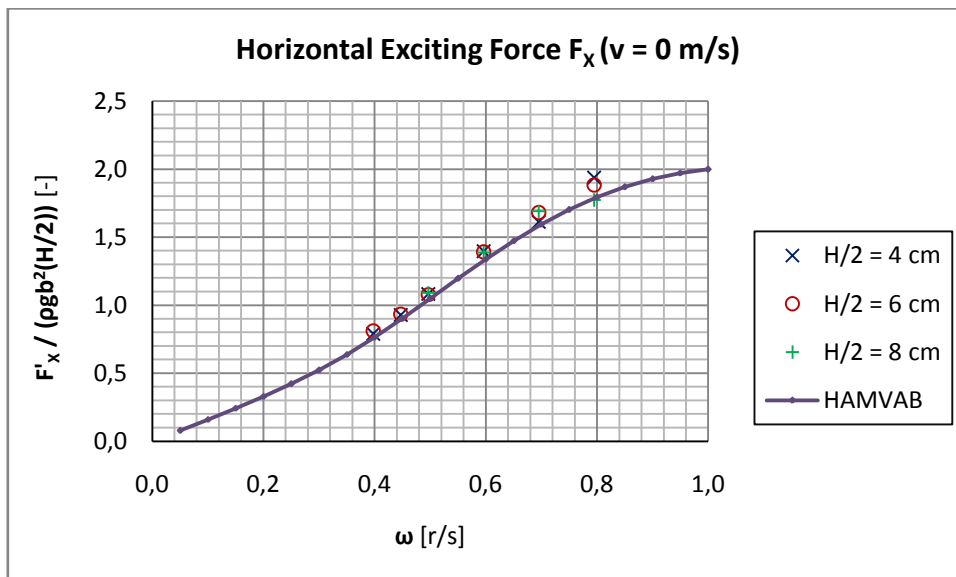


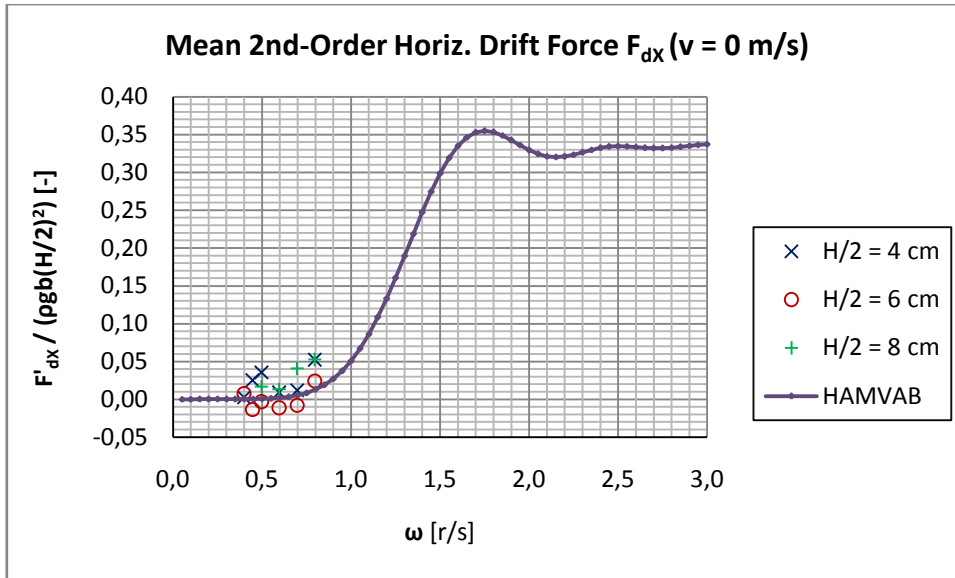
**ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ – ΠΑΚΤΩΜΕΝΟΣ (R35) –  
ΒΥΘΙΣΜΑ 50cm**

