



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Διπλωματική εργασία

Υδροδυναμική Ανάλυση Πλωτής Α/Γ αγκυρωμένης με
συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης

(Spar-buoy)

Επιβλέπων: Σ.Α. Μαυράκος

Άγγελος Σ. Κτωρής

Αθήνα 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την υδροδυναμική ανάλυση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, εδρασμένης σε Spar κατασκευή με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης. Το πειραματικό μέρος έλαβε χώρα στο Danish Hydraulic Institute (DHI) με μοντέλο κλίμακας 1:40. Περιοδικά κύματα γνωστού ύψους και συχνότητας, επιβλήθηκαν στο μοντέλο για τη μελέτη δυνάμεων και ροπών στον πύργο και στον πλωτήρα, κινήσεων surge, sway, heave και περιστροφών roll, pitch, yaw. Συλλέχθηκαν επίσης τα δεδομένα των ανυψώσεων των κυμάτων.

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια σταδιακή εισαγωγή στην αιολική ενέργεια καθώς και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις της θεωρητικής προσέγγισης του προβλήματος, καθώς και η ανάλυση του συστήματος αγκύρωσης της πλωτής κατασκευής. Το τρίτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει κάποιες καίριες έρευνες που έγιναν τα τελευταία χρόνια και αφορούν το συγκεκριμένο είδος πλωτής κατασκευής. Στο Κεφάλαιο 4 περιέχεται η περιγραφή της διάταξης και των συνθηκών του πειράματος, καθώς και η μεθοδολογία επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάποιων ενδεικτικών πειραμάτων καθώς και η στατιστική ανάλυσή τους. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του συνόλου των πειραμάτων με τα θεωρητικά αποτελέσματα, μέσω του προγράμματος SemiSub. Τέλος παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για μελλοντικές έρευνες. Η παρούσα διπλωματική εργασία συμπληρώνεται με πέντε παραρτήματα που περιλαμβάνουν την ανάλυση του συνόλου των πειραμάτων καθώς και τα δεδομένα εξόδου των προγραμμάτων STATMOOR και DYNAMOOR για την ανάλυση του κλάδου αγκύρωσης.

Abstract

This thesis deals with the hydrodynamic analysis of a floating wind turbine, founded on a Spar floating structure with conventional mooring lines. The experimental part was held at the Danish Hydraulic Institute (DHI) (with a 1:40 scaled model). Periodic wave motions of known amplitude and frequency were imposed on the model placed in the water tank to study shear forces and moments on both tower's bottom and nacelle, surge, sway, heave motions and roll, pitch, yaw rotations. Wave elevation data were also collected.

The first Chapter includes a gradual introduction in wind energy and offshore wind farms. The second Chapter presents the mathematical relations of the theoretical approach of the problem, and the analysis of the mooring system of the floating structure. The third Chapter includes some key studies conducted in recent years concerning the same type of floating structure. Chapter 4 contains the set up and the conditions of the experiment, and the methodology for processing the experimental data. Chapter 5 includes some indicative experiments and their statistical analysis. Then the experimental results are being compared with the theoretical results, which were exported from the program SemiSub. Finally conclusions and some recommendations for future research are being listed. This thesis is supplemented by five appendices, which include the analysis of all the experiments and the output data of programs STATMOOR and DYNAMOOR for the moorings' analysis.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπυρίδωνα Α. Μαυράκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η παρακολούθηση του μαθήματος Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών, αποτέλεσε την αφορμή να επιλέξω το παρών θέμα.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήταν σχεδόν αδύνατη αν δεν υπήρχε η καθοδήγηση του κ. Θωμά Μαζαράκου, μεταδιδακτορικού ερευνητή μηχανικού του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης. Τον ευχαριστώ για το χρόνο που μου αφιέρωσε, καθώς και για τη διάθεση που επεδείκνυε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Από τις συζητήσεις απέκτησα γνώση για το συγκεκριμένο αντικείμενο, αλλά και γνώσεις ζωής.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Σταύρο και Μαρία και τα αδέρφια μου Ηλιάνα και Γιώργο για τη ηθική στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην Ομόνοια και στους απανταχού ροφούς.

Περιεχόμενα

1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.1 Ο άνεμος.....	1
1.1.2 Αιολική ενέργεια	2
1.1.3 Γνωριμία με τις ανεμογεννήτριες.....	3
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	5
1.2.1 Χερσαία ή υπεράκτια αιολικά πάρκα.....	10
1.3 ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	12
1.3.1 Ευρωπαϊκή αγορά.....	12
1.3.2 Παγκόσμια αγορά.....	15
1.3.3 Ελληνική αγορά.....	16
1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	18
1.4.1 Πλατφόρμες σταθερής έδρασης.....	21
1.4.2 Πλωτές πλατφόρμες	27
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	31
2.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	31
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	32
2.2.1 Πεδίο ανέμου.....	33
2.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	44
2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ ...	52
2.5 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ	63
2.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	67
2.6.1 Υπόβαθρο	67
2.6.2 Παράθεση αποτελεσμάτων.....	69
2.6.3 Ανάλυση πολλαπλών κλάδων αγκύρωσης.....	73
2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ...	77
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΩΤΗΣ Α/Γ ΕΔΡΑΣΜΕΝΗΣ ΣΕ SPAR ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	83
3.1 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΠΛΩΤΗ Α/Γ ΤΥΠΟΥ SPAR	85
3.2 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ NREL-5MW	94

4.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	96
4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	96
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	97
4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	100
4.4 ΘΕΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	101
4.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	104
4.6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	109
4.6.1 Αισθητήρες ανύψωσης κύματος (Wave Gauge)	109
4.6.2 Μετρητής δύναμης τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας.....	111
4.6.3 Μετρητές δυνάμεων αγκύρωσης (mooring).....	112
5.ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ..	113
5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	115
5.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	130
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	137
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	150
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	153
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	159
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	162

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1.1: Εξέλιξη ανεμογεννητριών</i>	(Σελ.5)
<i>Εικόνα 1.4.1: Δομή πλατφόρμων σταθερής έδρασης</i>	(Σελ.18)
<i>Εικόνα 1.4.2: Δομή πλωτών πλατφόρμων</i>	(Σελ.19)
<i>Εικόνα 1.4.3: Gravity-based Structure (GBS)</i>	(Σελ.21)
<i>Εικόνα 1.4.4: Monopile</i>	(Σελ.23)
<i>Εικόνα 1.4.5: Tripile</i>	(Σελ.24)
<i>Εικόνα 1.4.6: Tripod</i>	(Σελ.25)
<i>Εικόνα 1.4.7: Jacket</i>	(Σελ.26)
<i>Εικόνα 1.4.8: Spar</i>	(Σελ.28)
<i>Εικόνα 1.4.9: TLP</i>	(Σελ.29)
<i>Εικόνα 1.4.10: Semi-submersible</i>	(Σελ.30)
<i>Εικόνα 2.3.1: Η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων σε διάφορες περιοχές</i>	(Σελ.51)
<i>Εικόνα 2.4.1: Διακριτοποίηση του πεδίου ροής γύρω από αξονοσυμμετρικό σώμα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας</i>	(Σελ.52)
<i>Εικόνα 2.5.1: Γραμμή αγκύρωσης με μηδενική γωνία στον πυθμένα</i>	(Σελ.63)
<i>Εικόνα 2.6.1: Κάτοψη του συστήματος αγκύρωσης</i>	(Σελ.73)
<i>Εικόνα 2.7.1: Σταθερές ελατηρίων πειράματος</i>	(Σελ.77)
<i>Εικόνα 2.7.2: Σύστημα συντεταγμένων ανάλυσης σταθεράς ελατηρίου</i>	(Σελ.78)
<i>Εικόνα 2.7.3: Σύστημα συντεταγμένων προέντασης</i>	(Σελ.81)
<i>Εικόνα 2.7.4: Ανάλυση τάσης στον κλάδο αγκύρωσης</i>	(Σελ.81)
<i>Εικόνα 3.1.1: Υβριδικό μοντέλο κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και μέταλλο</i>	(Σελ.87)
<i>Εικόνα 3.1.2: Ιδιότητες μοντέλου A.Sultania και L.Manuel</i>	(Σελ.88)
<i>Εικόνα 3.1.3: Παραμετροποιημένα κυλινδρικά τμήματα κατά Ivar F. και Petter Andreas B.</i>	(Σελ.90)
<i>Εικόνα 3.1.4: Σκαρίφημα μοντέλων κατά Karimirad M. και Moan T.</i>	(Σελ.91)
<i>Εικόνα 3.1.5: Σκαρίφημα μοντέλου εθνικού ερευνητικού ιδρύματος της Ιαπωνίας</i>	(Σελ.93)

<i>Εικόνα 4.2.1: Σκαρίφημα της πειραματικής δεξαμενής</i>	<i>(Σελ.98)</i>
<i>Εικόνα 4.2.2: Κυματιστήρας της πειραματικής δεξαμενής</i>	<i>(Σελ.98)</i>
<i>Εικόνα 4.2.3: Σκαρίφημα πειραματικού μοντέλου</i>	<i>(Σελ.99)</i>
<i>Εικόνα 4.3.1: Συντεταγμένες πειραματικού μοντέλου</i>	<i>(Σελ.100)</i>
<i>Εικόνα 4.4.1: Διάταξη μετρητών ανύψωσης κύματος</i>	<i>(Σελ.101)</i>
<i>Εικόνα 4.4.2: Μετρητής έξι βαθμών ελευθερίας</i>	<i>(Σελ.102)</i>
<i>Εικόνα 4.4.3: Μετρητής τεσσάρων βαθμών ελευθερίας</i>	<i>(Σελ.103)</i>
<i>Εικόνα 4.4.4: Τρόπος σύνδεσης μετρητών δύναμης τύπου S</i>	<i>(Σελ.104)</i>
<i>Εικόνα 5.3.1: Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα SemiSub</i>	<i>(Σελ.137)</i>

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1.3.1: Αριστερά: ποσοστό παραγωγής αιολικής ενέργειας, Δεξιά: ποσοστό εγκατεστημένων ανεμογεννητριών	(Σελ.12)
Γράφημα 1.3.2: Τύποι ανεμογεννητριών	(Σελ.13)
Γράφημα 1.3.3:Ευρωπαϊκοί στόχοι για την περίοδο 2011-2020	(Σελ.14)
Γράφημα 1.3.4: Ευρωπαϊκοί στόχοι για την περίοδο 2021-2030	(Σελ.14)
Γράφημα 1.3.5: Οικονομική εξέλιξη υπεράκτιας τεχνολογίας	(Σελ.15)
Γράφημα 1.3.6: Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα	(Σελ.17)
Γράφημα 2.6.1: Στατική κατάσταση μονού κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.70)
Γράφημα 2.6.2: Συνολική δύναμη στο πάνω μέρος του κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.71)
Γράφημα 2.6.3: Γωνία μεταξύ του πάνω τμήματος του κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.72)
Γράφημα 2.6.4: Συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα λόγω της οριζόντιας δύναμης	(Σελ.72)
Γράφημα 2.6.5: Συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα λόγω της κάθετης δύναμης	(Σελ.73)
Γράφημα 2.6.7: Οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει οριζόντιας απόστασης διεύθυνση- x	(Σελ.74)
Γράφημα 2.6.8: Οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει οριζόντιας απόστασης στη διεύθυνση- y	(Σελ.75)
Γράφημα 2.6.9: Στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα του πλωτήρα σε σχέση με την αντίστοιχη ροπή διέγερσης	(Σελ.75)
Γράφημα 2.6.10: Συντελεστής δυσκαμψίας K_{xx} του κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.76)
Γράφημα 2.6.11: Συντελεστής δυσκαμψίας K_{yy} του κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.76)
Γράφημα 2.6.12: Συντελεστής δυσκαμψίας $K_{\phi\phi}$ του κλάδου αγκύρωσης	(Σελ.77)
Γράφημα 2.7.1: Σταθερά ελατηρίου $K_{z\chi}$	(Σελ.80)
Γράφημα 4.6.1: Συναρτήσεις μεταφοράς αισθητήρων ανύψωσης κύματος	(Σελ.110)
Γράφημα 4.6.2: Συναρτήσεις μεταφοράς μετρητών δύναμης- ροπής	(Σελ.111)
Γράφημα 4.6.3: Συναρτήσεις μεταφοράς μετρητών δυνάμεων αγκύρωσης	(Σελ.112)
Γράφημα 5.1.1: Πείραμα 1382	(Σελ.120)
Γράφημα 5.1.2: Πείραμα 1396	(Σελ.126)

<i>Γράφημα 5.1.3: Πείραμα 1385-1386</i>	<i>(Σελ.129)</i>
<i>Γράφημα 5.2.1: Στατιστική ανάλυση Πειράματος 1382</i>	<i>(Σελ.131)</i>
<i>Γράφημα 5.2.2: Στατιστική ανάλυση Πειράματος 1396</i>	<i>(Σελ.136)</i>
<i>Γράφημα 5.3.1: Σύγκριση πειραμάτων υπό γωνία 0°</i>	<i>(Σελ.139-143)</i>
<i>Γράφημα 5.3.1: Σύγκριση πειραμάτων υπό γωνία 20°</i>	<i>(Σελ.143-149)</i>

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2.1.1: Συντελεστές α, β της σχέσης 2.2.2</i>	<i>(Σελ.34)</i>
<i>Πίνακας 2.6.1: Ιδιότητες κλάδου αγκύρωσης</i>	<i>(Σελ.67)</i>
<i>Πίνακας 3.1.1: Ιδιότητες μοντέλων κατά Karimirad M. και Moan T.</i>	<i>(Σελ.86)</i>
<i>Πίνακας 3.1.2: Ιδιότητες μοντέλου εθνικού ερευνητικού ιδρύματος της Ιαπωνίας</i>	<i>(Σελ.88)</i>
<i>Πίνακας 3.2.1: Κύριες ιδιότητες NERL-5MW</i>	<i>(Σελ.90)</i>
<i>Πίνακας 4.1.1: Προδιαγραφές της πρωτότυπης πλωτής ανεμογεννήτριας Hywind</i>	<i>(Σελ.92)</i>
<i>Πίνακας 4.5.1α: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων</i>	<i>(Σελ.100)</i>
<i>Πίνακας 4.5.1β: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων</i>	<i>(Σελ.100)</i>
<i>Πίνακας 4.5.2α: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων</i>	<i>(Σελ.107)</i>
<i>Πίνακας 4.52β: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων</i>	<i>(Σελ.108)</i>
<i>Πίνακας 4.6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας οργάνων με τις συναρτήσεις μεταφοράς</i>	<i>(Σελ.112)</i>
<i>Πίνακας 5.1: Συντομογραφίες στατιστικής ανάλυσης</i>	<i>(Σελ.113)</i>
<i>Πίνακας 5.2: Συντομογραφίες μετρούμενων πειραματικών μεγεθών</i>	<i>(Σελ.114)</i>
<i>Πίνακας 5.1.1: Πείραμα 1382</i>	<i>(Σελ.115)</i>
<i>Πίνακας 5.1.2: Πείραμα 1396</i>	<i>(Σελ.121)</i>

Συντομογραφίες

Λατινικές

EWEA	European Wind Energy Association
BOEMRE	Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement
GBS	Gravity-based Structure
TLP	Tension-leg platform
CGF	Concrete Gravity Foundation
GPS	Global Positioning System
IEA	International Energy Agency
AWEA	American Wind Energy Association
GWEA	Global Wind Energy Council
OC3	Offshore Code Comparison Collaboration
OC4	Offshore Code Comparison Collaboration Continuation
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NMRI	Naval Medical Research Institute
FORM	First-Order Reliability Method
FOWT	Floating Offshore Wind Turbine
RECOFF	Recommendations for Design of Offshore Wind Turbines
DHI	Danish Hydraulic Institute
SWL	Still Water Line
FFT	Fast Fourier Transformation
STDEV	Standard Deviation
RAO	Response Amplitude Operator

Ελληνικές

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΛΕΤΑΕΝ	Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας
Κ.Σ.Π.	Κινηματική συνθήκη του πυθμένα
Κ.Σ.Ε.Ε.	Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια
Δ.Σ.Ε.Ε.	Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια

1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

1.1 Εισαγωγή

1.1.1 Ο άνεμος

Οι άνεμοι της γης παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Ως γνωστό οι θάλασσες παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα αφού, εκτός από την εξάτμιση, η θερμότητα μεταφέρεται προς τα κάτω μέσα στις υδάτινες μάζες. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο αέρας πάνω από λίμνες, θάλασσες και ωκεανούς παραμένει σχετικά κρύος, σε σχέση πάντα με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από την ξηρά και που θερμαίνεται περισσότερο. Από τη θέρμανση του αέρα της ξηράς έχουμε ελάττωση της πυκνότητας του με συνέπεια την ανύψωση του. Και ο βαρύτερος κρύος αέρας που βρίσκεται πάνω από το νερό κινείται για να πάρει τη θέση του. Με τον τρόπο αυτό παράγονται τα τοπικά παραλιακά ρεύματα. Κατά τη διάρκεια της νύκτας τα παραλιακά αυτά ρεύματα αντιστρέφονται, επειδή η θερμοκρασία της ξηράς ελαττώνεται γρηγορότερα από αυτήν του νερού και έτσι ο ψυχρότερος, άρα βαρύτερος αέρας της ξηράς κινείται προς τη θάλασσα όπου αναπληρώνει τον αέρα που ανυψώνεται από την επιφάνεια της θάλασσας.^[1]

Παρόμοια τοπικά ρεύματα συμβαίνουν στις βουνοπλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν ο θερμός αέρας ανυψώνεται κατά μήκος των θερμών πλαγιών που θερμαίνονται από τον ήλιο. Κατά τη νύκτα ο σχετικά κρύος αέρας των πλαγιών κινείται κάτω προς τις πεδιάδες.

Κατά τον ίδιο τρόπο παράγονται οι πλανητικοί άνεμοι, λόγω της μεγαλύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της γης κοντά στον ισημερινό από ότι στους πόλους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κρύοι επιφανειακοί άνεμοι να φυσούν από τους πόλους προς τον ισημερινό προς αντικατάσταση του αέρα που ανυψώνεται στις τροπικές περιοχές και κινείται στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

1.1.2 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια. Χώρες χρωστούσαν τον πλούτο και την ναυτιλιακή ικανότητά τους στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα πλοία τους. Στην ξηρά εξ' άλλου χρησιμοποιήθηκε στους ανεμόμυλους άντλησης νερού ή άλεσης σιτηρών.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ισχύς των ανέμων σ' όλη τη γη υπολογίζεται σε 3.610^9 MW. Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Η ισχύς ρεύματος γενικά είναι ανάλογη της πυκνότητας του και του κύβου της ταχύτητας του. Έτσι για την ίδια ταχύτητα και διατομή ένα ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μια «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Για παράδειγμα άνεμος εντάσεως 5 μποφόρ, περίπου 9,5 m/s, έχει ισχύ 500W ανά m^2 προσβαλλομένης επιφάνειας, ενώ μία ανεμογεννήτρια μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να δεσμεύσει το 48% αυτής της ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα ανταπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια μία «αναβαθμισμένη» κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προσβάλλει σήμερα ως μία από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

1.1.3 Γνωριμία με τις ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες αναπτύχθηκαν από αρχαιοτάτων χρόνων και για πολλούς αιώνες χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα ιδιαίτερα σε αγροτικές εφαρμογές. Η εποχή άλλωστε, που έγινε πολύ εκτεταμένη χρήση ανεμόμυλων, είναι σχετικά πρόσφατη. Για παράδειγμα στις Η.Π.Α. κατασκευάστηκαν περίπου έξι εκατομμύρια ανεμόμυλους ανάμεσα στο 1880 και στον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Μετά τον πόλεμο η χρήση τους αρχίζει να υποχωρεί και οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν στο γεγονός αυτό είναι δυο. Ο πρώτος είναι η ανάπτυξη άλλων μορφών ενέργειας που παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα και ταυτόχρονα είναι απαλλαγμένες από τον στατιστικό χαρακτήρα του ανέμου, δηλαδή παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία διαθεσιμότητας. Ο δεύτερος βρίσκεται στη δημιουργία εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων, που φθάνουν ακόμα και στα πιο απομακρυσμένα και απομονωμένα μέρη. Με αυτά τα δεδομένα έπαψε κάθε ενδιαφέρον γύρω από τις ανεμογεννήτριες για περίπου τριάντα χρόνια, μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Όμως τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον σχετικά με την αιολική ενέργεια γνώρισε νέα άνθιση. Έναυσμα έδωσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973. Το κίνητρο ήταν καθαρά οικονομικό γιατί έπρεπε να βρεθούν και να αξιοποιηθούν νέες πηγές ενέργειας. Στη συνέχεια εμφανίστηκε και ένας νέος παράγοντας, που τη φορά αυτή ήταν οικολογικός. Η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος άρχισε να απασχολεί έντονα τόσο τους επιστήμονες όσο και την κοινή γνώμη.

Έτσι δημιουργήθηκε νέο ενδιαφέρον για ήπιες μορφές ενέργειας, οι οποίες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό που τις κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές, είναι ανανεώσιμες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι ανεμόμυλοι ξεπέρασαν το προηγούμενο στάδιο τους και μπήκαν στη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η έρευνα πάνω σε θέματα αιολικής ενέργειας καθώς και η εξέλιξη της τεχνολογίας είχαν σαν αποτέλεσμα οι σημερινές ανεμογεννήτριες να μοιάζουν ελάχιστα ή και καθόλου με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους. Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργίας τους. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους.

Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην άνωση. Η υπεροχή των σημερινών μονάδων γίνεται προφανής, αν ληφθεί υπ' όψη ότι σε μια αεροτομή η άνωση μπορεί να γίνει υπερδεκαπλάσια της αντίστασης.

Ο βαθμός απόδοσης C_p που χαρακτηρίζει τις ανεμογεννήτριες και που ονομάζεται και συντελεστής ισχύος ορίζεται ως:

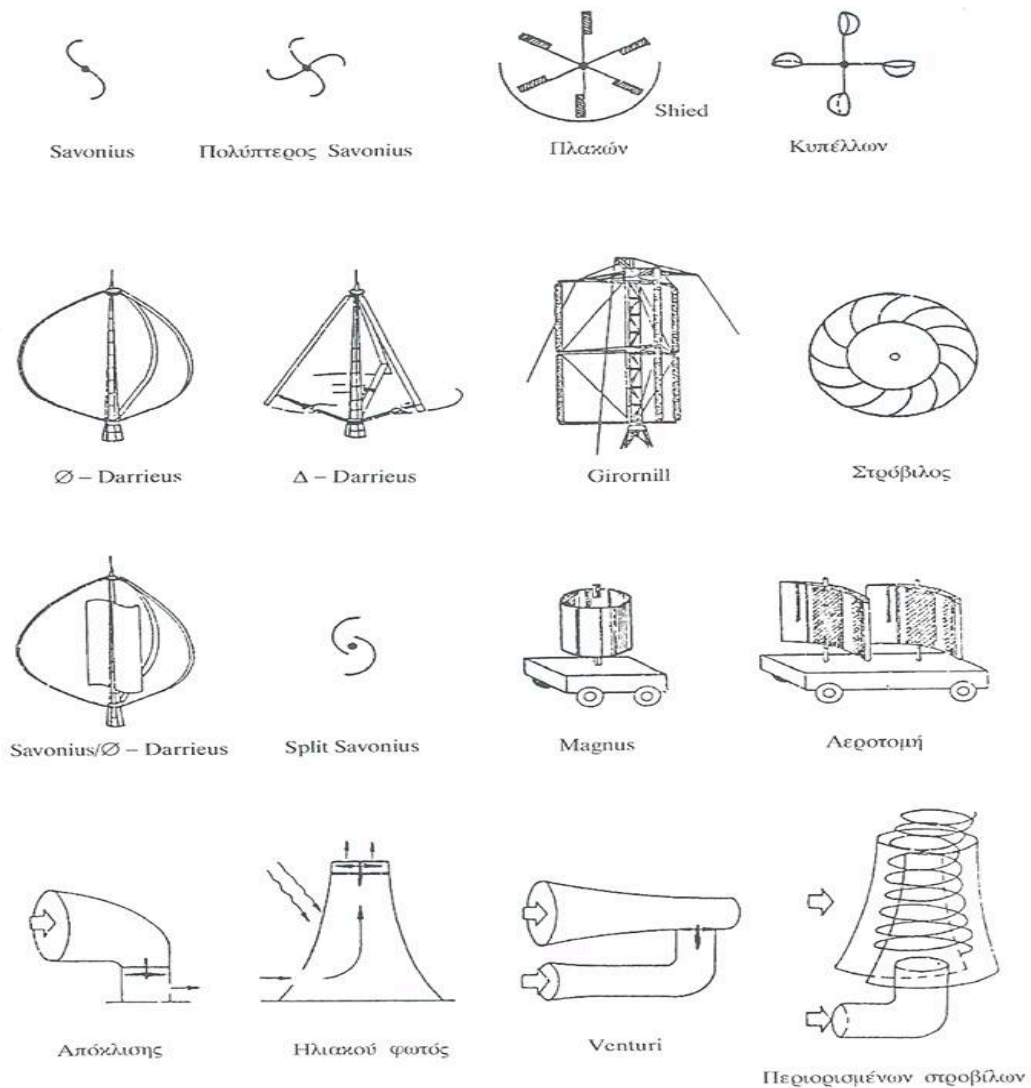
$$C_p = \frac{P}{1/2\rho V^3 A}$$

Όπου P η ισχύς που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια ως προς την ισχύ που έχει ο άνεμος ταχύτητας V και που περνάει από την ανεμογεννήτρια μετωπικής επιφάνειας A (ρ πυκνότητα του αέρα). Η ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο μετωπικής επιφάνειας είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

Για ανεμογεννήτρια γνωστών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ο συντελεστής ισχύος C_p αποτελεί μονοπαραμετρική συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ ($\lambda = \omega R / V$) όπου ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και R η ακτίνα του. Η αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου καλείται και κατάσταση λειτουργίας του δρομέα.

Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας είναι στην ιδανικότερη των περιπτώσεων 59% περίπου. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανεμογεννήτριας που έχει εφαρμοστεί ευρύτατα στην πράξη, είναι δρομέα οριζόντιου άξονα και θυμίζει έλικα αεροπλάνου ή ελικοπτερου. Όμως γύρω στα 1970 εμφανίζεται στο προσκήνιο ένας νέος τύπος ανεμογεννήτριας με δρομέα κατακόρυφου άξονα περιστροφής και καμπύλα πτερύγια. Η ανεμογεννήτρια αυτή αποτελεί εξέλιξη μιας παλιάς ιδέας του Γάλλου G.Darrieus που είχε και τη σχετική πατέντα από το 1931. Η μορφή των πτερυγίων του δρομέα Darrieus είναι τέτοια ώστε να μην αναπτύσσονται καθόλου καμπτικές τάσεις από τις φυγόκεντρες δυνάμεις που δημιουργεί η περιστροφή και ουσιαστικά είναι η μορφή που παίρνει ένα σχοινί που περιστρέφεται γύρω από άξονα.

Η Εικόνα 1.1.1 δείχνει τους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών που έχουν κατά καιρούς επινοηθεί από όπου φαίνεται η επινοητικότητα του ανθρώπου στη συνεχή προσπάθεια του για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος.



Εικόνα 1.1.1: Εξέλιξη ανεμογεννητριών

1.2 Ιστορική αναδρομή στις γερσαίες και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο παλιές φυσικές πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή.^{[2][3][4]}

Η πρωτογενής αυτή μορφή ενέργειας που παρέχεται άμεσα από τη φύση, έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας ιδιαίτερα με τη χρήση της στη ναυτιλία για συγκοινωνίες και εξερευνήσεις.

Πρώτη χρήση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο έγινε για την κίνηση των πλοίων του. Υπάρχουν επίσης ιστορικές και αρχαιολογικές μαρτυρίες ότι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από τους Κινέζους, τους Πέρσες και τους Αιγύπτιους αιώνες πριν από τη γέννηση του Χριστού. Περισσότερα σήμερα είναι γνωστά για τους ανεμόμυλους των Περσών οι οποίοι ήταν κατακόρυφου άξονα.

Στην Αίγυπτο σώζονται πύργοι ανεμόμυλων ηλικίας μεγαλύτερης των 3000 ετών. Στο Αφγανιστάν βρίσκονται τα ερείπια ενός μεγάλου κτιρίου, με πολλές οπές, διαμέσου των οποίων ο αέρας εισέρεε έβαζε σε κίνηση ειδικές μηχανές που εκτελούσαν χρήσιμες για τον άνθρωπο εργασίες.

Στις χώρες τις Ανατολής, στην Περσία, στην Μικρά Ασία, στο Αιγαίο, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά για την άλεση δημητριακών, μέχρι τη Βυζαντινή εποχή και μεταγενέστερα.

Οι ανεμόμυλοι δε χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την άλεση δημητριακών, αλλά και για άλλους σκοπούς με περισσότερο σπουδαίο την άντληση των υδάτων. Η μεγαλύτερη διάδοση ανεμόμυλων έγινε στην Ολλανδία. Εκεί με τη βοήθεια των ανεμόμυλων απορροφήθηκαν τα νερά των τεραστίων σε έκταση περιοχών της χώρας που βρίσκονταν σε χαμηλή στάθμη, και διοχετεύτηκαν στη θάλασσα.

Στην Ελλάδα για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κυρίως στην Ανατολική Κρήτη. Υπολογίζεται ότι ο αριθμός τους είχε φθάσει προπολεμικά στους 6000.

Μια σύντομη ιστορική αναδρομή στη χρησιμοποίηση των ανεμόμυλων δείχνει ότι κατά τους αρχαίους χρόνους χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για το άλεσμα του σιταριού. Μέχρι και το 900 μ.Χ. χρησιμοποιούντο στην Περσία ακόμα ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα για το πότισμα κήπων. Στη συνέχεια αναφέρονται οι κυριότεροι χρονικοί σταθμοί της εξελικτικής πορείας του ανεμόμυλου σε χερσαίες και υπεράκτιες περιοχές.

- 1200 μ.Χ. Ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα σιταριού.
- 1500 μ.Χ. Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quijote τους φέρνει στην Ισπανία.
- 1600 μ.Χ. Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια της Αμερικής.
- 1700 μ.Χ. Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαθιστούν τους ανεμόμυλους.
- 1860 μ.Χ. Οι Αμερικάνοι κατασκευάζουν πολυπτέρυγους ανεμόμυλους για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
- 1870 μ.Χ. Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
- 1887 μ.Χ. (Ιούλιος) Κατασκευάζεται ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον καθηγητή James Blyth.
- 1887 μ.Χ. (Χειμώνας) Ο καθηγητής Charles F. Brush κατασκευάζει ένα ανεμόμυλο 12 kW για να φορτίσει 408 μπαταρίες αποθηκευμένες στο υπόγειο του σπιτιού του.
- 1890 μ.Χ. Ο επιστήμονας Poul la Cour ξεκινά τα πειράματα με ανεμόμυλους για να δώσει ηλεκτρισμό στη Δανία. Το 1903 ιδρύει το «Society of wind electricians» και το 1904 γίνεται το πρώτο συνέδριου του οργανισμού αυτού. Ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε ότι γρήγορα περιστρεφόμενοι ανεμόμυλοι με λιγότερες λεπίδες ήταν πιο αποτελεσματικοί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1920 μ.Χ. Ο πρώτος κάθετου άξονα ανεμόμυλος ανακαλύφθηκε από τον Frenchman George Darrieus που το 1931 το έκανε πατέντα στην Αμερική.
- 1927 μ.Χ. Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική για ηλεκτροδότηση στα αγροτικά σπίτια.

- 1930 μ.Χ. Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1931 μ.Χ. Ο πρόδρομος των σύγχρονων ανεμόμυλων οριζόντιου άξονα κατασκευάζεται στην Yalta (Σοβιετική Ένωση) παράγοντας 100 kW. Ο βαθμός απόδοσης ήταν αρκετά υψηλός ακόμα και για τα σημερινά δεδομένα.
- 1941 μ.Χ. Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμογεννήτρια ισχύος 1 MW με δυο πτερύγια.
- 1950 μ.Χ. Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
- 1960 μ.Χ. Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας- πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
- 1970 μ.Χ. Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
- 1976 μ.Χ. Τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για πράγματα γύρω από την τεχνοοικονομική διερεύνηση των ανεμογεννητριών.
- 1983 μ.Χ. Κατασκευή ανεμογεννητριών ισχύος 3 MW.
- 1990 μ.Χ. Κατασκευή ανεμογεννητριών ισχύος 5 MW.
- 1991 μ.Χ. Κατασκευάζεται το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην Vindeby στην Δανία αποτελούμενο από 11 ανεμογεννήτριες των 450 KW.
- 2008 μ.Χ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση επικυρώνει το στόχο πως η παραγωγή του 20% της ηλεκτρικής ενέργειας θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το 2020.
- 2012 μ.Χ. Ολοκληρώνεται με επιτυχία το μεγαλύτερο μέχρι σήμερα υπεράκτιο αιολικό πάρκο αποτελούμενο από 175 ανεμογεννήτριες των 3,6 MW συνολικής ισχύος 630 MW.^[5]

Η αύξηση της ζήτησης ενέργειας μεταπολεμικά οδήγησε ορισμένες τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες στην κατάστροφη προγραμμάτων για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Η επιδίωξη να συμπεσθεί το κόστος της αρχικής εγκατάστασης με την κατασκευή μονάδων μεγαλύτερης ισχύος, αντιμετώπισε την επίλυση δύσκολων τεχνικών προβλημάτων και την αναζήτηση ανθεκτικότερων υλικών. Η προσπάθεια αυτή είχε να ανταγωνισθεί και την επέκταση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα τελικά να χαθεί το ενδιαφέρον ακόμα και για μικροεφαρμογές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Τελικά το ενδιαφέρον περιορίστηκε στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές.

Η πρόσφατη ενεργειακή κρίση με τις αλληπάλληλες αυξήσεις της τιμής του πετρελαίου, και η τεχνολογική πρόοδος που σημειώθηκε, έδρασαν ευνοϊκά ώστε σήμερα να δικαιολογείται η προσπάθεια κατασκευής μεγαλύτερων μονάδων για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, αλλά και της τυποποίησης στην κατασκευή των μικρότερων, για ορισμένες χρήσεις.

Η Ευρώπη είναι παγκόσμιος πρωτοπόρος στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Μέχρι τον Ιανουάριο του 2014 το Ηνωμένο Βασίλειο είχε την μεγαλύτερη παραγωγή σε αιολική ενέργεια (υπεράκτια) παγκοσμίως. Ο στόχος μέχρι το 2020 είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στα 40 GW στην Ευρώπη που θα παρέχουν το 4% των ηλεκτρικών αναγκών της.

Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια τέθηκε σε λειτουργία στα τέλη του 2009. Ονομάζεται Hywind και η κατασκευή και η τοποθέτηση της κόστισαν 62 εκατομμύρια δολάρια. Οι πλωτές ανεμογεννήτριες έχουν διαφορετική κατασκευαστική τεχνολογία κοντινότερη σε αυτή των πλωτών εξεδρών άντλησης πετρελαίου παρά σε αυτή των συμβατικών μορφών κατασκευής. Στα τέλη του 2011 η Ιαπωνία ανακοίνωσε σχέδια για την κατασκευή πολλαπλών μονάδων πλωτών ανεμογεννητριών με 6 ανεμογεννήτριες των 2 MW. Μετά την φάση αξιολόγησης που θα ολοκληρωθεί το 2016, σκοπεύει να κατασκευάσει έως και 80 ανεμογεννήτριες στην περιοχή της Fukushima, όπου έγινε το πυρηνικό ατύχημα το 2011.

1.2.1 Χερσαία ή υπεράκτια αιολικά πάρκα

Το πιο σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος τόσο στα χερσαία όσο και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η κατασκευή και στη συνέχεια η ανακύκλωση των υλικών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες. Ενώ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους οι ανεμογεννήτριες είναι αρκετά οικολογικές με πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.^{[6][7][8]}

Τα χερσαία αιολικά πάρκα έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον υπό την μορφή της ηχορύπανσης, της οπτικής ρύπανσης και τα ατυχήματα με τα πτηνά. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις η οπτική ρύπανση και η ηχορύπανση ήταν χαμηλότερη από την αναμενόμενη καθώς η ηχορύπανση είναι εντονότερη σε κοντινές αποστάσεις και σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα όσο απομακρυνόμαστε από αυτές και η οπτική ρύπανση είναι θέμα ατομικής αισθητικής. Επίσης τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι συχνά κοντά σε υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα επομένως δεν υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την κατασκευή τους. Όμως στις περιπτώσεις των απομακρυσμένων περιοχών τα προβλήματα αυτά είναι σημαντικά καθώς συνήθως οι απομακρυσμένες περιοχές βρίσκονται μακριά από την ανθρώπινη επιρροή στη φύση. Όσο αφορά τα ατυχήματα με τα πτηνά αυτά παρατηρούνται κυρίως με αποδημητικά πτηνά αφού δεν έχουν «συνηθίσει» την παρουσία των ανεμογεννητριών.

Το μεγαλύτερο περιβαλλοντολογικό κόστος είναι το κτίσιμο και η εγκατάσταση μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας. Το κόστος αυτό είναι αναμφίβολα μικρότερο στα χερσαία αιολικά πάρκα από ότι στα υπεράκτια. Αν όμως στο κόστος αυτό προσθέσουμε και την απόδοση των ανεμογεννητριών οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι παρόμοιες. Αυτό οφείλεται στο ότι ο αέρας πάνω από τη θάλασσα είναι πιο δυνατός και πιο αξιόπιστος σε σχέση με τον αέρα που βρίσκεται πάνω από την ξηρά, όπως έδειξαν μετρήσεις που έγιναν τόσο σε χερσαία όσο και υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις πλατφόρμες σταθερής έδρασης και στις πλωτές πλατφόρμες. Οι πλατφόρμες σταθερής έδρασης έχουν περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά με τις χερσαίες, αφού βρίσκονται σχετικά κοντά από την ξηρά λόγω του μικρού σχετικά βάθους που

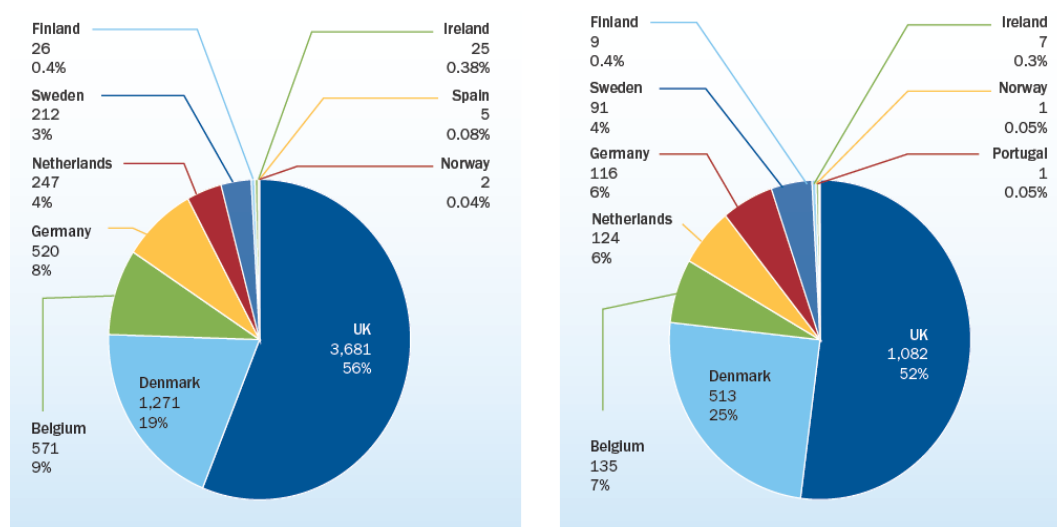
μπορούν να τοποθετηθούν. Έτσι οι θετικές και η αρνητικές περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις στον άνθρωπο και στη φύση είναι πρακτικά οι ίδιες. Στις περιπτώσεις όμως που η ανεμογεννήτρια εδράζεται σε πλωτή πλατφόρμα οι επιπτώσεις που είχαμε να αντιμετωπίσουμε μέχρι τώρα παύουν να υφίστανται. Αυτό γιατί οι πλωτές πλατφόρμες δεν επηρεάζουν καθόλου την υποθαλάσσια ζωή και δεν είναι ορατές από τον άνθρωπο καθώς μπορούν να μεταφερθούν πολύ πιο μακριά από τις ακτές. Επίσης η χρήση μεγαλύτερων ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με τους ισχυρότερους ανέμους οδηγούν σε καλύτερους βαθμούς απόδοσης μειώνοντας έτσι την απόσβεση του κόστους κατασκευής. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει πως παύουν να εμφανίζονται άλλα προβλήματα καθώς αυξάνεται η απόσταση από τις ακτές αυξάνεται και η έκταση του ηλεκτρικού δικτύου που επιφέρει μεγαλύτερο συνολικό κόστος για τις κατασκευές. Επίσης χρειάζονται επιπλέον μελέτες όσον αφορά στα δρομολόγια των πλοίων που περνούν από τις συγκεκριμένες διαδρομές ούτως ώστε να μην χρειάζεται να αλλάζουν πορεία.

Αν και η υπεράκτια αιολική ενέργεια έρχεται με ένα πρόσθετο κόστος από την άποψη των υλικών, τόσο στα χερσαία όσο και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα ο χρόνος απόσβεσης του κόστους αυτού είναι σύντομος. Επιπλέον ο θόρυβος και η οπτική ρύπανση που μπορεί να προκύψει από τις χερσαίες ανεμογεννήτριες είναι μικρότερος στα υπεράκτια αιολικά πάρκα και μηδενικός σε αυτά με πλωτές ανεμογεννήτριες. Είναι πιθανό ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα αυξηθεί περισσότερο από την χερσαία αιολική ενέργεια λόγω της πρακτικότητας και των ζητημάτων χώρου που αντιμετωπίζουν πολλές παράκτιες περιοχές. Τέλος η προστιθέμενη αποδοτικότητα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε σχέση με την χερσαία καλύπτει το συνολικό κόστος της κατασκευής, το ίδιο συμβαίνει και στη σύγκριση των εξεδρών σταθερής έδρασης με αυτών των πλωτών ανεμογεννητριών.

1.3 Υπάρχοντα και μελλοντικά υπεράκτια αιολικά πάρκα

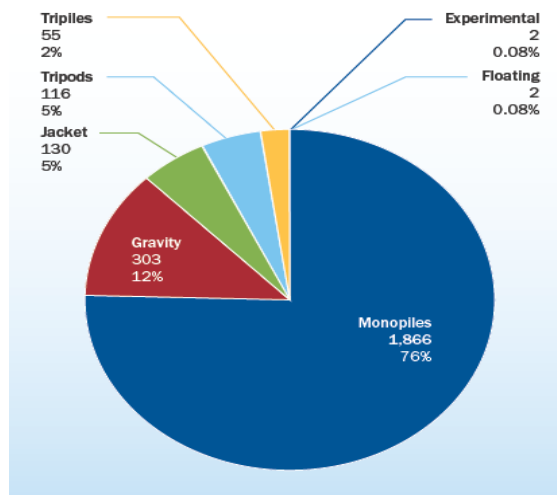
1.3.1 Ευρωπαϊκή αγορά

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η Ευρώπη κατέχει την παγκόσμια πρωτιά στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Μέχρι τον Απρίλιο του 2014 κατασκευάστηκαν περισσότερα από 80 υπεράκτια αιολικά πάρκα με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης 482 MW για το 2013. Σήμερα το Ηνωμένο Βασίλειο έχει την μεγαλύτερη παραγωγή σε υπεράκτια αιολική ενέργεια παγκοσμίως με 3,681 MW (56% της Ευρωπαϊκής παραγωγής) με 1082 ανεμογεννήτριες ακολουθούμενη από την Δανία με 1,271 MW και το Βέλγιο με 571 MW, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1.3.1. Ο Γερμανικός κατασκευαστής ανεμογεννητριών Siemens και ο Δανέζικος Vestas μαζί κατέχουν το 87% των Ευρωπαϊκά εγκατεστημένων ανεμογεννητριών.^[9]



Γράφημα 1.3.1: Αριστερά: ποσοστό παραγωγής αιολικής ενέργειας, Δεξιά: ποσοστό εγκατεστημένων ανεμογεννητριών

Οι πλατφόρμες σταθερής έδρασης μονοπωλούν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα καθώς οι πλωτές πλατφόρμες ακόμη βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο ή σε επίπεδο έρευνας. Λόγω του χαμηλού βάθους εγκατάστασης των περισσότερων ανεμογεννητριών οι "Monoriles" υπερτερούν σε σχέση με τους άλλους τύπους πλατφόρμων σταθερής έδρασης όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1.3.2.