Πειράματα 16-31

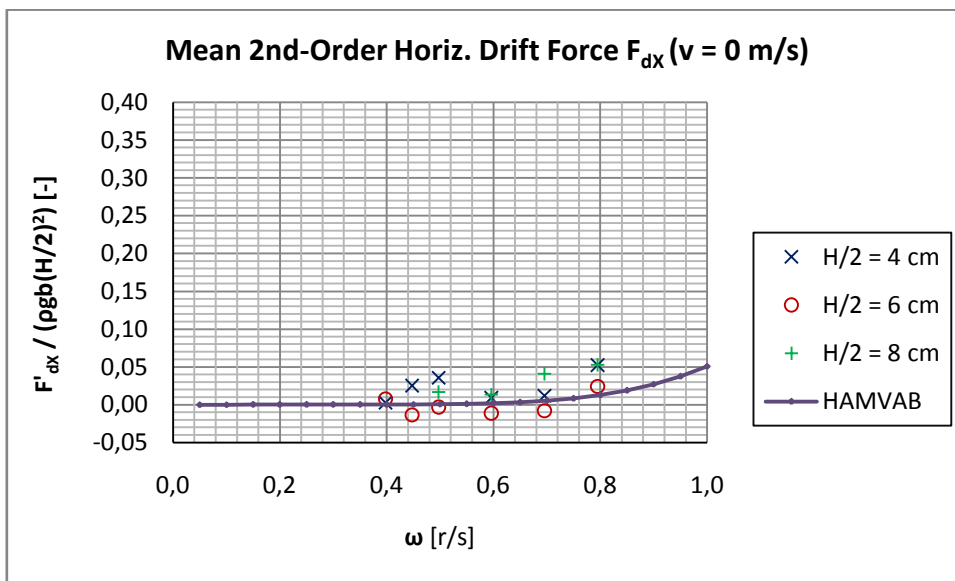


Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος



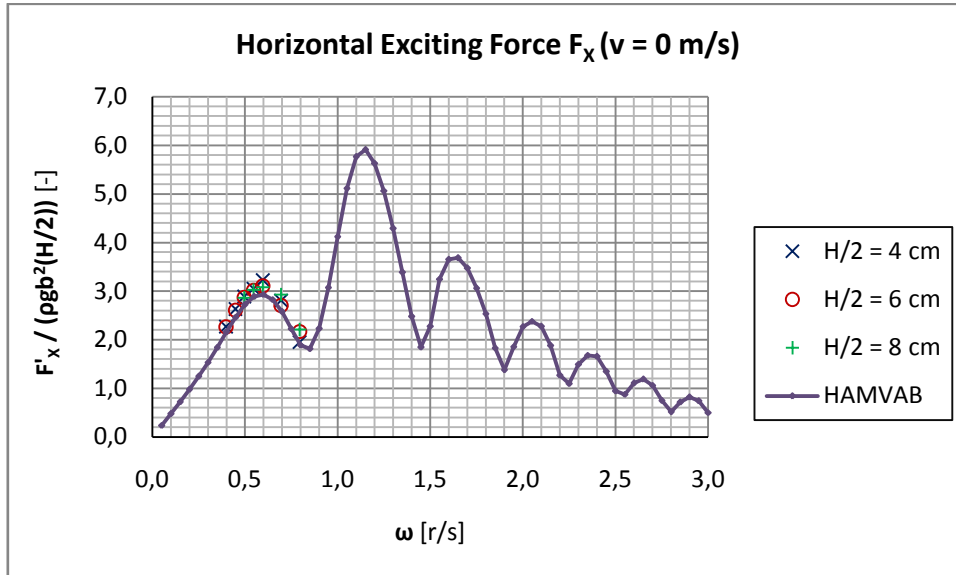


*Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος*

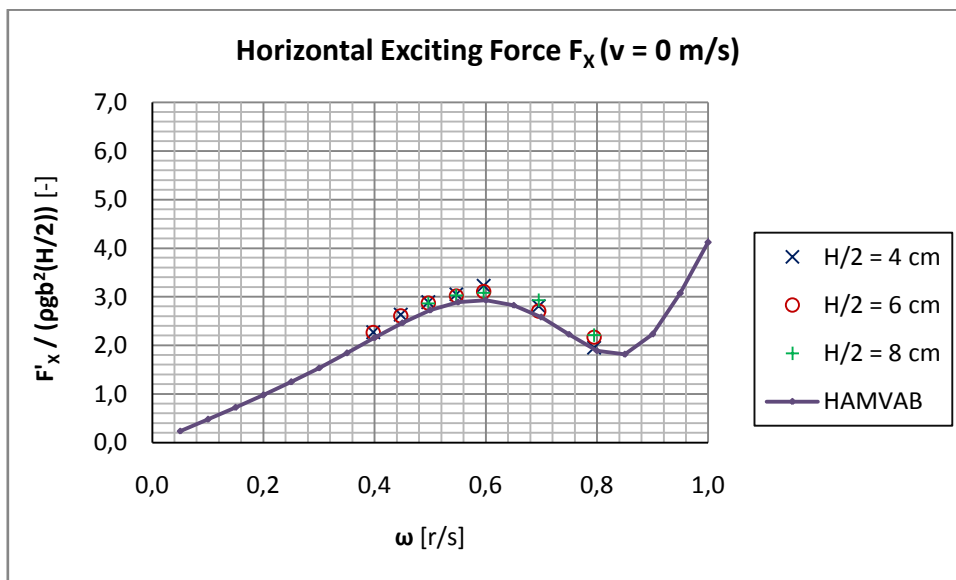


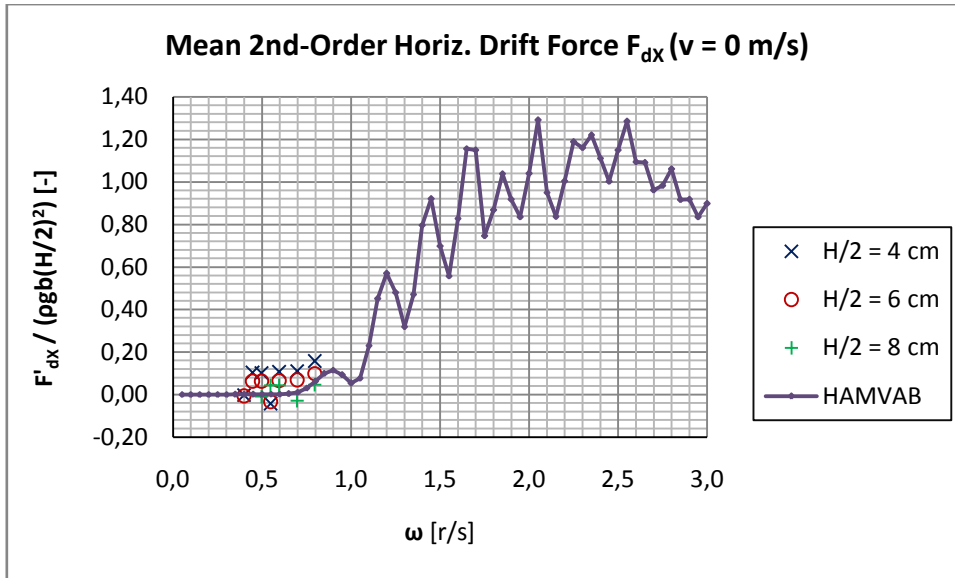
**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΠΑΚΤΩΜΕΝΗ (R35) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Πειράματα 68-87

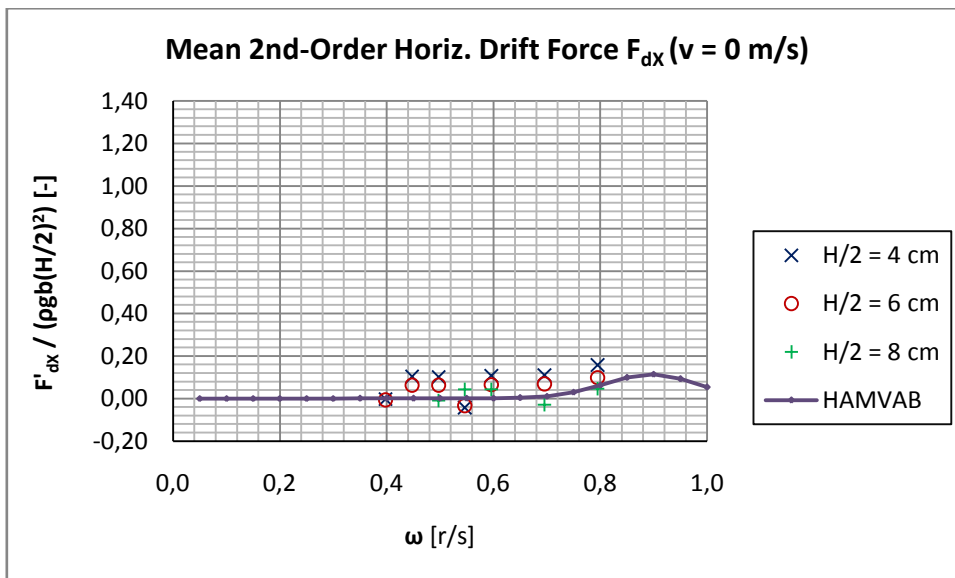


Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος





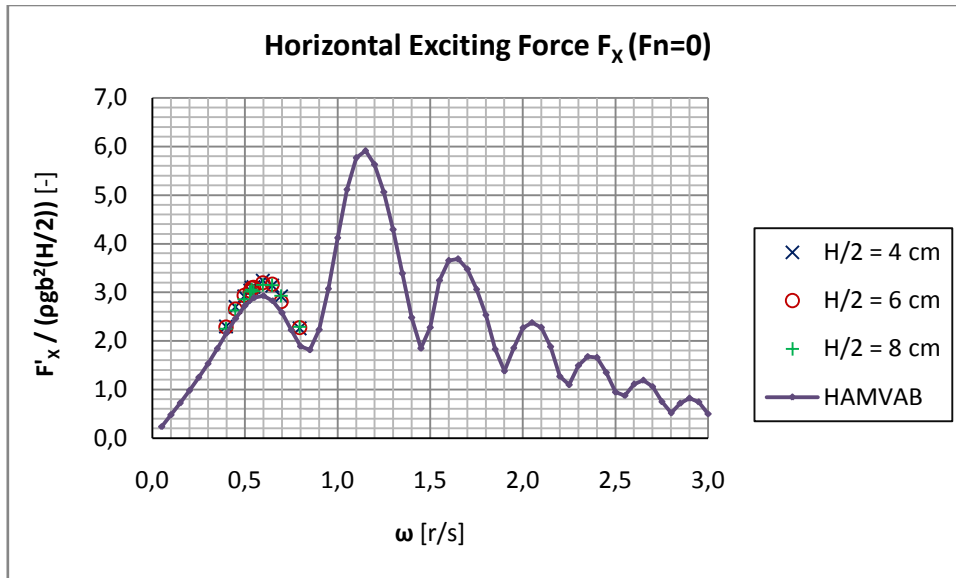
*Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος*