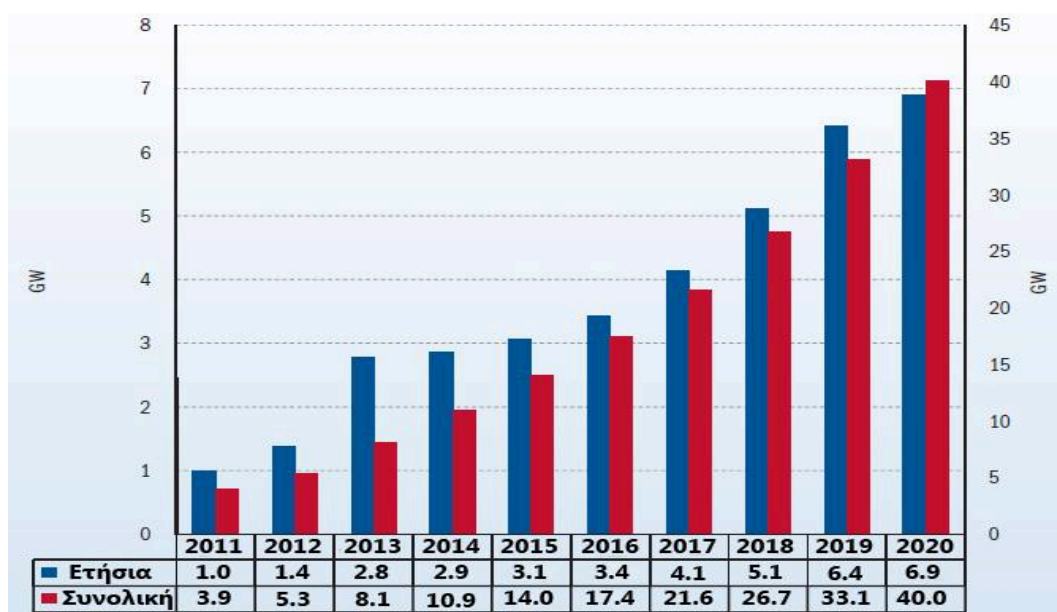
Γράφημα 1.3.2: Τύποι ανεμογεννητριών

Τα μεγαλύτερα υπεράκτια πάρκα βρίσκονται στη Μεγάλη Βρετανία, με πρώτο το "London Array" με ετήσια παραγωγή 630 MW αποτελούμενο από 175 ανεμογεννήτριες των 3.6 MW, το έργο ολοκληρώθηκε το 2012. Ακολουθεί το "Greater Gabbard" με ετήσια παραγωγή 504 MW αποτελούμενο από 140 ανεμογεννήτριες των 3.6 MW. Στη τρίτη θέση βρίσκονται το "Anholt" της Δανίας και το "BARD Offshore 1" της Γερμανίας με 400 MW ετήσιας παραγωγής. Ενώ στο Δανέζικο αιολικό πάρκο τοποθετήθηκαν οι ίδιες ανεμογεννήτριες με τα αιολικά πάρκα της Μεγάλης Βρετανίας στο Γερμανικό χρησιμοποιήθηκαν ανεμογεννήτριες των 5 MW.^[10]

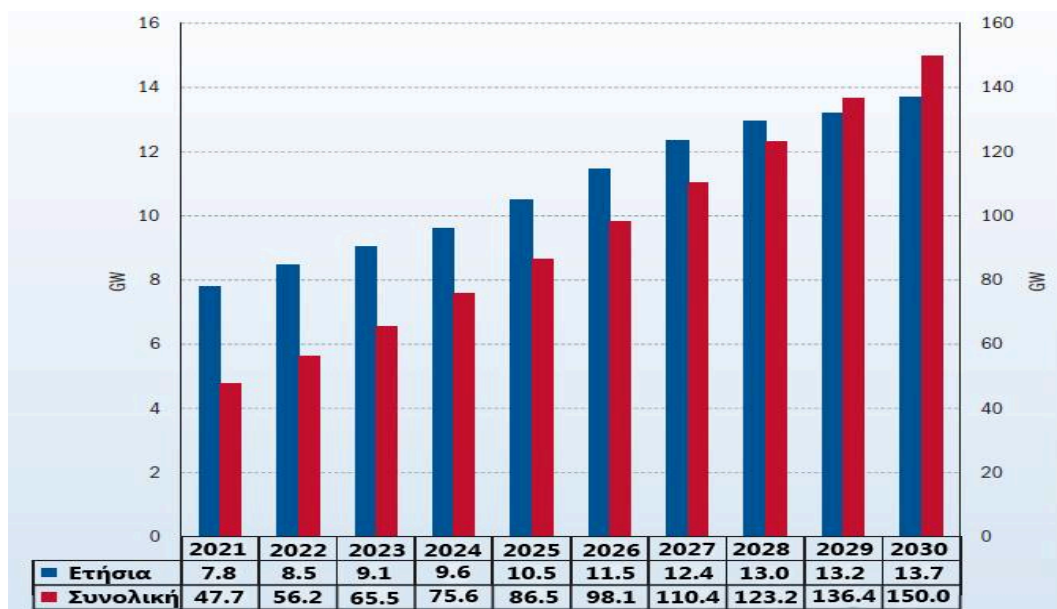
Αφού οι στόχοι μέχρι το 2020 είναι πολύ μεγαλύτεροι σε σχέση με την υπάρχουσα ετήσια παραγωγή βρίσκονται σε επίπεδο παραγωγής και θα λειτουργήσουν εντός του 2014 πολλά ακόμα μεγάλα αιολικά πάρκα. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε το "Gwynt y Mor" στη Μεγάλη Βρετανία με 576 MW και τα "Trianel Borkum West II" και "Global Tech I" στη Γερμανία με 400MW το κάθε ένα.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (EWEA) εκτιμά πως μέχρι το 2020 θα κατασκευαστούν υπεράκτια αιολικά πάρκα με ετήσια παραγωγή περισσότερη των 40GW παράγοντας 148 TWh καλύπτοντας το 4% των ηλεκτρικών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έτσι θα αποτρέψουμε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της τάξεως των 87 εκατομμυρίων τόνων. Οι αριθμοί

αυξάνονται ακόμα περισσότερο για το 2030 καθώς η ετήσια παραγωγή θα ανέλθει στα 150 GW φθάνοντας στο 14% των ηλεκτρικών αναγκών που υπολογίζεται πως θα χρησιμοποιούνται τότε. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή 315 εκατομμυρίων τόνων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Εκτενή στοιχεία παρατίθενται στα Γραφήματα 1.3.3 και 1.3.4.^[11]

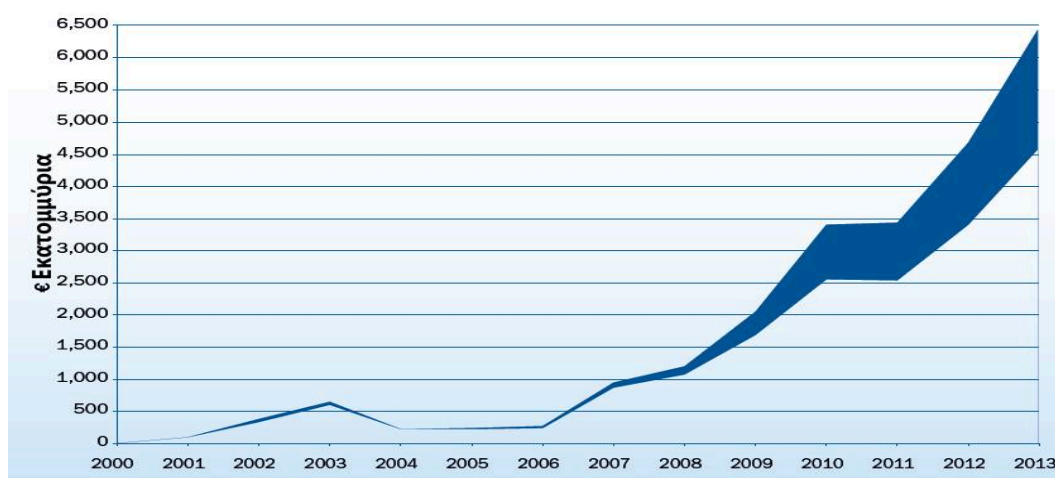


Γράφημα 1.3.3: Ευρωπαϊκοί στόχοι για την περίοδο 2011-2020



Γράφημα 1.3.4: Ευρωπαϊκοί στόχοι για την περίοδο 2021-2030

Υπολογίζεται πως μέχρι το 2020 θα υπάρχουν θέσεις εργασίας για 169,500 άτομα σε υπεράκτια αιολικά πάρκα ενώ το 2030 ο αριθμός αυτός θα εκτοξευθεί στις 300,000. Πράγμα που υποδουλώνει πως οι επενδύσεις στο τομέα αυτό για έρευνα, κατασκευή, εγκατάσταση και συντήρηση θα είναι μεγάλες, επομένως και προοπτική για άτομα που έχουν ή επιδιώκουν να αποκτήσουν κατάρτιση σε αυτό τον τομέα. Αυτό είναι γεγονός και όχι «υπόσχεση» για το μέλλον αν αναλογιστεί κανείς την ανάπτυξη που υπάρχει στο κλάδο αυτό από το 2000 με βάση τα στοιχεία στο Γράφημα 1.3.3 από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Αιολικής Ενέργειας.



Γράφημα 1.3.5: Οικονομική εξέλιξη υπεράκτιας τεχνολογίας

1.3.2 Παγκόσμια αγορά

Στις ΗΠΑ δεν έχουν κατασκευαστεί υπεράκτια αιολικά πάρκα έως σήμερα. Η πολιτική στήριξη αυξάνεται με αργούς ρυθμούς καθώς ο σχεδιασμός, η χωροθέτηση και οι διαδικασίες αδειοδότησης αποτελούν ακόμα μια πρόκληση. Το 2010 δημοσιεύθηκαν αιτήσεις παροχής πληροφοριών για τη μέτρηση του εμπορικού ενδιαφέροντος για ανάπτυξη αιολικών πάρκων στο Μέρυλαντ, το Ντέλαγουερ και στη Μασαχουσέτη. Τον Απρίλιο το 2010 το έργο στο ακρωτήριο της Μασαχουσέτης έγινε το πρώτο προτεινόμενο υπεράκτιο αιολικό πάρκο των ΗΠΑ που έλαβε τελική ομοσπονδιακή έγκριση και η τελική μίσθωση έγινε τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Το Φεβρουάριο του 2011 το Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement (BOEMRE) όρισε τέσσερις περιοχές με δυνατότητες ανάπτυξης αιολικών πάρκων εκ των οποίων τα τρία έχουν ήδη υπογράψει συμφωνία αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.^[12]

Η Κίνα βρίσκεται στη 5^η θέση παγκοσμίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτια αιολικά πάρκα και είχε θέσει υψηλούς στόχους μέχρι το 2020. Το όλο πρόγραμμα ξεκίνησε το 2008, η ολοκλήρωση του πρώτου αιολικού πάρκου έγινε το 2010 με ετήσια παραγωγή 110,6 MW ακολούθησε το δεύτερο πάρκο την ίδια χρονιά παραγωγής 201 MW και τέλος το 2012 το "Longyan Rudong Intertidal" παραγωγής 150 MW. Μέχρι το τέλος του 2012 είχαν εγκατασταθεί ανεμογεννήτριες για παραγωγή 461,6 MW. Αυτό έδειξε πως η ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας δεν ήρθε όπως ήταν αρχικά προγραμματισμένη έτσι ο στόχος των 5GW για το 2015 και ο στόχος των 30 GW για το 2020 φαντάζουν πολύ μακρινοί.

Σχέδια υπάρχουν ακόμα σε Ταιβάν, Ιαπωνία και Νότιο Κορέα κάποια εκ των οποίων έχουν ήδη υλοποιηθεί. Οι τρεις αυτές χώρες αντιλαμβανόμενες το παγκόσμιο ενδιαφέρον για ανάπτυξη υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έθεσαν τις βάσεις και προχωράνε με αργούς ρυθμούς προς την υλοποίηση των στόχων που έχουν θέσει.

1.3.3 Ελληνική αγορά

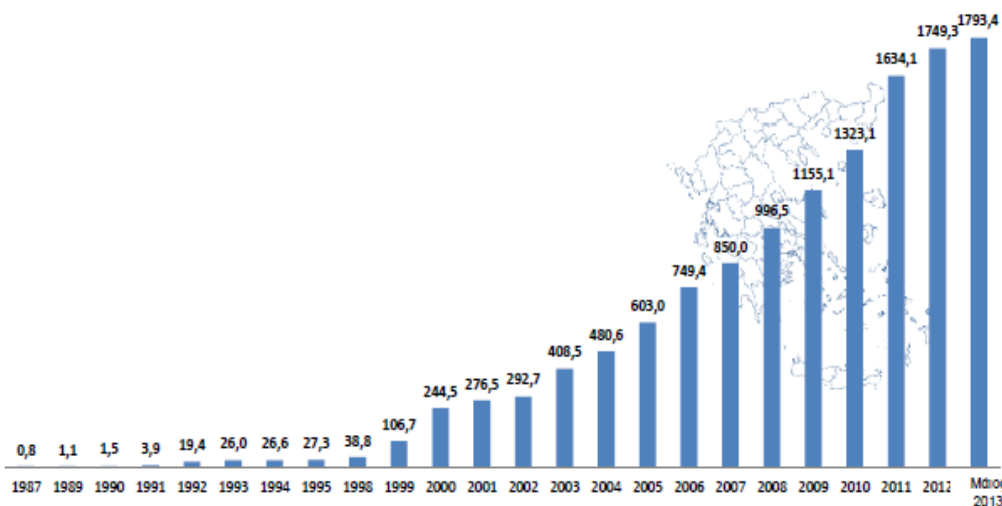
Η αιολική ενέργεια πρωταγωνιστεί στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και παρουσιάζει σημαντικές επενδυτικές δυνατότητες στην Ελλάδα. Το εξαιρετικά υψηλό δυναμικό της χώρας κατατάσσεται μεταξύ των πλέον ελκυστικών στην Ευρώπη, με απόδοση πάνω από 8 μέτρα/δευτερόλεπτο σε πολλά σημεία της χώρας.^{[13][14]}

Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ακτογραμμή και στο τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου ισχυροί άνεμοι πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές της χώρας. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Σύμφωνα με στοιχεία από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), μέχρι το Μάιο του 2013 παράγονται 1793,4 MW από χερσαία αιολικά πάρκα όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1.3.4. Στόχος είναι να εγκατασταθούν 7,500 MW μέχρι το 2020, από τα οποία τα 300 MW αφορούν υπεράκτια αιολικά πάρκα.^[15]



Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς (MW) ανά έτος



Στη στατιστική της αιολικής ενέργειας, η ΕΛΕΤΑΕΝ έχει συμπεριλάβει τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα ανά την Ελλάδα που βρίσκονται σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία.

Γράφημα 1.3.6: Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις ήπιες μορφές ενέργειας.

Η ανάπτυξη του τομέα των ΑΠΕ στην Ελλάδα διασφαλίζεται από δεσμευτικούς συμβατικούς στόχους που απαιτούν τη συμμετοχή κατά 40% στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το 2020, έναντι της τρέχουσας συμμετοχής που ανέρχεται στο 15% περίπου, συμπεριλαμβάνοντας τα μικρά υδροηλεκτρικά. Για να γίνει αυτό όμως εφικτό απαραίτητη είναι και η συνεχής εξέλιξη της νομοθεσίας ώστε να δοθεί πρόσθετη ώθηση στην παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα χερσαία και υπεράκτια αποτρέποντας έτσι φαινόμενα καθυστερήσεων και με αυτό το τρόπο να μπαίνουν σε εφαρμογή νέοι στόχοι.

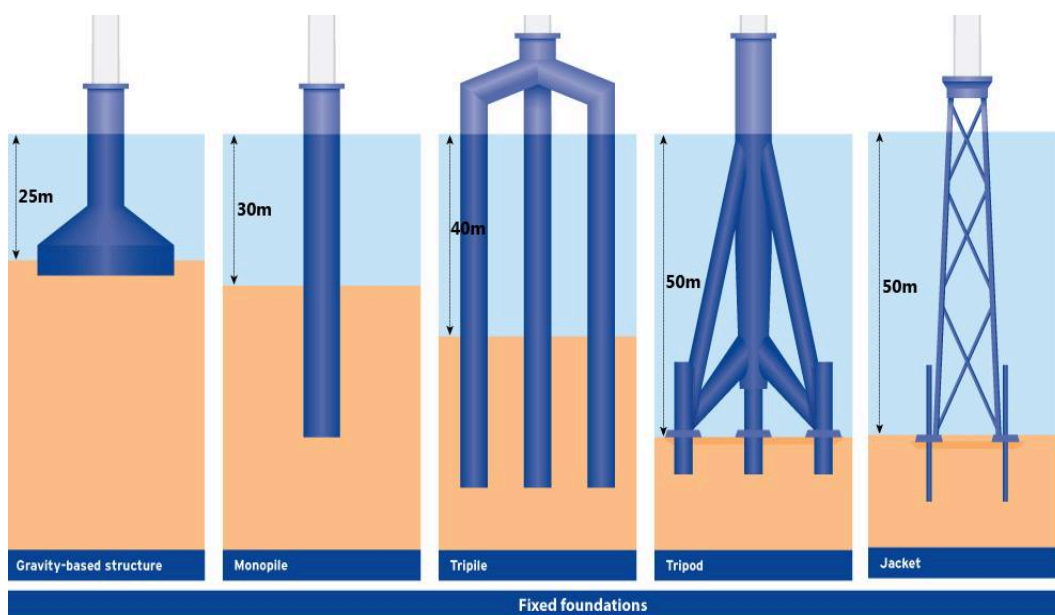
1.4 Κατηγορίες έδρασης ανεμογεννητριών

Αρκετοί τύποι υποδομής έχουν χρησιμοποιηθεί και προταθεί μέχρι σήμερα, για την στήριξη των ανεμογεννητριών στη θάλασσα. Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τις πλατφόρμες σταθερής έδρασης και τις πλωτές πλατφόρμες.

Οι πλατφόρμες σταθερής έδρασης αποτελούνται από τις:

- Gravity-based Structure (GBS)
- Monopile
- Tripile
- Tripod
- Jacket

Η δομή τους φαίνεται στην Εικόνα 1.4.1

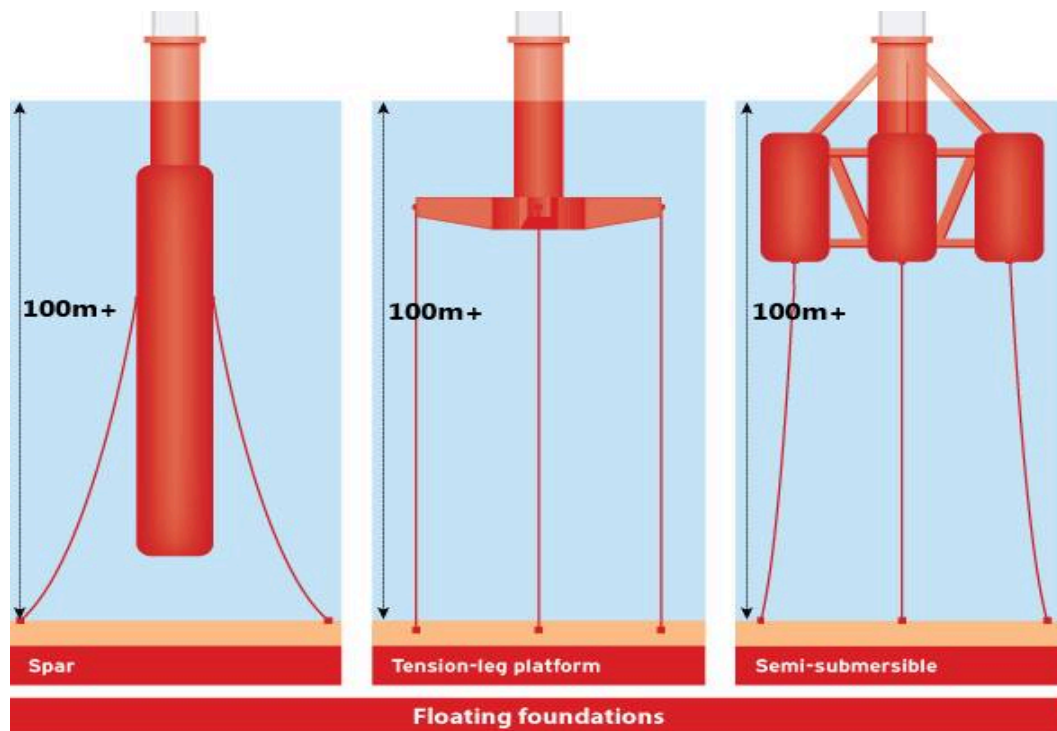


Εικόνα 1.4.1: Δομή πλατφόρμων σταθερής έδρασης

Οι πλωτές πλατφόρμες αποτελούνται από τις:

- Spar
- Tension-leg platform (TLP)
- Semi-submersible

Η δομή τους φαίνεται στην Εικόνα 1.4.2



Εικόνα 1.4.2: Δομή πλωτών πλατφόρμων

Σημαντικές εκτιμήσεις πρέπει να γίνουν πριν την επιλογή του τύπου δομής της πλατφόρμας οι οποίες περιλαμβάνουν το κόστος, το βάθος του νερού, τις συνθήκες στο βυθό της θάλασσας της περιοχής, τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τους τεχνικούς-εμπορικούς παράγοντες ρίσκου. Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε βάθη νερού μικρότερα των 20 έως 25 μέτρων εδράζονται σε Monopile γιατί είναι σχετικά απλά στην παραγωγή, εύκολα στην εγκατάσταση και λιγότερο δαπανηρά. Δομές που βασίζονται σε GBS οι οποίες είναι επίσης σχετικά εύκολο να παραχθούν συνθέτουν μαζί με τις Monopile το μεγαλύτερο εύρος έδρασης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων σήμερα.

Οι Monopiles αναμένεται να συνεχίσουν να κυριαρχούν στην αγορά μέχρι και τα τεχνικά όρια της βιωσιμότητας τους όσον αφορά το μέγεθος του στροβίλου, το βάθος του νερού και τις συνθήκες του εδάφους. Οι GBS θα συνεχίσουν επίσης να αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό στο μερίδιο αγοράς σε ρηχές ή προστατευμένες περιοχές.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγαλύτερο βάθος νερού και ανάλογα με τις συνθήκες του βυθού στη κάθε περιοχή χρησιμοποιούνται οι υπόλοιποι τύποι έδρασης ανεμογεννήτριας. Πρόκληση αποτελεί ο παροπλισμός των υποδομών στο τέλος της ζωής τους καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις αναλόγως και του τύπου της έδρασης το κόστος είναι μεγάλο.

Όλα τα υφιστάμενα εμπορικής κλίμακας αιολικά πάρκα χρησιμοποιούν πλατφόρμες σταθερής έδρασης. Ωστόσο, σε πολλές χώρες ο αριθμός κατάλληλων χώρων σε ρηχά νερά για την δημιουργία οικονομικά βιώσιμων αιολικών πάρκων είναι περιορισμένος. Σε αυτές τις περιοχές οι πλωτές πλατφόρμες μπορεί να αποδειχθούν ως οι οικονομικότερες λύσεις. Υπό αυτές τις συνθήκες οι πλωτές κατασκευές έχουν μια σειρά από σημαντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μεγαλύτερης ευελιξίας στις διαδικασίες κατασκευής και εγκατάστασης και η ευκολία παροπλισμού στο σημείο εγκατάστασης τους.

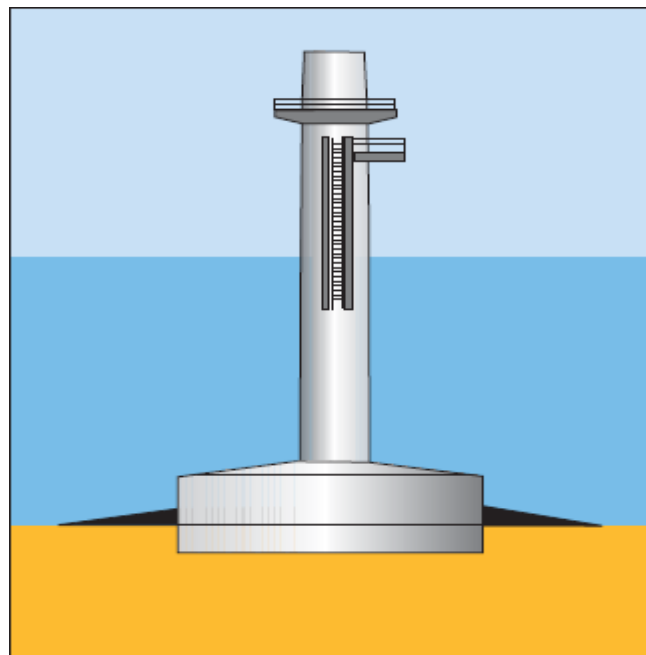
Η σημαντικότερη διαφορά στις δύο κατηγορίες έγκειται στο γεγονός πως στις πλωτές πλατφόρμες η υποστήριξη προέρχεται από το νερό και όχι από το έδαφος. Η επαφή με το βυθό της θάλασσας γίνεται μέσω της αγκύρωσης της κατασκευής όπως και στις πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στο σχεδιασμό μια πλωτής πλατφόρμας λόγω της μεγαλύτερης εμπειρίας του ανθρώπου σε αυτούς τους τύπους κατασκευής.

Με φόντο όλα αυτά τα οφέλη η χρήση πλωτών ανεμογεννητριών είναι αναπόφευκτη. Όμως υπάρχουν και μια σειρά από προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν όπως η ελαχιστοποίηση του ανέμου και των κυμάτων που προκαλούνται από την κίνηση της κατασκευής και η προστιθέμενη πολυπλοκότητα της διαδικασίας σχεδιασμού των ηλεκτρικών υποδομών καθώς και της όλης κατασκευής.

1.4.1 Πλατφόρμες σταθερής έδρασης

– Gravity-based Structure (GBS)

Σε αντίθεση με τις πλατφόρμες σταθερής έδρασης που στηρίζονται σε πυλώνες οι GBS είναι σχεδιασμένες για την αποφυγή εφελκυστικών δυνάμεων καθώς και δυνάμεων ανάτασης μεταξύ του πυθμένα της κατασκευής και του βυθού της θάλασσας. Μία τυπική πλατφόρμα GBS φαίνεται στην Εικόνα 1.4.3.^{[11][16]}



Εικόνα 1.4.3: Gravity-based Structure (GBS)

Η βασική αρχή της όλης κατασκευής παραμένει η ίδια από το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο που κατασκευάστηκε το 1991 στη Δανία όπου οι ανεμογεννήτριες εδράζονταν σε GBS. Δηλαδή ότι το βάρος της κατασκευής συγκρατεί τον πύργο και την ανεμογεννήτρια στη θέση τους χωρίς να χρειάζεται γεώτρηση ή σφυρηλάτηση στο χώρο εγκατάστασης της αλλά ένα στρώμα από χαλίκι και σκυρόδεμα για την εξομάλυνση του βυθού.

Οι GBS κατασκευάζονται σε ναυπηγεία και μεταφέρονται στην περιοχή εγκατάστασης με ειδικά σκάφη. Μετά την τοποθέτησή τους για να αυξηθεί το βάρος της κατασκευής τοποθετείται οπλισμένο σκυρόδεμα, πέτρες, άμμος ή σιδηρομεταλλεύματα ανάλογα με τις συνθήκες του βυθού στην εκάστοτε περιοχή, για την προστασία της αποσάθρωσης του εδάφους.

Ο συγκεκριμένος τύπος κατασκευής είναι λιγότερο δαπανηρός καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι λιγότερο εξαρτημένα από υψηλή αστάθεια των τιμών τους. Επιπλέον το σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον είναι ανθεκτικό στο θαλάσσιο περιβάλλον έτσι έχουμε χαμηλότερο κόστος και στη συντήρηση της κατασκευής αλλά και στο χρόνο ζωής της.

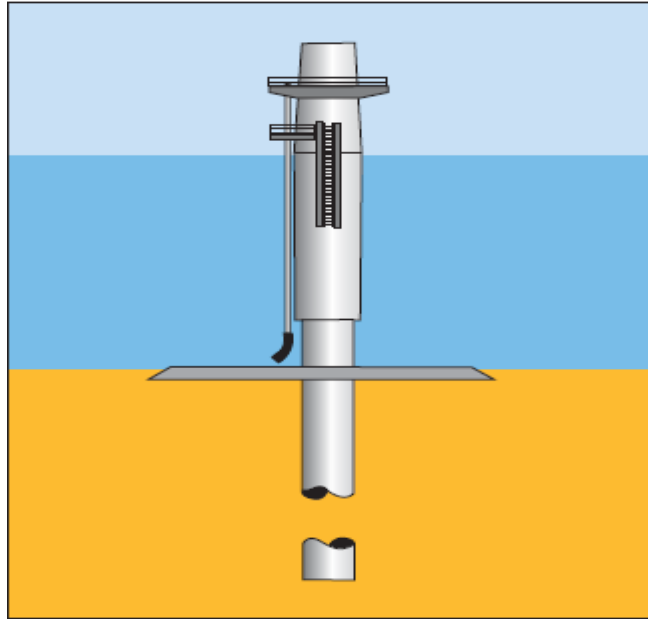
Μέχρι σήμερα η βάση στήριξης των GBS είναι κυλινδρικού ή κωνικού σχήματος. Οι διαστάσεις και το βάρος της κατασκευής αυξάνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του βάθους και της ικανότητας (παραγωγής) της ανεμογεννήτριας. Έτσι το κόστος της κατασκευής είναι ανάλογο του τετραγώνου του βάθους της εγκατάστασης.

Υπάρχουν σχέδια για πλατφόρμες CGF (Concrete Gravity Foundation) τα οποία αφορούν βάθος άνω των 100m και διάρκεια ζωής της κατασκευής ως και 100 χρόνια. Κάτι που ίσως αλλάξει τις ισορροπίες στις πλατφόρμες σταθερής έδρασης που μονοπωλούνται από τις Monopile.

– *Monopile*

Μία monopile κατασκευή αποτελείται από ένα ενιαίο κυλινδρικό χάλυβα ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο βυθό της θάλασσας. Το πόσο εκτείνεται η κατασκευή μέσα στο βυθό καθώς και η διάμετρος της προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από την ονομαστική ικανότητα των ανεμογεννητριών. Η δομή στήριξης είναι σχετικά απλή και επιτυγχάνεται είτε άμεσα είτε μέσω ενός τεμαχίου μετάβασης. Επίσης το βάθος διείδυσης είναι ρυθμιζόμενο ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες του βυθού της θάλασσας. Μία τυπική πλατφόρμα Monopile φαίνεται στην Εικόνα 1.4.4.^{[11][17]}

Ένα μειονέκτημα της κατασκευής είναι ότι καθίσταται λιγότερο σταθερή σε βαθύτερα νερά. Αυτό παρατηρείται λόγω των υψηλών υδροδυναμικών φορτίων που δημιουργούνται γύρω από τον σωλήνα στήριξης της κατασκευής τα οποία προκαλούν κραδασμούς, πλευρικά φορτία, ροπές κάμψης στην κατασκευή καθώς και αξονικά φορτία στο σημείο μετάβασης. Έτσι επηρεάζεται η διάμετρος της κατασκευής η οποία δεν ξεπερνάει τα 6m και κατ' επέκταση το βάθος εγκατάστασης που περιορίζεται στα 30m.



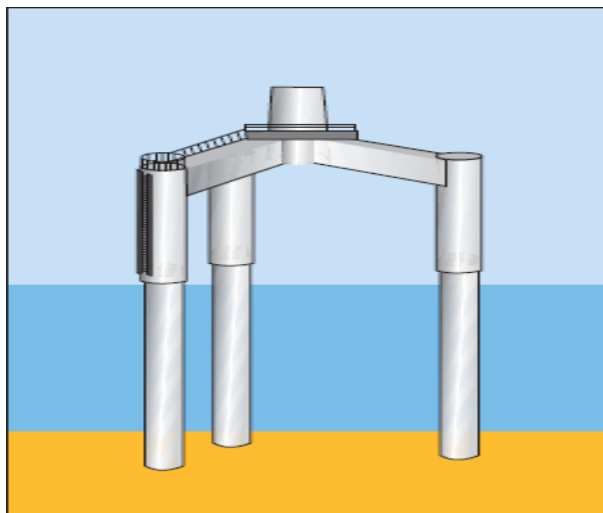
Εικόνα 1.4.4: Monopile

Όμως λόγω της απλότητας στο σχεδιασμό, στην παραγωγή και την εύκολη μεταφορά της στο σημείο εγκατάστασης, καθώς και το ότι η τεχνική εγκατάστασης είναι γνωστή και χρησιμοποιείται ευρέως από τον κλάδο των κατασκευών οι πλατφόρμες έδρασης τύπου monopile είναι οι πλέον διαδεδομένες. Εάν κάποιος βρεθεί τυχαία σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο υπάρχει πιθανότητα 70% μια ανεμογεννήτρια να εδράζεται σε monopile.

– *Tripile*

Η tripile αποτελεί βελτιωμένη εξέλιξη της monopile καθώς βασίζεται στην ίδια αρχή όμως κατασκευάζεται από τρεις πυλώνες για αυξημένη σταθερότητα. Σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε από τη γερμανική εταιρεία κατασκευής ανεμογεννητριών Bard η οποία αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς τόσο στις δομές υποστήριξης όσο και στην παραγωγή ανεμογεννητριών. Η πρώτη εγκατάσταση έγινε το 2008.^{[11][18]}

Η δομή της αποτελείται από τρία πόδια Jacked στο κάτω τμήμα της συνδεδεμένα με ένα monopile στο άνω μέρος, όλα κατασκευασμένα από κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες. Το πλάτος της βάσης και το βάθος διείσδυσης προσαρμόζονται ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες της εγκατάστασης. Μία τυπική πλατφόρμα Tripile φαίνεται στην Εικόνα 1.4.5.



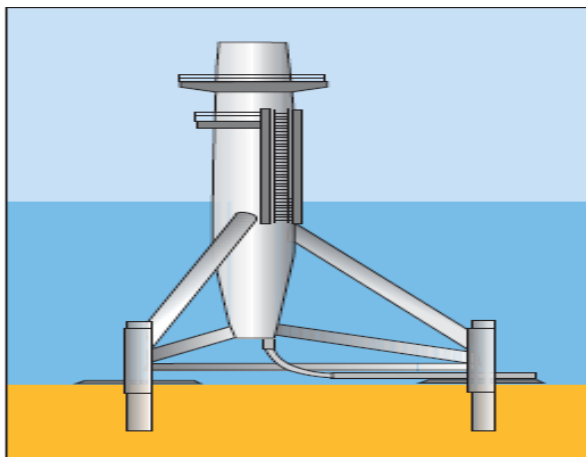
Εικόνα 1.4.5: Tripile

Οι πάσσαλοι τοποθετούνται μέσα στο βυθό της θάλασσας με τη βοήθεια ενός ειδικού πλαισίου οδηγήσεως. Στη συνέχεια, αυτά ενώνονται μαζί από το τεμάχιο μετάβασης το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή και στο κέντρο του τοποθετείται μια φλάντζα σύνδεσης για την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας. Οι πάσσαλοι και το τεμάχιο μετάβασης συνδέονται μόνιμα. Το μήκος των πασσάλων είναι ανάλογο του βάθους ενώ η κατασκευή φτάνει σε βάθος νερού μέχρι 40m.

Πρόκληση αποτελεί η ακριβής τοποθέτηση των τριών πασσάλων. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια του Global Positioning System (GPS) έτσι οι πάσσαλοι σφυρηλατούνται ένας προς έναν στο βυθό με υδραυλικά σφυριά. Η διαφορά τους με τα monopile είναι πως ένα μεγάλο τμήμα του τεμαχίου μετάβασης βρίσκεται πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας έτσι με τον τρόπο αυτό έχουμε εύκολη πρόσβαση άρα και ευκολία στη συντήρηση της κατασκευής.

– *Tripod*

Το Tripod είναι ένα τυπικό τρίποδο κατασκευασμένο από κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες. Αποτελείται από τρία πόδια χάλυβα τα οποία ενώνονται σε μία κεντρική άτρακτο που είναι συνδεδεμένη με την ανεμογεννήτρια. Κάτω από την κεντρική άτρακτο υπάρχει ένα χαλύβδινο πλαίσιο το οποίο μεταφέρει τις δυνάμεις από τον πύργο στα τρία πόδια. Μία τυπική πλατφόρμα Tripod φαίνεται στην Εικόνα 1.4.6.^{[11][19]}



Εικόνα 1.4.6: Tripod

Το πλάτος της βάσης καθώς και το βάθος διείδυσης ρυθμίζεται ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και του εδάφους. Οι κολώνες διείδυσης έχουν σχετικά μικρή διάμετρο η οποία δεν ξεπερνά τα 3m. Η διάμετρος όπως και στην έδραση monopile είναι εξαρτημένη με την ικανότητα του στροβίλου, τις συνθήκες των κυμάτων αλλά και το βάθος του νερού στη περιοχή.

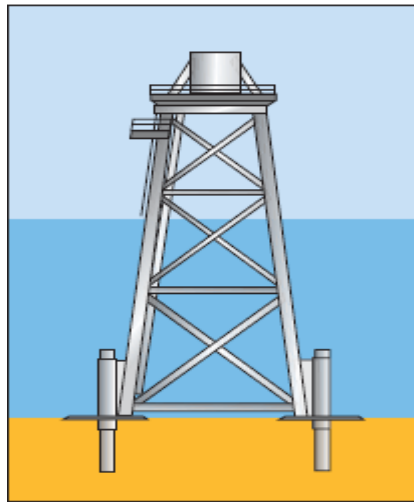
Τα tripod έχουν καλή σταθερότητα και συνολική ακαμψία. Ωστόσο δεν είναι κατάλληλα σε βάθος νερού μικρότερο των 6- 7m καθώς αυτό προκαλεί προβλήματα στα πλοία που προσεγγίζουν τη βάση της κατασκευής. Είναι κατάλληλο για περιοχές με βάθος νερού ως 50m, ακατάλληλο όμως για περιοχές με ανώμαλο βυθό και μεγάλους ογκόλιθους.

Η δομή αυτή είναι κοινή στην υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, λόγω του μικρού συνολικού βάρους της κατασκευής αλλά και της προστασίας του βυθού που γίνεται η εγκατάσταση. Ακόμα και με αυτά τα πλεονεκτήματα δεν αποτελούν μεγάλο ποσοστό ακόμη στην έδραση μιας ανεμογεννήτριας.

Σημαντικό μειονέκτημα σε όλες τις κατηγορίες έδρασης όπου χρησιμοποιούνται υδραυλικά σφυριά είναι ο θόρυβος κατά την διάρκεια εγκατάστασης. Αυτό λόγω των ανησυχιών για την υγεία των ψαριών, των θαλάσσιων θηλαστικών και γενικά της θαλάσσιας ζωής που βρίσκεται στην περιοχή. Η Ευρώπη πρόκειται να θέσει περιορισμούς κατά την διάρκεια της τοποθέτησης για να μετριάσει το θόρυβο.

– *Jacket*

Η έδραση μιας ανεμογεννήτριας σε δομή τύπου Jacket εξετάστηκε όταν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έπρεπε να εγκατασταθούν σε βαθύτερα νερά. Αυτό επιτευχθεί με το πρόγραμμα της Beatrice που ολοκληρώθηκε το 2007 φτάνοντας στα 45m βάθος. Φυσικά η δομή αυτού του τύπου ήταν ευρέως γνωστή στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου με κατασκευές που φτάνουν ακόμη και τα 100m. Μία τυπική πλατφόρμα Jacket φαίνεται στην Εικόνα 1.4.7.^{[11][20]}



Εικόνα 1.4.7: *Jacket*

Το κύριο τμήμα της δομής αποτελείται από τρία ή τέσσερα κύρια σκέλη που συνδέονται μεταξύ τους με κυλινδρικές αρθρώσεις. Η μεγάλη βάση της δομής προσφέρει μεγάλη αντίσταση στην ανατροπή. Οι αρθρώσεις είναι σχήματος τύπου «X», «K» ή «Y». Λόγο του ότι η σύνδεση γίνεται με συγκόλληση απαιτούνται πολλές εργατοώρες και επιπλέον η συγκόλληση αποτελεί το αδύνατο σημείο στην κατασκευή από την άποψη της κόπωσης που παρατηρείται σε αυτά τα σημεία. Λύση αποτελεί η χύτευση του κόμβου αυτού ωστόσο λόγω του όγκου του η παραγωγή γίνεται ακόμα πιο δύσκολη.

Η σύνδεση όπως και στους άλλους τύπους έδρασης με την ανεμογεννήτρια γίνεται μέσω ενός κομματιού μετάβασης, το οποίο σκοπό έχει τη μεταφορά των φορτίων από την ανεμογεννήτρια στο βυθό. Στη κατασκευή τύπου Jacket υπάρχουν ακόμη πλατφόρμα εργασίας, σύστημα πρόσβασης και σύστημα αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Η εγκατάσταση μέχρι σήμερα γίνεται με δύο τρόπους : το "post-piling" και το "pre-pilling". Κατά τη διάρκεια του "pre-pilling" οι πάσσαλοι σφυρηλατούνται στο βυθό και στη συνέχεια η κατασκευή τοποθετείται πάνω σε αυτούς. Ενώ κατά τη διάρκεια του "post-piling" η εγκατάσταση των πασσάλων γίνεται μέσω μανικιών που βρίσκονται στα πόδια της δομής, όταν τα μανίκια τοποθετηθούν στη πλατφόρμα λάσπη και πέτρες μεταφέρουν τα φορτία από τη δομή στο βυθό ενεργώντας ως θεμέλιο στήριξης.

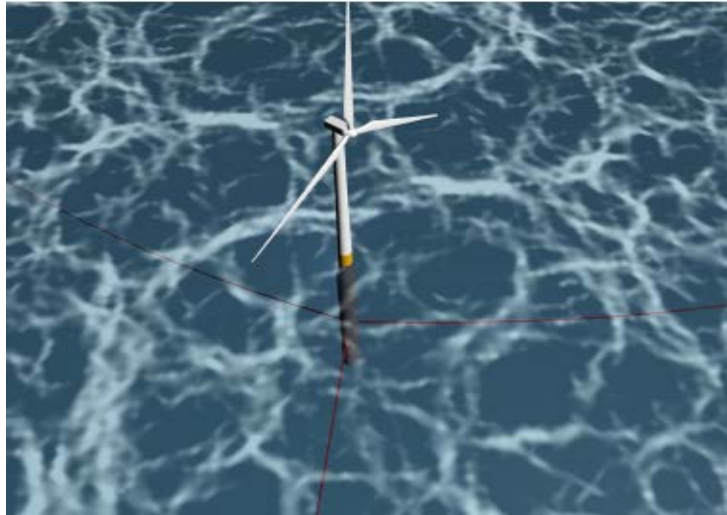
Πλεονεκτήματα μίας δομής Jacket είναι: τα χαμηλά κυματικά φορτία σε σχέση με τις monopile και η τεχνογνωσία κατασκευής είναι ευρέως γνωστή από τις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αντιθέτως το υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης καθώς και το υψηλό κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης αποτελούν τον αντίποδα στις κατασκευές αυτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αυξημένο κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης σε σύγκριση με μια δομή τύπου Tripod αντισταθμίζεται από μια σημαντικά μικρότερη μάζα για τα ίδια χαρακτηριστικά δυσκαμψίας καθώς και ότι με αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής έχουν τη δυνατότητα να μειωθεί περαιτέρω το κόστος.

1.4.2 Πλωτές πλατφόρμες

– Spar

Η πλωτή πλατφόρμα τύπου Spar αποτελείται από ένα κατακόρυφο κύλινδρο μεγάλης διαμέτρου. Ο κύλινδρος σταθμίζεται στον πυθμένα σε ένα θάλαμο γεμάτο με υλικό μεγαλύτερης πυκνότητας από το νερό ώστε να χαμηλώσει το κέντρο βάρους της κατασκευής για περισσότερη σταθερότητα. Λόγο μεγάλης ποσότητας αέρα που βρίσκεται στην κορυφή της κατασκευής σε συνδυασμό με το έρμα στο κάτω μέρος η κατασκευή παραμένει όρθια. Η αγκύρωση της κατασκευής γίνεται μέσω αλυσίδων. Μία πλωτή πλατφόρμα Spar φαίνεται στην Εικόνα 1.4.8.^{[11][21]}

Οι πλωτές πλατφόρμες ήρθαν στο προσκήνιο λόγω της ανάγκης για την κάλυψη μεγαλύτερης έκτασης για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Αυτό δίνει την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε την ικανότητα των πλωτών πλατφόρμων να εγκατασταθούν σε μεγαλύτερο βάθος. Η πρώτη ανεμογεννήτρια εδρασμένη σε πλωτή πλατφόρμα κανονικής κλίμακας ήταν τύπου Spar και ονομάζεται Hywind.



Εικόνα 1.4.8:Spar

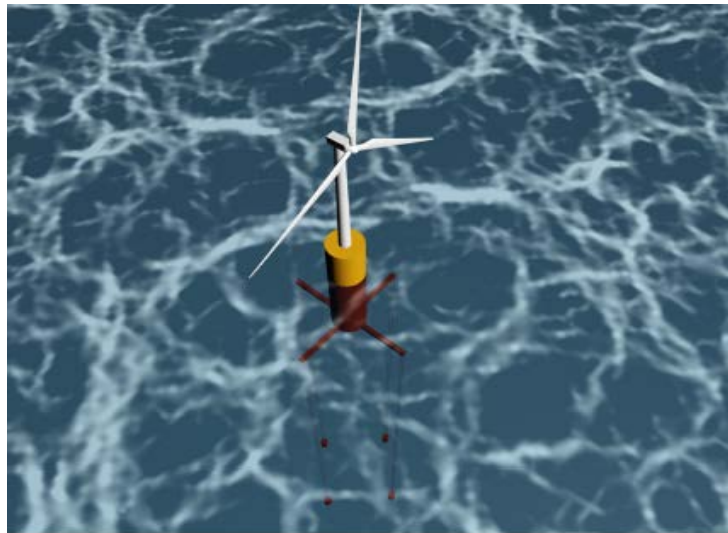
Ο σωλήνας φθάνει τα 100m και έχει διάμετρο 8,3m. Είναι κατασκευασμένη από 1.500 τόνους χάλυβα ενώ το συνολικό βάρος της κατασκευής μαζί με το έρμα και την ανεμογεννήτρια φτάνει τους 5.300 τόνους. Η όλη κατασκευή γέρνει ελαφρώς με την παρουσία κυματισμών και ανέμων, αυτό επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας και αποτελεί μειονέκτημα σε όλες τις πλωτές πλατφόρμες. Στη Hywind το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίστηκε καθώς οι ανεμογεννήτρια σχεδιάστηκε για μία σταθερή βάση και μία γωνία όχι μεγαλύτερη των 0.5 μοιρών στον κατακόρυφο άξονα.

Το πλεονέκτημα στις πλωτές πλατφόρμες τύπου Spar σε σύγκριση με τους άλλους τύπους είναι η μικρή διατομή στην επιφάνεια της κατασκευής. Έτσι επιτυγχάνεται λιγότερη ευαισθησία άρα και σταθερότητα στους κυματισμούς.

– *Tension-leg platform (TLP)*

Οι πλωτές πλατφόρμες TLP έχουν σαν αρχή την δημιουργία μίας υποβρύχιας πλατφόρμας με άνωση αντί της μεγάλης ποσότητας έρματος που χρησιμοποιείται στις Spar. Η πλευστότητα υπερβαίνει το βάρος της πλατφόρμας και ως εκ τούτου προκαλεί προένταση στα κατακόρυφα καλώδια τα οποία διατηρούν την πλατφόρμα στην τοποθεσία εγκατάστασης. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του σχεδιασμού της πρόσδεσης της πλατφόρμας είναι ότι έχουν σχετικά υψηλή αξονική δυσκαμψία έτσι ώστε το σύνολο της κατακόρυφης κίνησης να θεωρείται μηδενικό. Μία πλωτή πλατφόρμα TLP φαίνεται στην Εικόνα 1.4.9.^[11]

Στα αρχικά υπεράκτια αιολικά πάρκα οι κατασκευές κόστιζαν περισσότερο από την παραγόμενη συνολική ενέργεια, λόγω της έλλειψης τεχνογνωσίας από τους κατασκευαστές. Σε αντίθεση οι πλωτές πλατφόρμες TLP έχουν το ένα τρίτο του επιπλέον κόστους ενώ έρευνες εκτιμούν πως μπορούν να λειτουργήσουν από 30- 200m υποστηρίζοντας ανεμογεννήτριες μέχρι 5 MW.



Εικόνα 1.4.9: TLP

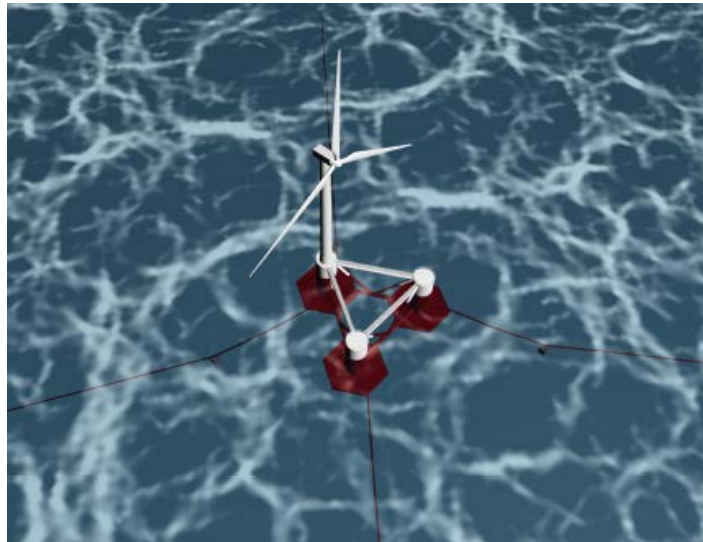
Ερευνητές υποστηρίζουν πως αν τοποθετηθούν αποσβεστήρες στις κατασκευές μπορούν να μειώσουν την κίνηση σε περίπτωση φυσικής καταστροφής. Οι TLP επίσης έχουν το πλεονέκτημα της συναρμολόγησης στη ξηρά καθώς και ότι μπορούν να μετακινηθούν αν κριθεί αναγκαίο από το σημείο εγκατάστασης.

Σε πραγματική χρήση TLP πλατφόρμα είχε εγκατασταθεί από την εταιρεία Blue H υπό κλίμακα 3:4 ανοικτά των ακτών της Ιταλίας το 2008, σε βάθος 113m παραγωγής 80kW για συλλογή δεδομένων. Η πλατφόρμα αποπλίστηκε στις αρχές του 2009. Η εταιρία σκοπεύει να δημιουργήσει ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο χρησιμοποιώντας πλωτές πλατφόρμες TLP στις ακτές της Ιταλίας παραγωγής 90 MW ενώ αναμένεται η έγκριση της τελικής άδειας.