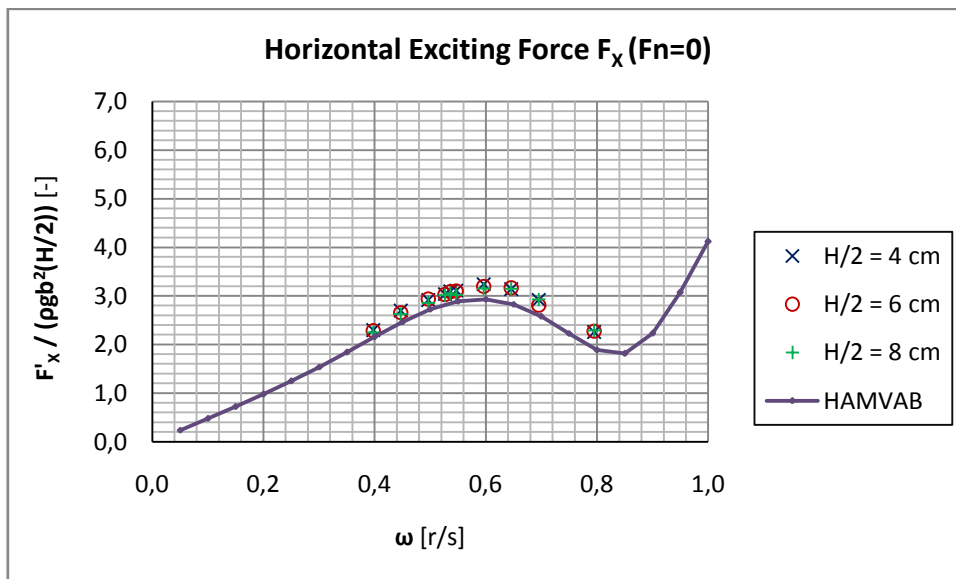


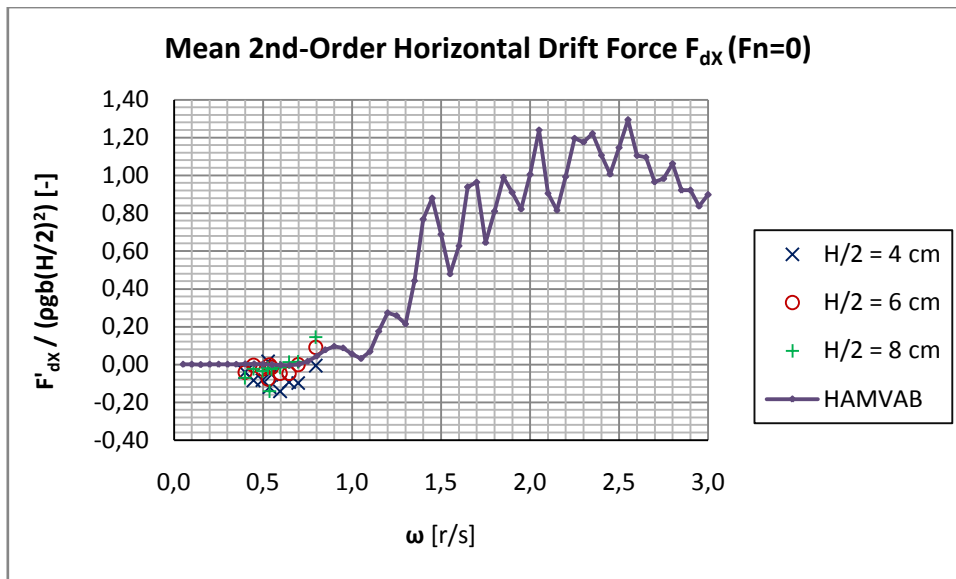
**ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ –  
ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΙΝΗΣΗ (R47) – ΒΥΘΙΣΜΑ 50 cm**

Πειράματα 124-165

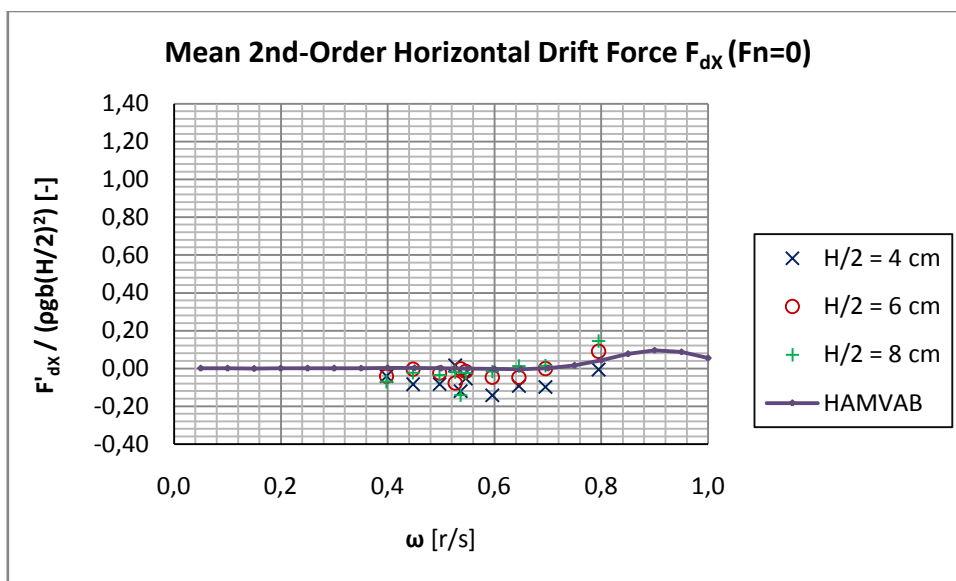


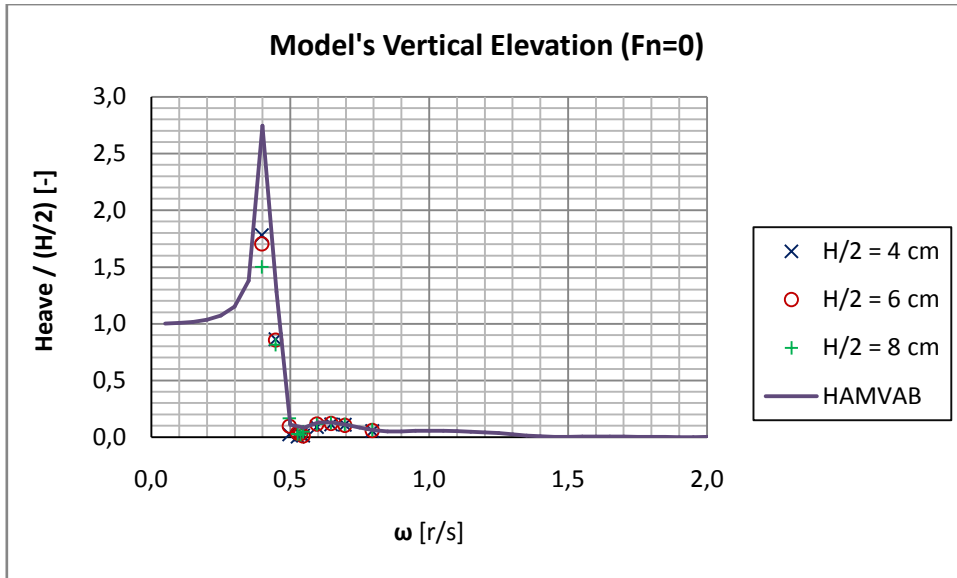
Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος



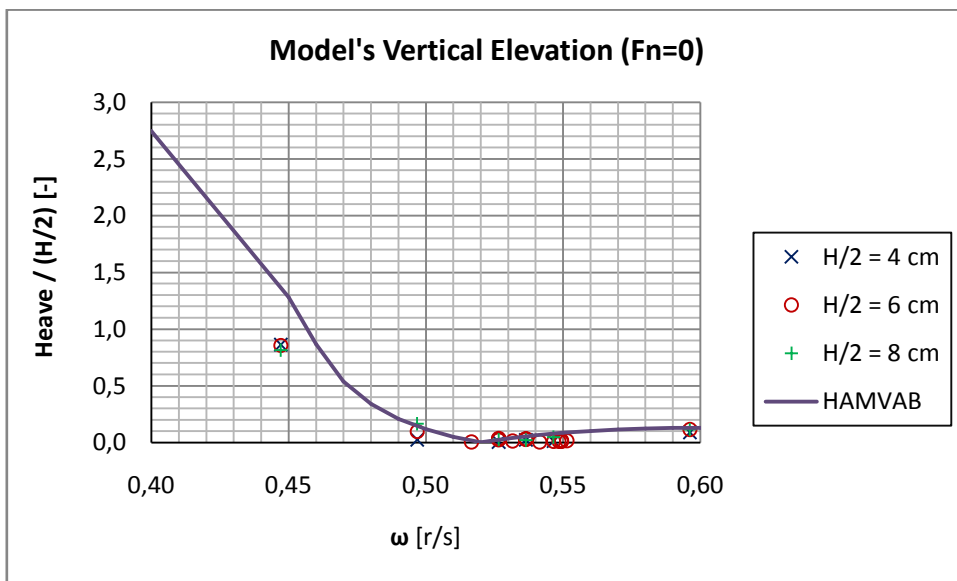


Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος





*Μεγέθυνση στην περιοχή ενδιαφέροντος*



## 4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα σε όλα τα στάδια επεξεργασίας όπως και τη σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων, μπορούν να γίνουν τα παρακάτω σχόλια.