– *Semi-submersible*

Μία semi-submersible κατασκευή είναι ένα εξειδικευμένο θαλάσσιο σκάφος που χρησιμοποιείται σε μια σειρά από υπεράκτιους ρόλους, όπως υπεράκτιες εξέδρες γεώτρησης, σκάφη ασφαλείας, πλατφόρμες παραγωγής πετρελαίου και

φυσικού αερίου και τέλος ως γερανοί βαρέων φορτίων. Σαν κατασκευή έχει καλά χαρακτηριστικά σταθερότητας και δυναμικής συμπεριφοράς. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κέντρο βάρους της κατασκευής που βρίσκεται αρκετά κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Παρά το γεγονός αυτό δεν χρησιμοποιείται σαν πλωτή πλατφόρμα για παραγωγή αιολικής ενέργειας ακόμη. Μία πλωτή πλατφόρμα semi-submersible φαίνεται στην Εικόνα 1.4.10.^[11]



Εικόνα 1.4.10: Semi-submersible

Πλεονέκτημα επίσης αποτελεί η ευκολία εγκατάστασης, καθώς το «σκάφος» μπορεί να πλεύσει σε οποιοδήποτε λιμάνι και σε ρηχά νερά χωρίς προβλήματα. Αυτό επιτρέπει την πλήρη συναρμολόγηση στο λιμάνι και κατ' επέκταση την μείωση του κόστους σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους έδρασης μίας ανεμογεννήτριας που γίνονται στο σημείο εγκατάστασης. Αυτό όμως μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά την μεταφορά στο σημείο εγκατάστασης λόγω της μεγάλης επιφάνειας που καθιστά την κατασκευή πολύ δεκτικοί σε υδροδυναμικά φορτία και μεγάλα φορτία λόγω ροπών που προκαλούνται από την ένταση του ανέμου.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Αρχές και μέθοδοι σχεδίασης πλωτών κατασκευών

Η πλειονότητα των πλωτών κατασκευών, και ιδιαίτερα οι διάφορες μορφές και τα είδη που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σύνθετες κατασκευές με αποτέλεσμα η διαστασιολόγησή τους, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης της κατασκευής, να εμπεριέχει αρκετές δυσκολίες.^{[22][23]}

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

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

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

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

- Προσδιορισμός των περιβαλλοντολογικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης και λειτουργίας
- Προσδιορισμός των φορτίων που επάγονται στην κατασκευή από το περιβάλλον και της απόκρισής της σε αυτά
- Εκλογή και εφαρμογή μεθόδου για στατική και δυναμική αντοχή της κατασκευής
- Εκλογή των κριτηρίων σχεδίασης
- Εκλογή υλικού
- Λεπτομερής κατασκευαστική σχεδίαση που θα περιλαμβάνει και τη διαδικασία παραγωγής
- Καθορισμός των απαιτήσεων συντήρησης και ελέγχου

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

2.2 Περιγραφή των συνθηκών του περιβάλλοντος

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.

2.2.1 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 10m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1hr

α, β : σταθερές που δίνονται στον πίνακα 2.1.1. Μ' αυτές λαμβάνονται υπόψη αποκλίσεις που προκύπτουν στη μέση τιμή όταν ο μέσος χρόνος μέτρησης δεν συμπίπτει με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της \bar{V}_{1hr10} .

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

Πίνακας 2.1.1: Συντελεστές α, β της σχέσης (2.2.2)

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

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

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

S: πυκνότητα φάσματος (m^2 / Hz), f: συχνότητα (Hz)

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

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

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

2.2.2 Θαλάσσια ρεύματα

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

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

Και

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

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

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

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.

2.2.3 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 ενέργειας 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

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

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

p: η πίεση

μ : συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας

ρ : η πυκνότητα και

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

- Η εξίσωση συνέχειας:

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

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:

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

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

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

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

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 Φ . 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

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

προκύπτει

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

για $z=\zeta(x,y,t)$

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

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

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

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

(2.2.18)

για $z=\zeta(x,y,t)$

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

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

για $z=\zeta(x,y,t)$

Παρατηρήσεις:

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

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

Σειρές για το δυναμικό:

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

Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

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

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 $z=0$ που αντιστοιχεί στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού, θεωρώντας ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\zeta(x,y;t)$ είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος.

Έτσι έχουμε :

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

Και τις παραγώγους:

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

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

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

Με τον τρόπο αυτό:

- Λαμβάνουμε υπόψη μας κατά τη διατύπωση των οριακών συνθηκών τη μη γραμμικότητα
- Εμφανιζόμενα μεγέθη υπολογίζονται στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού.

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

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

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

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

Πρόβλημα 1^{ης} τάξης ($n=1$)

Κινηματική συνθήκη

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

Δυναμική συνθήκη

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

Πρόβλημα 2^{ης} τάξης ($n=2$)

Κινηματική συνθήκη

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

Δυναμική συνθήκη

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

για $z=0$

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

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

και

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

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

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

τις οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια 2.2.32 και 2.2.33

τη συνθήκη στον πυθμένα 2.2.14 καθώς και

την εξίσωση του Laplace 2.2.12

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

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

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

Γραμμική θεωρία- απλά αρμονικά κύματα

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σαν λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις εξισώσεις 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:

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

Όπου:

- k : ο αριθμός κύματος που ισούται με $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- λ : το μήκος κύματος
- ω : η κυκλική συχνότητα του κύματος που συνδυάζεται με τον αριθμό κύματος k μέσω της σχέσης $\omega^2 = kg \tanh(kd)$
- d : το βάθος του νερού
- θ : η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση προχώρησης του μετώπου κυματισμού με τον άξονα x .

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Φορτίσεις πλωτών κατασκευών

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:
 - ο Άνεμος
 - ο Θαλάσσια ρεύματα
 - ο Θαλάσσιοι κυματισμοί
 - ο Σεισμοί
 - Έμμεση δράση:
 - ο Δυνάμεις αγκυρώσεων
 - ο Δυνάμεις λόγω κινήσεων της κατασκευής
 - ο 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.

2.3.1 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^{ης} τάξης, σαν λύση του γραμμικού προβλήματος και σε δυνάμεις 2^{ης} και ανώτερης τάξης όταν λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικοί όροι του προβλήματος (πχ. υπολογισμός αγκυρώσεων).

2.3.2 Επίδραση δυνάμεων αναφορικά με το είδος της κατασκευής

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

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

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

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

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

όπου

D : η διάμετρος του κυλίνδρου

d : το βάθος του νερού

ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H : το ύψος του κύματος

λ : το μήκος του κύματος

μ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού.

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

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

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

ισούται με τον λόγο του αριθμού Froude προς τον αριθμό Reynolds.

Ο αριθμός Froude προσδιορίζεται ως:

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

Ο αριθμός Reynolds προσδιορίζεται ως:

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

Διαιρώντας μεταξύ τους, τους συντελεστές:

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

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

Αντικαθιστώντας την τιμή της ταχύτητας μετατόπισης c του απλού αρμονικού κύματος, $c = \sqrt{\frac{g \tanh(kd)}{k}}$ στην έκφραση για τον αριθμό Froude, προκύπτει:

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

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

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

Παρατήρηση:

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

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

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

Τα φαινόμενα βαρύτητας αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για μεγάλες τιμές της διαμέτρου D , ή για μικρές τιμές του βάθους του νερού d , ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ .

Οι οριακές τιμές των παραμέτρων kd ή αντίστοιχα και $\frac{d}{D}$, πέρα από τις οποίες θα λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα της παραμόρφωσης της ροής θα αναφερθούν στη συνέχεια. Η δε θεωρητική τους κάλυψη απαιτεί προσδιορισμό του πεδίου ροής στα πλαίσια της θεωρίας δυναμικού.

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

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

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

όπου

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

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

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

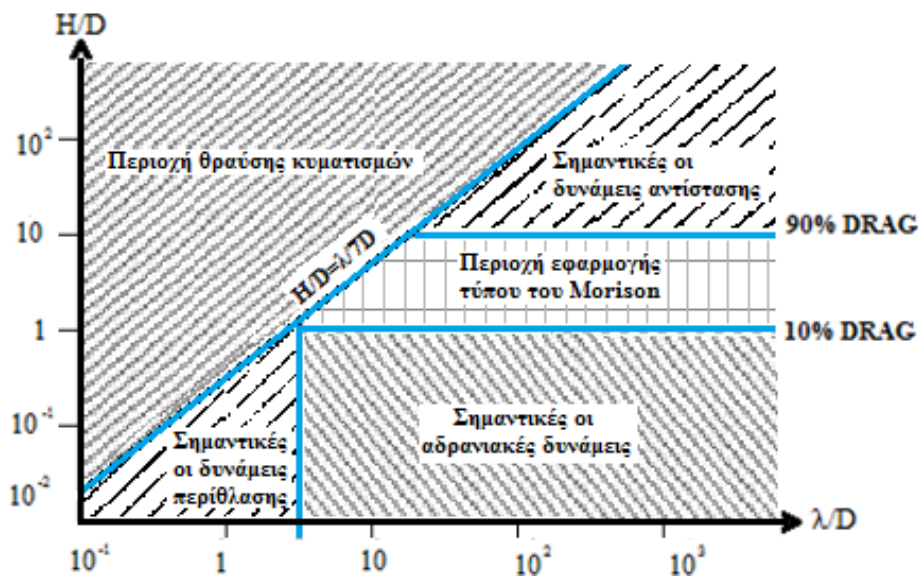
Αν θελήσουμε να εισάγουμε και την τραχύτητα k του κυλίνδρου, φθάνουμε σε άλλη συναρτησιακή σχέση που είναι απαραίτητη για μη λείους κυλίνδρους:

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

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

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

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



Εικόνα 2.3.1: 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» .

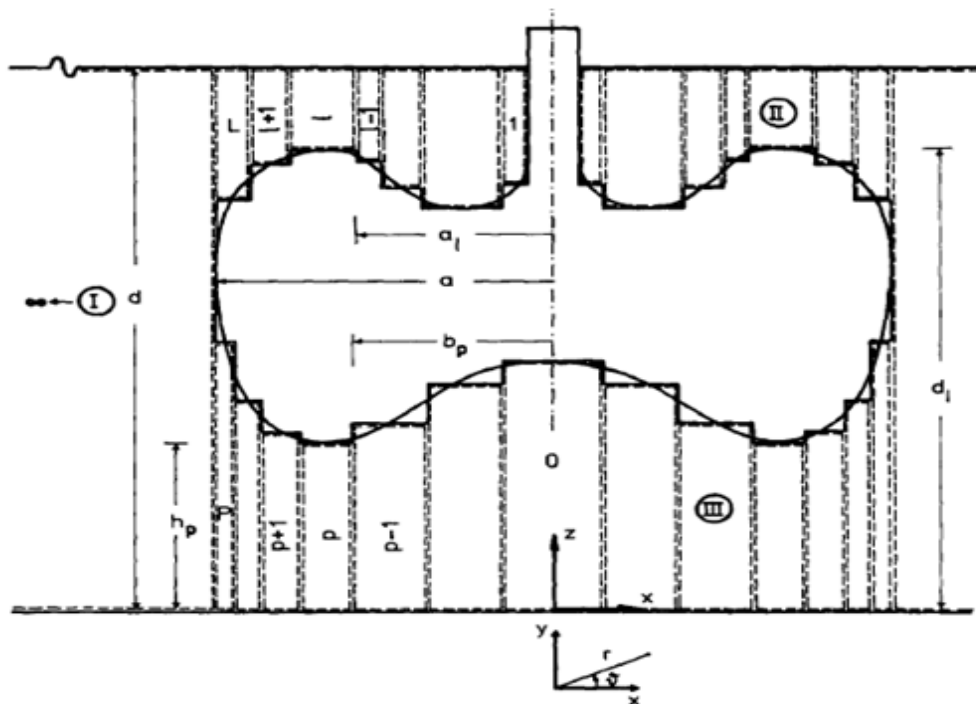
2.4 Ανάλυση των φορτίσεων από κυματισμούς σε σύνθετα

σώματα

2.4.1 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.^{[24][25]}

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 2.4.1.



Εικόνα 2.4.1: 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, Εικόνα 2.4.1. 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 2.4.1. Για αυτόν τον τύπο κατασκευής επιλέγεται κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (r, θ, Z) και στην περίπτωση μας ορίζεται η αρχή των αξόνων του στον πυθμένα της θάλασσας. Το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο και μη συνεκτικό. Το πεπερασμένο βάθος νερού, d , είναι σταθερό και η ελεύθερη επιφάνεια είναι άπειρη σε όλες τις κατευθύνσεις. Οι κινήσεις του σώματος και του ρευστού θεωρούνται μικρές, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη τα γραμμικοποιημένα προβλήματα οριακών τιμών για την περίθλαση και την ακτινοβολία. Με την παραδοχή συμμετρικής κατανομής μάζας, στο κατακόρυφο σώμα επιδρούν αρμονικά κύματα τριών βαθμών ελευθερίας κίνησης κατά το επίπεδο διάδοσης των κυμάτων, δηλαδή, έχουμε δύο μετατοπίσεις (surge x_1 , heave x_3) και μία περιστροφή (pitch x_5). Το πρώτης τάξης ολικό δυναμικό ταχύτητας για σταθερή κατάσταση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

(2.4.1)

Όπου:

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

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

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

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

Το πρόβλημα περίθλασης είναι εκφρασμένο από το δυναμικό ταχύτητας:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

και

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

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

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

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

Θεωρώντας τώρα την επιμέρους γεωμετρία της πραγματικής, «ιδεατής» αξονοσυμμετρικής κατασκευής Εικόνα 2.4.1 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 $P = 0,1,\dots,P(b_0 = 0, a_{L+1} = b_{P+1} = a)$:

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

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

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

- Κατακόρυφες οριακές συνθήκες:

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

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

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

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 $\frac{\partial \phi_j}{\partial r}$ ($j= D, 1,3,5$), πρέπει να είναι συνεχείς στα κατακόρυφα όρια των γειτονικών μακροστοιχείων, Εικόνα 2.4.1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

όπου

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

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

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

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

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

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

όπου:

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

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

και 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 $k=1,3$

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

και

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

Σε αυτές τις εξισώσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί οι ακόλουθοι ορισμοί:

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

και

$$j = 1, 3, 5$$

για $S = 0, 1, 2, \dots, P$ ή

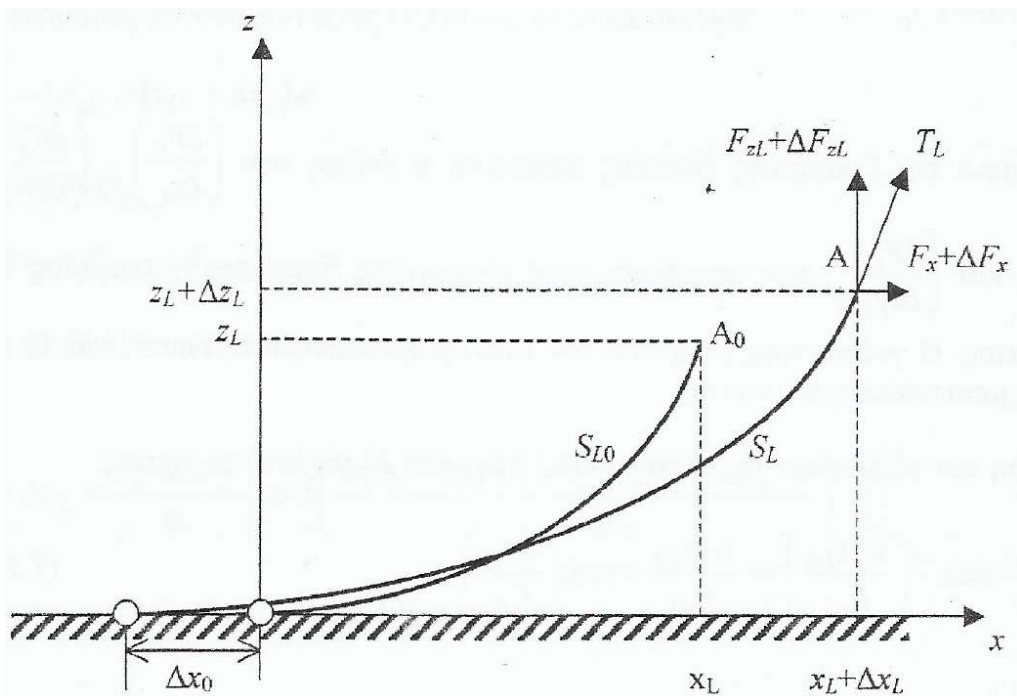
$$S = 1, 2, \dots, L$$

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

2.5 Συμβατικός κλάδος αγκύρωσης μηδενικής γωνίας στον πυθμένα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η συμπεριφορά της γραμμής αγκύρωσης στη περίπτωση μικρής απομάκρυνσης του σημείου σύνδεσης της γραμμής με την πλωτή αγκυρωμένη κατασκευή. Χάριν πληρότητας, θα αναπαραχθούν οι εξισώσεις που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα από τις σημειώσεις του μαθήματος «Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών»^[26].

Στη ανάλυση που ακολουθεί θα χρησιμοποιηθούν οι συμβολισμοί της παρακάτω εικόνας και θα θεωρηθεί δεδομένη η ισχύς των ακόλουθων υποθέσεων:



Εικόνα 2.5.1: Γραμμή αγκύρωσης με μηδενική γωνία στον πυθμένα

- Η γραμμή είναι μη ελαστική
- Υπάρχει επαρκές μήκος της γραμμής στον οριζόντιο πυθμένα, έτσι ώστε $(dz/dx)_{x=0}$ να παραμένει σε ισχύ ακόμα και στη περίπτωση απομάκρυνσης του A_0 στο A .
- Με το δείκτη θ συμβολίζονται όλα τα μεγέθη στην αρχική θέση της γραμμής, ενώ όλες οι μετατοπίσεις θεωρούνται μικρές σε μέγεθος.

Οι δυνάμεις στη νέα θέση ισορροπίας της γραμμής αναπτύσσονται σε σειρά Taylor. Επομένως:

$$F_x \cong F_{x0} + \left(\frac{\partial F_x}{\partial x_L}\right)_0 \cdot \Delta x_L + \left(\frac{\partial F_x}{\partial z_L}\right)_0 \cdot \Delta z_L + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F_x}{\partial x_L^2}\right)_0 \cdot (\Delta x_L)^2 + \left(\frac{\partial^2 F_x}{\partial x_L \partial z_L}\right)_0 \cdot \Delta x_L \cdot \Delta z_L + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F_x}{\partial z_L^2}\right)_0 \cdot (\Delta z_L)^2 + \dots \quad (2.5.1)$$

$$F_z \cong F_{z0} + \left(\frac{\partial F_z}{\partial x_L}\right)_0 \cdot \Delta x_L + \left(\frac{\partial F_z}{\partial z_L}\right)_0 \cdot \Delta z_L + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F_z}{\partial x_L^2}\right)_0 \cdot (\Delta x_L)^2 + \left(\frac{\partial^2 F_z}{\partial x_L \partial z_L}\right)_0 \cdot \Delta x_L \cdot \Delta z_L + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F_z}{\partial z_L^2}\right)_0 \cdot (\Delta z_L)^2 + \dots \quad (2.5.2)$$

Στα πλαίσια της Γραμμικής Θεωρίας απαιτείται η γνώση των $\left(\frac{\partial F_x}{\partial x_L}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F_x}{\partial z_L}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F_z}{\partial x_L}\right)_0$, $\left(\frac{\partial F_z}{\partial z_L}\right)_0$, που αποτελούν τους γραμμικούς συντελεστές ακαμψίας του συστήματος. Η γνώση τους επιτρέπει τον υπολογισμό των δυνάμεων F_x , F_z , για γνωστές μετατοπίσεις Δx_L , Δz_L .

Με χρήση των εξισώσεων της αλυσοειδούς στη θέση A_0 ισχύουν οι σχέσεις:

$$x_L = \frac{F_{x0}}{w} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{w \cdot s_{L0}}{F_{x0}} \right) \Rightarrow \frac{w \cdot s_{L0}}{F_{x0}} = \sinh \left(\frac{w \cdot x_L}{F_{x0}} \right) \quad (2.5.3)$$

$$z_L = \frac{F_{x0}}{w} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{w \cdot s_{L0}}{F_{x0}} \right)^2} - 1 \right\} \quad (2.5.4)$$

$$F_{zL} = w \cdot s_{L0} \quad (2.5.5)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις 2.5.3 και 2.5.4 λαμβάνουμε:

$$z_L = \frac{F_{x0}}{w} \cdot \left\{ \cosh \left(\frac{w \cdot x_L}{F_{x0}} \right) - 1 \right\} \quad (2.5.6)$$

ενώ αντίστοιχα από τις 2.5.3 και 2.5.5

$$F_{zL} = F_{x0} \cdot \sinh \left(\frac{w \cdot x_L}{F_{x0}} \right) \quad (2.5.7)$$

Στη θέση A ισχύουν:

$$z_L + \Delta z_L = \frac{F_x + \Delta F_x}{w} \cdot \left\{ \cosh\left(\frac{w \cdot (x_L + \Delta x_L + \Delta x_0)}{F_x + \Delta F_x}\right) - 1 \right\} \quad (2.5.8)$$

$$s_{L0} + \Delta s_L = \frac{F_x + \Delta F_x}{w} \cdot \sinh\left(\frac{w \cdot (x_L + \Delta x_L + \Delta x_0)}{F_x + \Delta F_x}\right) \quad (2.5.9)$$

$$F_{zL} + \Delta F_{zL} = (s_{L0} + \Delta s_L) \cdot w \quad (2.5.10)$$

Για μια ανελαστική γραμμή αγκύρωσης μπορούμε να υποθέσουμε:

$$\Delta s_L \cong \Delta x_0 \quad (2.5.11)$$

Και επομένως συνδυάζοντας τις 2.5.10 και 2.5.11 εξάγουμε:

$$F_{zL} + \Delta F_{zL} = (s_{L0} + \Delta x_0) \cdot w \quad (2.5.12)$$

ή αντίστοιχα:

$$w \cdot (\Delta x_0) = F_{zL} + \Delta F_{zL} - s_{L0} \cdot w \quad (2.5.13)$$

Από τις 2.5.8 και 2.5.13 προκύπτει:

$$z_L + \Delta z_L = \frac{F_x + \Delta F_x}{w} \cdot \left\{ \cosh\left(\frac{w \cdot (x_L + \Delta x_L) + (F_{zL} + \Delta F_{zL}) - s_{L0} \cdot w}{F_x + \Delta F_x}\right) - 1 \right\} \quad (2.5.14)$$

ενώ από τις 2.5.9, 2.5.10 και 2.5.13 προκύπτει:

$$F_{zL} + \Delta F_{zL} = (F_x + \Delta F_x) \cdot \sinh\left(\frac{w \cdot (x_L + \Delta x_L) + (F_{zL} + \Delta F_{zL}) - s_{L0} \cdot w}{F_x + \Delta F_x}\right) \quad (2.5.15)$$

Υποθέτοντας ότι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι πολύ μικρές και κατά συνέπεια και τα διαφορικά μεγέθη των δυνάμεων που προκαλούν αυτές τις μετατοπίσεις είναι επίσης πολύ μικρά, γεγονός το οποίο περιγράφεται μαθηματικά ως:

$$\Delta x_L \ll x_L, \quad \Delta F_x \ll F_x$$

$$\Delta z_L \ll z_L, \quad \Delta F_{zL} \ll F_{zL}$$

Μπορούμε να καταλήξουμε στις ακόλουθες μαθηματικές εκφράσεις:

$$z_L = \frac{F_x}{w} \cdot \left\{ \cosh\left(\frac{w \cdot (x_L) + (F_{zL}) - s_{L0} \cdot w}{F_x}\right) - 1 \right\} \quad (2.5.16)$$

$$F_{zL} = F_X \cdot \sinh \left(\frac{w \cdot (x_L) + (F_{zL}) - s_{L0} \cdot w}{F_X} \right) \quad (2.5.17)$$

Παραγωγίζοντας τώρα τις 2.5.16 και 2.5.17 ως προς x_L και z_L προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$0 = \frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial x_L} \cdot (\cosh \varepsilon - 1) + \frac{F_X}{w} \cdot \sinh \varepsilon \cdot \left(\frac{w}{F_X} + \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_Z}{\partial x_L} - \varepsilon \cdot \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial x_L} \right) \quad (2.5.18)$$

$$\frac{\partial F_Z}{\partial x_L} = \frac{\partial F_X}{\partial x_L} \cdot (\sinh \varepsilon) + F_X \cdot \cosh \varepsilon \cdot \left(\frac{w}{F_X} + \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_Z}{\partial x_L} - \varepsilon \cdot \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial x_L} \right) \quad (2.5.19)$$

$$1 = \frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial z_L} \cdot (\cosh \varepsilon - 1) + \frac{F_X}{w} \cdot \sinh \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_{zL}}{\partial z_L} - \varepsilon \cdot \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial z_L} \right) \quad (2.5.20)$$

$$\frac{\partial F_{zL}}{\partial z_L} = \frac{\partial F_X}{\partial z_L} \cdot (\sinh \varepsilon) + F_X \cdot \cosh \varepsilon \cdot \left(\frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_{zL}}{\partial z_L} - \varepsilon \cdot \frac{1}{F_X} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial z_L} \right) \quad (2.5.21)$$

$$\text{Οπου: } \varepsilon = \frac{w \cdot (x_L) + (F_{zL}) - s_{L0} \cdot w}{F_X} \quad (2.5.22)$$

Τέλος από τις 2.5.18 ως 2.5.21 επιλύοντας ως προς $\left(\frac{\partial F_X}{\partial x_L} \right)$, $\left(\frac{\partial F_X}{\partial z_L} \right)$, $\left(\frac{\partial F_Z}{\partial x_L} \right)$, $\left(\frac{\partial F_Z}{\partial z_L} \right)$

μπορούμε να εξάγουμε τους συντελεστές επαναφοράς ως:

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial x_L} = \frac{\sinh \varepsilon}{\varepsilon \cdot \sinh \varepsilon + 2 \cdot (1 - \cosh \varepsilon)} \equiv C_{11} \quad (2.5.23\alpha)$$

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_{zL}}{\partial x_L} = \frac{(\cosh \varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot \sinh \varepsilon + 2 \cdot (1 - \cosh \varepsilon)} \equiv C_{31} \quad (2.5.23\beta)$$

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_X}{\partial z_L} = \frac{(\cosh \varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot \sinh \varepsilon + 2 \cdot (1 - \cosh \varepsilon)} \equiv C_{13} \quad (2.5.23\gamma)$$

$$\frac{1}{w} \cdot \frac{\partial F_Z}{\partial z_L} = \frac{(\varepsilon \cosh \varepsilon - \sinh \varepsilon)}{\varepsilon \cdot \sinh \varepsilon + 2 \cdot (1 - \cosh \varepsilon)} \equiv C_{33} \quad (2.5.23\delta)$$

2.6 Ανάλυση συστήματος αγκύρωσης πειραματικού μοντέλου

2.6.1 Υπόβαθρο

Η περιγραφή για το σύστημα αγκύρωσης ενός πλωτήρα Spar τύπου OC3 που θα αναλύσουμε στη παρούσα διπλωματική εργασία, με διάφορα είδη ανεμογεννήτριας δόθηκε από τον J. Jonkman (2010)^[27]. Οι προδιαγραφές του συστήματος αγκύρωσης φαίνονται στο πιο κάτω πίνακα:

Αριθμός κλάδων αγκύρωσης	3
Γωνία μεταξύ κλάδων	120°
Βάθος πρόσδεσης στον πυθμένα	320 m
Βάθος πρόσδεσης στον πλωτήρα	70.0 m
Ακτίνα αγκύρωσης στον πυθμένα από το κέντρο του πλωτήρα	853.87 m
Ακτίνα αγκύρωσης στον πλωτήρα από το κέντρο του	5.2 m
Μήκος κλάδου	902.2 m
Διάμετρος κλάδου	0.09 m
Βάρος κλάδου αγκύρωσης ανά μονάδα μήκους	77.7066 kg/m
Ισοδύναμο βάρος κλάδου αγκύρωσης στο νερό	698.094 N/m
Ισοδύναμη δυσκαμψία κλάδου αγκύρωσης	384,243,000 N
Πρόσθετη δυσκαμψία ελατηρίου στον άξονα z	98,340,000 Nm/rad

Πίνακας 2.6.1: Ιδιότητες κλάδου αγκύρωσης

Η ανάλυση που ακολουθεί έχει γίνει από τον Σ.Α. Μαυράκο, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HYDRALAB IV, 2012 (Mooring System Analysis for the Spar Buoy (SB) floating wind turbine concept applicable to the experimental campaign)^[28].

Το σύστημα αποτελείται από 3 κλάδους όπου ο κάθε ένας από αυτούς έχει μήκος 902.2m και αναδυόμενο βάρος ανά μονάδα μήκους 698.094N/m. Η ισοδύναμη δυσκαμψία του κλάδου αγκύρωσης είναι $E \cdot A$ όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Yeung και το A είναι το ισοδύναμο εμβαδόν διατομής της γραμμής (σε περίπτωση αλυσίδας αυτό είναι $2 \cdot \pi \cdot d^2/4$ όπου d η διάμετρος του καλωδίου της αλυσίδας) και είναι ίση με 384,243,00 N. Έτσι υπολογίζοντας έχουμε:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.6.1)$$

ή ισοδύναμα:

$$\frac{T}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \frac{T}{\Delta l} = \frac{E \cdot A}{l} \Rightarrow k_{\text{εκτατικό}} = \frac{E \cdot A}{l} \quad (2.6.2)$$

Όπου T είναι η τάση στη κορυφή του κλάδου, παρατηρούμε ότι η ισοδύναμη δυσκαμψία του κλάδου αγκύρωσης που δόθηκε στον Πίνακα 2.5.1 αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη δυσκαμψία σε κλάδο 1m. Το βάθος αγκύρωσης θεωρήθηκε 320m, το σημείο πρόσδεσης του κλάδου στον πλωτήρα θεωρήθηκε 70m κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια (αυτό σημαίνει πως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο σημείων πρόσδεσης είναι 250m), ενώ η γωνία μεταξύ των κλάδων αγκύρωσης είναι ίση με 120° .

Φαίνεται να υπάρχει ασυμφωνία για το βάρος του κλάδου αγκύρωσης μεταξύ των δεδομένων του κατασκευαστή και της τιμής που έχουμε στον Πίνακα 2.6.1 για αλυσίδα 90mm. Τυπικές τιμές για το βάρος του κλάδου ανά μονάδα μήκους εκτός νερού είναι περίπου 177kg/m σύμφωνα με Vryhof (2005)^[29]. Όμως, υποθέτοντας ότι η αναφερόμενη διάμετρος των 90mm αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη διάμετρο μιας αλυσίδας η οποία έχει διάμετρο τόση όση η αλυσίδα διαμέτρου d , και υπολογίζοντας σε αυτή της περίπτωση πως $d_{\text{eq}} = d \cdot \sqrt{2}$ τότε βρίσκουμε τη πραγματική διάμετρο περίπου 62mm με βάρος 85kg/m, η οποία είναι πολύ κοντά στη τιμή που μας δόθηκε στο Πίνακα 2.6.1.

Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο για τους υπολογισμούς της στατικής ανάλυσης θα θεωρηθεί το βάρος του κλάδου αγκύρωσης ανά μονάδα μήκους, w , που μας δόθηκε στο Πίνακα 2.6.1.

Για τη στατική ανάλυση του ενός κλάδου αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα STATMOOR^[30]. Το λογισμικό είναι ικανό να υπολογίσει τη στατική ανάλυση ενός εκτεταμένου κλάδου αγκύρωσης ο οποίος είναι κατασκευασμένος από διάφορα τμήματα το κάθε ένα από αυτά με διαφορετικές γεωμετρικές προδιαγραφές καθώς και με βυθισμένες σηματοδούρες κατά το μήκος του κλάδου. Στο Παράρτημα 1 υπάρχει ένα τυπικό "output" του προγράμματος αντίστοιχο με τη θέση ισορροπίας του εξεταζόμενου κλάδου αγκύρωσης. Η στατική ανάλυση

του κλάδου αγκύρωσης μπορεί να συμπληρωθεί, εάν ζητηθεί από τη δυναμική ανάλυση με την βοήθεια του λογισμικού DYNAMOUR^[32].

2.6.2 Παράθεση αποτελεσμάτων

Στη αρχή προσδιορίστηκε η θέση ισορροπίας. Σύμφωνα με τον J. Jonkam (2010) η συνολική κάθετη δύναμη που ασκείται στον πλωτήρα από τους 3 κλάδους αγκύρωσης είναι 1,607,000N, δηλαδή $V=535667N$ κάθετη δύναμη ανά κλάδο. Εφόσον είναι γνωστή η κάθετη δύναμη, το μήκος του κλάδου αγκύρωσης l_s είναι ισοδύναμο (στη περίπτωση του μη εκτατού κλάδου):

$$l_s = \frac{V}{w} = \frac{535,667N}{698.094N/m} = 767.33m \quad (2.6.3)$$

Η αντίστοιχη οριζόντια δύναμη στο σημείο πρόσδεσης του πλωτήρα είναι:

$$H = \frac{w(l_s^2 - D^2)}{2D} = 734,800N \quad (2.6.4)$$

ενώ η προβολή του μήκους του κλάδου αγκύρωσης στον οριζόντιο άξονα δίνεται:

$$x = \frac{H}{w} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{w \cdot D}{H} + 1 \right) = \frac{734,800}{698.094} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{398.094 \cdot 250}{734,800} + 1 \right) = 711.817m \quad (2.6.5)$$

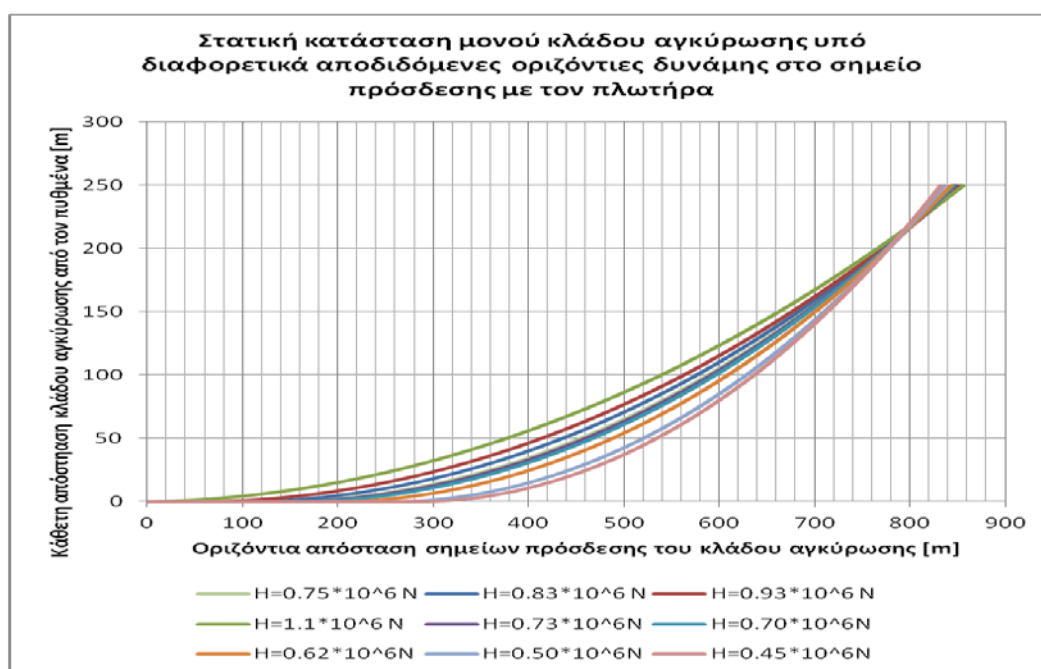
και η απόσταση από το σημείο πρόσδεσης στον πυθμένα είναι:

$$x_A = l - l_s + x = 902.2 - 763.3 + 711.8 = 846.7m \quad (2.6.6)$$

Χρησιμοποιώντας την οριζόντια δύναμη σαν είσοδο στο πρόγραμμα STATMOOR η στατική διαμόρφωση στο σημείο ισορροπίας του ενός κλάδου αγκύρωσης μπορεί να ανακτηθεί μαζί με την κάθετη συνιστώσα της δύναμης στο σημείο πρόσδεσης με τον πλωτήρα, η ισοδύναμη γωνία στο σημείο πρόσδεσης και κατά μήκος της γραμμής, καθώς και το οριζόντιο μήκος του κλάδου από το σημείο πρόσδεσης στον πυθμένα. Το εκτενές αυτό «output» παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1.

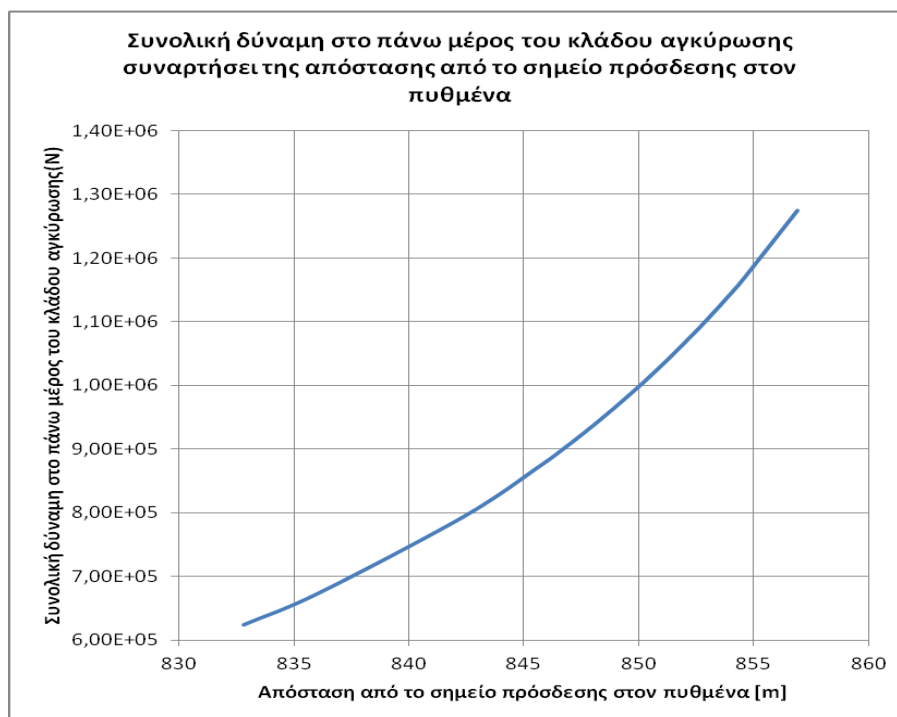
Στο Γράφημα 2.6.1, η στατική κατάσταση του ενός κλάδου αγκύρωσης απεικονίζεται για διαφορετικά αποδιδόμενες οριζόντιες δυνάμεις στο σημείο πρόσδεσης με τον πλωτήρα. Η περίπτωση της οριζόντιας δύναμης με τιμή $0.76 \cdot 10^6$ είναι πολύ κοντά στη πραγματική στατική τιμή στη θέση ισορροπίας του

κλάδου αγκύρωσης, ενώ για την μεγαλύτερη επιλεγόμενη οριζόντια δύναμη ολόκληρος ο κλάδος αγκύρωσης ανυψώνεται με μηδενική γωνία στον πυθμένα. Επίσης υπολογίστηκε ένας αριθμός από οριζόντιες δυνάμεις μικρότερης έντασης σε σχέση με αυτήν του σημείου ισορροπίας, με σκοπό να κατανοηθεί πλήρως η συμπεριφορά του κλάδου αγκύρωσης για θετικές και αρνητικές τιμές στο σημείο πρόσδεσης του πλωτήρα με έμφαση στο σημείο ισορροπίας. Από τα αποτελέσματα του Παραρτήματος 1, μπορεί να παρατηρηθεί ότι από τον υπολογισμό της ελαστικότητας του κλάδου αγκύρωσης, υπάρχει μία απόκλιση σε σχέση με τις παραπάνω τιμές στο σημείο ισορροπίας. Έτσι η απόσταση του κλάδου από το σημείο πρόσδεσης στον πλωτήρα με το σημείο πρόσδεσης στο πυθμένα στο σημείο ισορροπίας είναι 847m με ένα μέρος της αλυσίδας να ακουμπάει στον πυθμένα ίσο με 134m περίπου.



Γράφημα 2.6.1: Στατική κατάσταση μονού κλάδου αγκύρωσης

Στο Γράφημα 2.6.2, δίνεται η συνολική δύναμη στο πάνω μέρος του κλάδου αγκύρωσης συναρτήσει της απόστασης από το σημείο πρόσδεσης στον πυθμένα. Η μικρότερη τιμή του γραφήματος αναφέρεται στην τιμή $0,45 \cdot 10^6$ της οριζόντιας δύναμης, όπου το τελευταίο σημείο αναφέρεται στη θέση όπου ο κλάδος της αγκύρωσης ανυψώνεται οριακά από τον πυθμένα σχηματίζοντας μηδενικής γωνίας.



Γράφημα 2.6.2: Συνολική δύναμη στο πάνω μέρος του κλάδου αγκύρωσης

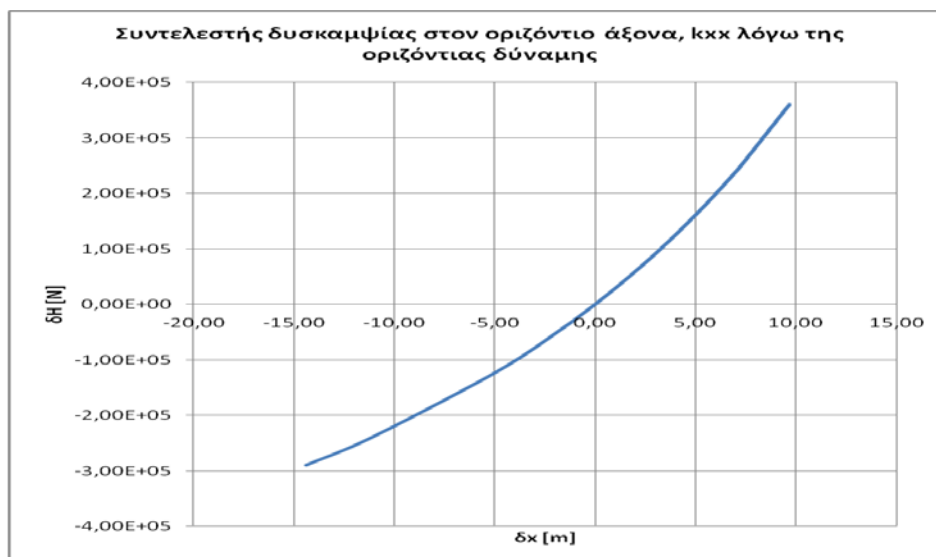
Στο Γράφημα 2.6.3, η γωνία μεταξύ του πάνω τμήματος του κλάδου και της οριζόντια δύναμης συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από το σημείο πρόσδεσης του πλωτήρα με τον πυθμένα. Η μικρότερη οριζόντια απόσταση (excursion) από το σημείο πρόσδεσης του πλωτήρα με τον πυθμένα έχει τιμή οριζόντιας δύναμης ίση με $0.45 \cdot 10^6$, ενώ η μεγαλύτερη τιμή είναι στο σημείο οριακής ανύψωσης στον πυθμένα. Είναι δεδομένο πως όσο μικρότερη είναι η οριζόντια δύναμη στο πάνω σημείο του κλάδου αγκύρωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζεται σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα.

Στο Γράφημα 2.6.4, δίνεται ο συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα, k_{xx} . Αντιπροσωπεύει την αύξηση της οριζόντιας δύναμης στο πάνω μέρος του κλάδου αγκύρωσης εξαιτίας της οριζόντιας απόστασης του σημείου πρόσδεσης με τον πλωτήρα με έμφαση στην αρχική θέση ισορροπίας. Το τελευταίο σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο $(\delta H, \delta \chi) = (0N, 0m)$. Λήφθηκαν υπόψη οι θετικές καθώς και οι αρνητικές μετατοπίσεις του κλάδου αγκύρωσης στο σημείο πρόσδεσης με τον πλωτήρα με έμφαση στο σημείο ισορροπίας.

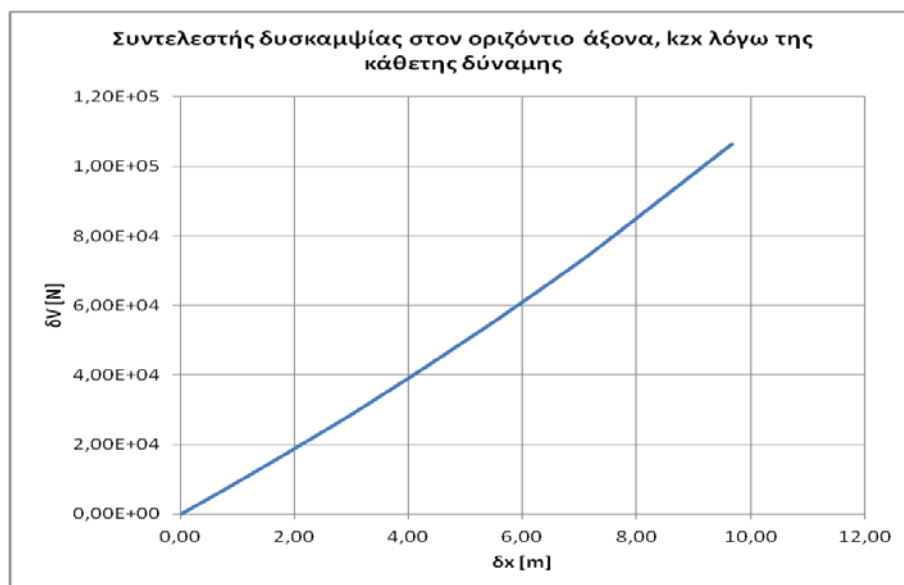


Γράφημα 2.6.3: Γωνία μεταξύ του πάνω τμήματος του κλάδου αγκύρωσης

Στο Γράφημα 2.6.5, δίνεται ο συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα, k_{zx} . Αντιπροσωπεύει την αύξηση της κάθετης δύναμης στο πάνω μέρος του κλάδου αγκύρωσης εξαιτίας της οριζόντιας απόστασης του σημείου πρόσδεσης με τον πλωτήρα με έμφαση στην αρχική θέση ισορροπίας. Το τελευταίο σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο $(\delta V, \delta \chi) = (0N, 0m)$.



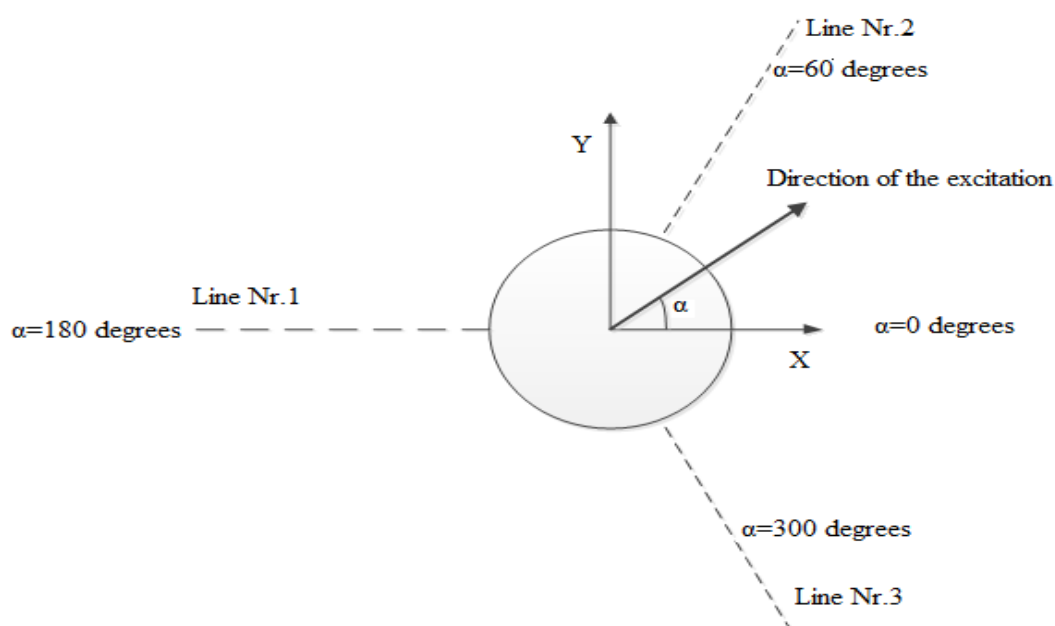
Γράφημα 2.6.4: Συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα λόγω της οριζόντιας δύναμης



Γράφημα 2.6.5: Συντελεστής δυσκαμψίας στον οριζόντιο άξονα λόγω της κάθετης δύναμης

2.6.3 Ανάλυση πολλαπλών κλάδων αγκύρωσης

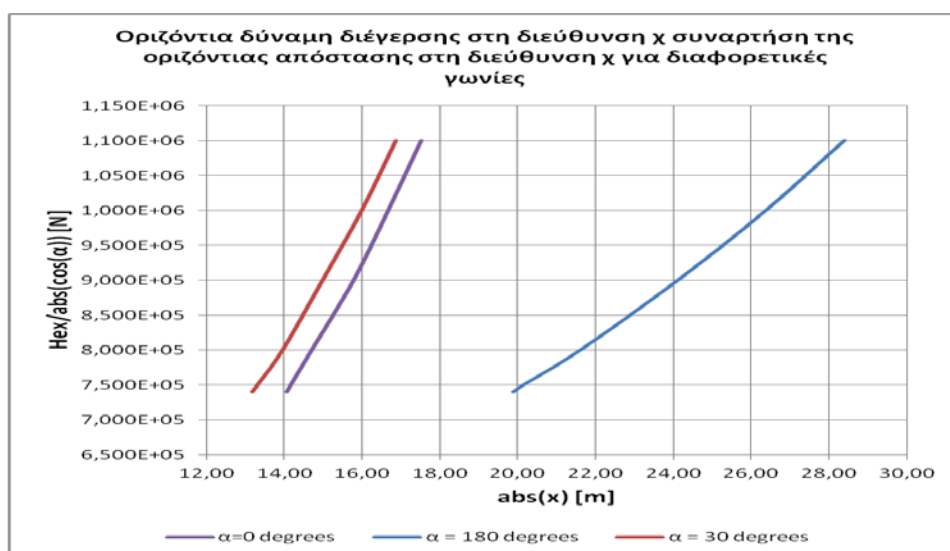
Για την ανάλυση των πολλαπλών κλάδων αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκε ξανά το πρόγραμμα STATMOOR. Στην Εικόνα 2.6.1 δίνεται η κάτοψη του συστήματος αγκύρωσης με αριθμημένο τον κάθε κλάδο καθώς και τους άξονες που χρησιμοποιήθηκαν.



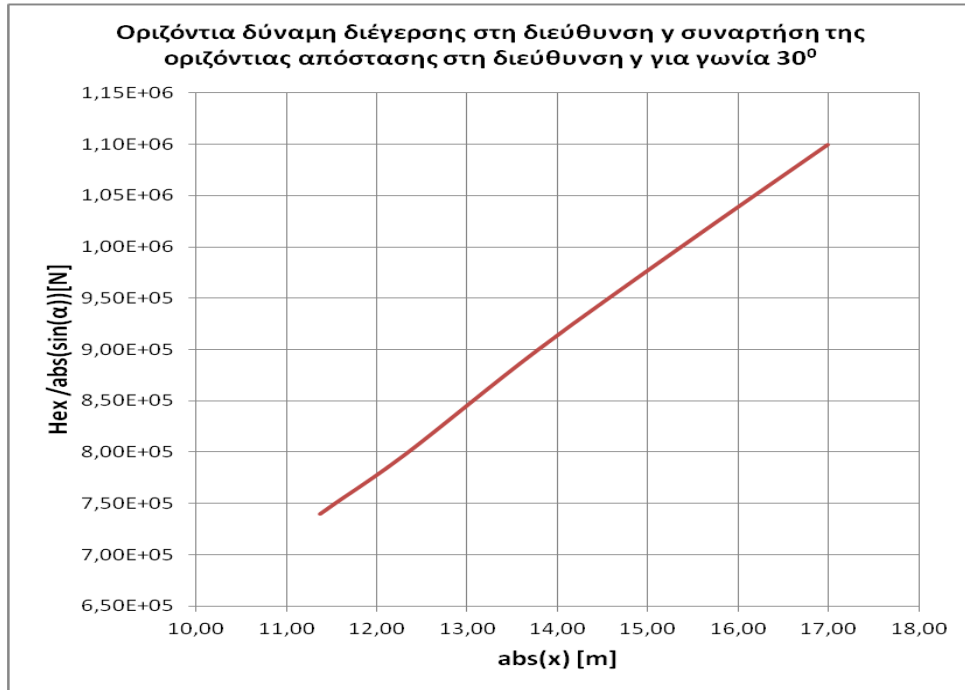
Εικόνα 2.6.1: Κάτοψη του συστήματος αγκύρωσης

Στα Γραφήματα 2.6.7- 2.6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για σύστημα αγκύρωσης τριών κλάδων. Στο Γράφημα 2.6.7 έχουμε την οριζόντια απόσταση του πλωτήρα σε σχέση με την δύναμη διέγερσης στον άξονα- x για διαφορετικές γωνίες. Εδώ θεωρήθηκαν τρεις διαφορετικές γωνίες. Η πρώτη αντιστοιχεί σε γωνία 0° η δεύτερη σε γωνία 180° και τέλος η τρίτη γωνία επιλέχθηκε αυθαίρετα στις 30° . Είναι σαφές πως το σύστημα αγκύρωσης για τις 0° είναι πιο άκαμπτο σε σχέση με τις 180° . Αυτό απεικονίζεται και στο Γράφημα 10 όπου η ακαμψία στη διεύθυνση x του κλάδου αγκύρωσης οφείλεται σε μία αντίστοιχη μετατόπιση του πλωτήρα προς την διεύθυνση- x και η οποία δίδεται συναρτήσει των πιο πάνω γωνιών.

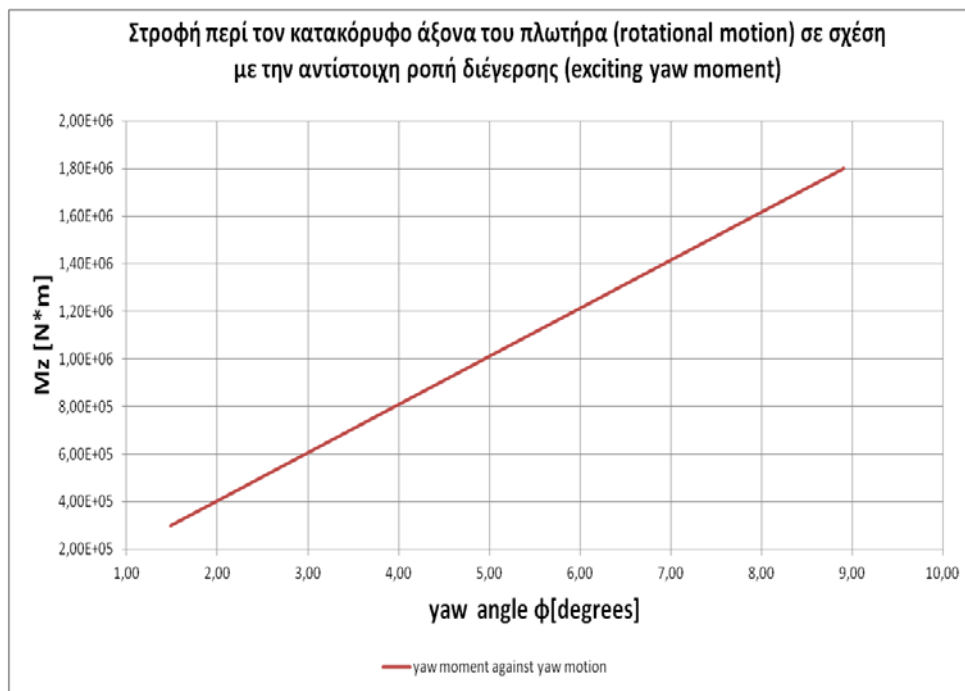
Στο Γράφημα 2.6.8 η οριζόντια μετατόπιση του πλωτήρα περιγράφεται σε σχέση με την οριζόντια δύναμη διέγερσης κατά την διεύθυνση- y , ενώ στο Γράφημα 2.6.9 ο διατοιχισμός του πλωτήρα (rotational motion) δίδεται σε σχέση με την αντίστοιχη ροπή διέγερσης (exciting yaw moment). Τέλος, η αντίστοιχη ακαμψία του κλάδου αγκύρωσης στην διεύθυνση- y και στη διεύθυνση- z απεικονίζονται στα Γράφημα 2.6.11 και 2.6.12 αντίστοιχα. Στο Παράρτημα 2 παρατίθενται τα αποτελέσματα εξόδου του προγράμματος για δύο περιπτώσεις διέγερσης για το σύστημα αγκύρωσης τριών κλάδων. Το πρώτο θεωρήθηκε με γωνία διέγερσης 0° ενώ το δεύτερο με 30° .



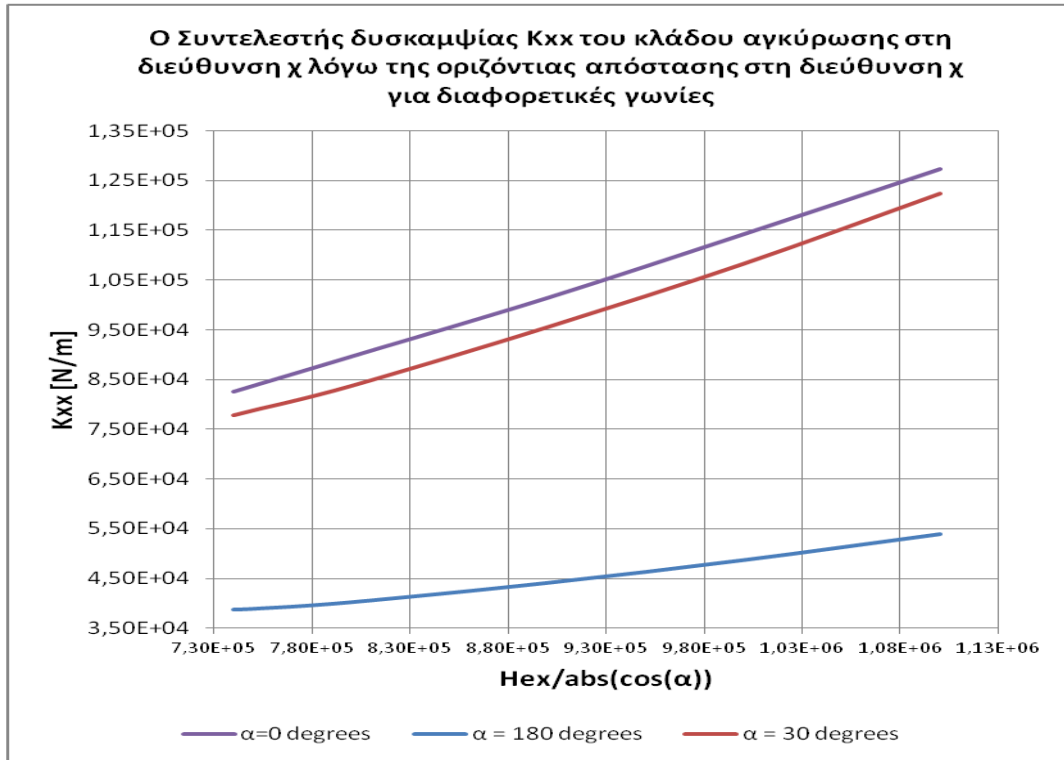
Γράφημα 2.6.7: Οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήσει οριζόντιας απόστασης στη διεύθυνση- x



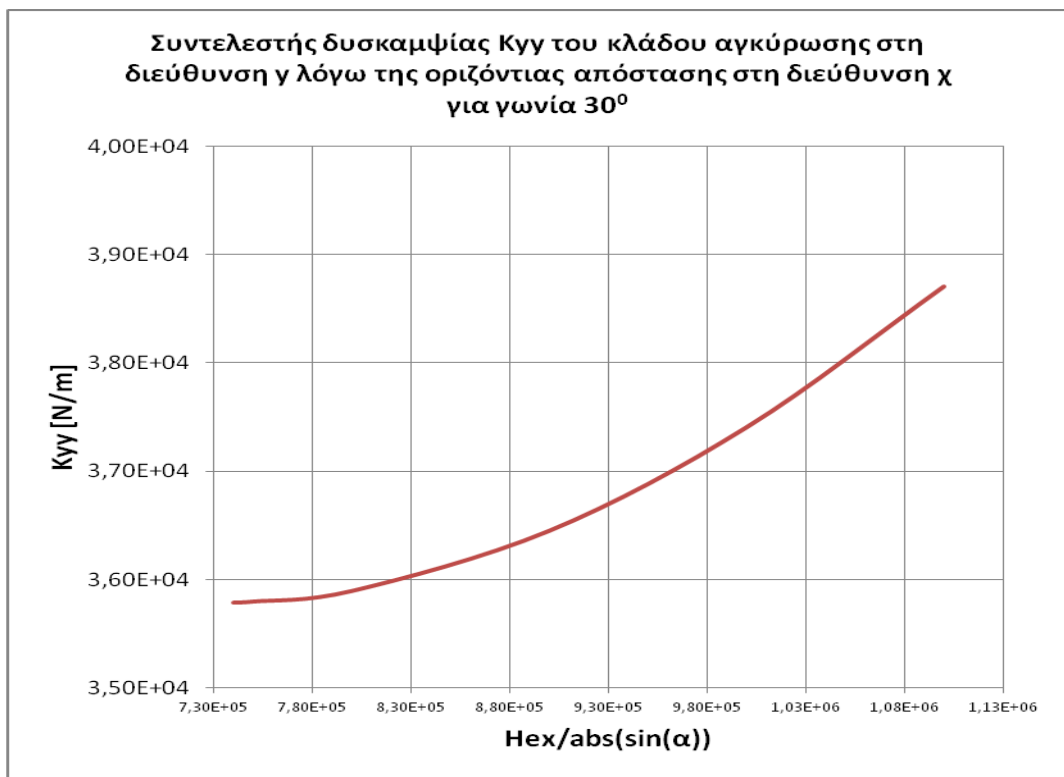
Γράφημα 2.6.8: Οριζόντια δύναμη διέγερσης συναρτήση οριζόντιας απόστασης στη διεύθυνση- y



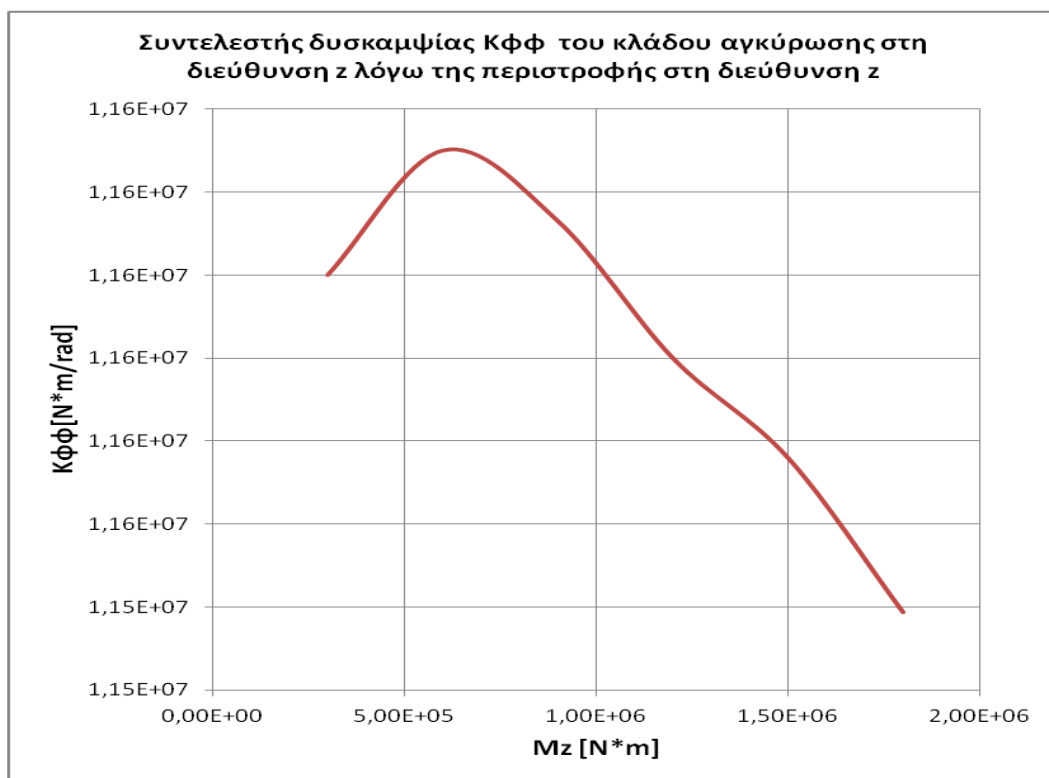
Γράφημα 2.6.9: Στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα του πλωτήρα σε σχέση με την αντίστοιχη ροπή διέγερσης



Γράφημα 2.6.10: Συντελεστής δυσκαμψίας K_{xx} του κλάδου αγκύρωσης



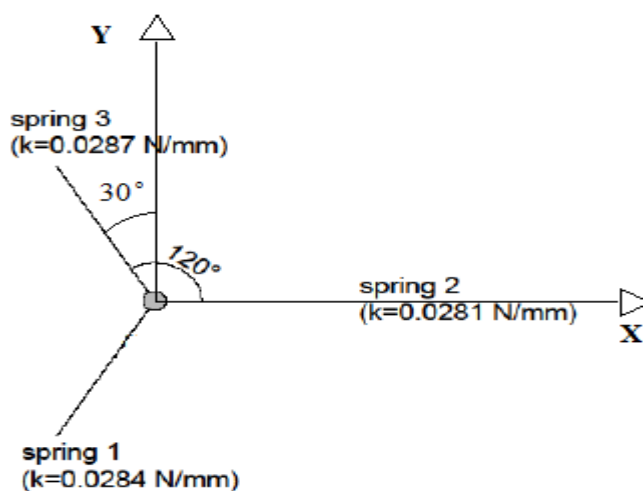
Γράφημα 2.6.11: Συντελεστής δυσκαμψίας K_{yy} του κλάδου αγκύρωσης



Γράφημα 2.6.12: Συντελεστής δυσκαμψίας $K_{\phi\phi}$ του κλάδου αγκύρωσης

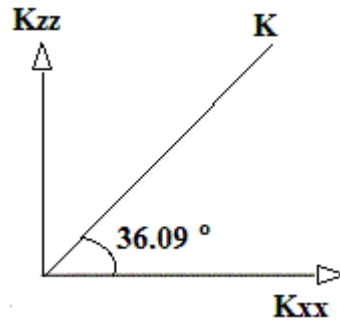
2.7 Υπολογισμός σταθερών ελατηρίου και προέντασης πειράματος

Στην παρακάτω Εικόνα 2.7.1 φαίνονται οι σταθερές των ελατηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την τοποθέτηση του μοντέλου στη δεξαμενή, όπως παρουσιάστηκαν στην έκθεση του πειράματος.



Εικόνα 2.7.1: Σταθερές ελατηρίων πειράματος

Ακολουθεί η ανάλυση της σταθεράς ελατηρίου για τον κάθε κλάδο αγκύρωσης με βάση το σύστημα συντεταγμένων της Εικόνας 2.7.2



Εικόνα 2.7.2: Σύστημα συντεταγμένων ανάλυσης σταθεράς ελατηρίου

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που ακολουθεί έχουν γίνει με βάση τα δεδομένα του μοντέλου, αλλά αφορούν την πραγματική κατασκευή αφού έχει ληφθεί υπόψη η κλίμακα.

$$K1_{\text{model}} = 0,0284 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0284 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K1_{\text{real}} = 0,0284 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0284 \cdot 10^3 \cdot 40^2 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 45,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K2_{\text{model}} = 0,0281 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0281 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K2_{\text{real}} = 0,0281 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0281 \cdot 10^3 \cdot 40^2 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 44,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K3_{\text{model}} = 0,0287 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0287 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K3_{\text{real}} = 0,0287 \frac{\text{N}}{\text{mm}} = 0,0287 \cdot 10^3 \cdot 40^2 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 45,92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K1_{xy} = 45,44 \cdot \cos 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 36,7197 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K1_{zz} = 45,44 \cdot \sin 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 26,7667 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K2_{xy} = 44,96 \cdot \cos 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 36,3318 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K2_{zz} = 44,96 \cdot \sin 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 26,4839 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K3_{xy} = 45,92 \cdot \cos 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 37,1076 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K3_{zz} = 45,92 \cdot \sin 36,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 27,0494 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K1_{xx} = 36,7197 \cdot \cos 60 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 18,3599 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K1_{yy} = 36,7197 \cdot \cos 30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 31,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K2_{xx} = K2_{xy} = 36,3318 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K2_{yy} = 0$$

$$K3_{xx} = 37,1076 \cdot \cos 60 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 18,5538 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K3_{yy} = 37,1076 \cdot \cos 30 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 32,1361 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Τέλος υπολογίζουμε το K_{zx} το οποίο είναι κοινό σε όλους τους κλάδους αγκύρωσης που θα χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο στην εισαγωγή του προγράμματος για την ανάλυση του συστήματος.

$$Z_{[S]} = \left(\frac{H}{w} \right) \cdot \left(\sqrt{(1 + (\tan \Phi_B)^2)} - \sqrt{(1 + (\tan \Phi_A)^2)} \right)$$

όπου:

$H(N)$: Οριζόντια στατική δύναμη (προένταση)

$w(N/m)$: Βάρος αγκύρωσης ανά μονάδα μήκους στο νερό

Φ_A : Γωνία αγκύρωσης στον πυθμένα

Φ_B : Γωνία αγκύρωσης στον πλωτήρα

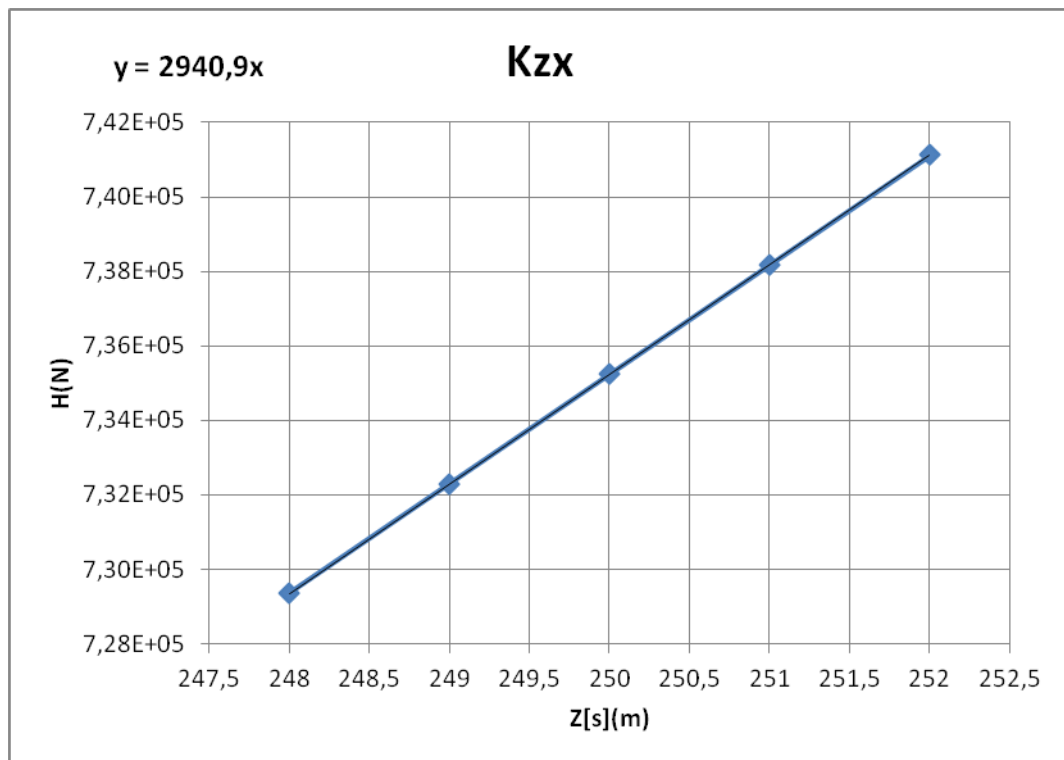
$Z_{[S]}$: Βάθος νερού στο σημείο εγκατάστασης

$$w=698,094(\text{N/m})$$

$$\Phi_A=0^\circ$$

$$\Phi_B=36,09^\circ$$

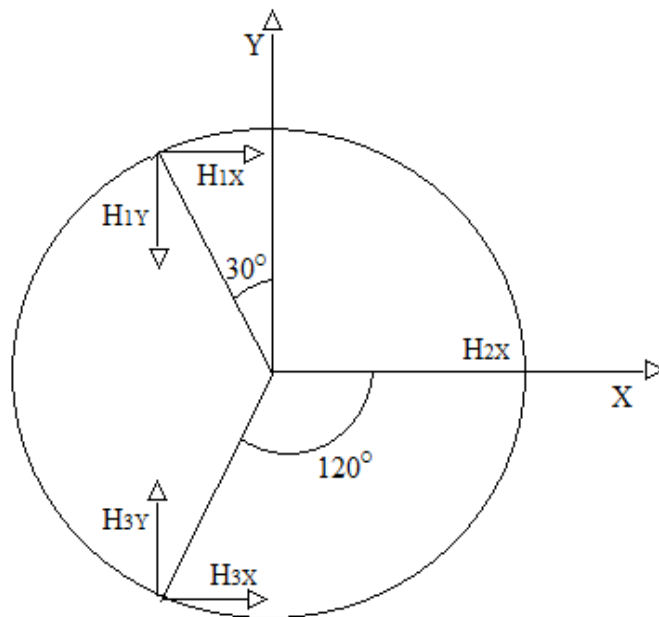
Για διαφορετικά βάθη υπολογίζουμε την οριζόντια προένταση και με τα σημεία που προκύπτουν κατασκευάζουμε ευθεία της οποίας η κλίση είναι το K_{ZX} όπως φαίνεται στο Γράφημα 2.7.1



Γράφημα2.7.1: Σταθερά ελατηρίου K_{ZX}

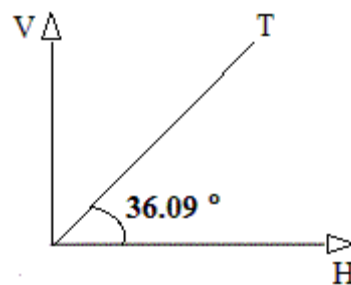
Επομένως το $K_{ZX}=2940,9\text{N}$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την προέκταση στους τρεις άξονες όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.7.3



Εικόνα 2.7.3: Σύστημα συντεταγμένων προέκτασης

Η τάση (T) του κάθε κλάδο αγκύρωσης αναλύεται σε οριζόντια (H) και κατακόρυφη (V) δύναμη ως εξής:



Εικόνα 2.7.4: Ανάλυση τάσης στον κλάδο αγκύρωσης

$H = 734800\text{N}$ (όπως δίδεται στην έκθεση του πειράματος)

επομένως:

$V = H \cdot \tan 36,09 = 535667\text{N}$ (όπως δίδεται από J. Jonkman 2010)

$H_{1x} = H \cdot \cos 60 = 367,4\text{kN}$

$$H1_y = H \cdot \cos 30 = 636,4\text{kN}$$

$$V1 = V = 535,7\text{kN}$$

$$H2_x = -H = -734,8\text{kN}$$

$$H2_y = 0$$

$$V2 = V = 535,7\text{kN}$$

$$H3_x = H \cdot \cos 60 = 367,4\text{kN}$$

$$H3_y = -H \cdot \cos 30 = -636,4\text{kN}$$

$$V3 = V = 535,7\text{kN}$$

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΩΤΗΣ Α/Γ ΕΔΡΑΣΜΕΝΗΣ ΣΕ SPAR

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Ο ερευνητής μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, έρχεται αντιμέτωπος με μία σειρά από προβλήματα κατά την διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας. Πιο κάτω παρατίθενται επιγραμματικά μερικά από αυτά:

1. Ποια όργανα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή χρήσιμων δεδομένων στην περιοχή τοποθέτησης της κατασκευής (στατιστικά ανέμων/κυμάτων, μορφολογία βυθού και βάθος)
2. Στοιχεία για την ίδια την κατασκευή (δομή, τρόπος αγκύρωσης, διαστάσεις, υλικά κατασκευής)
3. Επιλογή ανεμογεννήτριας με βάση τα βήματα 1 και 2 (ισχύς, διάμετρος, βάρος)
4. Ποιες μέθοδοι θα χρησιμοποιηθούν για την υδροδυναμική ανάλυση των δεδομένων στο σχεδιασμό και στην πειραματική διαδικασία (κώδικες προγραμμάτων, επεξεργασία αποτελεσμάτων στον υπολογιστή, έκταση κλίμακας μοντέλου)
5. Ποιοι είναι οι συμβιβασμοί μεταξύ των δοκιμών σε δεξαμενή και των δοκιμών πεδίου (ανοικτής θαλάσσης).
6. Δοκιμές υπό πλήρη κλίμακα σε ανοιχτή θάλασσα.
7. Συλλογή όλων των πληροφοριών για βελτιστοποίηση τυχόν ανωμαλιών που παρατηρήθηκαν σε όλη την διαδικασία.
8. Σύγκριση αποτελεσμάτων με άλλες έρευνες.

Λόγω του ότι ακόμη δεν έχει κατασκευαστεί αιολικό πάρκο με οποιοδήποτε είδος πλωτής ανεμογεννήτριας και ότι όλοι οι τύποι έδρασης βρίσκονται σε ερευνητικό κυρίως στάδιο, συγκαλούνται συνέδρια σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτό γίνεται από όλους τους συλλόγους που σχετίζονται με την υπεράκτια αιολική ενέργεια, καθώς και από εκπαιδευτικά και ερευνητικά ιδρύματα. ^[33]

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε μερικά από αυτά: IEA (International Energy Agency), AWEA (American Wind Energy Association), EWEA (European Wind Energy Association), GWEA (Global Wind Energy Council), NREL (National Renewable Energy Laboratory). Σκοπός αυτών των συνεδρίων είναι η συνεργασία όλων των εμπλεκομένων φορέων σε διεθνή επίπεδο είτε από τον ακαδημαϊκό τομέα είτε από τον επιχειρησιακό. Αυτό γιατί η ποιότητα των αποτελεσμάτων και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων ποικίλουν.

Για παράδειγμα τα συνέδρια τόσο του OC3 όσο και του OC4 (τμήμα του IEA) που έχουν γίνει μέχρι σήμερα επικεντρώνονται στην επαλήθευση των εργαλείων μοντελοποίησης καθώς και τους κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα πειράματα μέσω σύγκρισης αποτελεσμάτων. Η επαλήθευση των εργαλείων μοντελοποίησης είναι μόνο ένα βήμα προς την εξασφάλιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων που παρέχουν αυτά τα εργαλεία. Ένα άλλο βήμα είναι η επικύρωση, η οποία περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αποτελέσματα δεδομένων μέτρησης από μια φυσική εξέταση. Στην δεύτερη περίπτωση η εξέταση των φορτίων καθώς και οι επιδόσεις της κατασκευής δίνουν καλύτερα αποτελέσματα, όμως οι συνθήκες που δοκιμάζεται το μοντέλο περιορίζονται στο χρόνο διεξαγωγής του πειράματος. Αυτό μπορεί να διαχωριστεί σε μια ελεγχόμενη κατάσταση στο εργαστήριο όπου η συμπεριφορά σε κύμα και σε άνεμο εξετάζονται ξεχωριστά ακόμα και σε ακραίες συνθήκες. Μειονέκτημα αποτελεί η ανάγκη για προσαρμογή του μοντέλου με βάση τις διαστάσεις της δεξαμενής με αποτέλεσμα την δημιουργία ασυνέπειας σε δυνάμεις αντίστασης με βάση το μοντέλο πλήρους κλίμακας, καθώς και ζητήματα που αφορούν τους αριθμούς Froude και Reynolds σε μοντέλα υπό κλίμακα.

Η σύγκριση όλων αυτών των δεδομένων από τις έρευνες που γίνονται για κάθε στάδιο της πειραματικής διαδικασίας διασφαλίζει την επαλήθευση και την επικύρωση των αποτελεσμάτων. Με αυτό τον τρόπο παρέχονται στη βιομηχανία αξιόπιστα εργαλεία με τα οποία αναλύονται και εξελίσσονται τα σχέδια για δημιουργία πλωτών αιολικών πάρκων.

3.1 Η εξέλιξη της έρευνας σε μία πλωτή Α/Γ τύπου Spar

Το 1998 ο Tong K.C. παρουσίασε την προκαταρκτική μελέτη FLOAT η οποία ήταν μια πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Spar. Το σύστημα FLOAT είχε σαν στόχο να επιτρέψει την οικονομική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια σε υπεράκτιες περιοχές βάθους από 100m ως 300m. Η τεχνικό-οικονομική πτυχή της εγκατάστασης μιας υπεράκτιας αιολικής μονάδας που βασίζεται στο σύστημα FLOAT είναι άμεσα συνυφασμένη με νομικά και περιβαλλοντολογικά θέματα κατά την διάρκεια της εγκατάστασης.^[34]

Το 2006 ο Nielson F.G. και ο Skaare B. Το 2007 ανέπτυξαν μοντέλο προσομοίωσης για μια ολοκληρωμένη δυναμική ανάλυση μίας Spar κατασκευής, γνωστή ως Hywind, και συνέκριναν τα αριθμητικά του αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μοντέλο υπό κλίμακα. Έλαβαν υπόψη τους αρκετές περιβαλλοντικές συνθήκες και διαφορετικά συστήματα ανεμογεννητριών. Απέδειξαν την σημασία του αποτελέσματος της γωνίας προνευτασμού (pitchangle) που δημιουργούν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας στην δυναμική απόκριση της πλωτής κατασκευής για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής. Αυτό δείχνει ότι η μοντελοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη της την σύζευξη της αεροδυναμικής και υδροδυναμικής ανάλυσης για την εξαγωγή ποιοτικών αποτελεσμάτων για την δυναμική απόκριση.^[35]

Οι Suzuki H. και Sato A. το 2007 διερεύνησαν την επίδραση ενός σταθεροποιητικού πτερυγίου το οποίο συνδέεται στη βάση της πλωτής κατασκευής για την μείωση του προνευτασμού. Το σχέδιο είναι ανάλογο των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται στα πλοία για την σταθεροποίηση του διατοιχισμού (roll). Το πτερύγιο μπορεί να μειώσει την περιστροφική κίνηση της ανεμογεννήτριας επειδή παρέχει πρόσθετη υδροδυναμική μάζα. Επιπλέον το πτερύγιο βοηθά στην μετακίνηση της φυσικής περιόδου του διατοιχισμού, του προνευτασμού και της στροφικής οριζόντιας ταλάντωσης (yaw) μακριά από το εύρος της περιόδου του κύματος από την προστιθέμενη μάζα για να αποφευχθεί η απήχηση.^[36]

Οι Matsukuma H. και Utsunomiya T. πραγματοποίησαν μια ανάλυση στη κίνηση μια πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Spar κάτω από σταθερό άνεμο θεωρώντας περιστροφή του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Τα φορτία του ανέμου που επιδρούν πάνω στα πτερύγια του ρότορα υπολογίζονται με βάση τη θεωρία του περυγίου ως δυναμικό στοιχείο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κινήσεις του διατοιχισμού, της στροφικής οριζόντιας ταλάντωσης και της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης (sway) να παράγονται λόγω της επίδρασης που δημιουργεί στιγμιαία η περιστροφή του ρότορα. Για τον ίδιο τύπο πλωτής ανεμογεννήτριας εξετάστηκε πειραματικά η απόκριση σε κύμα σε μοντέλο υπό κλίμακα 1:100, και συγκρίθηκε με αριθμητικές προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν από τον Nishida E. Ο Utsunomiya το 2009 συνέχισε τη μελέτη για τον προσδιορισμό της κίνησης ενός πρωτότυπου πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Spar πάνω σε κανονικούς και τυχαίους κυματισμούς και σε μια σταθερή οριζόντια δύναμη η οποία προσομοιώνει τον άνεμο. Η πρωτότυπη ανεμογεννήτρια ήταν 2MW, είχε 80m διάμετρο ρότορα, ύψος πλήμνης 55m. Το πλωτό θεμέλιο είχε βύθισμα 60m, στο κάτω μέρος ο κύλινδρος είχε διάμετρο 12m, στο μεσαίο τμήμα 8,4m και στο άνω τμήμα 4,8m. Οι πειραματικές δοκιμές έγιναν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο κλίμακας 1:22,5 σε δεξαμενή δημιουργώντας συνθήκες για βαθύ νερό στο NMRI (Naval Medical Research Institute), όπου τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα συμβάδιζαν. Περαιτέρω πειραματικές δοκιμές στο συγκεκριμένο τμηματικό-τύπο Spar αγκυρωμένο σε διαφορετικές θέσεις έδειξαν ότι μικρότερης κλίμακας προνευτασμός και κατακόρυφη ταλάντωση (heave) παρατηρήθηκε όταν η κατασκευή ήταν αγκυρωμένη στο πάνω τμήμα, συγκρινόμενη με κατασκευή ομοιόμορφου κυλίνδρου. Το 2010 ο Utsunomiya πραγματοποίησε πειραματικές δοκιμές σε ανοικτή θάλασσα σε κλίμακα 1:10 ενός υβριδικού μοντέλου κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και μέταλλο και η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.1.1. Η τοποθεσία βρίσκεται 30m ανοικτά των ακτών του Σασέμπρο στην Ιαπωνία. Πολύτιμα αποτελέσματα ελήφθησαν με έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης της βάσης του πύργου, τα οποία επιβεβαιώνουν την αριθμητική μέθοδο και τον κώδικα του υπολογιστή για τη δυναμική ανάλυση της πλωτής ανεμογεννήτριας υπό την επίδραση των δυνάμεων των κυμάτων και του ανέμου.^{[37][38][39][40][41]}

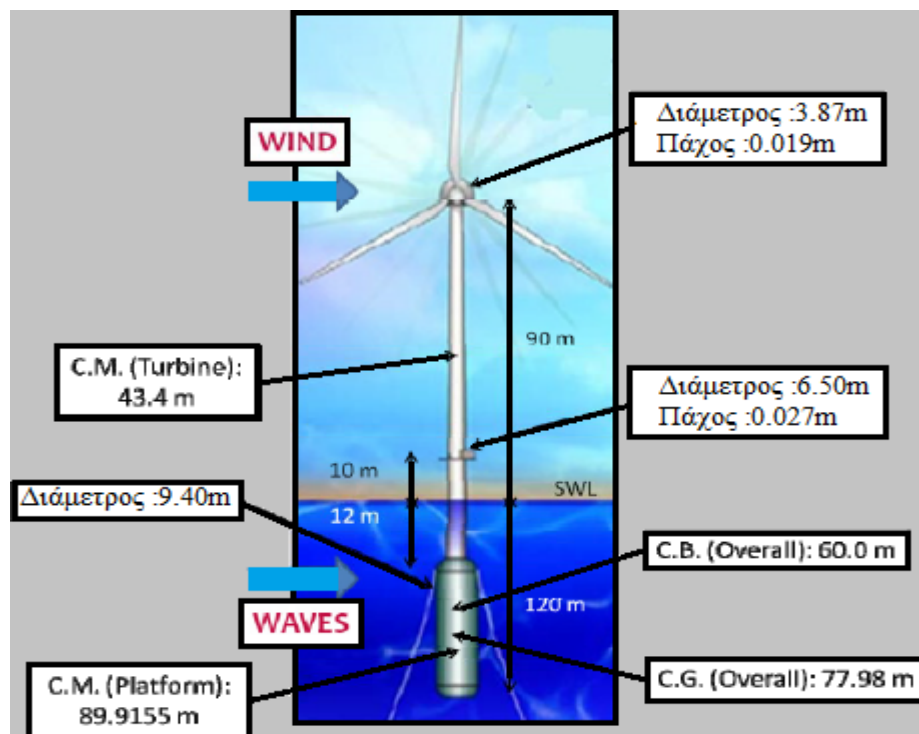


Εικόνα 3.1.1: Υβριδικό μοντέλο κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και μέταλλο

Ο Suzuki H. το 2009 παρουσίασε διάφορα σενάρια αποσύνδεσης μιας πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Sparc σε ένα αιολικό πάρκο στο οποίο βρίσκονταν σε κοντινά σημεία, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εγκατάστασης. Μια τυχαία αποσύνδεση μίας πλωτής ανεμογεννήτριας από το σύστημα αγκύρωσης μπορεί να οδηγήσει σε σύγκρουση ή επαφή μεταξύ των συστημάτων αγκύρωσης των γειτονικών πλωτών ανεμογεννητριών. Αξιολόγησε το ρίσκο σε κάθε σενάριο και τέθηκαν προς συζήτηση τα αποτελέσματα της ρύθμισης των ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα καθώς και οι παράγοντες ασφάλειας που πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό των συστημάτων αγκύρωσης.^[39]

Οι Karimirad M. και Moan T. το 2010 πραγματοποίησαν ανάλυση της δυναμικής απόκρισης σε μία πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Sparc σε πολύ ακραίες συνθήκες. Τα αποτελέσματα τους επικεντρώθηκαν στον προσδιορισμό του κατάλληλου σχεδιασμού μιας πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Sparc όταν αυτή υπόκειται σε μεγάλες αποκρίσεις. Χρησιμοποιήθηκε μαθηματική προσέγγιση για την προσομοίωση της σύζευξης των δυνάμεων του ανέμου και των κυμάτων καθώς και της κίνησης και της απόκρισης της κατασκευής σε ακραίες συνθήκες. Οι κρίσιμες αποκρίσεις της κατασκευής δημιουργήθηκαν από την αερο-υδροελαστική προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Τα κύρια αποτελέσματα της έρευνας τους ήταν μια ευρέως κλιμακωτή γκαουσιανή διαδικασία και το ότι ο άνεμος προκαλεί αποκρίσεις συντονισμού.^[42]

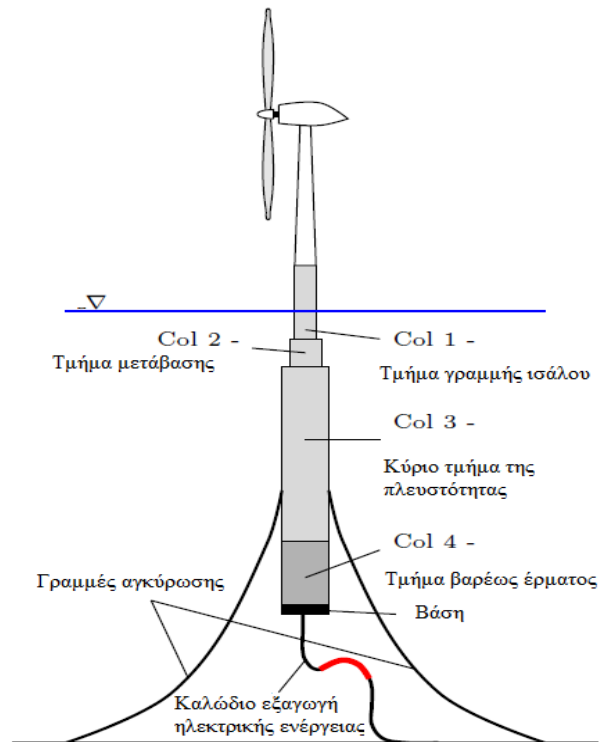
Το 2011 οι A.Sultania και L.Manuel εξέτασαν την μακροπρόθεσμη αξιοπιστία αναλύοντας μια πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Spar, με στοχαστική προσομοίωση. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα για τις αριθμητικές αναλύσεις επιλέχθηκαν από περιοχή αναφοράς με βαθύ νερό. Χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου, μελετήθηκε η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου, καθώς και τα στατικά φορτία σε πύργο και ρότορα, μαζί με τις κινήσεις της πλατφόρμας σε κρίσιμους συνδυασμούς ταχύτητας ανέμου και ύψους κύματος. Τα μακροπρόθεσμα φορτία που συνδέονται σε μία περίοδο 50 ετών υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας στατιστική προέκταση με βάση τα φορτία που προέρχονταν από τις προσομοιώσεις. Για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στα σημεία φόρτισης με τυχαίες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν δύο προγράμματα: 1) το 2D Inverse First-Order Reliability Method (FORM) όπου επιλέγεται ένα ακραίο φορτίο σε μεσαίο επίπεδο και 2) 3D Inverse FORM όπου η διαφορετικότητα στις περιβαλλοντικές μεταβλητές καθώς και στα φορτία στη χρονική περίοδο των 50 ετών διασφαλίζεται πλήρως. Στην Εικόνα 3.1.2 καταγράφονται οι ιδιότητες του μοντέλου.^[43]



Εικόνα 3.1.2: Ιδιότητες μοντέλου A.Sultania και L.Manuel

Τα συμπεράσματα από αυτό το πείραμα ήταν πως: 1) η μεταβλητότητα σε ακραίες κίνησης της πλατφόρμας βρέθηκε να είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το ύψος των κυμάτων. 2) η διαμήκης οριζόντια ταλάντωση (surge) της πλατφόρμας βρέθηκε να είναι μεγαλύτερη για μία σχετικά μέση ταχύτητα ανέμου 13.3 m/s και για ύψος κύματος 5,5m. 3) η μακροχρόνια ροπή που προερχόταν από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας βρέθηκε να είναι μεγαλύτερη για μία μέση ταχύτητα ανέμου 21,7 m/s με σημαντικό ύψος κύματος 7,5m. Τα συμπεράσματα από αυτή τη έρευνα πρέπει να εξεταστούν υπό το πρίσμα των πολλών απλοποιήσεων και παραδοχών που έγιναν όσον αφορά τη δομή των μοντέλων και των επιβαλλόμενων φορτίσεων. Τέλος τονίστηκε από τους ερευνητές ότι για να γενικευτούν αυτά τα συμπεράσματα, πρέπει να γίνουν και άλλες μελέτες για το ίδιο θέμα με διαφορετικού τύπου πλωτές κατασκευές και ανεμογεννήτριες.