### Γενικά σχόλια

Σε γενικές γραμμές, τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα και συμφωνούν με τα θεωρητικά δεδομένα.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάστηκε ένα βασικό πρόβλημα το οποίο αλλοίωσε κάποια αποτελέσματα και είχε να κάνει με τα μετρητικά της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (wave probes). Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε πρόβλημα στις μετρήσεις των μετρητικών κατά τη διάρκεια της 6<sup>ης</sup> μέρας των πειραμάτων, το οποίο επηρέασε τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα διαγράμματα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού όπως και αυτά της αντίστασης δεν είναι τέλειαις ημιτονικής μορφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή κυματισμών από τον κυματιστήρα δεν είναι επίσης τέλεια και η αβεβαιότητα των παραγόμενων κυματισμών αυξάνει όταν πλησιάζουμε τα όρια λειτουργίας του ( $f = 0.3-1.2$  Hz). Τα όρια λειτουργίας του κυματιστήρα εξαρτώνται και περιορίζονται και από τα επιλεγόμενα ύψη κύματος.

Έγινε έλεγχος του αριθμού Brard (αποτελεί αδιάστατη παράμετρο ταχύτητας ρεύματος) ο οποίος ισούται με  $\tau = \frac{\omega * u}{g}$ . Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, οι τιμές του αριθμού Brard κυμαίνονται από 0.015 (για τον συνδυασμό της μικρότερης  $\omega$  και της μικρότερης  $u$ ) έως 0.061 (για το μεγαλύτερο γινόμενο  $\omega * u$ ). Παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις ο αριθμός Brard είναι μικρότερος του 0.25, που είναι και ο περιορισμός ώστε να ισχύει η θεωρία αλληλεπίδρασης κύματος-ρεύματος, ή, ισοδύναμα, αλληλεπίδρασης κύματος-μικρής πρόσω ταχύτητας. <sup>[67][68]</sup>

Έγινε επίσης έλεγχος της περιοχής ισχύος της Θεωρίας Airy με βάση το σχ. 3.10 του βιβλίου Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών (Μαυράκος Σ., 1999). Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ο λόγος  $H/\lambda$  για ενδεικτικά ζεύγη πειραματικών τιμών που καλύπτουν όλο το εύρος των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Για να ισχύει η Θεωρία Airy πρέπει  $H/\lambda \leq 10^{-2}$ . Από τους υπολογισμούς προέκυψε πως βρισκόμαστε στην περιοχή ισχύος της Θεωρίας Airy για συχνότητες κυματισμού μικρότερες της  $f = 0.6$  Hz όταν το πλάτος κυματισμού είναι  $H/2 = 4$  cm, για συχνότητες μικρότερες της  $f = 0.5$  Hz όταν το πλάτος είναι  $H/2 = 6$  cm και για συχνότητες μέχρι  $f = 0.4$  Hz όταν το πλάτος είναι  $H/2 = 8$  cm. <sup>[59]</sup>

### Οριζόντια δύναμη διέγερσης $F_x$

Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών δεδομένων είναι πολύ καλή. Επιπλέον, η συμπεριφορά της κατασκευής όσον αφορά στην αντίστασή της στους κυματισμούς δεν επηρεάζεται από το ύψος των κυματισμών, όπως είναι φανερό από τα διαγράμματα των αδιαστατοποιημένων αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης, όπου και συμπίπτουν οι τιμές της αντίστασης για τα διαφορετικά ύψη κυματισμών.

Στην περίπτωση του πακτωμένου σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου με βύθισμα 45 cm, το πλάτος κυματισμού των 6 cm βρίσκεται πράγματι στην γραμμική περιοχή.

Στην περίπτωση του πακτωμένου σύνθετου κατακόρυφου κυλίνδρου με βύθισμα 50 cm, παρουσιάζεται μικρή απόκλιση για συχνότητα  $\omega = 0.795$  r/s (κλίμακα 1:1), που αντιστοιχεί σε κυματισμούς στη δεξαμενή συχνότητας  $f = 0.80$  Hz, μεταξύ των πλατών κυματισμού 4, 6 και 8 cm. (πειράματα 21, 27, 31). Η συχνότητα  $f = 0.80$  Hz αποτελεί την μεγαλύτερη στην οποία άρθησαν πειραματικές μετρήσεις.

Στην περίπτωση της πακτωμένης τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων με βύθισμα 50 cm, τα πλάτη κυματισμών που μελετήθηκαν επιλέχθηκαν ώστε να βρίσκονται στην γραμμική περιοχή.

Στην περίπτωση της ελεύθερης στην κατακόρυφη κίνηση τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων με βύθισμα 50 cm, παρατηρείται μικρή απόκλιση στη συχνότητα  $\omega = 0.695$  r/s (κλίμακα 1:1) για πλάτος κυματισμού 6 cm σε σχέση με τα πλάτη 4 και 8 cm, της τάξης του 5%. Η απόκλιση αυτή είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.