Μια άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2011 από τους Ivar F. και Petter Andreas B. είχε σαν στόχο την ανάλυση των δυνάμεων του συστήματος αγκύρωσης καθώς και τις κινήσεις της πλωτής κατασκευής. Χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά εργαλεία σχεδιασμού προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν την επίλυση των μη γραμμικών προβλημάτων μέσω αυθαίρετων περιορισμών. Σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η ελαχιστοποίηση του κόστους της πλωτής κατασκευής καθώς και η ελαχιστοποίηση του κόστους των καλωδίων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν σταθερά μεγέθη για την επίλυση του προβλήματος θεωρήθηκαν: η γραμμή αγκύρωσης, η διάρκεια ζωής σε κόπωση, η ακτίνα καμπυλότητας του καλωδίου και περιορισμοί στα φορτία. Η πλωτή κατασκευή που αποτελείται από μία σειρά από κυλινδρικά τμήματα με: διαφορετική μάζα, πλευστότητα και κόστος κατασκευής, τα οποία θεωρείται ότι έχουν ομοιόμορφη κατανομή μάζας. Έτσι προτείνεται μια απλή σχέση μεταξύ της μάζας και των γεωμετρικών ιδιοτήτων τόσο σε μεγάλα όσο και σε μικρά τοιχώματα των σωληνοειδή τμημάτων. Στην πιο κάτω Εικόνα 3.1.3 παρατηρούμε τα κυλινδρικά τμήματα που παραμετροποιήθηκαν καθώς και τα καλώδια αγκύρωσης με το καλώδιο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.^[44]

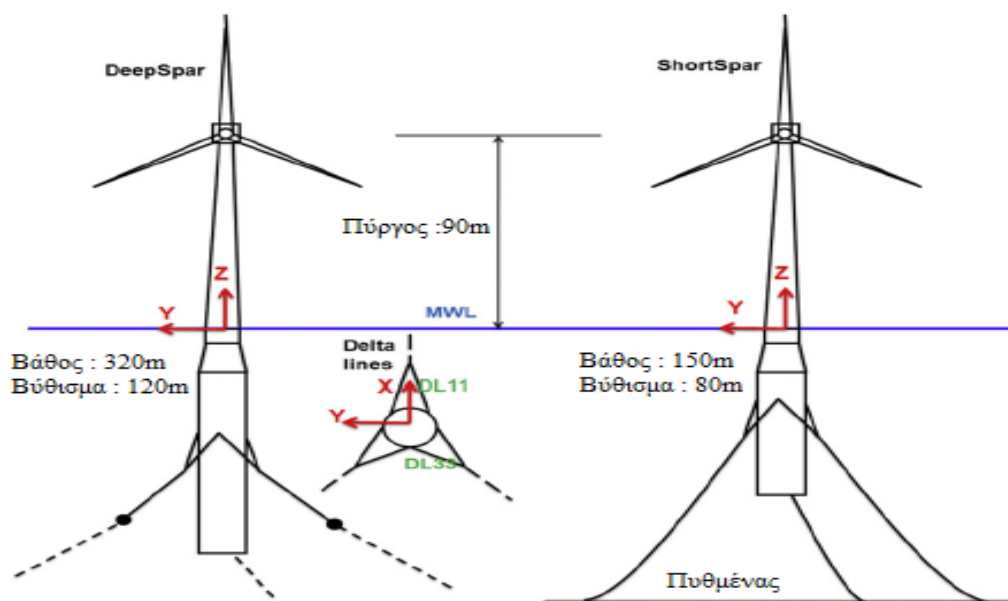


Εικόνα 3.1.3: Παραμετροποιημένα κυλινδρικά τμήματα κατά Ivar F. και Petter Andreas B.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πώς η προσέγγιση της βελτιστοποίησης στην πλωτή κατασκευή μαζί με το σύστημα αγκύρωσης και το καλώδιο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι εφικτή, παρά το γεγονός πως κάποιες από τις αρχικές συνθήκες δεν ήταν τελικά αποδεκτές. Αυτό ο τρόπος επίλυσης μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερα σφάλματα στον αρχικό σχεδιασμό αν και η μέθοδος δεν είναι ασφαλής έναντι αστοχίας και λόγω του πολύπλοκου σχήματος του μοντέλου και των περιορισμών που υπήρχαν κάποια σημεία της κατασκευής είναι δυνατόν να μην αποτελούν την βέλτιστη λύση. Τέλος η παραμετροποίηση ίσως χρειαστεί αλλαγές σε περίπτωση μεγάλης μεταβολής του μήκους της κατασκευής και ειδικότερα ο τρόπος με το οποίο το πάχος του τοιχώματος σχετίζεται με το βάθος του νερού.

Οι Karimirad M. και Moan T. το 2012 παρουσίασαν μια απλουστευμένη προσέγγιση για τη δυναμική ανάλυση της αντίδρασης μιας πλωτής κατασκευής που υπόκειται φορτία ανέμου και κυμάτων, σαν συνέχεια της έρευνας του 2010. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου, διατηρώντας

παράλληλα μια αποδεκτή ακρίβεια στα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι Spar πλωτών ανεμογεννητριών μία για μέτριο βάθος νερού και μία για βαθύ νερό έτσι ώστε να διερευνηθεί η ευαισθησία της απλουστευμένης μεθόδου. Τα αεροδυναμικά φορτία προήλθαν από την βιβλιοθήκη "TDHMILL" η οποία λειτούργησε σαν εξωτερική είσοδος για τα πρόγραμμα SIMO-RIFLEX. Η τριπλή αυτή συνεργασία ονομάστηκε SRT και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το πρόγραμμα HAWC2 ώστε να εξεταστεί η ακρίβεια τους. Στον Πίνακα 3.1.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων που εξετάστηκαν.^[45]



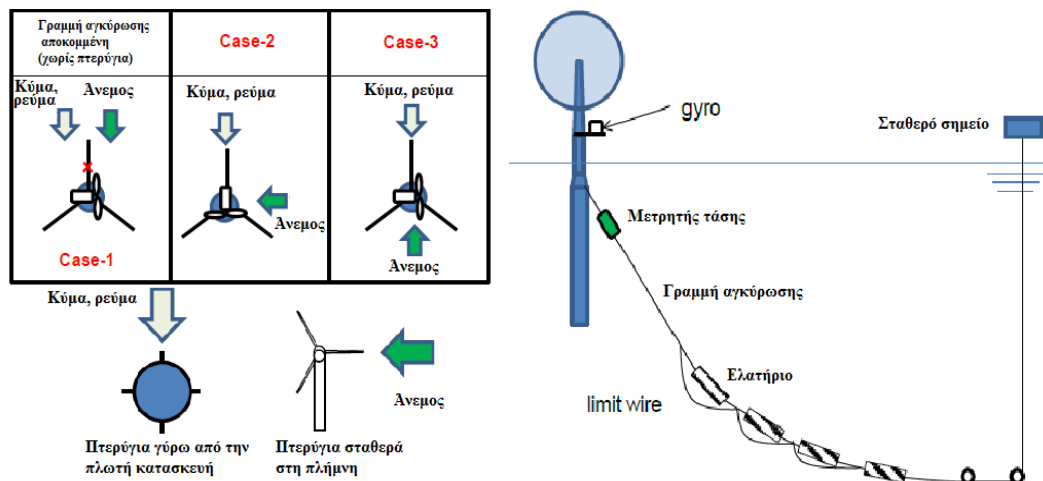
Εικόνα 3.1.4: Σκαρίφημα μοντέλων κατά Karimirad M. και Moan T.

Είδος	DeepSpar	ShortSpar
Ανεμογεννήτρια	NREL 5-MW	NREL 5-MW
Βάθος νερού (m)	320	150
Βύθισμα (m)	120	80
Εκτόπισμα (m ³)	8016	5245
Κέντρο πλευστότητας (m)	-62	-42
Διάμετρος στη MWL (m)	6,5	6,5
Διάμετρος στο κάτω τμήμα (m)	9,4	9,4
Βάρος (ton)	8216	5376
Κέντρο Βάρους (m)	-78,5	-47,3

Πίνακας 3.1.1: Ιδιότητες μοντέλων κατά Karimirad M. και Moan T.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η απλοποιημένη μέθοδος είναι ασύγκριτα ταχύτερη από την ολοκληρωμένη μέθοδο με αποδεκτή ακρίβεια στα αποτελέσματα. Αυτό παρατηρήθηκε και στα δύο μοντέλα και στην επιμέρους σύγκριση των αποτελεσμάτων στους κώδικες των δύο προγραμμάτων. Στις πλωτές κατασκευές οι κινήσεις και η δυναμική απόκριση τους, όπως η διαμήκης οριζόντια ταλάντωση, η ροπή κάμψης και η διατμητικές δυνάμεις στο πύργο της κατασκευής δημιουργούνται από άκαμπτες κινήσεις του σώματος και όχι από ελαστικές παραμορφώσεις. Η έρευνα θεωρώντας το πλωτό μέσο σαν άκαμπτο σώμα εισήγαγε στην ανάλυση της γενικές κινήσεις και δομικές αποκρίσεις με εξαιρετικά αποτελέσματα.

Το 2012 το εθνικό ερευνητικό ίδρυμα της Ιαπωνίας σε συνεργασία με τους Yoshida S. και Utsunomiya T. έκαναν πειράματα προκειμένου να επιβεβαιώσουν την ασφάλεια της FOWT (Floating Offshore Wind Turbine). Η FOWT είναι μια πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Spar το πάνω μέρος της οποίας είναι από μέταλλο και το κάτω από σκυρόδεμα, ενώ τέσσερα πτερύγια είναι τοποθετημένα περιμετρικά της για να αποτρέπουν την στροφική οριζόντια ταλάντωση (yaw). Το σύστημα αγκύρωσης αποτελείται από τρεις κλάδους και ερευνήθηκε η συμπεριφορά του όλου συστήματος σε δύσκολες καιρικές συνθήκες. Οι περιβαλλοντικές δυνάμεις αφορούσαν δυνάμεις από αέρα, κυματισμό και ρεύματα με περίοδο επιστροφής 50 ετών. Η τάση στους κλάδους αγκύρωσης καθώς και οι κινήσεις του μοντέλου μετρήθηκαν και στις τρεις καταστάσεις μαζί και με συνδυασμούς. Ενώ η φορά του ανέμου που υιοθετήθηκε προήλθε από τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις. Εξετάστηκε επιπλέον η επίδραση της κίνησης που προκαλείται από δίνες. Στην Εικόνα 3.1.5 βλέπουμε την πειραματική διάταξη καθώς και τα τρία διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν και τέλος τα πτερύγια που τοποθετήθηκαν περιμετρικά της πλωτής κατασκευής. Στον Πίνακα 3.1.2 βλέπουμε της προδιαγραφές του πειραματικού μοντέλου σε κλίμακα 1:34.5 και της πραγματικής ανεμογεννήτριας.^[46]



Εικόνα 3.1.5: Σκαρίφημα μοντέλου εθνικού ερευνητικού ιδρύματος της Ιαπωνίας

	Πλήρης κλίμακας	Μοντέλο
Διάμετρος στη WL(m)	2,375	0,069
Διάμετρος κύρια (m)	3,8	0,110
Βύθισμα πάνω τμήματος(m)	2,85	0,083
Βύθισμα κάτω τμήματος(m)	5,7	0,165
Βύθισμα(m)	37,05	1,074
Εκτόπισμα(m ³)	389,89	0,00949
Ύψος πλήμνης(m)	23,3	0,675
KB(m)	17,26	0,500
KG(m)	13,7	0,397

Πίνακας 3.1.2: Ιδιότητες μοντέλου εθνικού ερευνητικού ιδρύματος της Ιαπωνίας

Τα συμπεράσματα από τα πειράματα έδειξαν πως: 1) Οι τάσεις και η κίνηση των κλάδων αγκύρωσης σε άνεμο, κυματισμούς και ρεύματα μπορεί σχεδόν να υπολογίζεται ως το άθροισμα των τιμών σε κάθε εξωτερική δύναμη. 2) Όταν είχαμε αποκοπή σε ένα από τους κλάδους αγκύρωσης οι άλλοι κλάδοι διατηρούσαν την ασφάλεια της κατασκευής. Ωστόσο μεγάλη γωνία προνευτασμού παρατηρήθηκε την στιγμή της αποκοπής του κλάδου. 3) Η μέγιστη τάση στους κλάδους αγκύρωσης συνέβαινε όταν ο άνεμος, τα κύματα και τα ρεύματα προέρχονταν από την ίδια κατεύθυνση, αν και οι κινήσεις του μοντέλου ήταν εξαρτημένες από τον συνδυασμό των δυνάμεων. Με το τρόπο αυτό εξασφάλισαν την ασφάλεια της FOWT σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.

3.2 Η ανεμογεννήτρια NREL-5MW

Για την υποστήριξη των ερευνών που πραγματοποιούνται στις πλωτές ανεμογεννήτριες το NREL ανέπτυξε τις προδιαγραφές μίας αντιπροσωπευτικής ανεμογεννήτριας υπό πολλαπλές κλίμακες γνωστή και ως "NERL offshore 5-MW baseline wind turbine". Για την δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν γενικές πληροφορίες για το σχεδιασμό από κατασκευαστές με έμφαση στις ανεμογεννήτριες των 5MW. Λόγω του ότι λεπτομερή στοιχεία δεν ήταν διαθέσιμα επιλέχθηκε η καλύτερη δυνατή σύνθεση τους. Όλα αυτά είχαν σαν στόχο το μοντέλο να χρησιμοποιείται στο μέλλον στις δημοσιεύσεις των ερευνητών για εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων όπως και γίνεται καθώς οι πλείστες έρευνες που αναφερθήκαμε πιο πάνω χρησιμοποίησαν αυτή την ανεμογεννήτρια.^[47]

Πιο συγκεκριμένα η επιλογή της ισχύος της ανεμογεννήτριας έγινε με βάση το γεγονός πως για να είναι ένα πλωτό αιολικό πάρκο οικονομικά βιώσιμο έπρεπε οι ανεμογεννήτριες που εδράζονταν στις κατασκευές να είναι τουλάχιστον 5 MW. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις τελικές ιδιότητες της ανεμογεννήτριας προήλθαν κυρίως από την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα DOWEC (Dutch Offshore Wind ENERGY Converter) η οποία είχε σχεδόν ταυτόσημες ιδιότητες με την πρωτότυπη ανεμογεννήτρια REpower 5M από την οποία όμως δεν μπορούσαν να αντληθούν πληροφορίες. Η όλη μελέτη καθώς και οι τελικές ιδιότητες της ανεμογεννήτριας συμπληρώθηκαν από άλλες δύο μελέτες την WindPact και την Ευρωπαϊκή RECOFF (Recommendations for Design of Offshore Wind Turbines). Οι κύριες ιδιότητες την ανεμογεννήτριας καθώς και οι επιμέρους ιδιότητες των πτερυγίων, ατράκτου, πλήμνης, μετάδοσης και πύργου παρατίθενται στον Πίνακα 3.2.1.

Βασικές ιδιότητες της NREL-5MW	
Ισχύς	5 MW
Προσανατολισμός του ρότορα	Προσήνεμα
Αριθμός πτερυγίων	3
Σύστημα μετάδοσης	Υψηλής ταχύτητας, πολλαπλών βαθμίδων κιβώτιο ταχυτήτων
Διάμετρος ρότορα, πλήμνης	126 m, 3 m

Ύψος πλήμνης	90 m
Μέγιστη ταχύτητα	80 m/s
Προεξοχή, κλίση άξονα	5 m , 5°
Μάζα ρότορα	110,000 kg
Μάζα πύργου	347,460 kg
Συντεταγμένες ολικού C _M	(-0.2m,0.0m,64.0m)
Δομικές ιδιότητες πτερυγίων	
Μήκος	61.5 m
Συντελεστής προσαύξησης μάζας	4,536 %
Συνολική μάζα	17,740 kg
Δεύτερη ροπή αδράνειας	11,776,047 kg·m ²
Πρώτη ροπή αδράνειας	363,231 kg·m
Ύψος C _M	20,475 m
Λόγος διαρθρωτικής απόσβεσης	0,477465 %
Ιδιότητες ατράκτου και πλήμνης	
Μάζα ατράκτου	240,000 kg
Μάζα πλήμνης	56,780 kg
Αδράνεια πλήμνης γύρω από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας	115,926 kg·m ²
Αδράνεια ατράκτου γύρω από τον άξονα εκτροπής	2,607,890 kg·m ²
Ονομαστικός λόγος ατράκτου- στροφικής ταλάντωσης	0,3 %
Ιδιότητες μετάδοσης	
Ονομαστική ταχύτητα του ρότορα	12,1 rpm
Ονομαστική ταχύτητα γεννήτριας	1173,7 rpm
Σχέση κιβωτίου ταχυτήτων	97:1
Απόδοση ηλεκτρικής γεννήτριας	94,4 %
Αδράνεια γεννήτριας γύρω από τον άξονα υψηλής ταχύτητας	534,116 kg·m ²
Ισοδύναμη σταθερά άξονα-οδήγησης με αποσβεστήρα- στρέψης	19,160,000 N·m/(rad/s)
Πλήρως ανεπτυγμένη ροπή πέδησης άξονα υψηλής ταχύτητας	28,116.2 N·m
Σταθερά χρόνου φρένου άξονα υψηλής ταχύτητας	0,6 s
Ιδιότητες πύργου	
Ύψος από το έδαφος	87,6 m
Ύψος C _M	38.234 m
Λόγος διαρθρωτικής απόσβεσης	1 %

Πίνακας 3.2.1: Κύριες ιδιότητες NERL-5MW

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε την διαδικασία οργάνωσης, συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος και ανάλυσης των αρχείων βαθμονόμησης των αισθητήρων του πειράματος που έγινε τον Οκτώβριο του 2012 και παρουσιάστηκαν τον Ιανουάριο του 2013 στο DHI (Danish Hydraulic Institute).^[48]

4.1 Σκοπός του πειράματος

Ο στόχος των πειραμάτων που έγιναν ήταν η απόκτηση δεδομένων σχετικά με την συμπεριφορά δύο πλωτών μέσων, μίας πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου TLP και μίας πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου Spar. Για τον προσδιορισμό των συνδυασμένων επιπτώσεων των κλάδων αγκύρωσης και της ανεμογεννήτριας στην απόκριση τους πάνω στην πλωτή εξέδρα, καθώς και στη μελέτη των υδροδυναμικών επιπτώσεων που δέχεται η πλωτή εξέδρα υπό κανονικούς και τυχαίους κυματισμούς σε συνδυασμό με τον άνεμο. Έτσι θα δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων για την αριθμητική βαθμονόμηση μελλοντικών μοντέλων και για την επαλήθευσή τους. Εμείς θα επικεντρωθούμε και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που αφορούν την πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Spar. Στο πιο κάτω πίνακα παρατίθενται οι προδιαγραφές της πρωτότυπης πλωτής ανεμογεννήτριας Hywind σε κλίμακα με το υπό μελέτη μοντέλο που εξετάστηκε στη δεξαμενή.

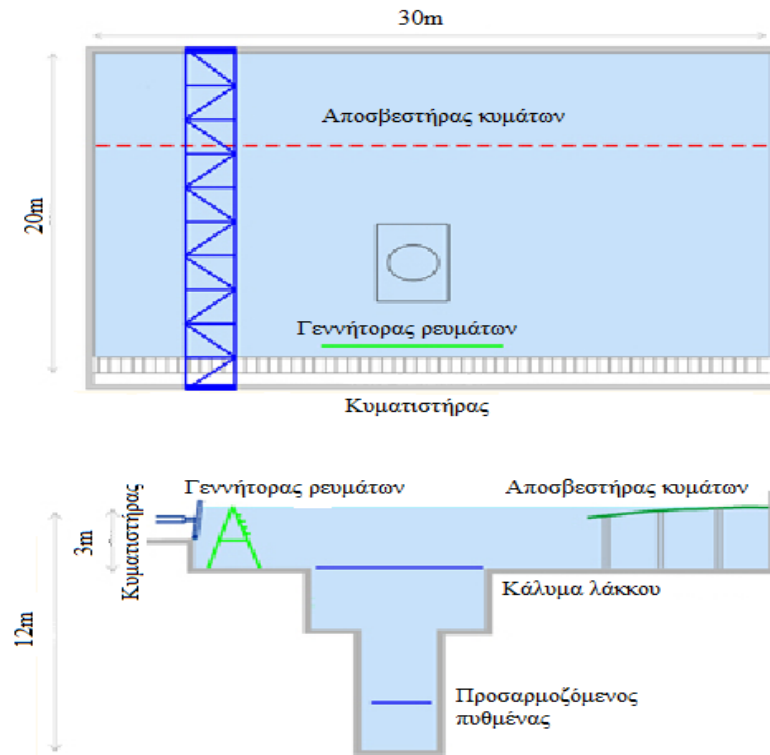
Πρωτότυπο Hywind	Πλήρης κλίμακα	Μονάδα μέτρησης	Συντελεστής κλίμακας	Μοντέλο υπό κλίμακα
Διάμετρος πλωτήρα	9,4	m	λ	0,235
Συνολικό βύθισμα	120	m	λ	3
Διάμετρος πάνω από πλωτήρα	6,5	m	λ	0,1625
Βάθος στο πάνω μέρος του πλωτήρα	4	m	λ	0,1
Βάθος στο κάτω μέρος του πλωτήρα	12	m	λ	0,3
Ύψος πύργου	88,5	m	λ	2,2125
Ύψος στο επίπεδο της πλήμνης	90	m	λ	2,25
Διάμετρος πλήμνης	3	m	λ	0,075
Διάμετρος αγκύρωσης στο πλωτήρα	9,4	m	λ	0,235
Διάμετρος αγκύρωσης στο πυθμένα	853,9	m	λ	21,3475
Βάθος αγκύρωσης στο πλωτήρα	70.32	m	λ	1,758

Βάθος αγκύρωσης στο πυθμένα	320	m	λ	8
C_M κάτω από SWL	89,9155	m	λ	2,2479
Ροπή στον άξονα X (Roll)	4,229E+09	kg·m ²	λ ⁵	41,2988
Ροπή στον άξονα Y (Pitch)	4,229E+09	kg·m ²	λ ⁵	41,2988
Ροπή στον άξονα Z (Yaw)	1,642E+09	kg·m ²	λ ⁵	1,6035
Εκτόπισμα	8029	m ³	λ ³	0,1255
Μάζα κατασκευής με έρμα	7466000	kg	λ ³	116,656
Αρχικό μήκος αγκύρωσης	902,2	m	λ	22,555
Διάμετρος κλάδου αγκύρωσης	0,09	m	λ	0,0023
Πυκνότητα μάζας κλάδου αγκύρωσης	77,71	kg/m	λ ²	0,0474
Γωνία μεταξύ κλάδων αγκύρωσης	120	deg	λ ⁰	120
Ακαμψία γραμμής αγκύρωσης	3,916·10 ⁷	Kg	λ ³	611,875
Προδιαγραφές ανεμογεννήτριας NREL-5MW				
Μάζα ρότορα	110000	kg	λ ³	1,6768
Μάζα ατράκτου	240000	kg	λ ³	3,6585
Μάζα πύργου	347500	kg	λ ³	5,2973
Συνολική μάζα	8163830	kg	λ ³	124,4486
Ανωση	8229725	kg	λ ³	125,4531
Πλευστότητα-Μάζα	65895	kg/m	λ ³	1,0045
Προέκταση κλάδου αγκύρωσης	282,6535	m	λ	7,0663

Πίνακας 4.1.1: Προδιαγραφές της πρωτότυπης πλωτής ανεμογεννήτριας Hywind

4.2 Πειραματική διάταξη

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην δεξαμενή της DHI, η οποία έχει 30m μήκος και 20m πλάτος, ενώ το βάθος της είναι 3m. Σε ένα σημείο της δεξαμενής υπάρχει ένας λάκκος που φτάνει τα 12m. Τυπικό σκαρίφημα της πειραματικής δεξαμενής φαίνεται στην Εικόνα 4.2.1. Ο κυματιστήρας αποτελείται από 60 αυτόνομα πτερύγια μήκους 1,5m. Είναι σε θέση να παράγει πρακτικά κύματα όλων των φασμάτων καθώς και συνδυασμούς τους. Η Εικόνα 4.2.2 δείχνει τον κυματιστήρα της πειραματικής δεξαμενής. Ένας παραβολικός αποσβεστήρας κύματος βρίσκεται απέναντι από τον κυματιστήρα, για να ελαχιστοποιεί τις ανακλάσεις των κυμάτων. Τα ρεύματα στη δεξαμενή παράγονται από ακροφύσια υψηλής πίεσης τα οποία αντλούν νερό και βρίσκονται μπροστά από τον κυματιστήρα. Τέλος τα φορτία του ανέμου προσομοιώνονται με τη χρήση ανεμιστήρων που ελεγχόμενων από υπολογιστή.



Εικόνα 4.2.1: Σκαρίφημα της πειραματικής δεξαμενής

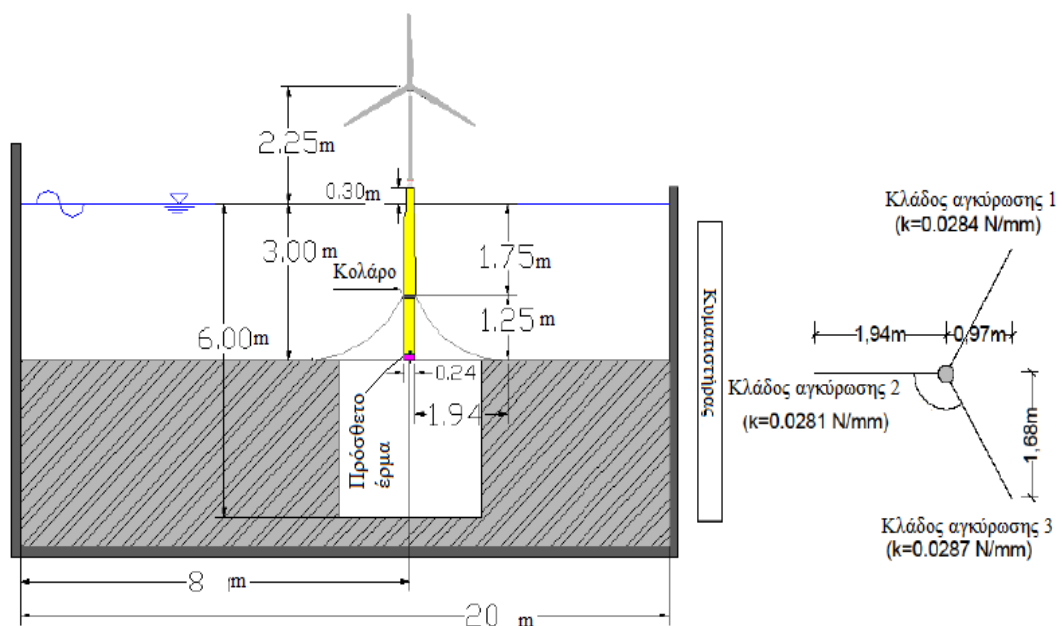


Εικόνα 4.2.2: Κυματιστήρας της πειραματικής δεξαμενής

Προκειμένου να προσομοιαστεί σωστά η δυναμική συμπεριφορά κατασκευάστηκε μοντέλο υπό κλίμακα 1:40 με βάση το OC3- Hywind και υποβλήθηκε σε αεροδυναμικές και υδροδυναμικές φορτίσεις.

Η πλωτή ανεμογεννήτρια μπορεί να διακριθεί σε τρεις κύριες ενότητες. Το κάλυμμα της δομής το οποίο ήταν αφαιρούμενο έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετούνται μέσα όργανα μέτρησης και έρμα. Είχε εξωτερική διάμετρο 162,5 mm και μήκος 400mm. Τα επόμενα 200mm της κατασκευής είχαν κωνικό σχήμα το οποίο είχε μέγιστη διάμετρο 235mm. Το υπόλοιπο σώμα κατασκευάστηκε με μια σταθερή διάμετρο 235mm και μήκους 2,6m. Ένα αποσπώμενο καπάκι στο τέλος της κατασκευής μήκους 100mm τοποθετήθηκε για πρόσθετο έρμα. Το σχεδιασμένο βάθος νερού (SWL) ξεκινούσε σε μια απόσταση 300mm από την κορυφή του άνω κυλίνδρου της κατασκευής. Συνολικά το πλωτό μέσο είχε μήκος 3m και οι γραμμές αγκύρωσης συνδέονταν με τη δομή στα 1,758m από την SWL. Ο πλωτήρας αποτελείται από πυρήνα αραμιδίου και επικάλυψη πολυεστέρα, ενώ για την προσομοίωση του έρματος χρησιμοποιήθηκαν σφαιρίδια μολύβδου.

Το σύστημα αγκύρωσης του μοντέλου περιελάμβανε τρεις γραμμές αγκύρωσης οι οποίες ήταν συνδεδεμένες απευθείας με την κατασκευή μέσω ενός κολάρου. Η αζιμουθιακή γωνία που σχηματίζεται μεταξύ δύο γειτονικών κλάδων είναι 120°. Λόγω του περιορισμένου βάθους του νερού στη δεξαμενή, οι κλάδοι περικόπηκαν σε κατακόρυφη απόσταση των 1,25m και σε οριζόντια απόσταση 1,94m από τα σημεία στερέωσης στο μοντέλο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2.3.



Εικόνα 4.2.3: Σκαρίφημα πειραματικού μοντέλου

Συνολικά τοποθετήθηκαν τρεις μετρητές δύναμης σε κάθε κλάδο αγκύρωσης, κάθε ένα από τα οποία έχει μέγιστη ικανότητα φορτίου 30kg. Οι κλάδοι αγκύρωσης είχαν αρχική προένταση με βάρος 1,5kg ανά κλάδο. Μετά τους μετρητές δύναμης τοποθετήθηκαν ελατήρια μήκους 0,75m με σταθερά ελατηρίου 0,0284 N/mm για το πρώτο κλάδο, 0,0281 N/mm για το δεύτερο και 0,0287N/mm για το τρίτο. Ο κάθε κλάδος έχει εκτατική ακαμψία 6,25 N/mm.

Στη κορυφή του πύργου τοποθετήθηκε μετρητής δύναμης τεσσάρων βαθμών ελευθερίας ενώ η άτρακτος και ο ρότορας της ανεμογεννήτριας ήταν σταθερά εδρασμένα. Ο ρότορας είχε διάμετρο 3,15m. Μεταξύ του κάτω μέρους του πύργου και του πλωτήρα τοποθετήθηκε μετρητής δύναμης έξι βαθμών ελευθερίας καθώς και ένα σύστημα εντοπισμού κίνησης της πλωτής κατασκευής έξι βαθμών ελευθερίας. Ο πύργος είχε συνολικό ύψος 1,8625m.

4.3 Προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων του πειράματος

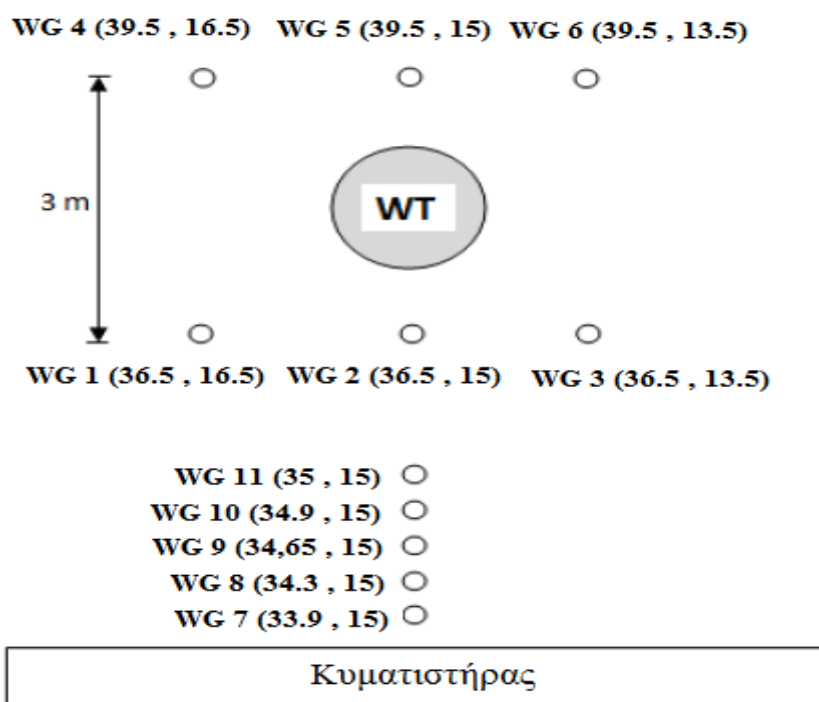
Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στη δεξιά γωνία του κυματιστήρα. Η πλωτή κατασκευή τοποθετήθηκε στο κέντρο του λάκκου σε απόσταση 7m από τον κυματιστήρα ο οποίος εκτείνεται σε όλο το μήκος της δεξαμενής. Οι συντεταγμένες κατά το μήκος της δεξαμενής εκτείνονται από το 0 ως το 30m ξεκινώντας από τα δεξιά. Οι συντεταγμένες κατά το πλάτος εκτείνονται από το 31 ως 51m, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.3.1. Ο κατακόρυφος άξονας είναι θετικός προς τα πάνω. Έτσι το μοντέλο τοποθετήθηκε στο $x=38$ και $y=15$. Κατά τη διάρκεια του πειράματος δημιουργούνται κύματα 0° και 20° .



Εικόνα 4.3.1: Συντεταγμένες πειραματικού μοντέλου

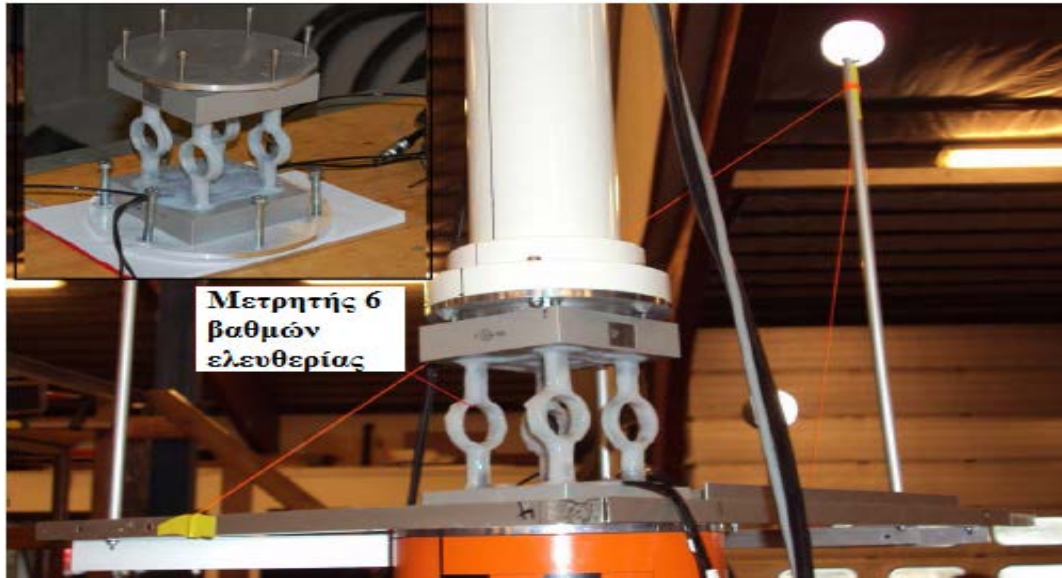
4.4 Θέση αισθητήρων

Συνολικά τοποθετήθηκαν έντεκα μετρητές ύψους κύματος (Wave Gauges) μήκους 60cm γύρω από την κατασκευή. Η ανάκλαση του σχήματος μετρήθηκε με σειρά από πέντε μετρητές ύψους κύματος. Αυτή η σειρά μετρητών κατά την βαθμονόμηση τοποθετήθηκε στο κέντρο του λάκκου της δεξαμενής για να καθορίσει τις κυματικές συνθήκες στην περιοχή της πλωτής κατασκευής. Οι υπόλοιποι έξι μετρητές τοποθετήθηκαν γύρω από την πλωτή κατασκευή, οι τρεις ευθυγραμμισμένοι 1,5m μπροστά από την κατασκευή και οι άλλοι τρεις 1,5m πίσω από αυτήν. Κατά την διάρκεια των δοκιμών η διάταξη των μετρητών φαίνεται στην Εικόνα 4.4.1.



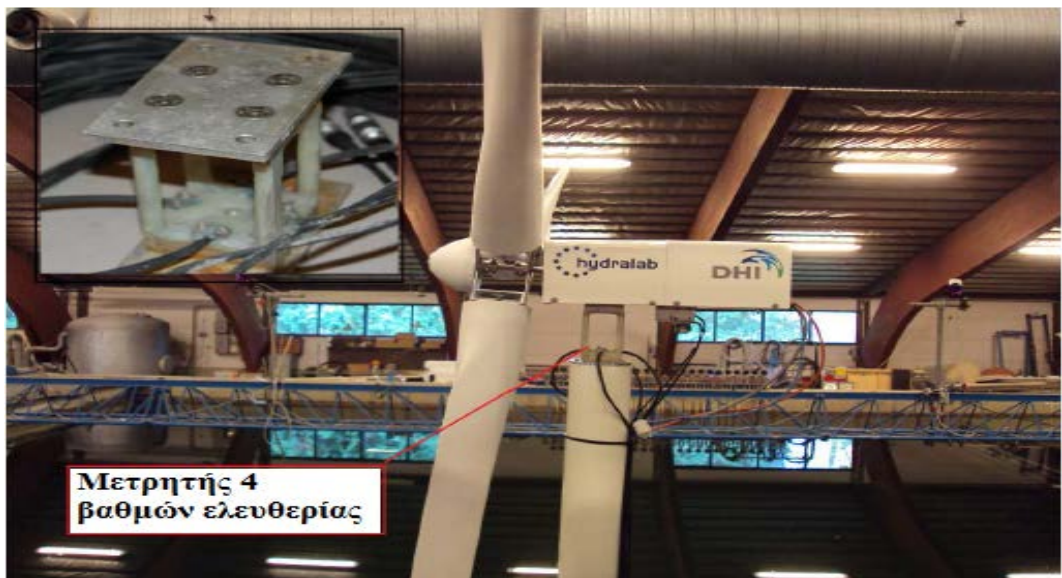
Εικόνα 4.4.1: Διάταξη μετρητών ανύψωσης κύματος

Στη βάση του πύργου τοποθετήθηκε μετρητής δύναμης έξι βαθμών ελευθερίας μετρώντας τις δυνάμεις (F_x , F_y , F_z) και τις ροπές (M_x , M_y , M_z). Συνδέθηκε με μια μεταλλική πλάκα που ήταν στερεωμένη στη πλωτή κατασκευή με έξι μπουλόνια όμοια και με τη βάση του πύργου. Στην Εικόνα 4.4.2 φαίνεται ο μετρητής των έξι βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 4.4.2: Μετρητής έξι βαθμών ελευθερίας

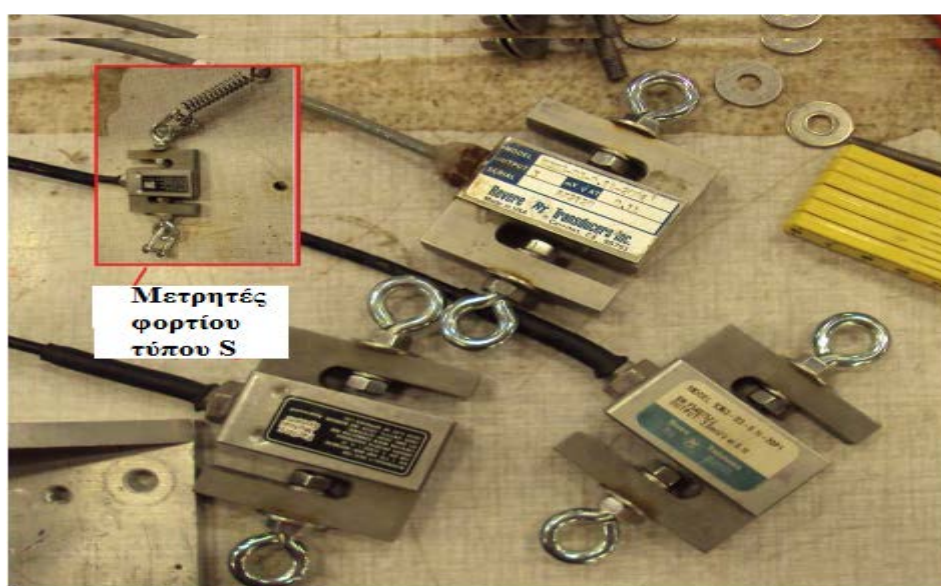
Ο πύργος ήταν ένας λεπτός πλαστικός κύλινδρος εξωτερικής διαμέτρου 80mm και ύψους 161,5cm. Στη κορυφή του πύργου ήταν τοποθετημένος ένας μετρητής δύναμης τεσσάρων βαθμών ελευθερίας ο οποίος μετρούσε δυνάμεις (F_x , F_y) και ροπές (M_x , M_y). Στην Εικόνα 4.4.3 φαίνεται ο μετρητής των τεσσάρων βαθμών ελευθερίας. Στη κορυφή του μετρητή τοποθετήθηκε η άτρακτος της ανεμογεννήτριας. Ένα μοτέρ στο εσωτερικό της ατράκτου έδινε κίνηση στα πτερύγια.



Εικόνα 4.4.3: Μετρητής τεσσάρων βαθμών ελευθερίας

Τα πτερύγια κατασκευάστηκαν από ίνες γυαλιού υπό γεωμετρική κλίμακα και είχαν μήκος 1,575m. Το βήμα των λεπίδων ρυθμίστηκε στις 30°. Αυτό προκαλούσε ώθηση 4N σε 38rpm στο μοντέλο. Για να επιτευχθεί η ζητούμενος ώθηση προστέθηκε μία δύναμη 7 N από ένα βάρος που ήταν δεμένο στη άτρακτο μέσω ενός σχοινιού.

Στο τέλος των κλάδων αγκύρωσης τοποθετήθηκαν ελατήρια τα οποία ήταν συνδεδεμένα με μετρητές δύναμης τύπου S. Ο τρόπος σύνδεσης φαίνεται στην Εικόνα 4.4.4.



Εικόνα 4.4.4: Τρόπος σύνδεσης μετρητών δύναμης τύπου S

Τέλος τοποθετήθηκε μια συσκευή εντοπισμού κίνησης έξι βαθμών ελευθερίας η οποία περιέγραφε την κίνηση της πλατφόρμας. Για την εν λόγω συσκευή χρησιμοποιήθηκαν δύο κάμερες που εξέπεμπαν υπέρυθρο φως. Το υπέρυθρο φως αντικατοπτριζόταν από πέντε σφαιρίδια 40mm τα οποία ήταν τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο και αυτό στη βάση του μοντέλου. Οι πέντε σφαίρες ήταν τοποθετημένες έτσι ώστε να μην είναι στο ίδιο επίπεδο και να εντοπίζονται και από τις δύο κάμερες. Τα δεδομένα της συσκευής μεταφέρονταν απευθείας ως αναλογική έξοδος στο κύριο σύστημα απόκτησης δεδομένων για συγχρονισμό με τα υπόλοιπα καταγεγραμμένα δεδομένα.

Οι δοκιμή ξεκινά όταν η αρχική ελεύθερη επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ηρεμία. Η καταγραφή των δεδομένων ξεκινάει μαζί με τον κυματιστήρα, με το πέρας της δοκιμής η καταγραφή δεδομένων σταματά μαζί με τον κυματιστήρα. Τα δεδομένα καταγράφονται σε αρχεία για επεξεργασία των μετρήσεων.

4.5 Συνθήκες και δεδομένα εξόδου πειράματος

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν προσομοιώνοντας τρεις βασικές μετεωρολογικές προϋποθέσεις:

1. Πρώτα μελετήθηκε η δυναμική της πλωτής κατασκευής χωρίς περιστροφή της ανεμογεννήτριας.
2. Μετά η κατασκευή μελετήθηκε υπό την ταυτόχρονη επίδραση των κυμάτων και της περιστροφής της ανεμογεννήτριας.
3. Επιπλέον εξετάστηκαν ακραίες συνθήκες που προσομοιώθηκαν με κύματα που προκύπτουν μια φορά στα πενήντα χρόνια.

Η κατασκευή ελέγχθηκε με τη χρήση μονής κατεύθυνσης κανονικών και τυχαίων κυματισμών. Οι τυχαίοι κυματισμοί προέκυψαν με δύο διαφορετικές υλοποιήσεις ενός φάσματος JONSWAP ($\gamma=3,3$) για κάθε σημαντικό ύψος κύματος. Τα πειράματα διεξήχθησαν με προσπίπτοντες κυματισμούς 0° και 20° . Το μέγιστο ύψος κύματος που δέχθηκε η κατασκευή ήταν 30cm για κανονικά κύματα και 20cm για τυχαίους κυματισμούς.

Η περιστροφική ταχύτητα του ρότορα διατηρήθηκε σταθερή κατά την διάρκεια των δοκιμών στις 38rpm, η οποία αντιστοιχεί σε μία ταχύτητα περιστροφής 11rpm σε πλήρη κλίμακα. Περαιτέρω δοκιμές εκτελέστηκαν για διάφορες περιστροφικές ταχύτητες της ανεμογεννήτριας οι οποίες αντιστοιχούν σε διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Τέλος στην αρχή του πειράματος έγιναν δοκιμές της πλωτής κατασκευής με ή χωρίς αγκύρωση καθώς και με ή χωρίς την τοποθέτηση του πύργου. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες δοκιμές με το μοντέλο υπό κλίση. Καθώς και δοκιμές βαθμονόμησης των οργάνων, για τα οποία θα γίνουν αναλυτικοί υπολογισμοί στη συνέχεια.

Παρακάτω ακολουθεί οι Πίνακες 4.5.1α και 4.5.1β με τις διάφορες συνθήκες διεξαγωγής των πειραμάτων καθώς και τα αρχεία που αντιστοιχούν:

H [cm]	T (s)	REG/ IRR	Όνομα αρχείου		Rotation
			0°	20°	
2,5	1,6	REG	1377	1389	NR
3,9	2,0		1378	1390	NR
4,5	2,4		1379	1391	NR
10	1,8		1380	1392	NR
15			1381	1393	NR
20			1382	1394	NR
25			1443	1449	NR
15			2,0	1383	1395
15	2,4		-----	1396	NR
30	2,0		1444	1450	NR
30	2,4		1446	1451	NR
10	1,6		IRR	1385-1386	1397-1399
15	1,6	1387-1388		1400-1401	NR
20	2,0	1447-1448		1453-1454	NR

Πίνακας 4.5.1α: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

H [cm]	T (s)	REG/ IRR	Όνομα αρχείου		Rotation
			0°	20°	
2,5	1,6	REG	1403	1424	R
3,9	2,0		1404	1425	R
4,5	2,4		1405	1426	R
10	1,8		1414	1427	R
15			1415	1435	R
20			1416	1436	R
25			1481	-----	R
15			2,0	1417	1437
15	2,4		1418	1438	R
30	2,0		1483	-----	R
30	2,4		1484	-----	R
10	1,6		IRR	1420-1421	1439-1440
15	1,6	1422-1423		1429-1441	R
20	2,0	1482		-----	R

Πίνακας 4.5.1β: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

Τέλος γίνεται επιβεβαίωση ότι έχουμε βαθύ νερό καθώς και υπολογισμός της γραμμικότητας των κυμάτων:

Αν $\kappa \cdot d > \pi \Rightarrow$ βαθύ νερό

$$\omega^2 = \kappa \cdot g \cdot \tanh(\kappa \cdot d)$$

$$\text{προκύπτει: } \frac{\omega^2 \cdot d}{g} = \kappa \cdot d \cdot \tanh(\kappa \cdot d)$$

όπου:

ω : Συχνότητα μοντέλου

d : Βάθος αγκύρωσης μοντέλου

κ : Κυματαριθμός

Με επαναληπτική διαδικασία υπολογίζουμε το $\kappa \cdot d$ για τις διάφορες συχνότητες του πειράματος και προκύπτει:

$$\omega_1=3,927 \Rightarrow \kappa \cdot d=12,576 > \pi$$

$$\omega_2=3,491 \Rightarrow \kappa \cdot d=9,937 > \pi$$

$$\omega_3=3,142 \Rightarrow \kappa \cdot d=8,049 > \pi$$

$$\omega_4=2,618 \Rightarrow \kappa \cdot d=5,589 > \pi$$

Επομένως σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε βαθύ νερό και:

$$\omega^2 = \kappa \cdot g \quad \text{και} \quad \lambda = \frac{2\pi}{\kappa}$$

$$\kappa_1=1,572 \quad \text{και} \quad \lambda_1=3,997$$

Για $H_1=0,025$ $H_1/\lambda_1=0,006 < 0,01$ (Linear)

$$\kappa_2=1,242 \quad \text{και} \quad \lambda_2=5,059$$

Για $H_2=0,1$ $H_2/\lambda_2=0,02 > 0,01$ (Nonlinear)

Για $H_3=0,15$ $H_3/\lambda_2=0,03 > 0,01$ (Nonlinear)

Για $H_4=0,2$ $H_4/\lambda_2=0,04 >0,01$ (Nonlinear)

Για $H_5=0,25$ $H_5/\lambda_2=0,049 >0,01$ (Nonlinear)

$\kappa_3=1,006$ και $\lambda_3=6,245$

Για $H_6=0,039$ $H_6/\lambda_3=0,006 <0,01$ (Linear)

Για $H_7=0,15$ $H_7/\lambda_3=0,024 >0,01$ (Nonlinear)

Για $H_8=0,3$ $H_8/\lambda_3=0,048 >0,01$ (Nonlinear)

$\kappa_4=0,699$ και $\lambda_4=8,993$

Για $H_9=0,045$ $H_9/\lambda_4=0,005 <0,01$ (Linear)

Για $H_{10}=0,15$ $H_{10}/\lambda_4=0,017 >0,01$ (Nonlinear)

Για $H_{11}=0,3$ $H_{11}/\lambda_4=0,033 >0,01$ (Nonlinear)

Αναλυτικά οι τιμές φαίνονται στους πιο κάτω Πίνακες:

Όνομα αρχείου					
0°	Βάθος	Γραμμικότητα	20°	Βάθος	Γραμμικότητα
1377	Βαθύ νερό	Linear	1389	Βαθύ νερό	Linear
1378	Βαθύ νερό	Linear	1390	Βαθύ νερό	Linear
1379	Βαθύ νερό	Linear	1391	Βαθύ νερό	Linear
1380	Βαθύ νερό	Nonlinear	1392	Βαθύ νερό	Nonlinear
1381	Βαθύ νερό	Nonlinear	1393	Βαθύ νερό	Nonlinear
1382	Βαθύ νερό	Nonlinear	1394	Βαθύ νερό	Nonlinear
1443	Βαθύ νερό	Nonlinear	1449	Βαθύ νερό	Nonlinear
1383	Βαθύ νερό	Nonlinear	1395	Βαθύ νερό	Nonlinear
-----			1396	Βαθύ νερό	Nonlinear
1444	Βαθύ νερό	Nonlinear	1450	Βαθύ νερό	Nonlinear
1446	Βαθύ νερό	Nonlinear	1451	Βαθύ νερό	Nonlinear
1385-1386	Βαθύ νερό	Nonlinear	1397-1399	Βαθύ νερό	Nonlinear
1387-1388	Βαθύ νερό	Nonlinear	1400-1401	Βαθύ νερό	Nonlinear
1447-1448	Βαθύ νερό	Nonlinear	1453-1454	Βαθύ νερό	Nonlinear

Πίνακας 4.5.2α: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

Όνομα αρχείου					
0°	Βάθος	Γραμμικότητα	20°	Βάθος	Γραμμικότητα
1403	Βαθύ νερό	Linear	1424	Βαθύ νερό	Linear
1404	Βαθύ νερό	Linear	1425	Βαθύ νερό	Linear
1405	Βαθύ νερό	Linear	1426	Βαθύ νερό	Linear
1414	Βαθύ νερό	Nonlinear	1427	Βαθύ νερό	Nonlinear
1415	Βαθύ νερό	Nonlinear	1435	Βαθύ νερό	Nonlinear
1416	Βαθύ νερό	Nonlinear	1436	Βαθύ νερό	Nonlinear
1481	Βαθύ νερό	Nonlinear	-----	Βαθύ νερό	Nonlinear
1417	Βαθύ νερό	Nonlinear	1437	Βαθύ νερό	Nonlinear
1418	Βαθύ νερό	Nonlinear	1438	Βαθύ νερό	Nonlinear
1483	Βαθύ νερό	Nonlinear	-----	Βαθύ νερό	Nonlinear
1484	Βαθύ νερό	Nonlinear	-----	Βαθύ νερό	Nonlinear
1420-1421	Βαθύ νερό	Nonlinear	1439-1440	Βαθύ νερό	Nonlinear
1422-1423	Βαθύ νερό	Nonlinear	1429-1441	Βαθύ νερό	Nonlinear
1482	Βαθύ νερό	Nonlinear	-----	Βαθύ νερό	Nonlinear

Πίνακας 4.5.2β: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων

4.6 Βαθμονόμηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες είναι μετρητικά όργανα που αντιλαμβάνονται τη μεταβολή κάποιου μεγέθους ως μεταβολή ρεύματος η οποία καταγράφεται στα αρχεία ως μεταβολή τάσης σε Volt. Η μετατροπή των μεταβολών αυτών (volt) στο ανάλογο μέγεθος γίνεται μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι γραμμικής, λογαριθμικής, εκθετικής μορφής και μορφή δύναμης. Οι γραμμικές συναρτήσεις που θα μας απασχολήσουν είναι της μορφής $y=ax+\beta$, 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. Η βαθμονόμηση αφορά της αντιστοίχιση γνωστών τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής με τιμές της ανεξάρτητης μεταβολής, με το τρόπο αυτό προκύπτουν 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, έτσι η διαδικασία βαθμονόμησης τους έγινε με διαφορετική διαδικασία για την κάθε ομάδα αισθητήρων.

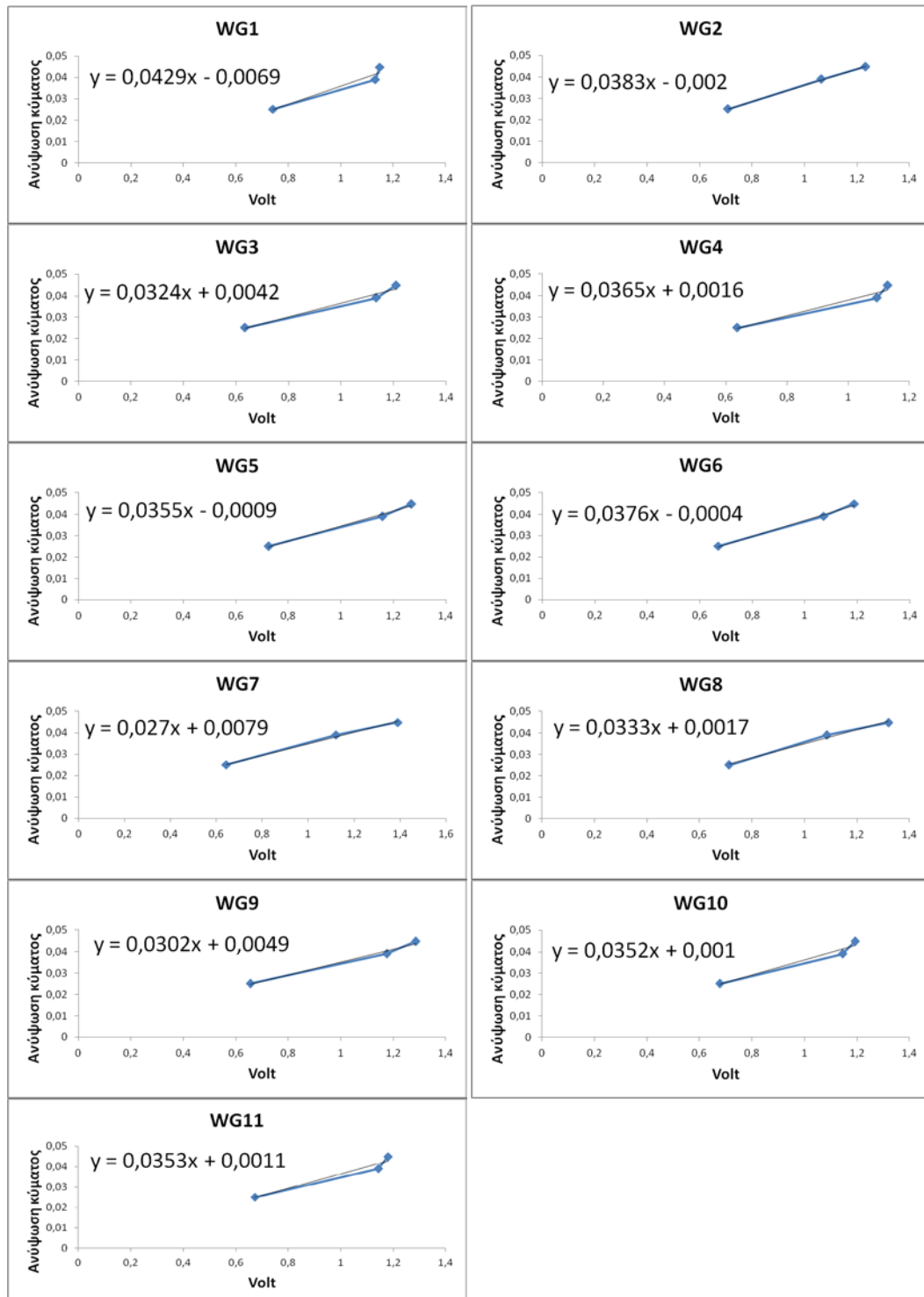
Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης για κάθε ομάδα αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς τους:

4.6.1 Αισθητήρες ανύψωσης κύματος (Wave Gauge)

Τα πειράματα που έγιναν για την βαθμονόμηση των WG αφορούσαν αρμονικούς κυματισμούς ύψους κύματος 0.025m, 0.039m, 0.045m με προσπίπτοντες κυματισμούς 0° .

Από τα αρχεία που είχαμε στη διάθεσή μας πήραμε για κάθε WG στο ανάλογο πείραμα, το μέσο εύρος των περιόδων που καταγράφηκαν και το αντιστοιχίσαμε με το ύψος κύματος του. Με τον τρόπο αυτό είχαμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάκτηση των σημείων για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων μεταφοράς.

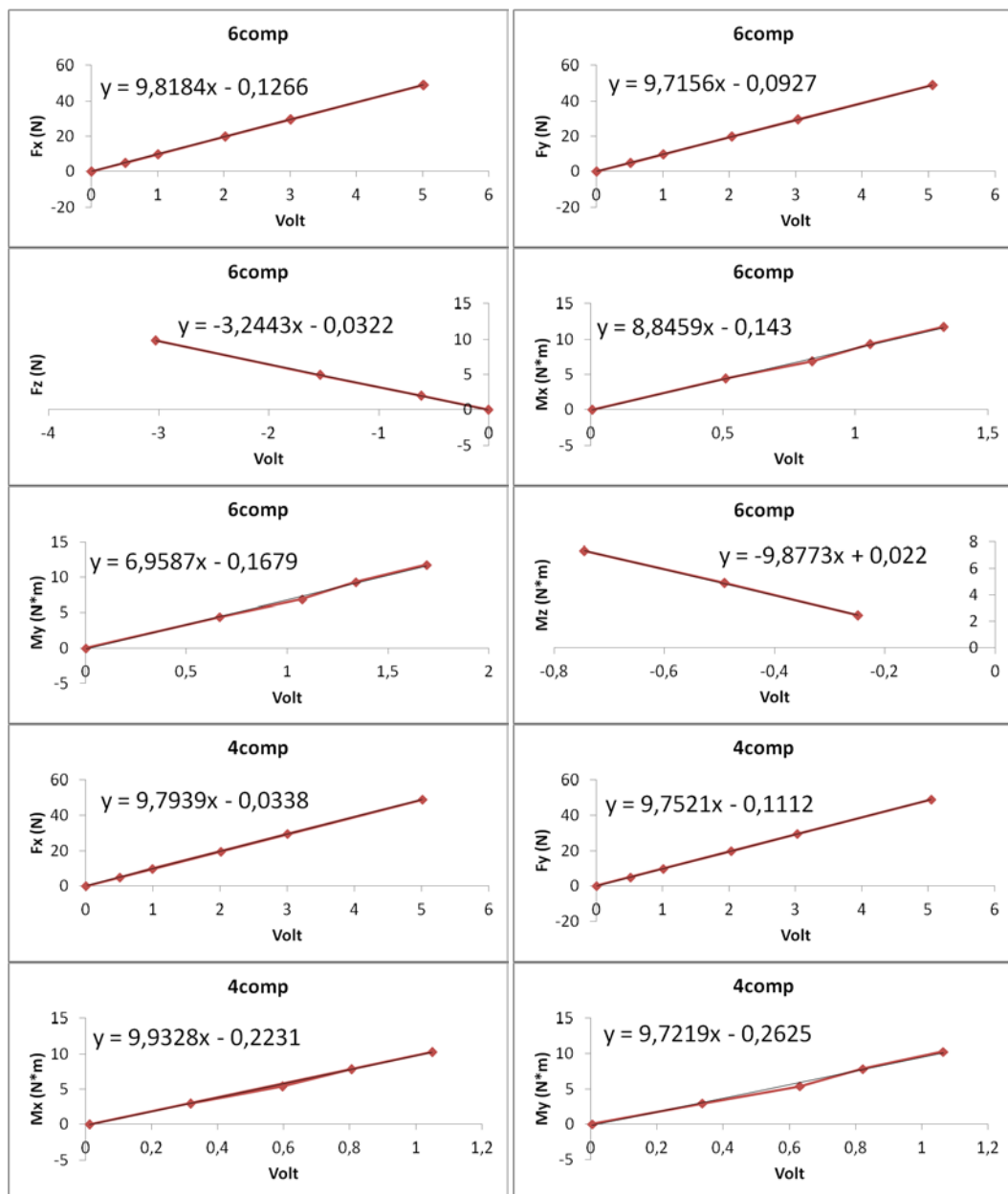
Πιο κάτω παρατίθενται τα Γραφήματα όλων των WG μαζί με τις συναρτήσεις μεταφοράς:



Γράφημα 4.6.1: Συναρτήσεις μεταφοράς αισθητήρων ανύψωσης κύματος

4.6.2 Μετρητής δύναμης τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας

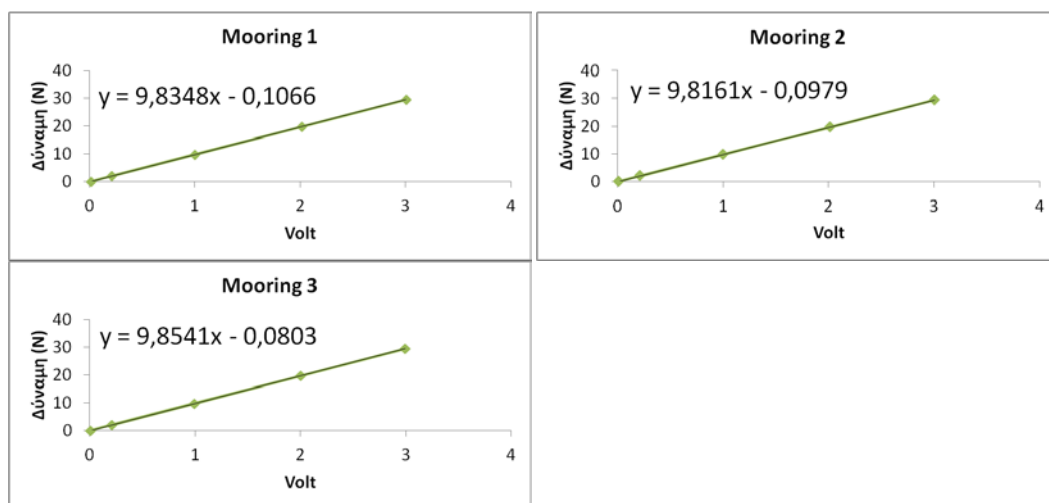
Τα πειράματα που έγιναν για την βαθμονόμηση των δύο αυτών οργάνων αφορούσαν, για τις δυνάμεις F_x , F_y , F_z την τοποθέτηση βαρών για την αντιστοιχία δύναμης- volt και για τις ροπές M_x , M_y , M_z την τοποθέτηση βαρών σε απόσταση από το όργανο για την αντιστοιχία ροπής- volt. Από τα μετρούμενα volt πήραμε τους μέσους όρους των τιμών και τους αντιστοιχήσαμε με τα ανάλογα βάρη- βάρη με απόσταση. Πιο κάτω παρατίθενται τα Γραφήματα όλων των δυνάμεων και ροπών μαζί με τις συναρτήσεις μεταφοράς:



Γράφημα 4.6.2: Συναρτήσεις μεταφοράς μετρητών δύναμης- ροπής

4.6.3 Μετρητές δυνάμεων αγκύρωσης (mooring)

Για τις δυνάμεις που ασκούνταν στους κλάδους αγκύρωσης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με τους μετρητές δυνάμεων τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας. Πιο κάτω παρατίθενται τα Γραφήματα των δυνάμεων μαζί με τις συναρτήσεις μεταφοράς:



Γράφημα 4.6.3: Συναρτήσεις μεταφοράς μετρητών δυνάμεων αγκύρωσης

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με όλα τα όργανα και τις συναρτήσεις μεταφοράς τους:

Όργανο	Συνάρτηση μεταφοράς	Όργανο	Συνάρτηση μεταφοράς
WG1	$y=0.0429x-0.0069$	WG7	$y=0.027x+0.0079$
WG2	$y=0.0383x-0.002$	WG8	$y=0.0333x+0.0017$
WG3	$y=0.0324x+0.0042$	WG9	$y=0.0302x+0.0049$
WG4	$y=0.0365x+0.0016$	WG10	$y=0.0352x+0.001$
WG5	$y=0.0355x-0.0009$	WG11	$y=0.0353x+0.0011$
WG6	$y=0.0376x-0.0004$		
6comp Fx	$y=9.8184x-0.1266$	6comp Mx	$y=8.8459x-0.143$
6comp Fy	$y=9.7156x-0.0927$	6comp My	$y=6.9587x-0.1679$
6comp Fz	$y=-3.2443x-0.0322$	6comp Mz	$y=-9.8773x+0.022$
4compFx	$y=9.7939x-0.0338$	4compMx	$y=9.9328x-0.0979$
4compFy	$y=9.7521x-0.1112$	4compMy	$y=9.7219x-0.2625$
Mooring1	$y=9.8348x-0.1066$	Mooring3	$y=9.8541x-0.0803$
Mooring2	$y=9.8161x-0.0979$		
Surge	$y=0.06x$	Roll	$y=0.04x$
Sway	$y=0.06x$	Pitch	$y=0.04x$
Heave	$y=0.04x$	Yaw	$y=0.18x$

Πίνακας 4.6.1: Συγκεντρωτικός πίνακας οργάνων με τις συναρτήσεις μεταφοράς

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρατεθεί η ανάλυση των μετρήσεων όπως προέκυψαν από το πείραμα. Η ανάλυση έγινε με την βοήθεια του λογισμικού Microsoft Office Excel όπου έγινε η μετατροπή των Volt σε φυσικό μέγεθος με τον τρόπο που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4, καθώς και η αποτύπωση των μεγεθών αυτών σε γραφήματα συναρτήσεως του χρόνου.

Στη συνέχεια έγινε στατιστική ανάλυση των χρονοϊστοριών των φυσικών μεγεθών χρησιμοποιώντας Fast Fourier Transformation (FFT) με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab.

Τέλος τρέξαμε το πρόγραμμα SemiSub^[49] για την εξαγωγή των θεωρητικών αποτελεσμάτων και προχωρήσαμε στις συγκρίσεις με τα πειραματικά, αφού πρώτα είχε γίνει μετατροπή τους ώστε να αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατασκευή.

Οι παρακάτω συντομογραφίες χρησιμοποιήθηκαν για τα στατιστικά μεγέθη.

Συντομογραφία	Επεξήγηση	
MIN	Minimum	Ελάχιστη Τιμή
MAX	Maximum	Μέγιστη Τιμή
MEDIAN	Median	Διάμεσος
MEAN	Mean	Μέση Τιμή
STDEV	Standard Deviation	Τυπική Απόκλιση

Πίνακας 5.1: Συντομογραφίες στατιστικής ανάλυσης

Στον παρακάτω πίνακα επεξηγείται η συντομογραφία των μετρούμενων πειραματικών μεγεθών, καθώς και το ανάλογο χρώμα που θα χρησιμοποιήσουμε σε όλη την παρουσίαση για το αντίστοιχο μετρούμενο μέγεθος.

Συντομογραφία	Επεξήγηση
WG1-11	Ανύψωση κύματος (m)
6 comp Fx	Δύναμη στον άξονα x στον πλωτήρα (N)
6 comp Fy	Δύναμη στον άξονα y στον πλωτήρα (N)
6 comp Fz	Δύναμη στον άξονα z στον πλωτήρα (N)
6 comp Mx	Ροπή στον άξονα x στον πλωτήρα (N·m)
6 comp My	Ροπή στον άξονα y στον πλωτήρα (N·m)
6 comp Mz	Ροπή στον άξονα z στον πλωτήρα (N·m)
4 comp Fx	Δύναμη στον άξονα x στο ύψος της A/Γ (N)
4 comp Fy	Δύναμη στον άξονα y στο ύψος της A/Γ (N)
4 comp Mx	Ροπή στον άξονα x στο ύψος της A/Γ (N·m)
4 comp My	Ροπή στον άξονα y στο ύψος της A/Γ (N·m)
Mooring 1-3	Δύναμη στον κλάδο αγκύρωσης (N)
Spar Surge	Οριζόντια ταλάντωση στον άξονα x (m)
Spar Sway	Οριζόντια ταλάντωση στον άξονα y (m)
Spar Heave	Κατακόρυφη ταλάντωση στον άξονα z (m)
Spar Roll	Διατοιχισμός (Deg)
Spar Pitch	Προνευτασμός (Deg)
Spar Yaw	Στροφική οριζόντια ταλάντωση (Deg)

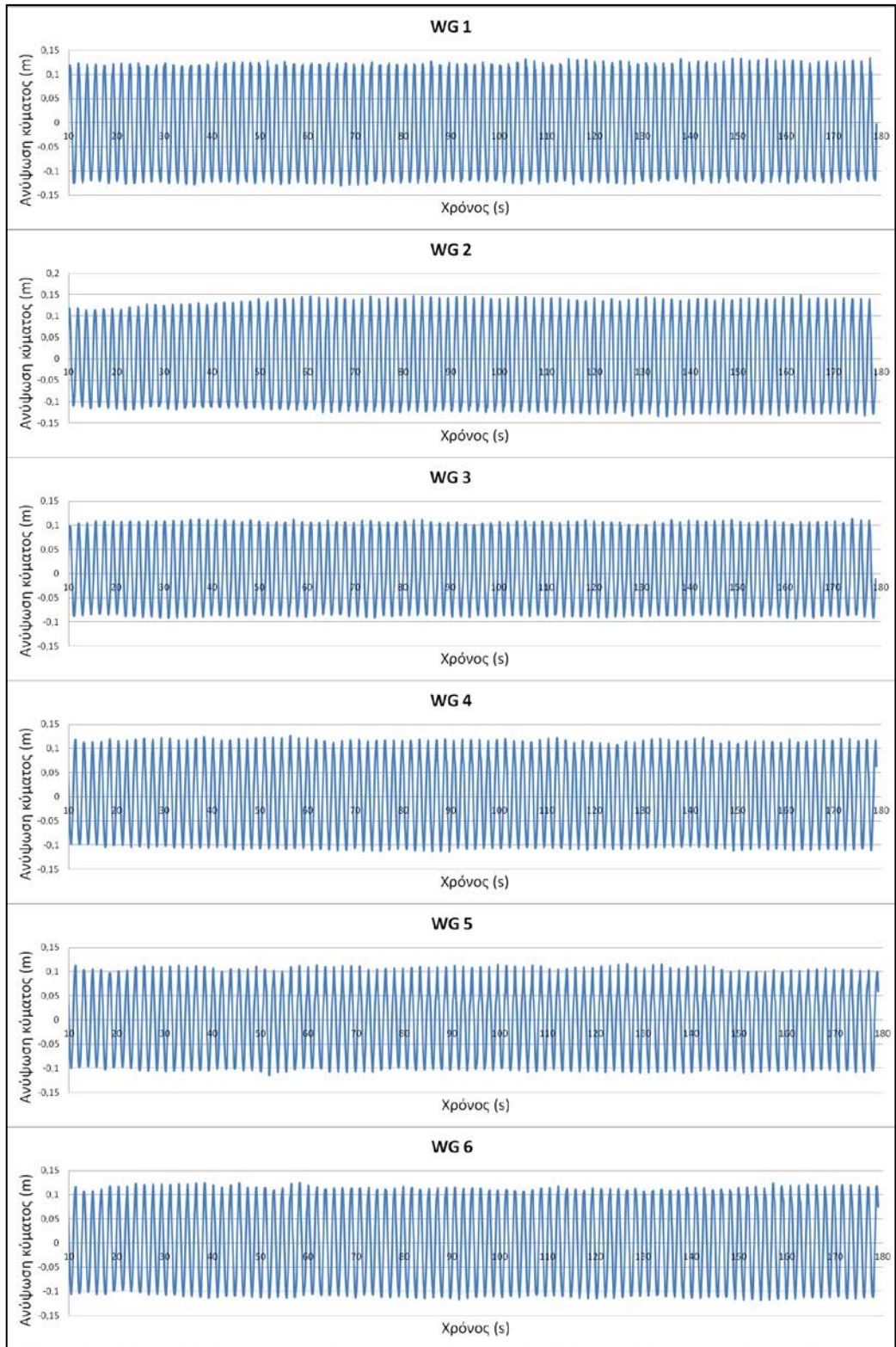
Πίνακας 5.2: Συντομογραφίες μετρούμενων πειραματικών μεγεθών

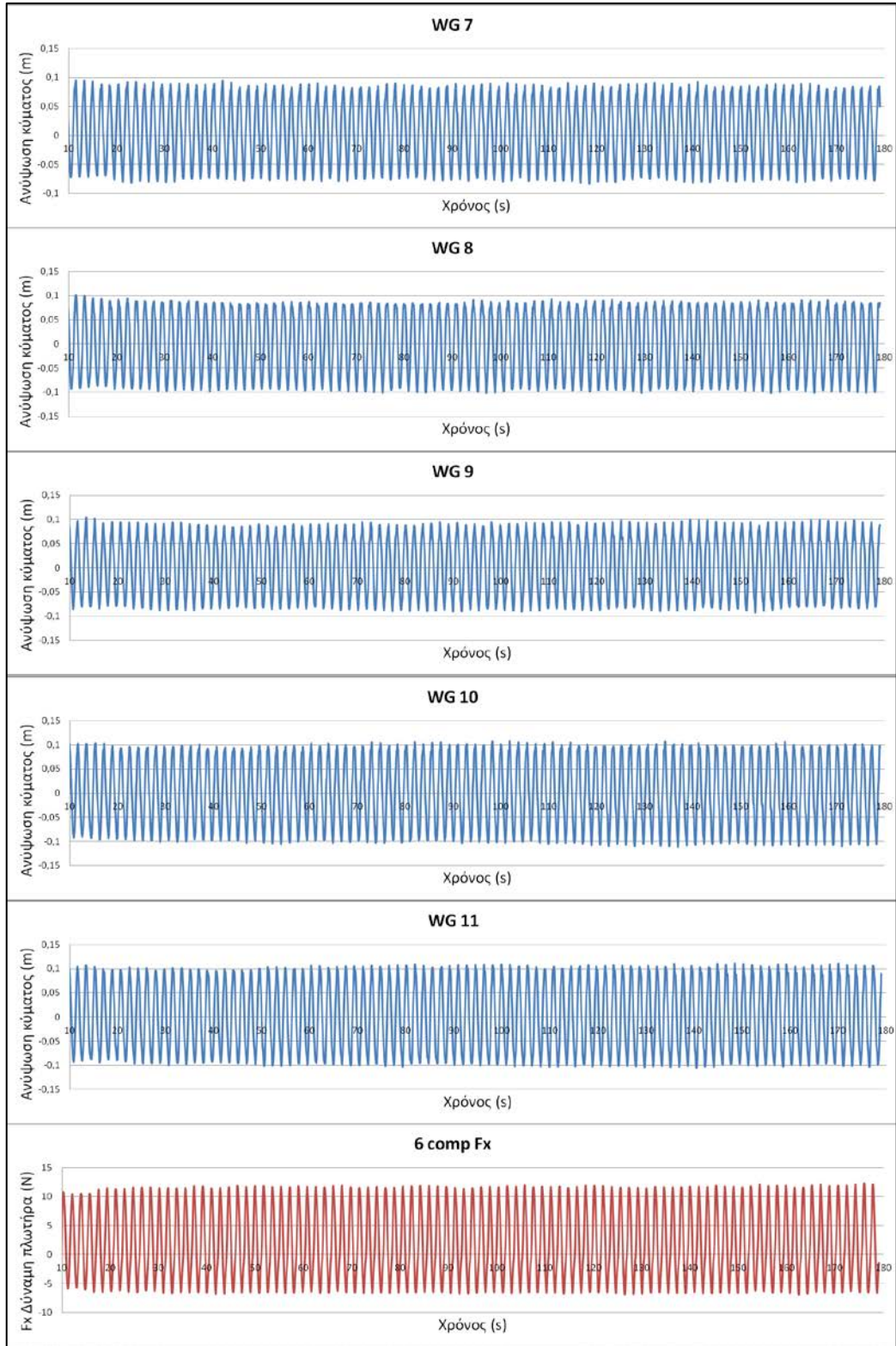
5.1 Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων

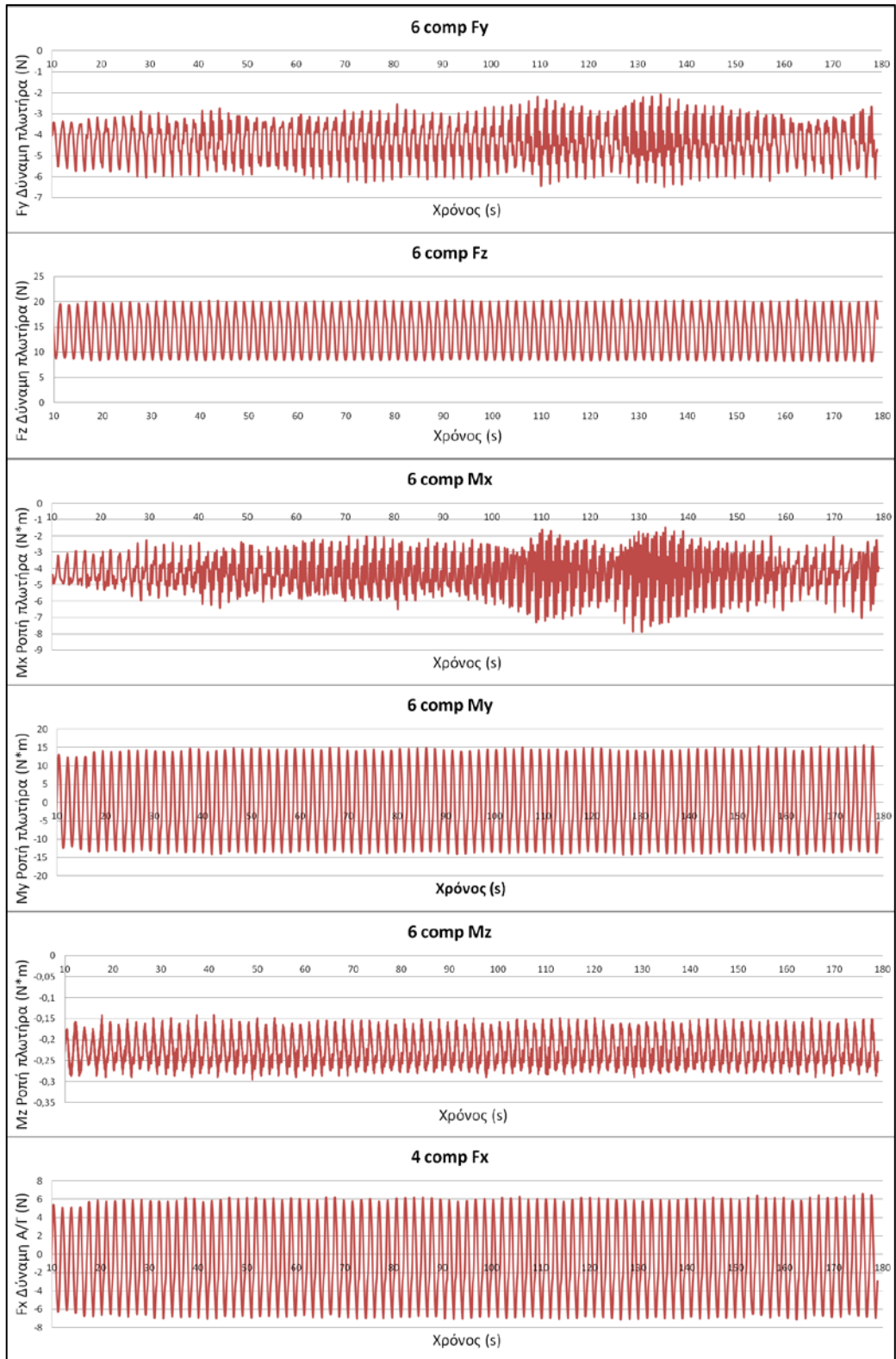
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων σε κανονικούς κυματισμούς. Η συνολική τους παρουσίαση παρατίθεται στο Παράρτημα 3.

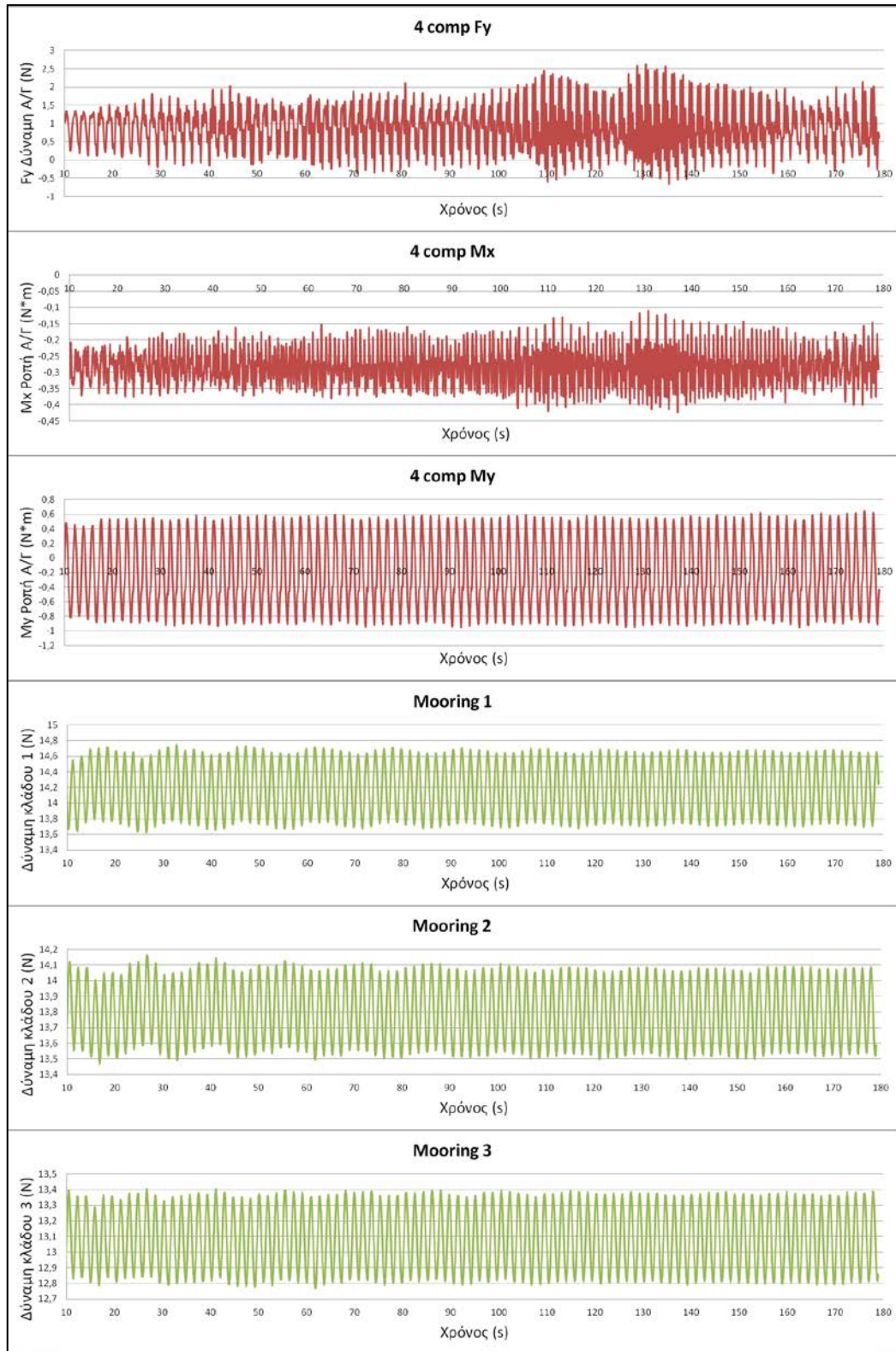
Ύψος Κύματος (m)			0,2			
Περίοδος Κύματος (s)			1,8			
0/20 (Degrees)			0			
Rotation/No Rotation			NR			
	WG1 (m)	WG2 (m)	WG3 (m)	WG4 (m)	WG5 (m)	WG6 (m)
MIN	-0,1304	-0,1337	-0,0933	-0,1136	-0,1141	-0,1185
MAX	0,1338	0,1481	0,1134	0,1258	0,1163	0,1241
STDEV	0,0871	0,0904	0,0680	0,0748	0,0687	0,0779
MEAN	-0,0083	-0,0021	0,0043	0,0018	-0,0002	-0,0001
MEDIAN	-0,0114	-0,0057	-0,0025	0,0013	0,0039	-0,0003
	WG7 (m)	WG8 (m)	WG9 (m)	WG10 (m)	WG11 (m)	6Comp Fx (N)
MIN	-0,0832	-0,1018	-0,0924	-0,1118	-0,1054	-6,9202
MAX	0,0966	0,1013	0,1034	0,1084	0,1116	12,2838
STDEV	0,0546	0,0651	0,0599	0,0686	0,0711	6,0456
MEAN	0,0082	0,0021	0,0048	0,0017	0,0012	2,0531
MEDIAN	0,0112	0,0056	0,0088	0,0018	-0,0001	1,4576
	6Comp Fy (N)	6Comp Fz (N)	6Comp Mx (N·m)	6Comp My (N·m)	6Comp Mz (N·m)	4Comp Fx (N·m)
MIN	-6,4876	8,0880	-7,8700	-14,2589	-0,2954	-7,1439
MAX	-2,0613	20,5129	-1,4621	15,6385	-0,1417	6,5784
STDEV	0,8511	3,9508	1,0410	9,2085	0,0346	4,2185
MEAN	-4,3380	13,9072	-4,2734	-0,3050	-0,2244	-0,7321
MEDIAN	-4,2571	13,9486	-4,3075	-1,4617	-0,2314	-1,2164
	4Comp Fy (N)	4Comp Mx (N·m)	4Comp My (N·m)	Mooring1 (N)	Mooring2 (N)	Mooring 3 (N)
MIN	-0,6579	-0,4224	-0,9494	13,6288	13,4681	12,7682
MAX	2,6276	-0,1100	0,6457	14,7449	14,1620	13,4041
STDEV	0,5519	0,0500	0,4680	0,3245	0,1879	0,1926
MEAN	0,8942	-0,2817	-0,2039	14,1928	13,8009	13,0851
MEDIAN	0,9295	-0,2839	-0,2874	14,1869	13,7896	13,0813
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)	Yaw (Deg)
MIN	-0,1151	0,1583	-0,0422	0,0252	-0,0092	-0,8193
MAX	0,1005	0,1788	-0,0070	0,0428	0,0738	-0,0577
STDEV	0,0675	0,0033	0,0098	0,0034	0,0261	0,2311
MEAN	-0,0054	0,1689	-0,0249	0,0328	0,0340	-0,4527
MEDIAN	-0,0057	0,1689	-0,0254	0,0326	0,0346	-0,4611