### Μέση δευτεροτάξια δύναμη έκπτωσης $F_{dx}$

Παρατηρείται ότι στις περιοχές συχνοτήτων που μελετήθηκαν ( $f = 0.40$ - $0.80$  πειράματος), οι δυνάμεις έκπτωσης τείνουν στο μηδέν. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από τις θεωρητικές καμπύλες.

## Κατακόρυφη κίνηση heave

Η συμπεριφορά της κατασκευής όσον αφορά στην κατακόρυφη ανύψωσή της στους κυματισμούς δεν επηρεάζεται από το ύψος των κυματισμών, όπως είναι φανερό από τα διαγράμματα των αδιαστατοποιημένων αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης, όπου και συμπίπτουν οι τιμές τις κατακόρυφης ανύψωσης για τα διαφορετικά ύψη κυματισμών.

Στην περίπτωση της ελεύθερης στην κατακόρυφη κίνηση τριγωνικής συστοιχίας σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων, βρέθηκαν τόσο η συχνότητα συντονισμού της κατασκευής όσο και η συχνότητα μηδενισμού. Η συχνότητα συντονισμού βρέθηκε πειραματικά περί το  $\omega = 0.397$  r/s (κλίμακα 1:1) και συμφωνεί με την θεωρητική τιμή που προέκυψε ίση με  $\omega = 0.400$  r/s. Η συχνότητα μηδενισμού βρέθηκε πειραματικά περί το  $\omega = 0.517$  r/s (κλίμακα 1:1) και συμφωνεί με την θεωρητική τιμή που προέκυψε ίση με  $\omega = 0.520$  r/s.

## Προτάσεις

Για να αναπτυχθεί ο τομέας εκμετάλλευσης της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε μεγάλα βάθη, απαιτείται περαιτέρω μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς διαφόρων πλωτών κατασκευών στήριξης στις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες προορίζονται, ώστε να επιλεγθούν οι καταλληλότερες σχεδιάσεις αυτών. Βασικό βήμα της μελέτης είναι η εκτέλεση πειραματικών μετρήσεων σε κάποια πειραματική δεξαμενή. Θα ήταν χρήσιμη, λοιπόν, η πειραματική διερεύνηση και άλλων σχεδιάσεων εκτός αυτών που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά τις σχεδιάσεις οι οποίες μελετήθηκαν (σύνθετος κατακόρυφος κύλινδρος και τριγωνική συστοιχία σύνθετων κατακόρυφων κυλίνδρων), θα μπορούσαν να γίνουν τα παρακάτω στο μέλλον:

- Αναλυτικότερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και συγκεκριμένα αναλυτικότερη μελέτη του δευτεροτάξιου προβλήματος.
- Διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων:
  - με τους ίδιους ημιβυθισμένους κυλίνδρους αλλά διαφορετικούς (διάμετρο, ύψος) βυθισμένους κυλίνδρους (‘σκαλοπάτια’)
  - σε διαφορετικά βυθίσματα
  - με τροποποιήσεις τέτοιες που να αλλάζουν το κέντρο βάρους των μοντέλων
  - με τοποθέτηση αγκυρώσεων (συμβατικούς ή προτεταμένους κλάδους)
  - με προσάρτηση μοντέλου ανεμογεννήτριας στις πλωτές κατασκευές
  - σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων κυματισμών
  - υπό την επίδραση τυχαίων κυματισμών και διερεύνηση των φασμάτων τους

## **Βιβλιογραφία**

1. Ανδρίτσος, Ν., Ενέργεια και Περιβάλλον, 2008
2. <http://commons.wikimedia.org/>
3. Chronopoulou, S., Nastos, P. T., Kampanis, N. A., Estimation of the wind potential in Greece, September 2010
4. Kaldellis, J. K., Zafirakis D., The wind energy (r)evolution: A short review of a long history, February 2011
5. <http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>
6. GWEC, Global Wind Statistics 2013, February 2014
7. EWEA, Wind in power, 2013 European statistics, February 2014
8. EWEA, Oceans of Opportunity, 2009
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:DanishWindTurbines.jpg>
10. NREL, Musial,W., Butterfield,S., Boone,A., Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines, January 2004
11. Sclavounos, P., Floating offshore wind turbines, Marine Technology Society Journal, vol.42, May 2008
12. GWEC, Global Offshore, 2012
13. EWEA, The European offshore wind industry – key trends and statistics 2013, January 2014
14. EWEA, Offshore Electricity Infrastructure in Europe, October 2011
15. Statoil, Hywind – Experience and way forward with Hywind, November 2012
16. [http://en.wikipedia.org/wiki/Environmental\\_impact\\_of\\_wind\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_wind_power)
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power)
18. EWEA, The European Wind Initiative – Wind Power Research and Development to 2020, January 2013
19. [http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind\\_how.html](http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_how.html)
20. HazimNamik, Individual Blade Pitch and Disturbance Accommodating Control of Floating Offshore Wind Turbines, February 2012
21. Κανελλόπουλος, Δ. Β., Αιολική Ενέργεια – Σχεδιάζοντας στις Αυλές των ανέμων, 2008