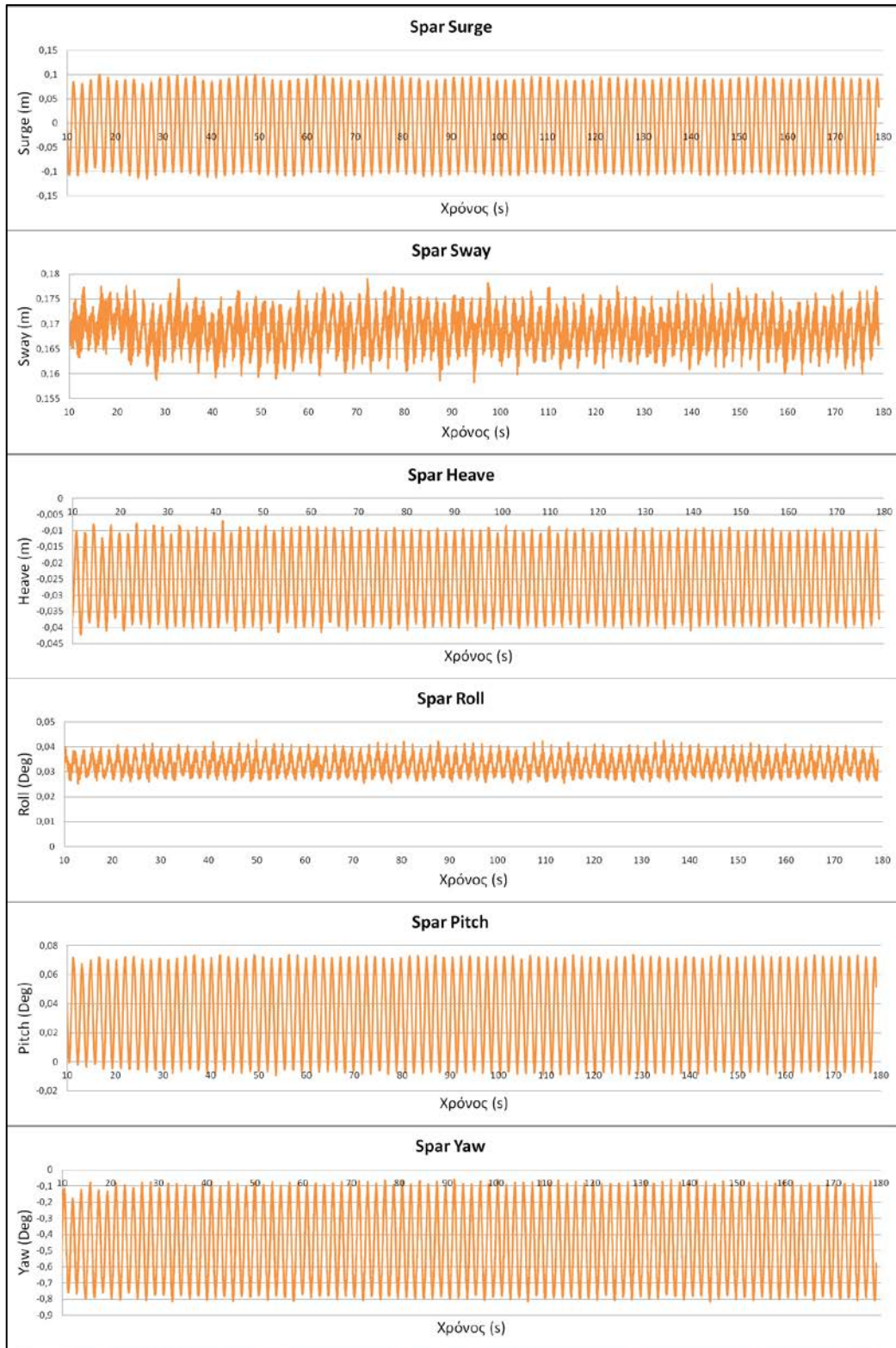
Πίνακας 5.1.1: Πείραμα 1382







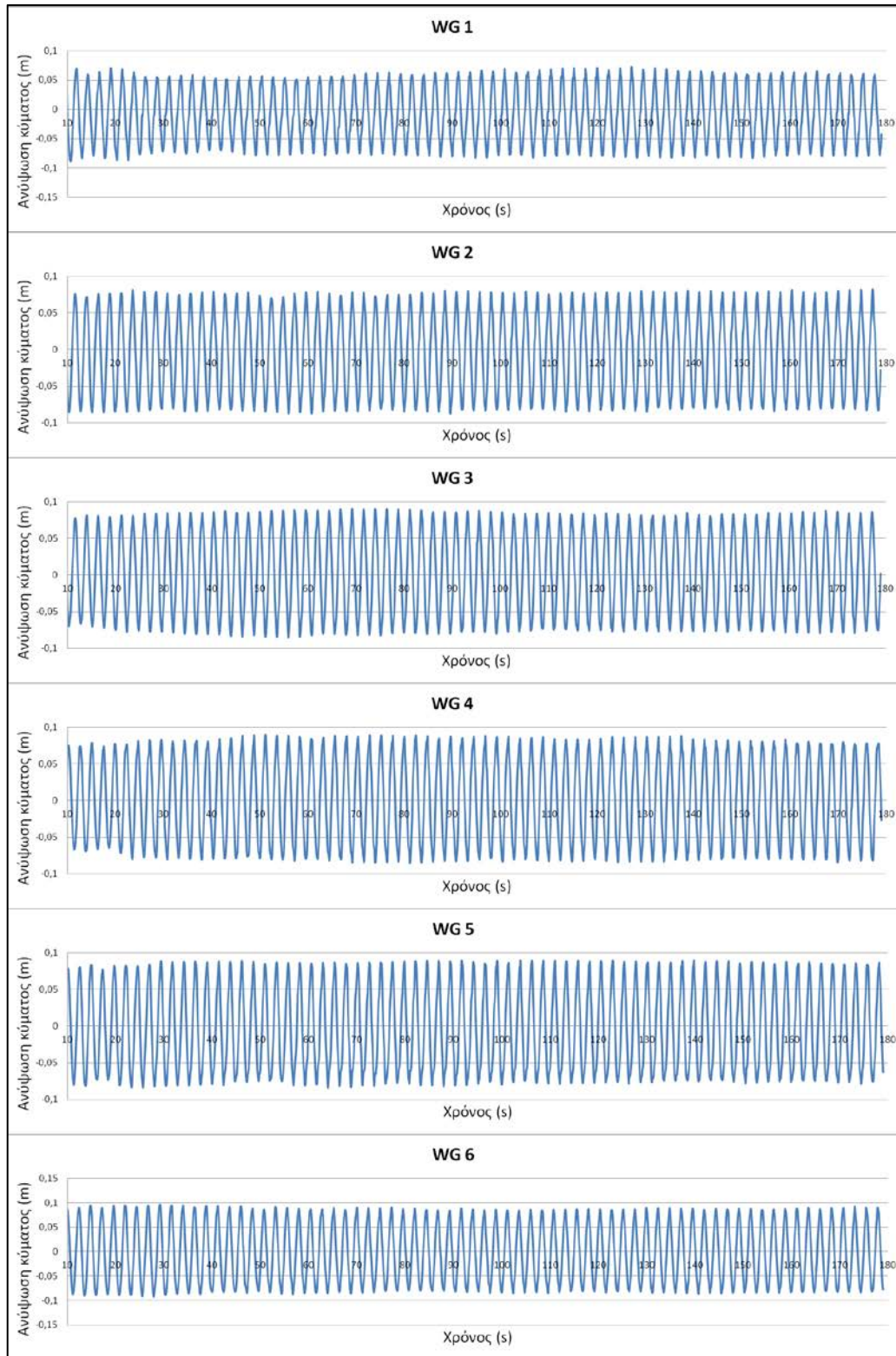


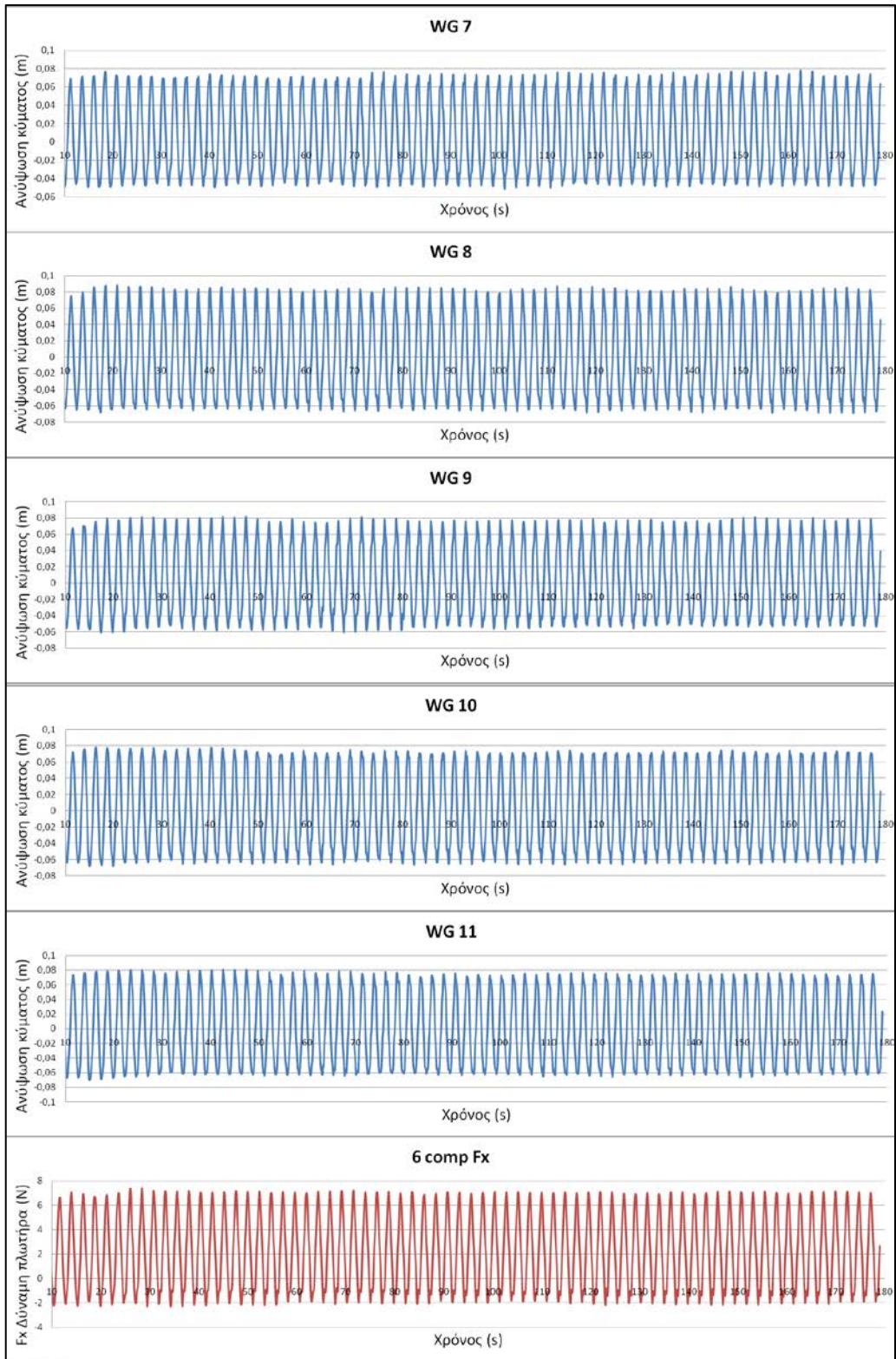


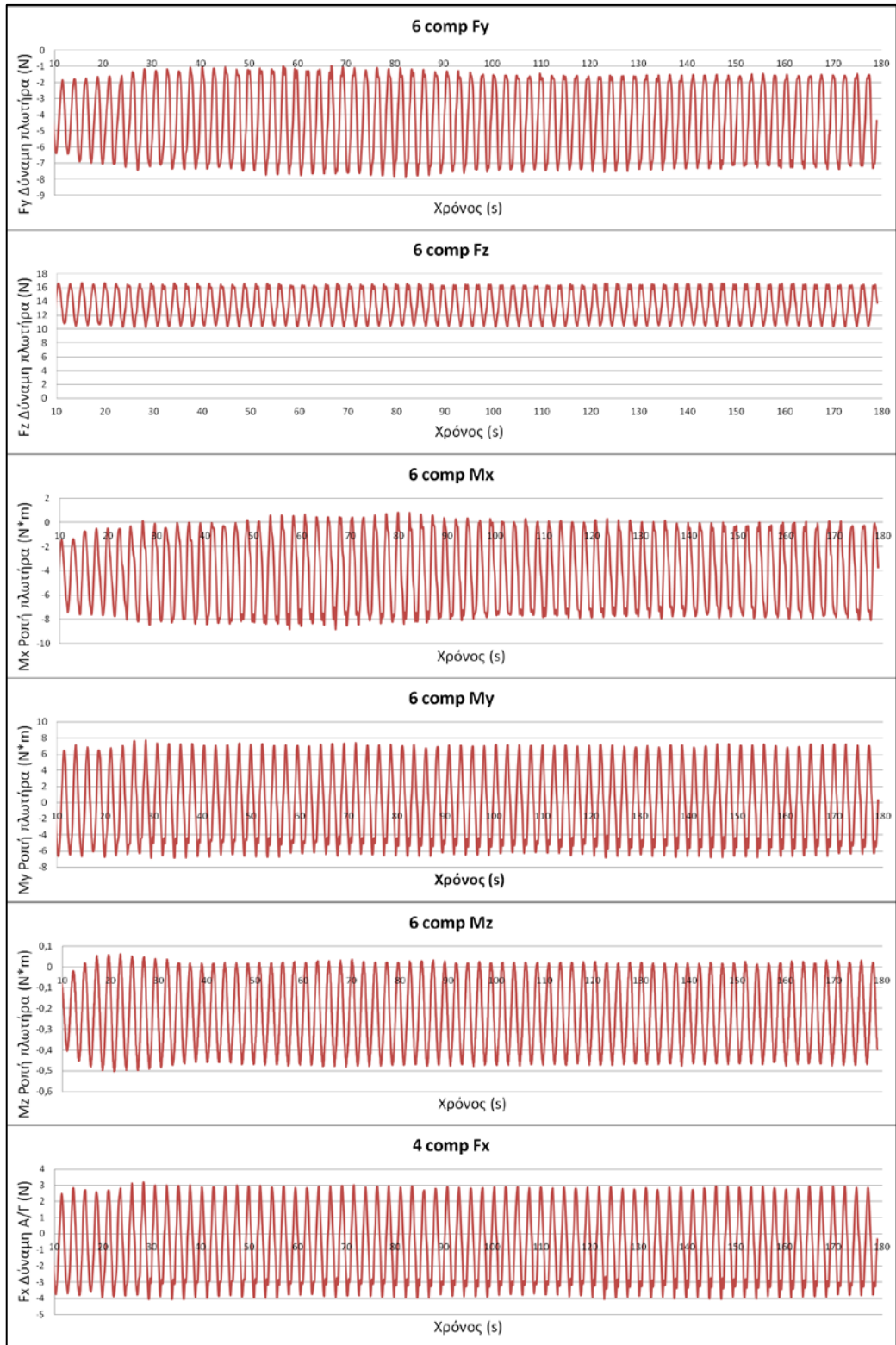
Γράφημα 5.1.1: Πείραμα 1382

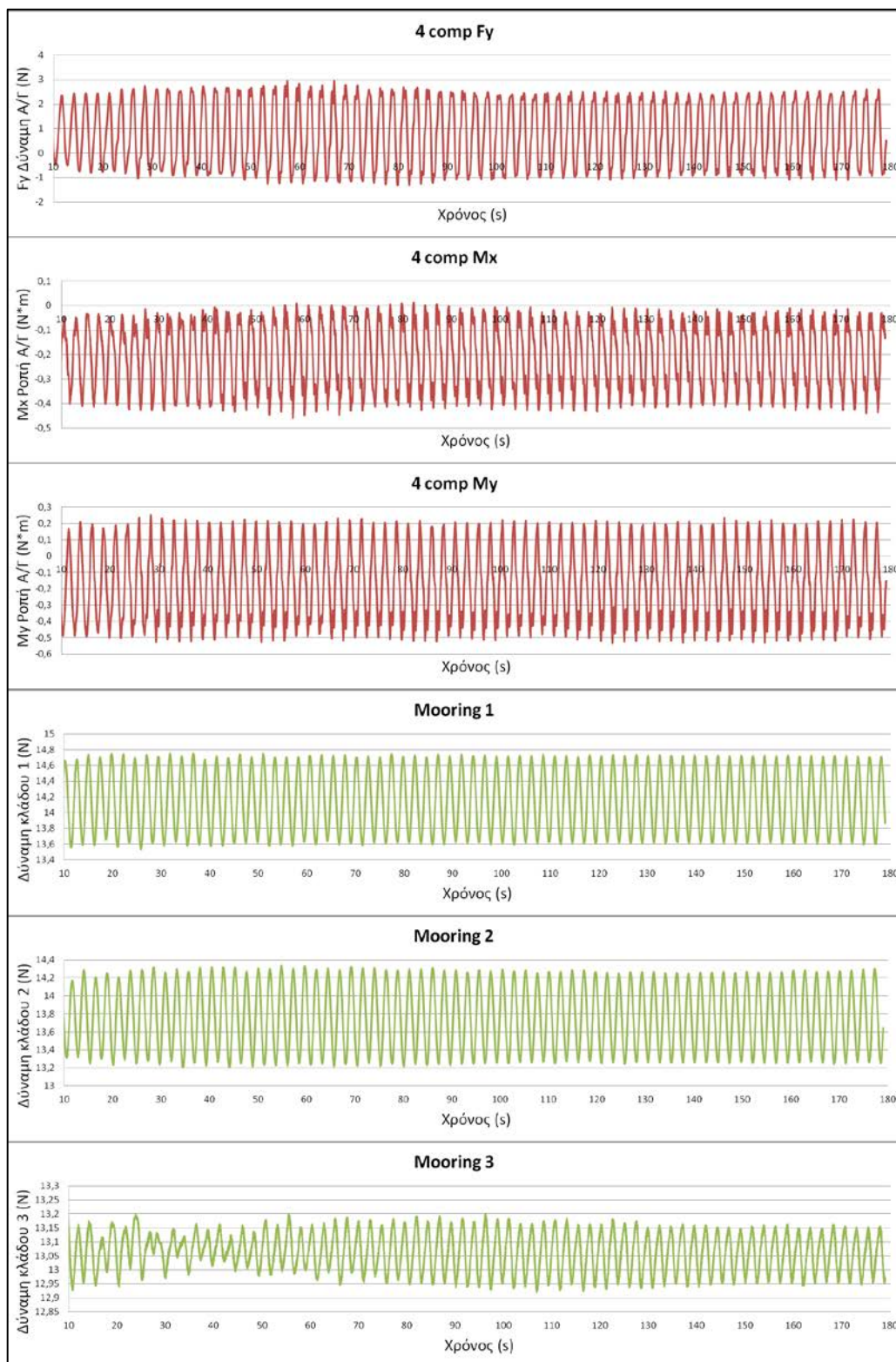
Υψος Κύματος (m)				0,15		
Περίοδος Κύματος (s)				2,4		
0/20 (Degrees)				20		
Rotation/No Rotation				NR		
	WG1 (m)	WG2 (m)	WG3 (m)	WG4 (m)	WG5 (m)	WG6 (m)
MIN	-0,0928	-0,0873	-0,0854	-0,0858	-0,0842	-0,0920
MAX	0,0777	0,0821	0,0901	0,0894	0,0897	0,0958
STDEV	0,0457	0,0534	0,0549	0,0557	0,0560	0,0584
MEAN	-0,0087	-0,0038	0,0033	0,0016	-0,0014	-0,0013
MEDIAN	-0,0089	-0,0007	0,0041	0,0022	-0,0037	-0,0025
	WG7 (m)	WG8 (m)	WG9 (m)	WG10 (m)	WG11 (m)	6Comp Fx (N)
MIN	-0,0514	-0,0698	-0,0607	-0,0710	-0,0730	-2,4472
MAX	0,0783	0,0885	0,0811	0,0780	0,0807	7,3681
STDEV	0,0414	0,0491	0,0437	0,0479	0,0489	2,9991
MEAN	0,0076	0,0016	0,0043	0,0012	0,0006	2,1626
MEDIAN	0,0029	-0,0041	-0,0001	-0,0033	-0,0048	2,0928
	6Comp Fy (N)	6Comp Fz (N)	6Comp Mx (N·m)	6Comp My (N·m)	6Comp Mz (N·m)	4Comp Fx (N·m)
MIN	-7,8548	10,3150	-8,8252	-7,0294	-0,5036	-4,0571
MAX	-0,9682	16,8047	0,8268	7,7072	0,0601	3,1804
STDEV	2,1514	2,0292	2,8797	4,4279	0,1668	2,2071
MEAN	-4,2749	13,6039	-4,0941	-0,2209	-0,2224	-0,7067
MEDIAN	-4,1406	13,5278	-4,2444	-0,3922	-0,2250	-0,7734
	4Comp Fy (N)	4Comp Mx (N·m)	4Comp My (N·m)	Mooring1 (N)	Mooring2 (N)	Mooring3 (N)
MIN	-1,3188	-0,4579	-0,5333	13,5331	13,2040	12,9056
MAX	2,9501	0,0124	0,2517	14,7513	14,3403	13,2411
STDEV	1,2710	0,1288	0,2215	0,3842	0,3555	0,0687
MEAN	0,8045	-0,2047	-0,1679	14,1541	13,7653	13,0639
MEDIAN	0,8315	-0,1938	-0,1707	14,1518	13,7482	13,0654
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)	Yaw (Deg)
MIN	-0,1064	0,1052	-0,0466	0,0060	0,0018	-1,8973
MAX	0,0936	0,2314	-0,0079	0,0574	0,0634	0,9614
STDEV	0,0649	0,0366	0,0107	0,0138	0,0187	0,8778
MEAN	-0,0039	0,1693	-0,0268	0,0325	0,0343	-0,4684
MEDIAN	-0,0024	0,1693	-0,0271	0,0331	0,0354	-0,4769

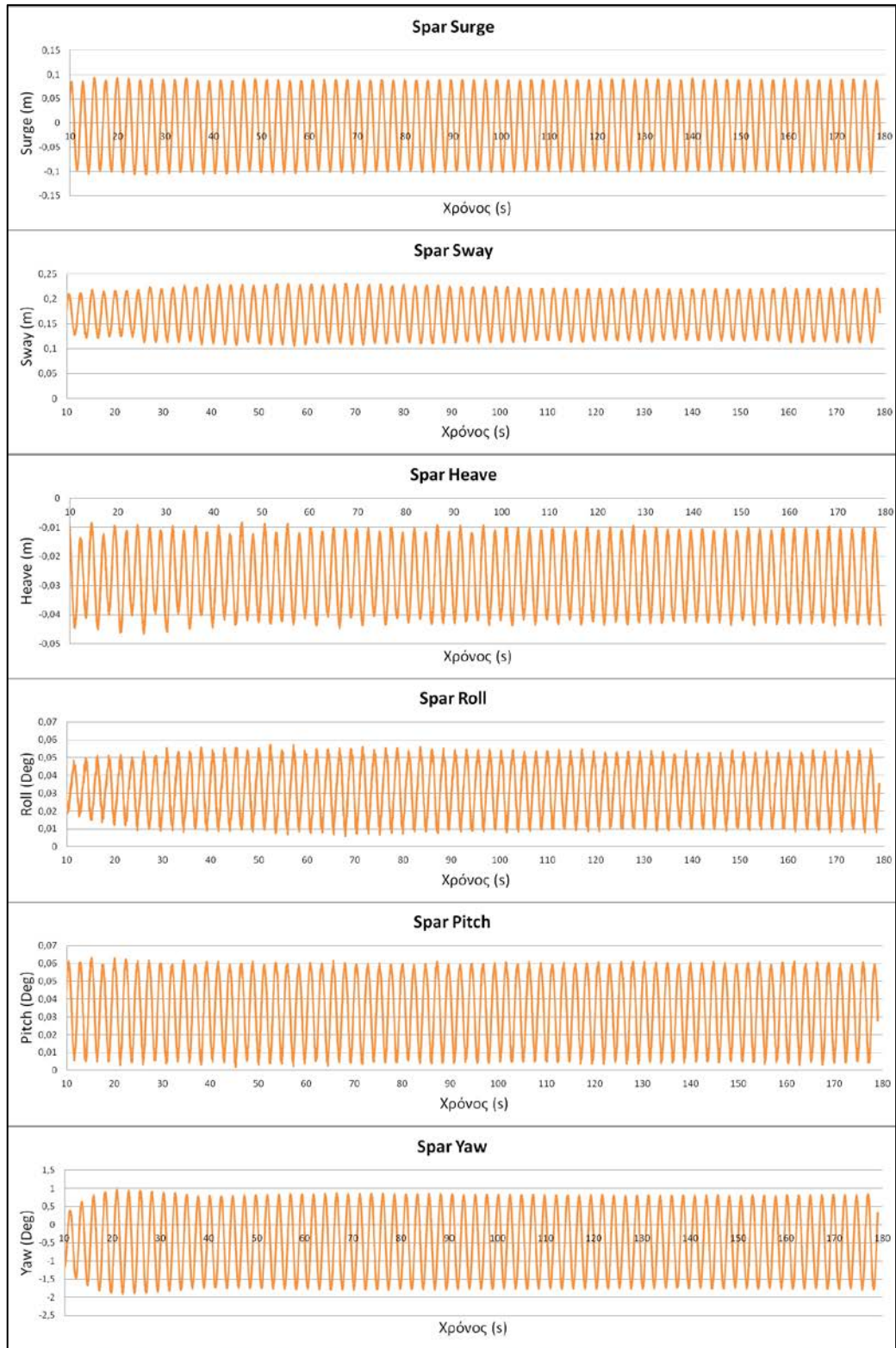
Πίνακας 5.1.2: Πείραμα 1396







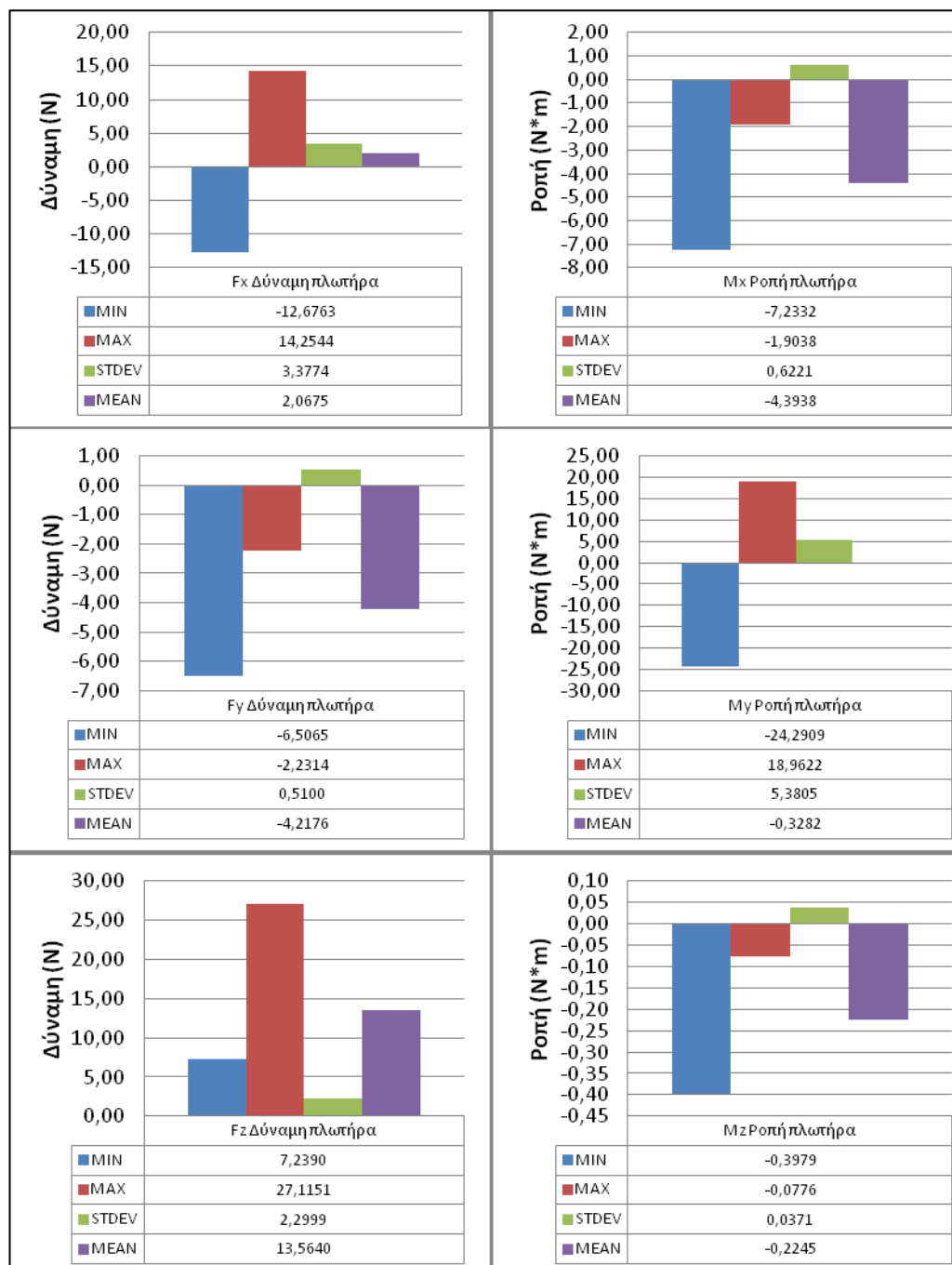


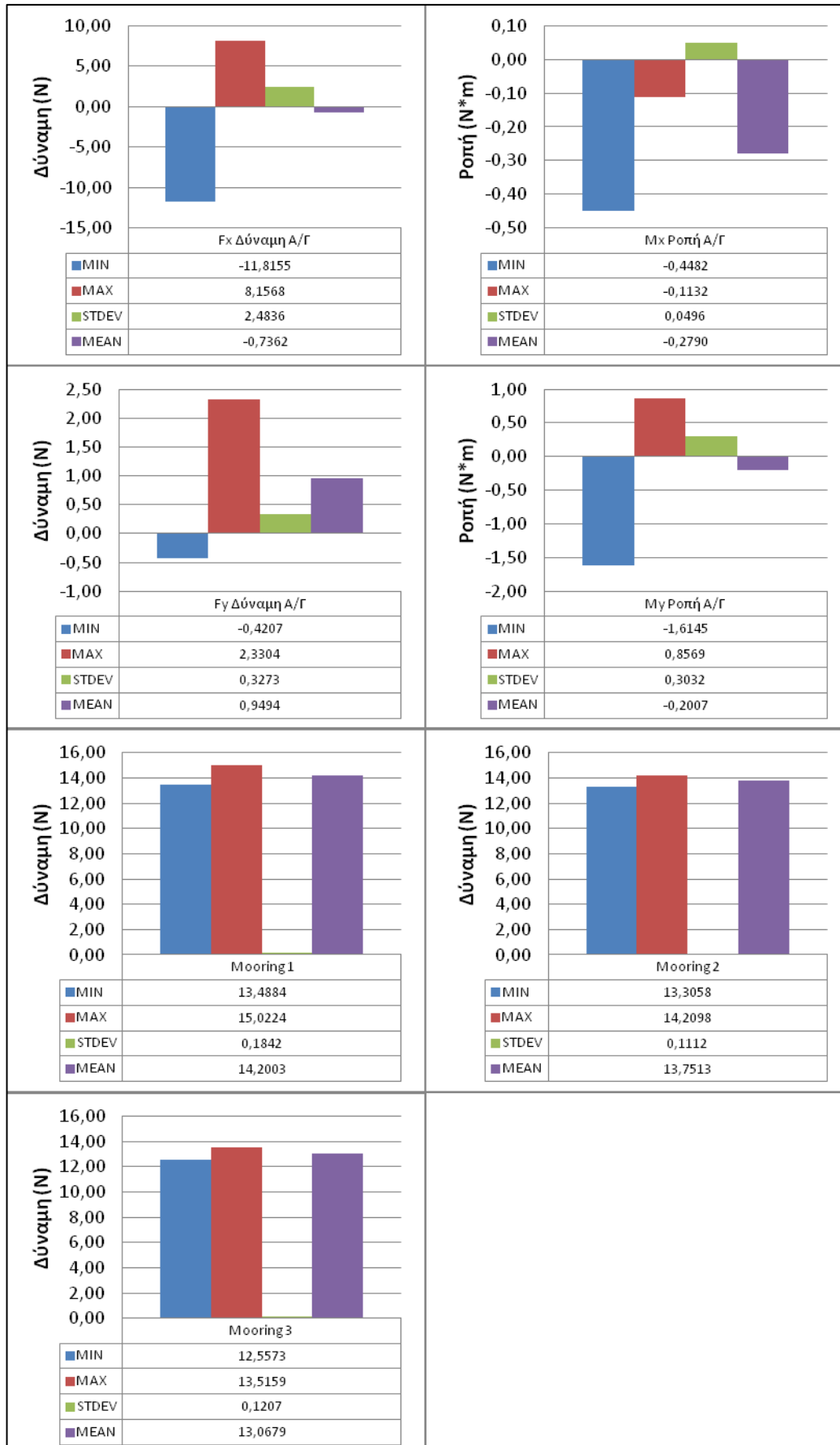


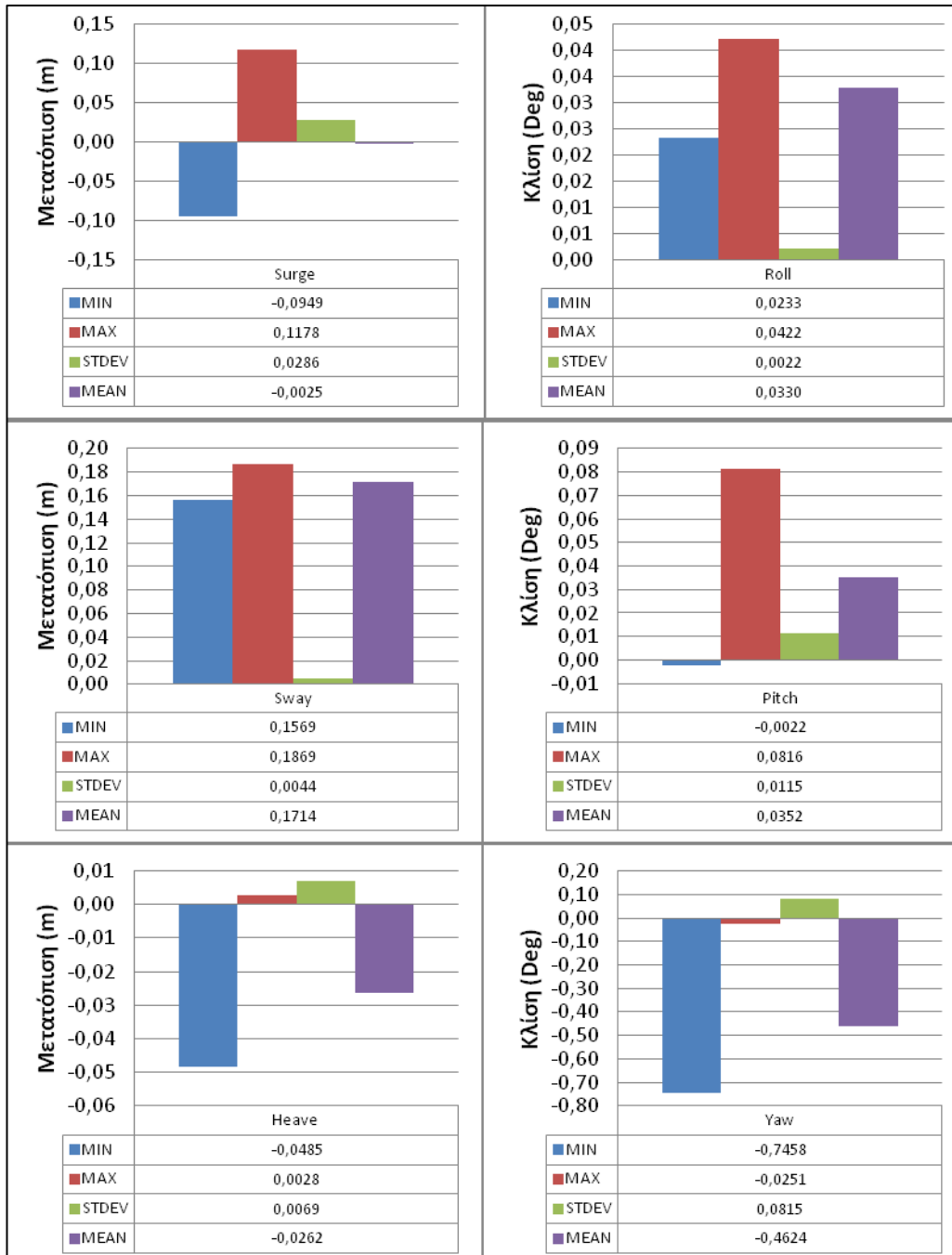
Γράφημα 5.1.2: Πείραμα 1396

Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων σε τυχαίους κυματισμούς. Η συνολική τους παρουσίαση παρατίθεται στο Παράρτημα 4.

Ύψος Κύματος (m)	0,1
Περίοδος Κύματος (s)	1,6
0/20 (Degrees)	0
Rotation/No Rotation	NR







Γράφημα 5.1.3: Πείραμα 1385-1386

5.2 Στατιστική ανάλυση πειραματικών μετρήσεων

Στο επόμενο βήμα της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων έγινε στατιστική ανάλυση των μετρούμενων 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.

Στη στατιστική επεξεργασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε να γίνει χρήση του κώδικα **FFTOM.m** και του λογισμικού MATLAB^[50]. Ο κώδικας FFTOM.m έχει αναπτυχθεί από τον Θ. Π. Μαζαράκο (2010), 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, standard deviation για το κάθε μέγεθος. Τέλος κάνει **Fast Fourier Transformation (FFT)** για το κάθε μέγεθος.^{[51][52]}

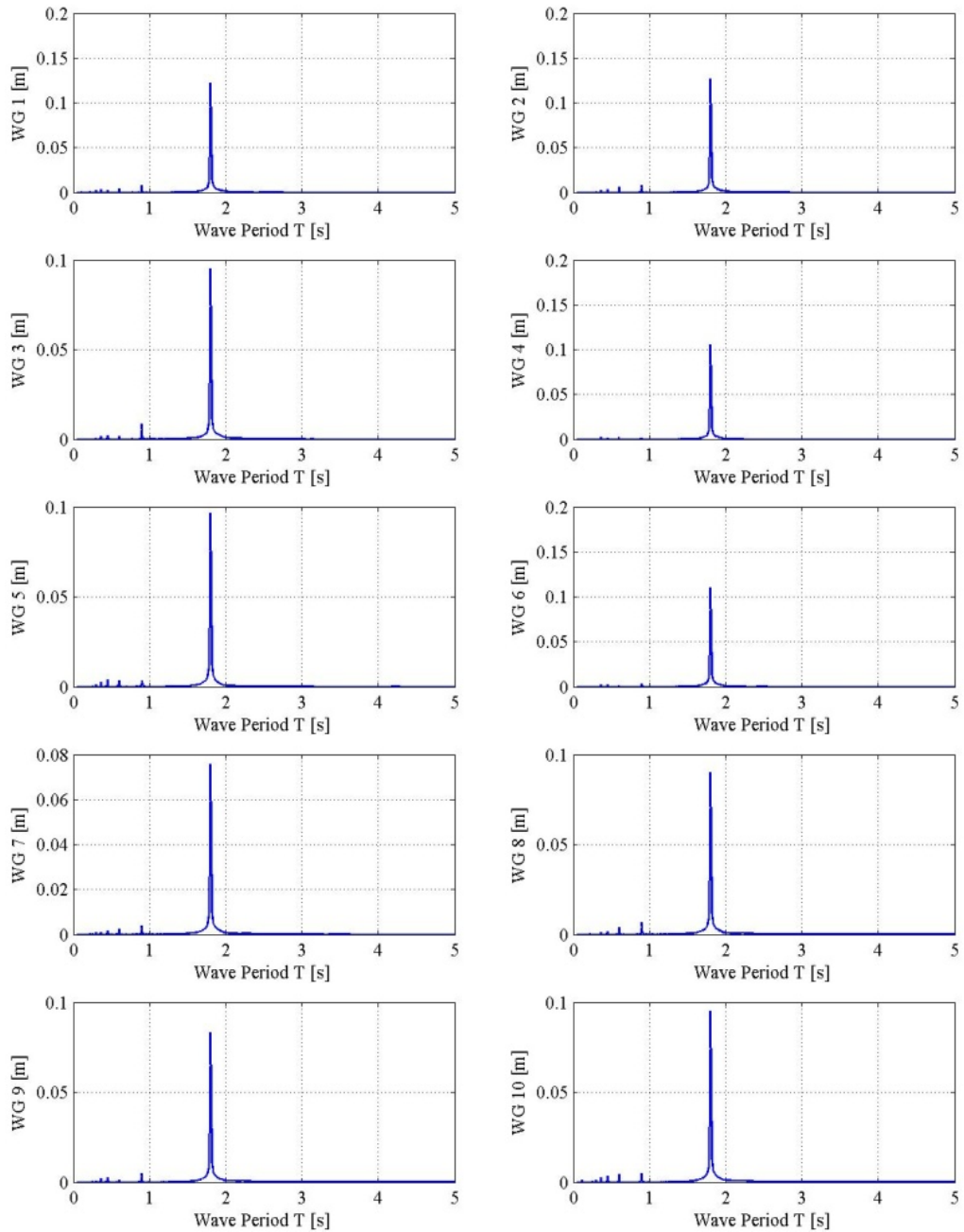
Για κάθε πειραματική μέτρηση, εκτελείται η ακόλουθη ανάλυση μέσω του κώδικα FFTOM.m:

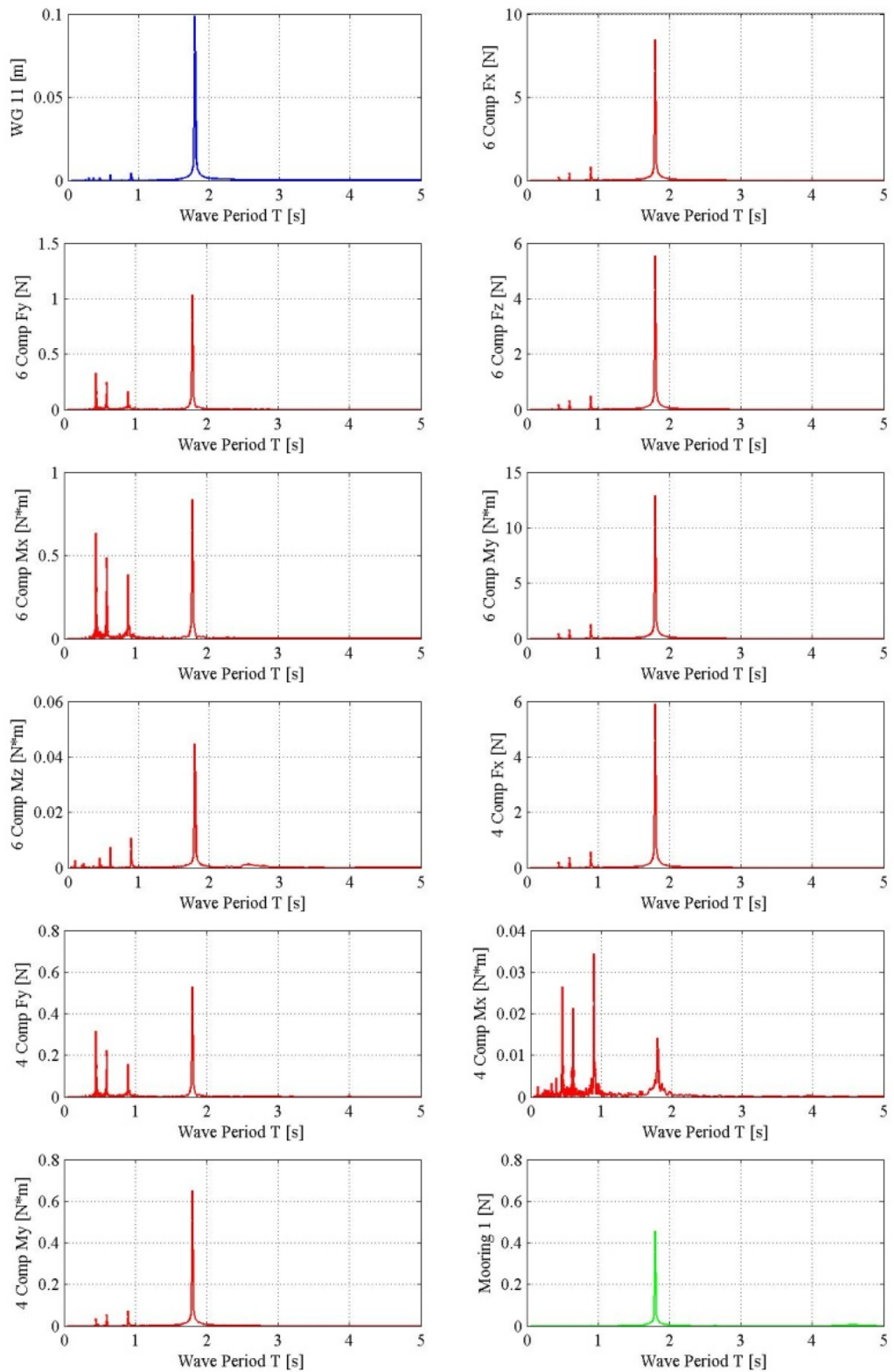
1. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για την αρχή της πειραματικής μέτρησης (5s για τους απλούς αρμονικούς κυματισμούς και 1s στο ήρεμο νερό). Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: Zmin, Zmax, Zmean, Zstd.

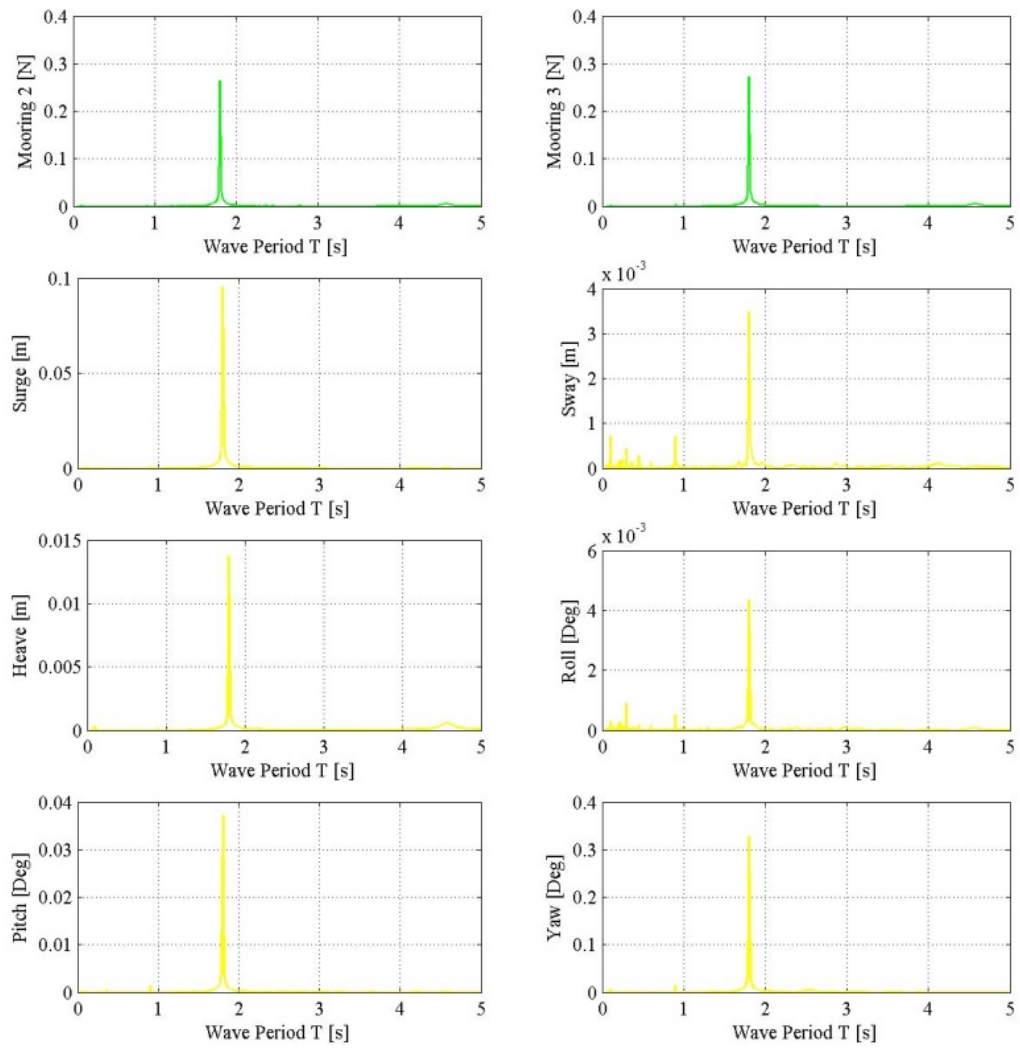
2. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για επιλεγμένο διάστημα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: Vmin, Vmax, Vmean, Vstd.

3. Οι μέσες τιμές στην αρχή πρέπει να αφαιρεθούν από τις μέσες τιμές κατά τη διάρκεια του επιλεγμένου διαστήματος ως εξής: Vmean-Zmean.

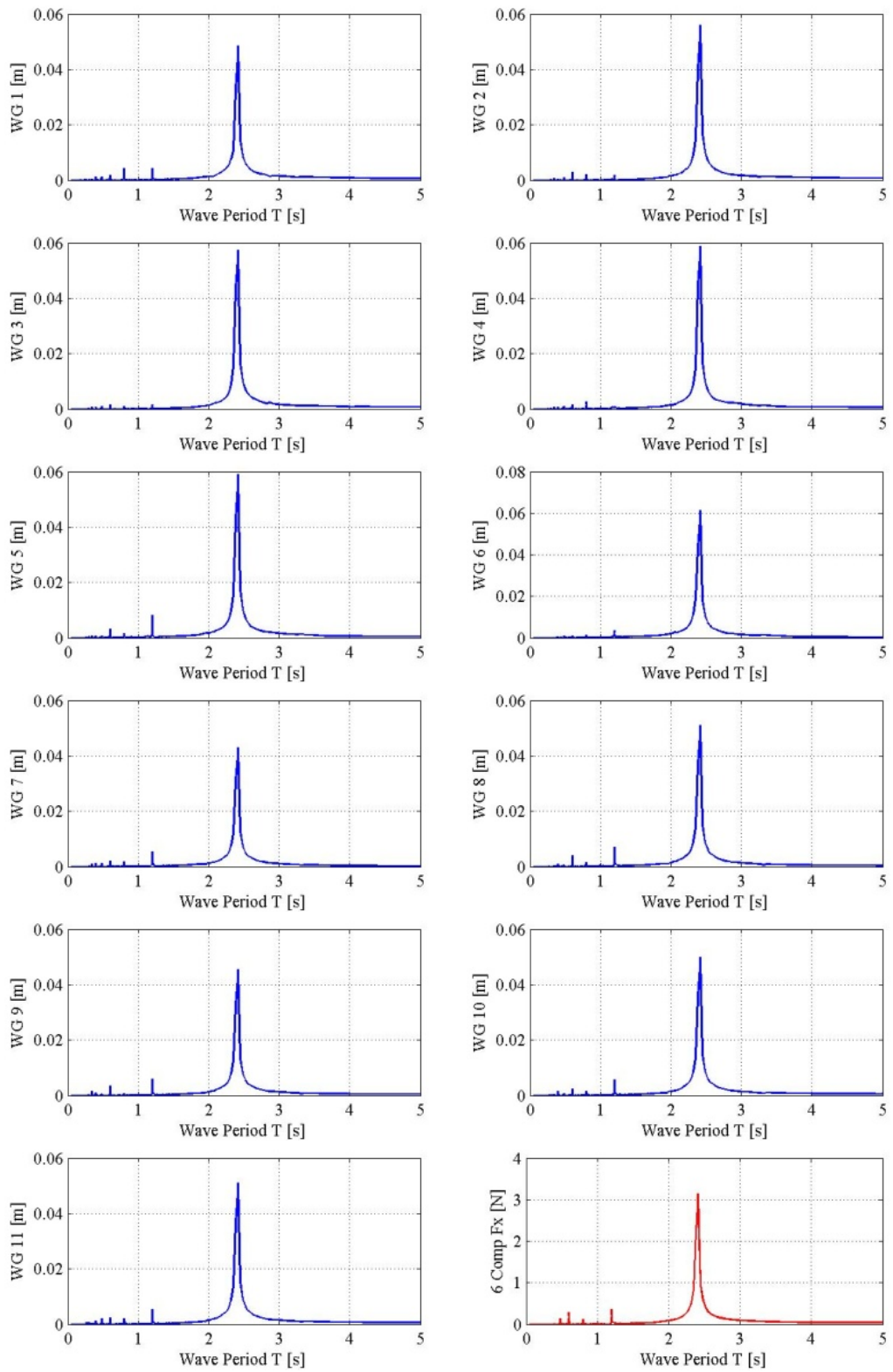
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της στατιστικής ανάλυσης των ίδιων πειραματικών μετρήσεων που παρουσιάστηκαν και στην προηγούμενη ενότητα. Η στατιστική ανάλυση του συνόλου των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζεται στο Παράρτημα 5.

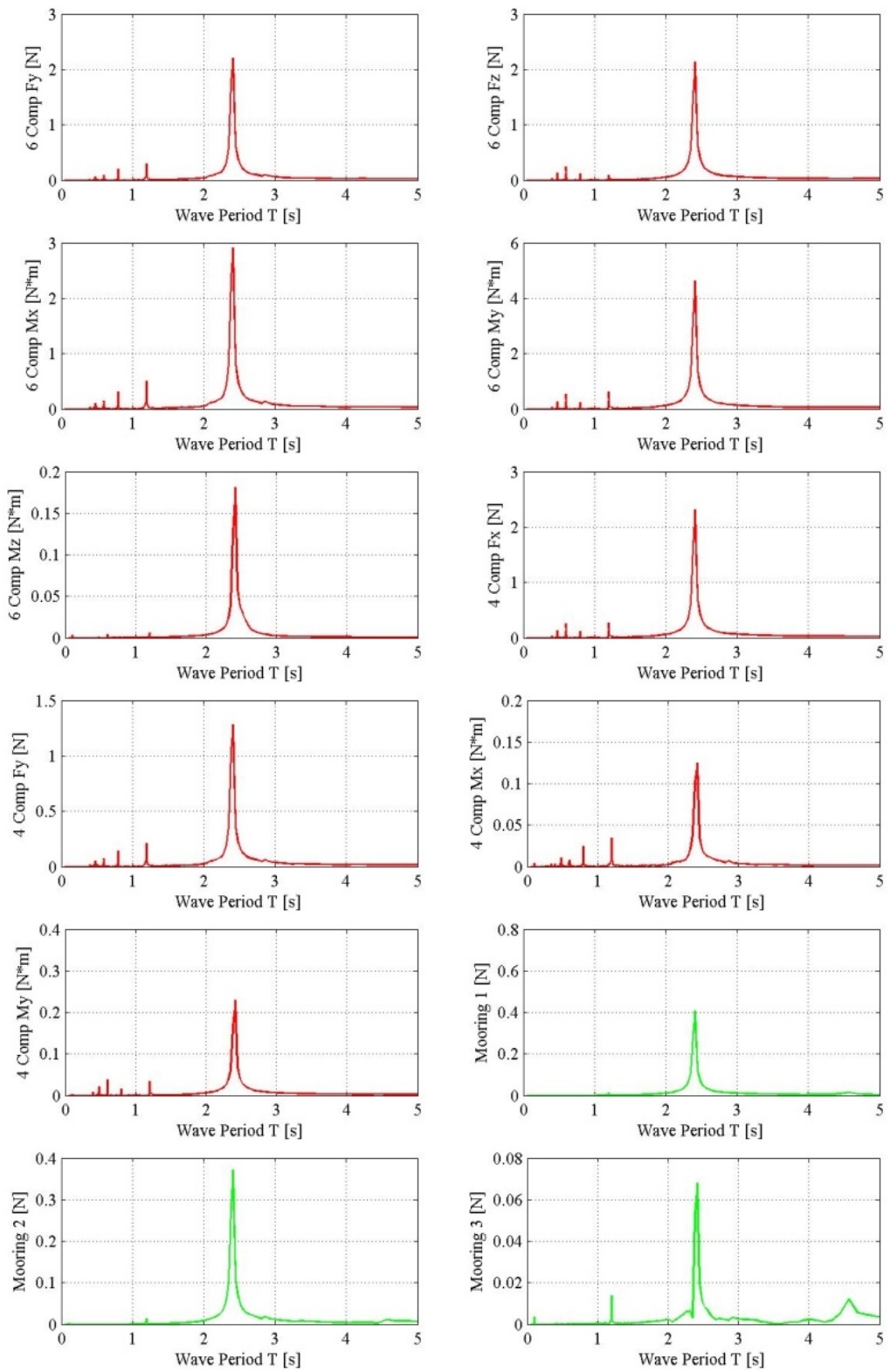


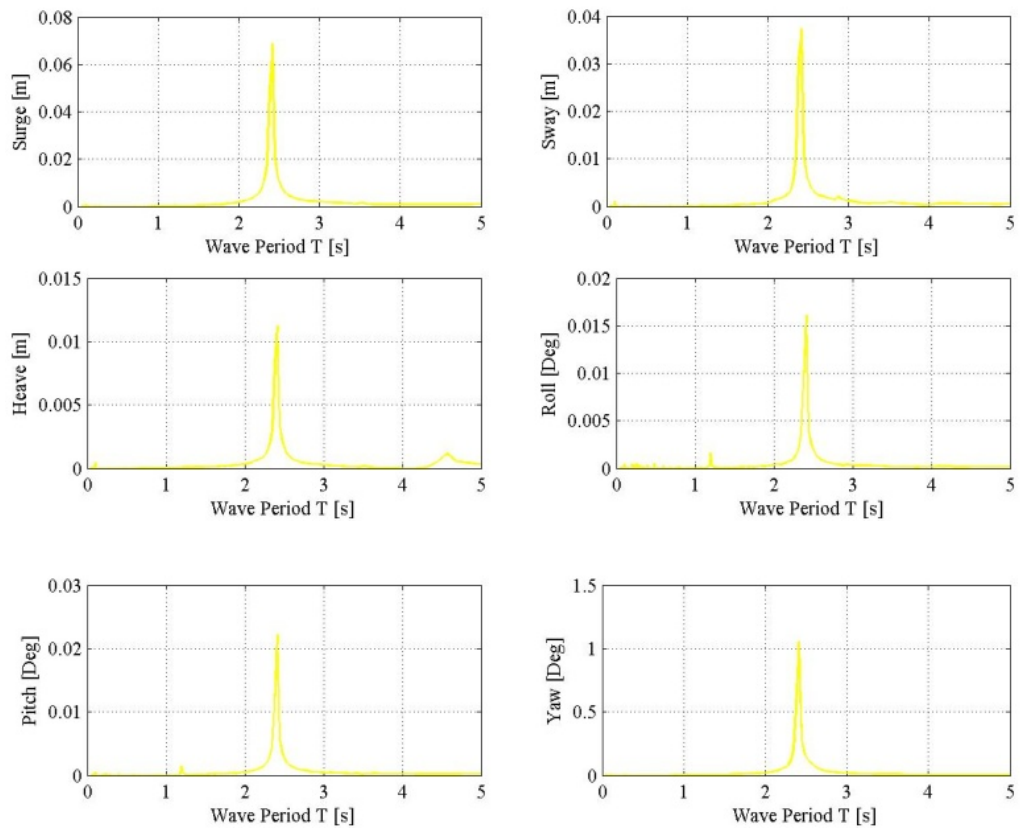




Γράφημα 5.2.1: Στατιστική ανάλυση Πειράματος 1382







Γράφημα 5.2.2: Στατιστική ανάλυση Πειράματος 1396

5.3 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά αποτελέσματα

Η εξαγωγή των θεωρητικών καμπυλών της γραμμικής θεωρίας έγινε μέσω του προγράμματος SemiSub. Στο αρχείο εισαγωγής του προγράμματος τοποθετήθηκαν όλα τα δεδομένα που εξήχθησαν από τα προηγούμενα κεφάλαια.