22. UpWind, Design limits and solutions for very large wind turbines, March 2011
23. IPCC, Special Report on Renewable Energy, 2011
24. <http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>
25. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2014/02/meet-the-new-worlds-biggest-wind-turbine>
26. NREL, Musial W., Butterfield S., Energetics Inc., Ram B., Energy from Offshore Wind, May 2006
27. Kelly, R. B., Houlsby, G. T., Byrne, B. W., Transient vertical loading of model suction caissons in a pressure chamber, *Geotechnique*, 56 (10), 665-675, 2006
28. GE Wind Energy, Mohamed A., Presentation at Wind Energy Workshop, October 2004
29. VØlund, P., Concrete is the Future for Offshore Foundations, *Proceedings Copenhagen Offshore Wind*, October 2005
30. <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>
31. ArchirodonNV, Χατζηγιαννέλης, Ι., Λουκάκης, Κ., Θεμελίωση επί Πασσάλων Θαλάσσιων «Μεταλλικών Πύργων»
32. <http://www.offshore-windenergie.net/en/technology/fundaments>
33. <http://www.4coffshore.com/windfarms/Foundations.aspx>
34. NREL, Butterfield S., Musial W., Jonkman J., MIT, Sclavounos P., Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines, October 2005
35. Hasan Bagbanci, Dynamic Analysis of Offshore Floating Wind Turbines, Dissertation for Master's degree, December 2011
36. <http://en.wikipedia.org/wiki/Semi-submersible>
37. EWEA, Deep Water - The next step for offshore wind energy, July 2013
38. NREL, Dykes K., Meadows R., Applications of Systems Engineering to the Research, Design, and Development of Wind Energy Systems, December 2011
39. Statoil, Hywind – The Floating wind turbine, November 2012
40. <http://www.statoil.com/>
41. REMenergy, Hywind – a proven floating offshore wind technology, February 2012

42. <http://www.parka.no/Client.aspx>
43. Statoil, Hywind – experience from offshore operation, October 2012
44. <http://www.principlepowerinc.com>
45. [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Agucadoura\\_WindFloat\\_Prototype.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Agucadoura_WindFloat_Prototype.jpg)
46. <http://www.hempel.com>
47. <http://windfloatpacific.com>
48. [http://www.glosten.com/pdfs/PelaStar\\_Handout.pdf](http://www.glosten.com/pdfs/PelaStar_Handout.pdf)
49. [http://www.pelastarwind.com/PelaStar\\_Anchors\\_v01p.pdf](http://www.pelastarwind.com/PelaStar_Anchors_v01p.pdf)
50. <http://www.pelastarwind.com/Tech%20Summary.pdf>
51. <http://www.offshorewind.biz/2013/07/16/usa-glosten-announces-completion-of-pelastar-model-testing-program/>
52. Main(e) International Consulting LLC, Floating Offshore Wind Foundations: Industry Consortia and Projects in the United States, Europe and Japan – An Overview, May 2013 Update
53. <http://www.windpowerengineering.com/design/downwind-a-floating-windpower-farm-with-lodging/>
54. <http://www.hexicon.eu/>
55. [http://wavec.org/client/files/The\\_Hexicon\\_Solution.pdf](http://wavec.org/client/files/The_Hexicon_Solution.pdf)
56. GustoMSC, Tri-Floater Floating Wind Turbine Foundation, brochure
57. NENUPHAR, Vertiwind: making floating wind turbine technology competitive for offshore, October 2012
58. <http://www.windsea.com/the-concept/>
59. Μαυράκος, Σ. Α., Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, 1999
60. Μαυράκος, Σ. Α., Συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών, 2012
61. [http://en.wikipedia.org/wiki/Morison\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Morison_equation)
62. Kokkinowrachos, K., Mavrakos, S., Asorakos, S., Behaviour of vertical bodies of revolution in waves, Ocean Engng, vol.13, no. 6, pages 505-538, 1986
63. Mavrakos, S. A., Koumoutsakos, P., Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves, 1987

- 64.** NREL, Robertson, A. N., Jonkman, J. M., Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts, June 2011
- 65.** NREL, Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, February 2009
- 66.** Mazarakos, K. P., Analysis of loads and motions on a TLP on the time domain and comparisons with experiments, Master Thesis, NTUA, 2008
- 67.** Mazarakos, T. P., Second-Order Wave Loading and Wave Drift Damping on Floating Marine Structures, Ph.D. Thesis, NTUA, pages 1-272, 2010
- 68.** Mazarakos, T. P., Mavrakos, S. A., Wave current interaction on a vertical truncated cylinder floating in finite depth waters, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 227(3), pages 243-255, 2013
- 69.** Mavrakos, S. A., User's Manual for the software HAMVAB, 1996