Παραθέτουμε στην Εικόνα 5.3.1 μερικά από αυτά όπως προέκυψαν από τους ανάλογους υπολογισμούς.

FLOATING WIND TURBINE - SPAR CONFIGURATION

31	0070503000101050003040000000								
1	320.0	2.000	1000.0	1.025	9.81				
2	44.000	10.12	3.300	180.0000					
	000000 0								
	0100000100	-2.35	-4.0703	-70.32	10				
	01								
	0100000100	4.700	0.000	-70.32	11				
	02								
	0100000100	-2.35	4.0703	-70.32	12				
	03								
	0100010000	0.000	0.0000	12.000	13				
32	020304050607								
	0100020000	0.000	0.0000	87.600	14				
33	03040506								
15	0101								
16	0.000	0.000	-62.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
17	-89.9155	7466.0	4229000.	4229000.	1642000.				
20	0201								
	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	43.40	249.72	674777.27	674777.27	1821.592				
21	0301								
	1.900	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	89.35	240.0	0.0000	1741.49	1741.49				
22	0401								
	-5.019	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	89.35	56.780	115.926	0.000	0.000				
23	0501								
	-5.019	-17.73	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	99.58	17.740	0.00000	0.000	0.000				
24	0501								
	-5.019	17.73	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	99.58	17.740	0.00000	0.000	0.000				
25	0501								
	-5.019	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	68.87	17.740	0.00000	0.000	0.000				
26	01								
	-2.35	-4.0703	-70.32						
27	18.36	31.80	26.77						
28	367.4	636.4	535.7						
	01								
	4.700	0.000	-70.32						
29	36.33	0.000	26.48						
	-734.8	0.000	535.7						
	01								
	-2.35	4.0703	-70.32						
30	18.55	32.14	27.05						
	367.4	-636.4	535.7						

Εικόνα 5.3.1: Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα SemiSub

Όπου:

- 1) Βάθος αγκύρωσης, 2) Σημαντικό ύψος κύματος, 3) Ύψος κύματος,
- 4) Περίοδος για Irregular waves, 5) Η/λ, 6) Παράγοντας γ στο φάσμα JONSWAP,
- 7) Πυκνότητα νερού, 8) Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού,

- 9) Επιτάχυνση της βαρύτητας,
- 10)- 12) Συντεταγμένες 1^{ου}, 2^{ου} και 3^{ου} κλάδου αγκύρωσης,
- 13) Συντεταγμένες 6 comp, 14) Συντεταγμένες 4 comp, 15) Στοιχεία πλωτήρα,
- 16) Συντεταγμένες από κέντρο πλωτήρα, 17) C_m από SWL, 18) Μάζα πλωτήρα,
- 19) I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} πλωτήρα, 20) Στοιχεία Tower, 21) Στοιχεία Nacelle,
- 22) Στοιχεία Hub, 23)-25) Στοιχεία Blade 1-3,
- 26) Συντεταγμένες 1^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 27) κ_{xx}, κ_{yy}, κ_{zz} 1^{ου} κλάδου αγκύρωσης,
- 28) Προένταση στις ανάλογες διευθύνσεις, 29) Στοιχεία 2^{ου} κλάδου αγκύρωσης,
- 30) Στοιχεία 3^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 31) Περιέχει κατά σειρά: πλήθος στοιχείων, τύποι διαφορετικών στοιχείων, πλήθος ελατηρίων, στοιχεία αγκύρωσης, κατανομημένες μάζες, πλήθος διατμητικών δυνάμεων, αλληλεπίδραση, πλήθος στοιχείων εξόδου, 32) Στοιχεία τομής στο σημείο του 6 comp, 33) Στοιχεία τομής στο σημείο του 4 comp.

Για τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις μετρήσεις εξόδου του προγράμματος SemiSub, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω αδιαστατοποιήσεις ως προς το ύψος κύματος:

- Για τις δυνάμεις στον πλωτήρα, στον πύργο και στην αγκύρωση:

$$F' = \frac{F \cdot 40^2}{\left(\frac{H}{2}\right) \cdot 1000}$$

- Για τις ροπές στον πλωτήρα και στον πύργο:

$$M' = \frac{M \cdot 40^3}{\left(\frac{H}{2}\right) \cdot 1000}$$

- Για τις μετατοπίσεις surge, sway και heave:

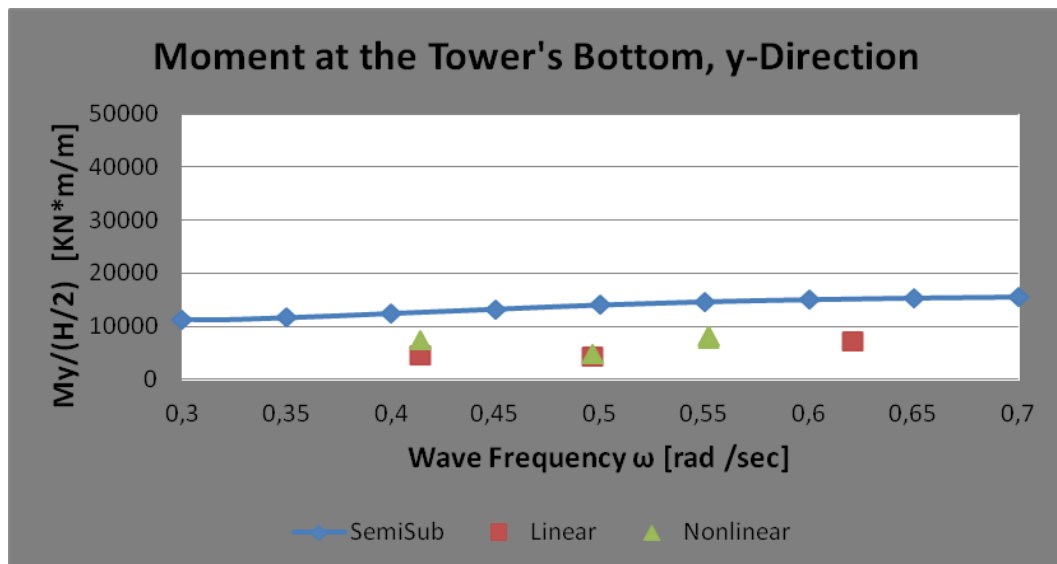
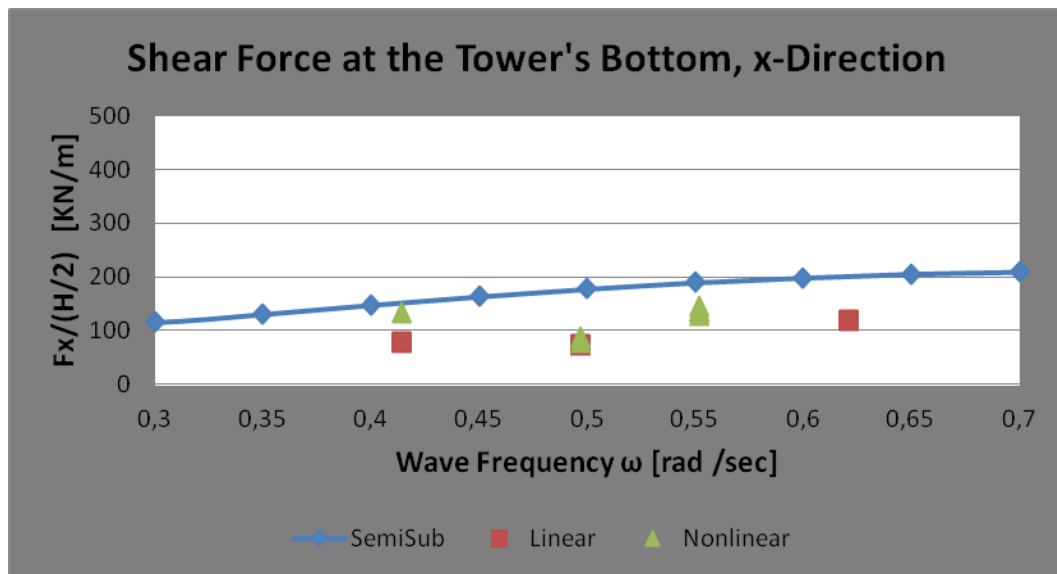
$$x' = \frac{x}{\left(\frac{H}{2}\right)}$$

- Για τις περιστροφές roll, pitch και yaw:

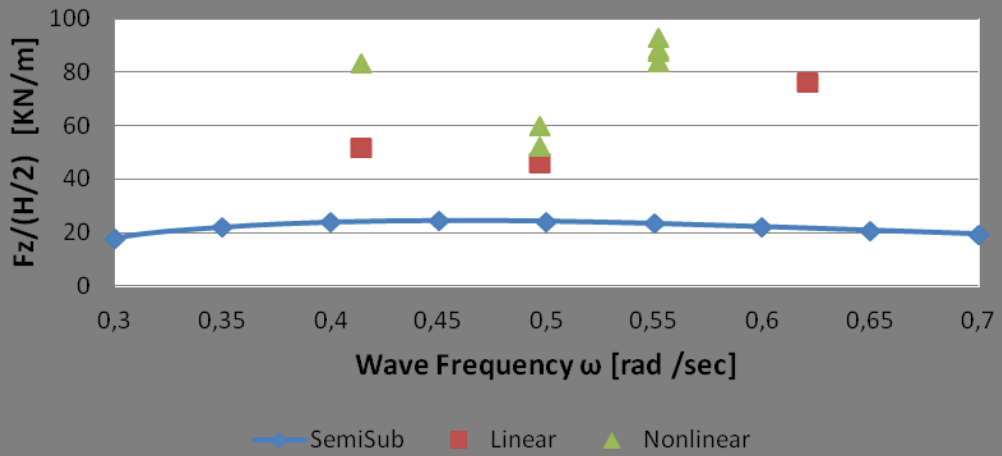
$$r' = \frac{r}{\left(\frac{H}{2}\right) \cdot k}$$

,όπου H και k ύψος κύματος και κυματάριθμος μοντέλου.

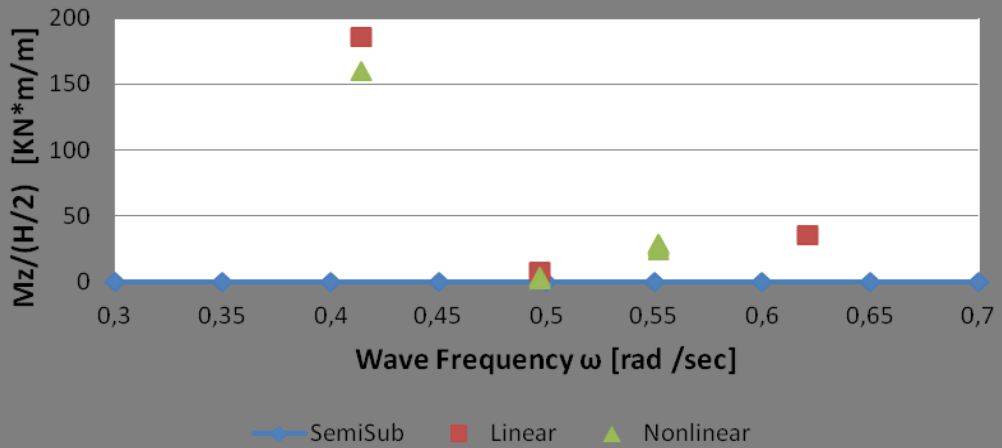
Ακολουθούν τα διαγράμματα των συγκρίσεων στα πειράματα με γωνία πρόσπτωσης 0°.



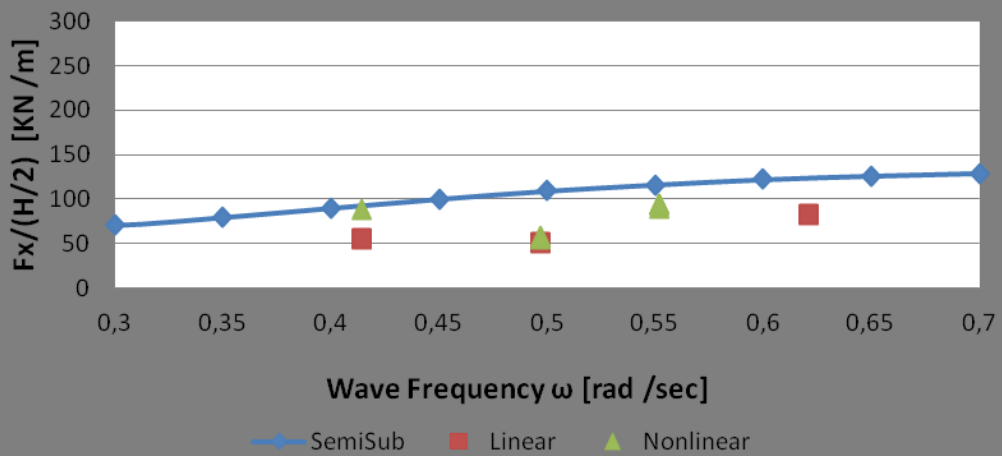
Shear Force at the Tower's Bottom, z-Direction



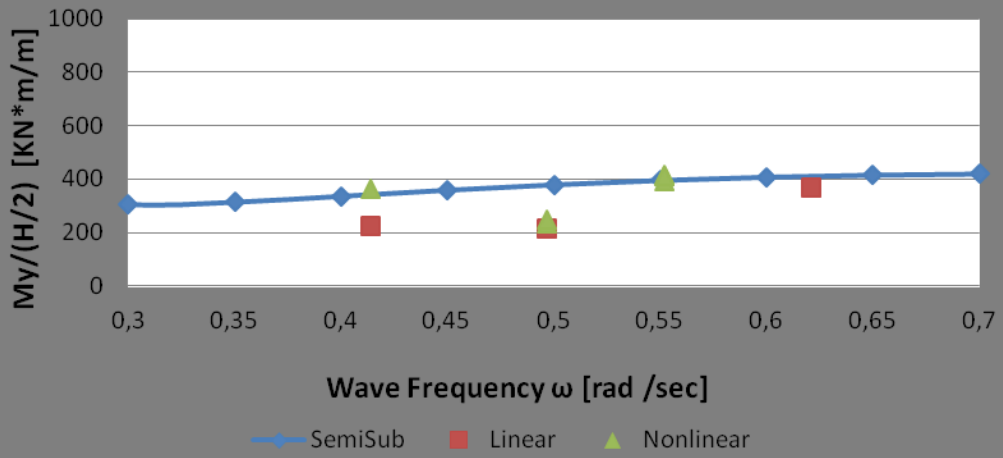
Moment at the Tower's Bottom, z-Direction



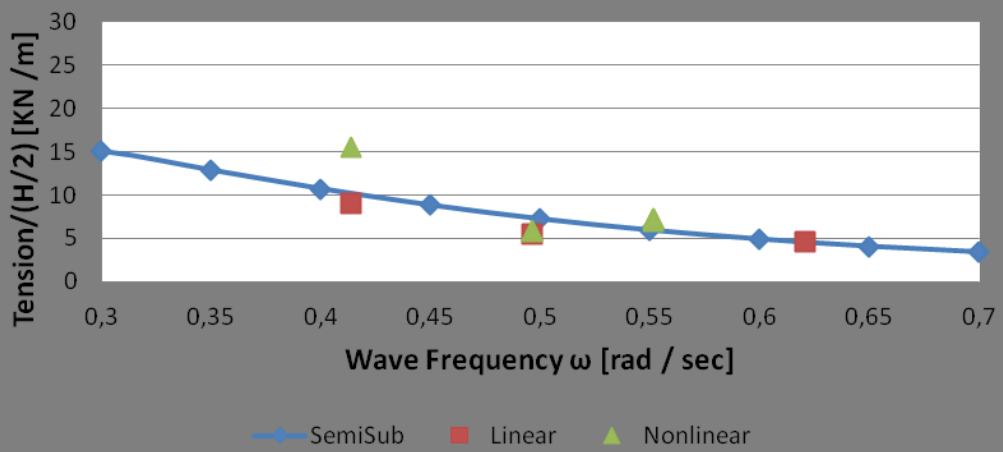
Shear Force at the Nacelle, x-Direction



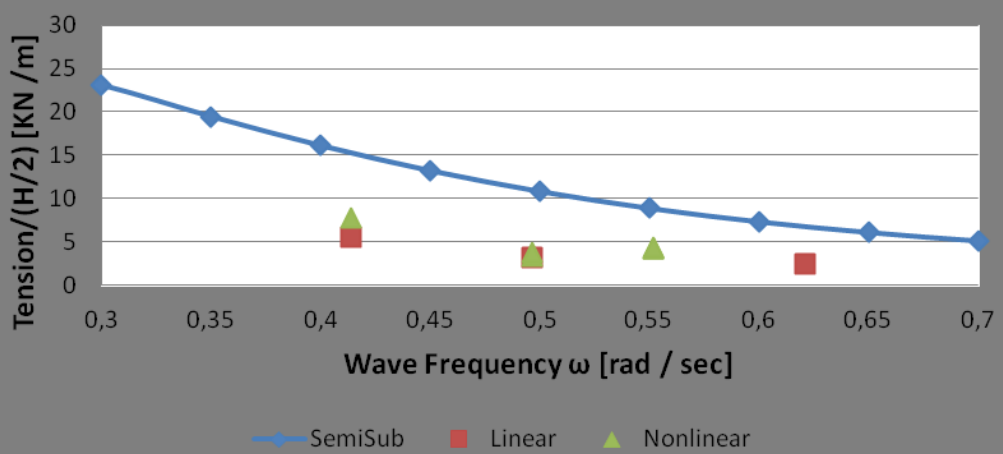
Shear Moment at the Nacelle, y -Direction



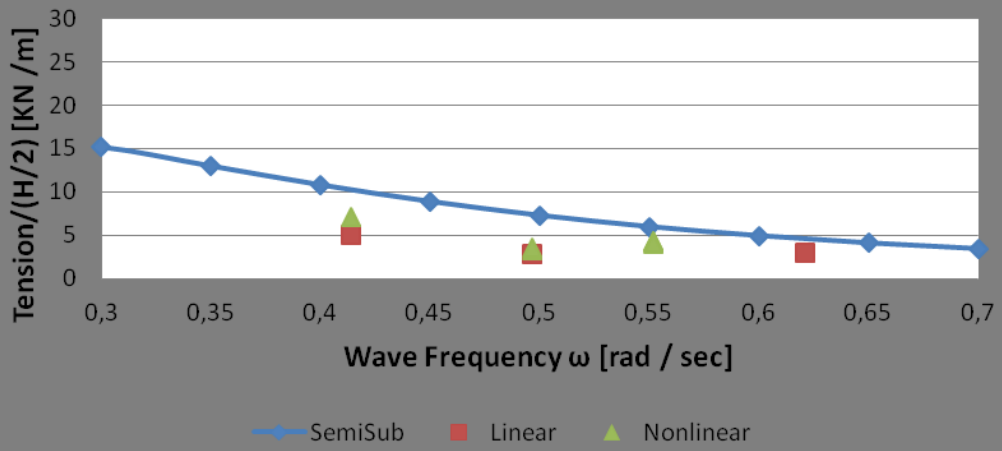
Tension at Line 1



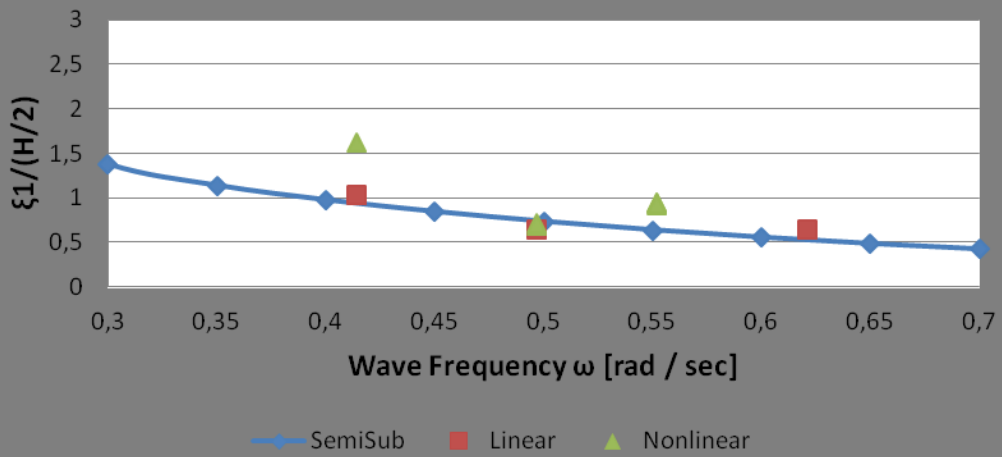
Tension at Line 2



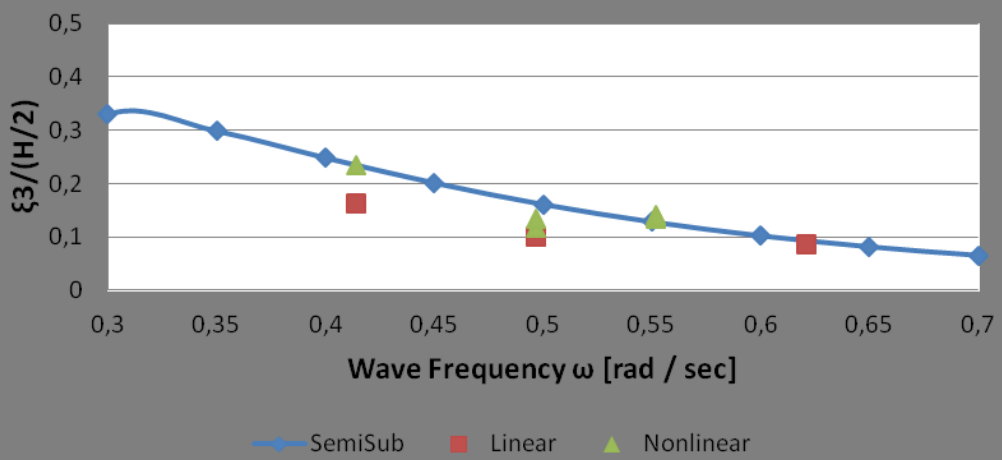
Tension at Line 3

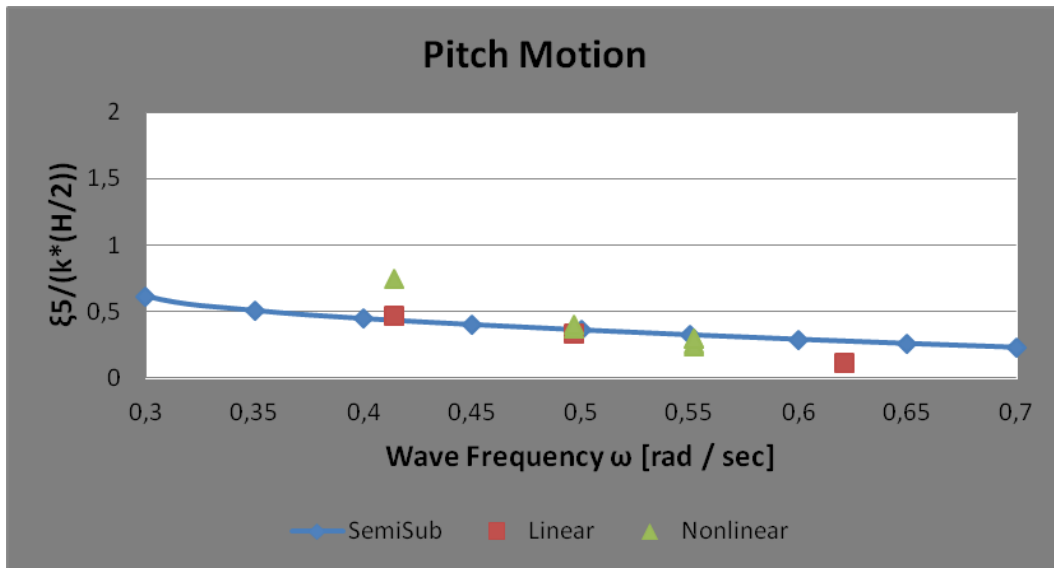


Surge Motion



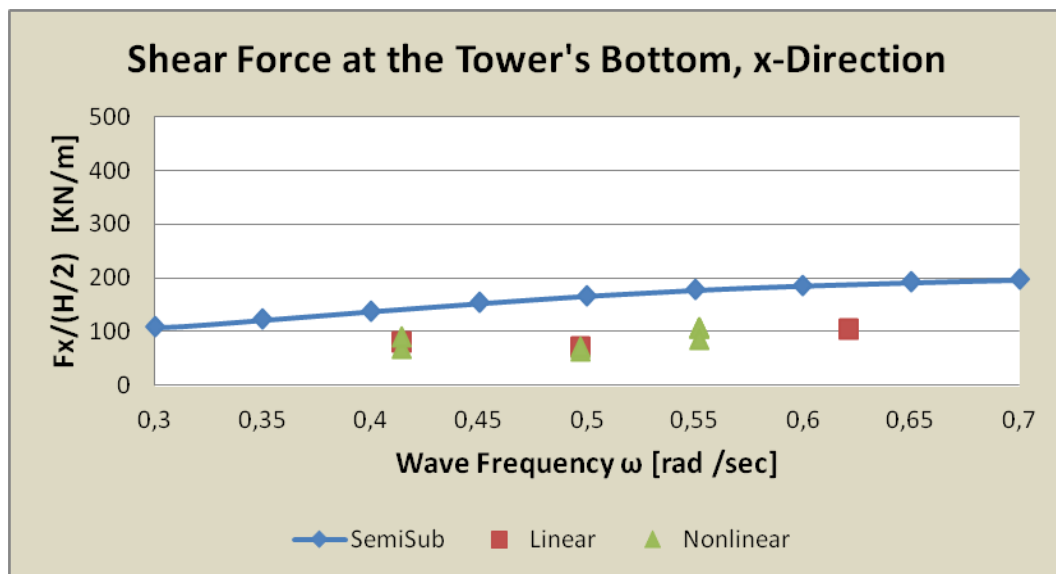
Heave Motion

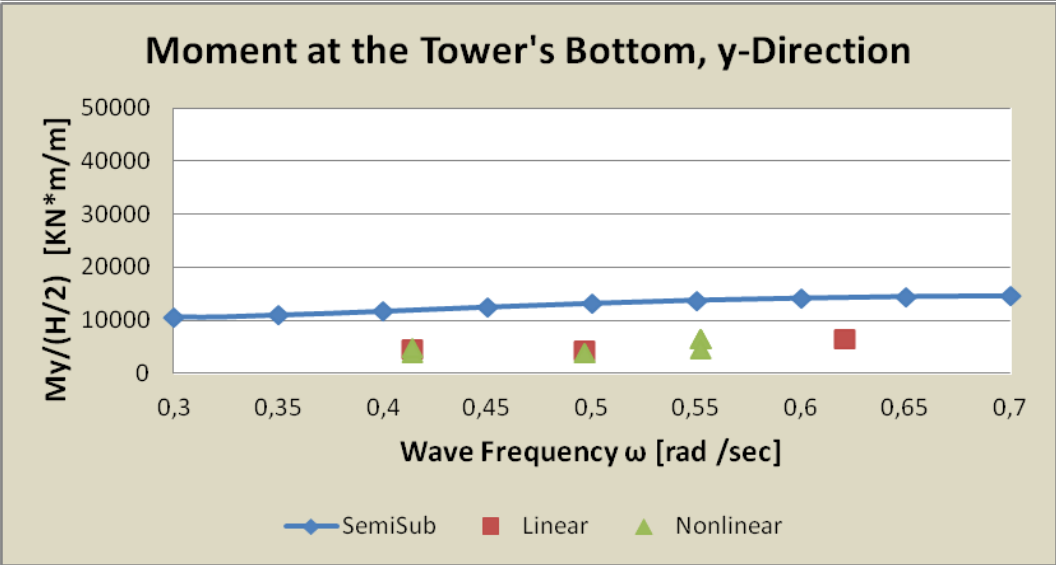
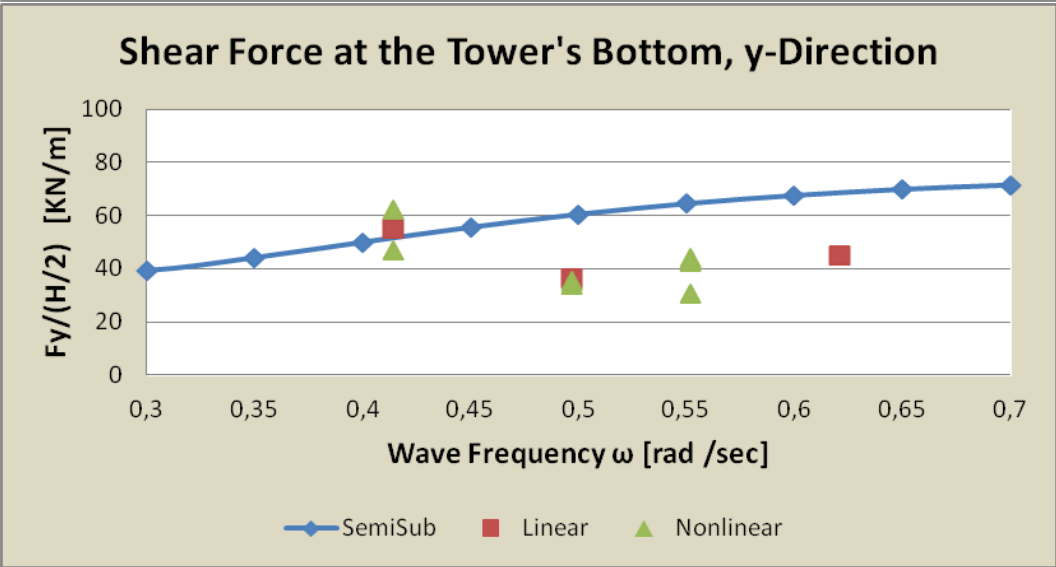
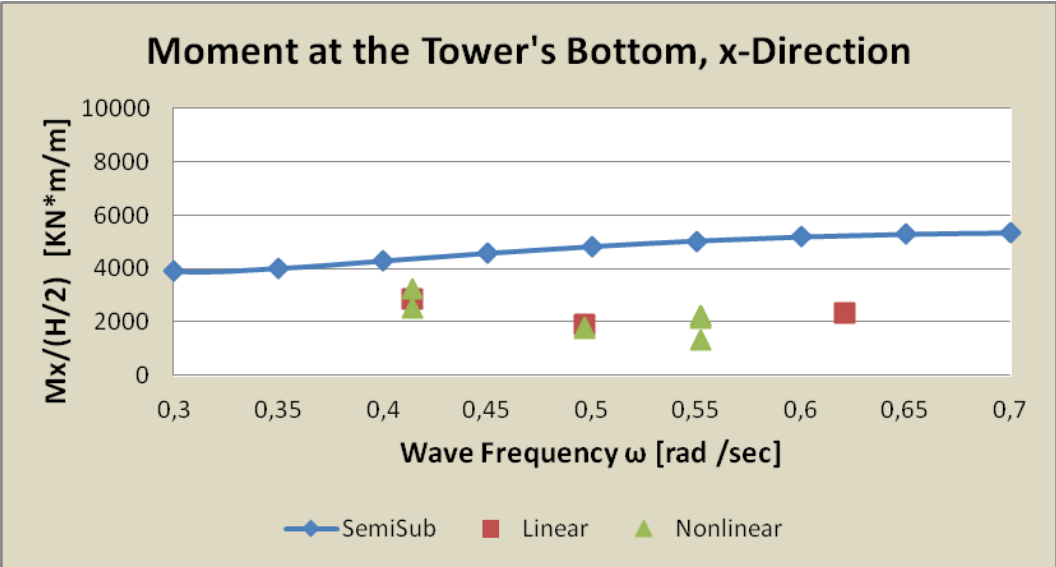


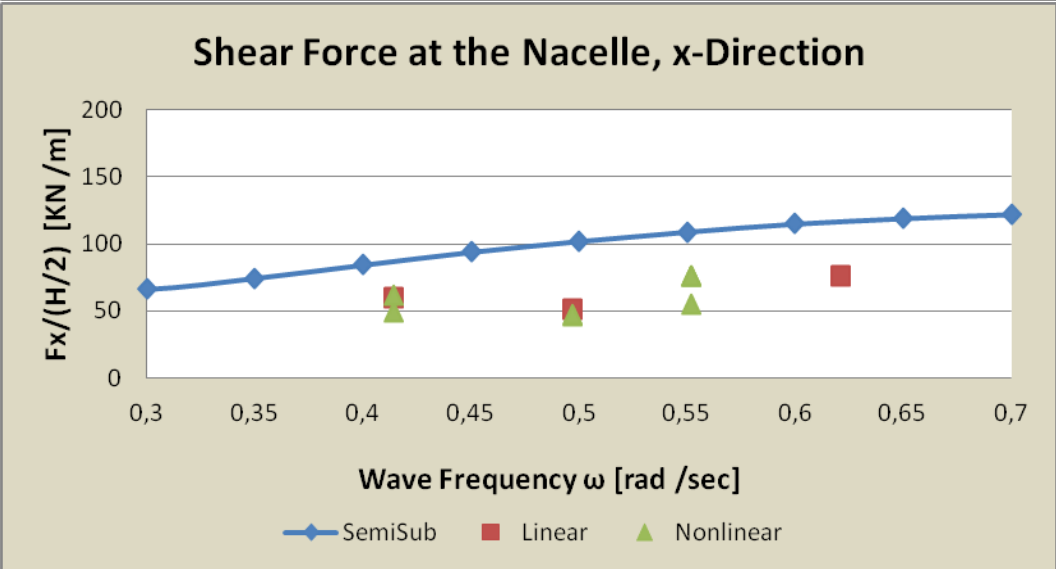
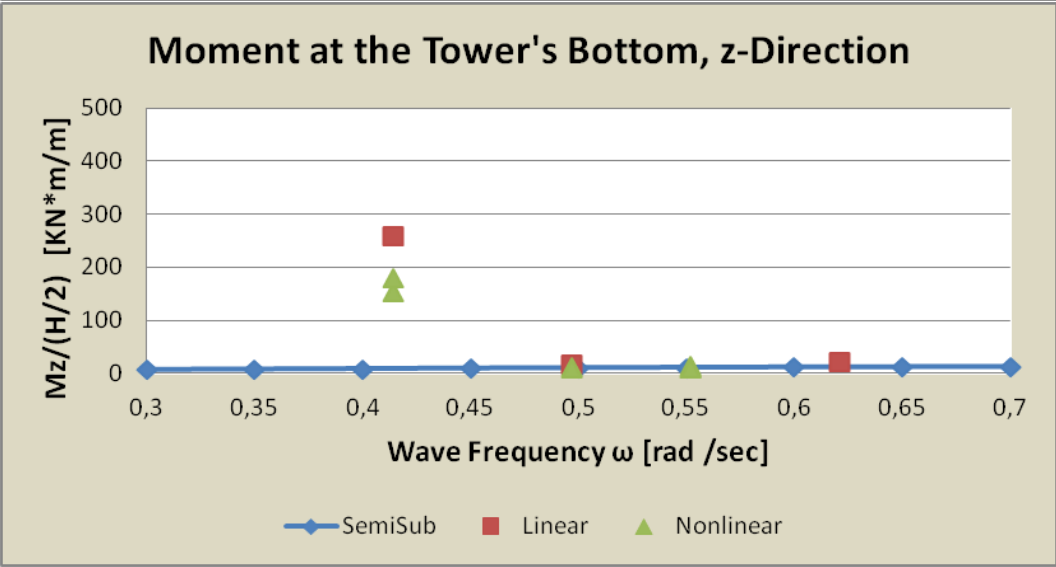
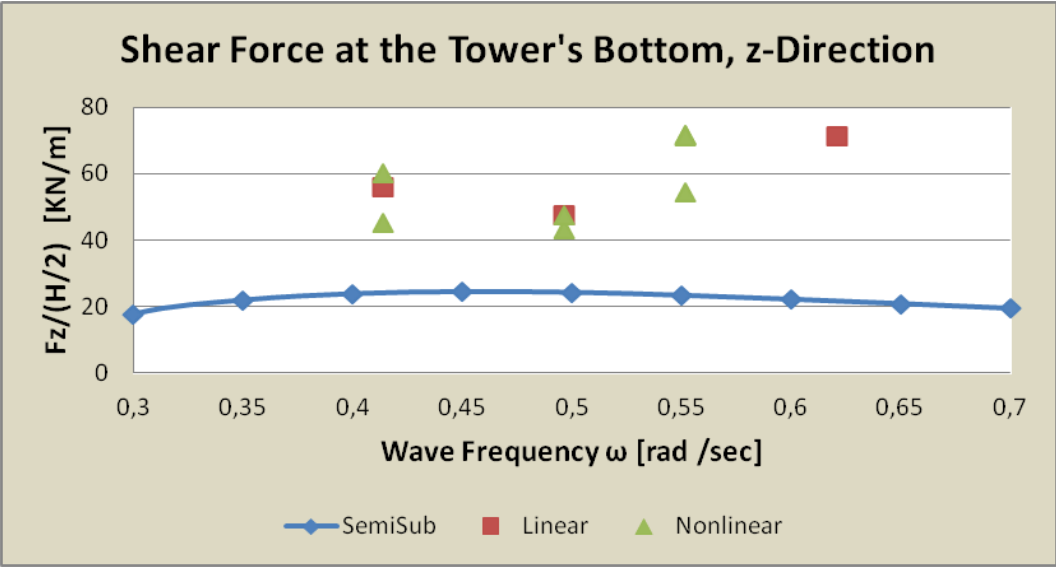


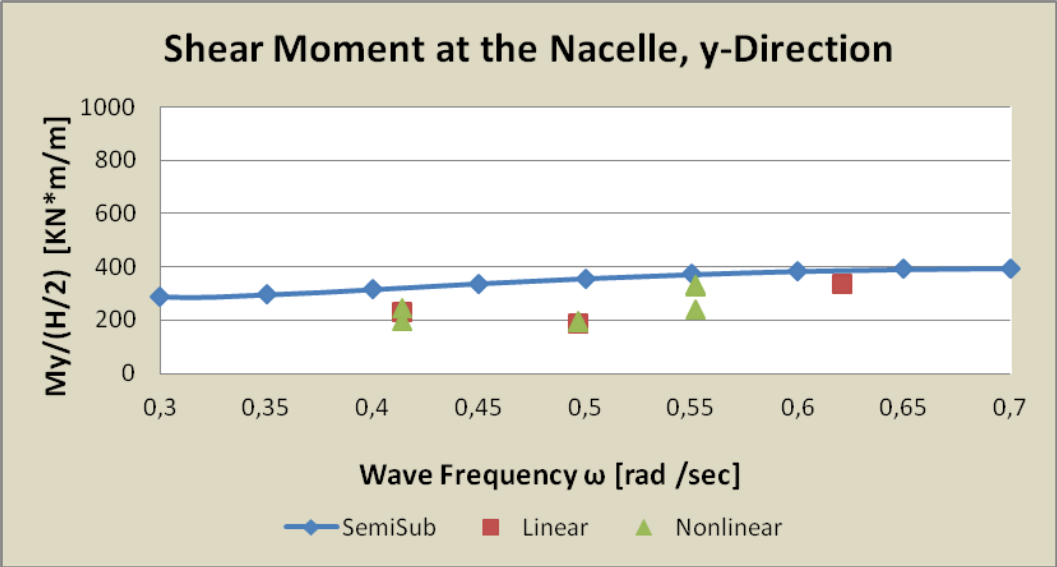
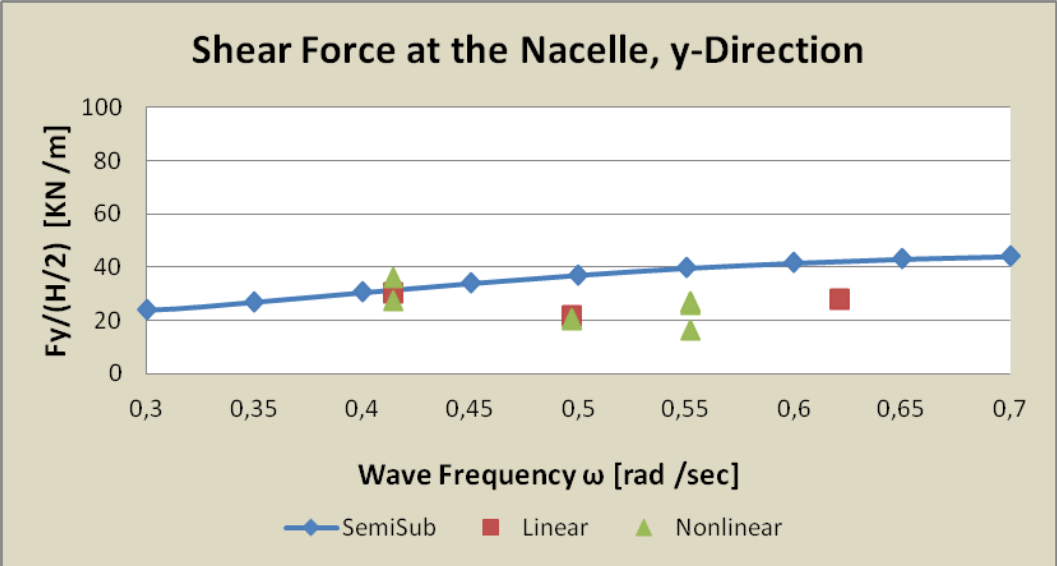
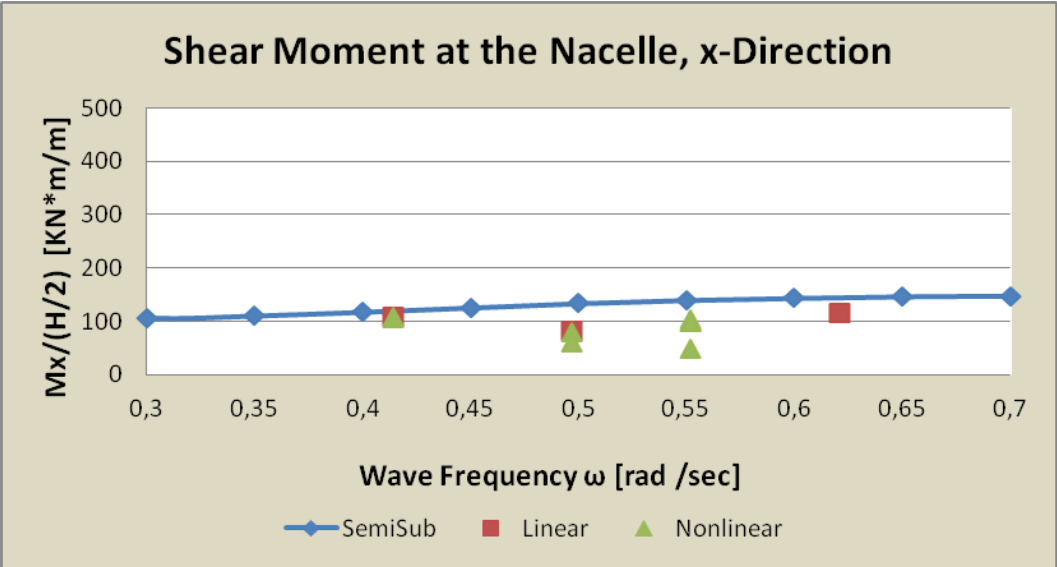
Γράφημα 5.3.1: Σύγκριση πειραμάτων υπό γωνία 0°

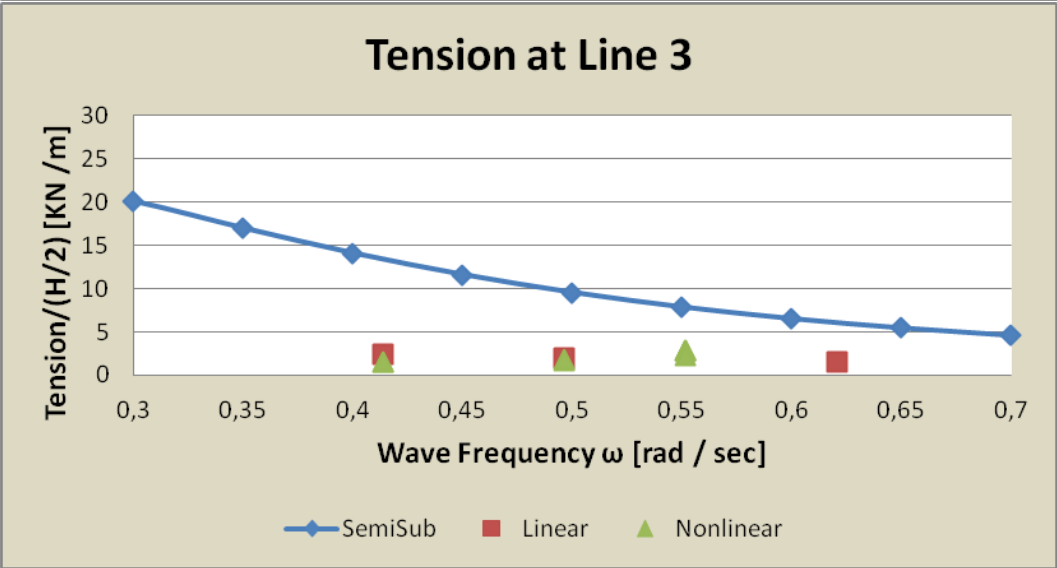
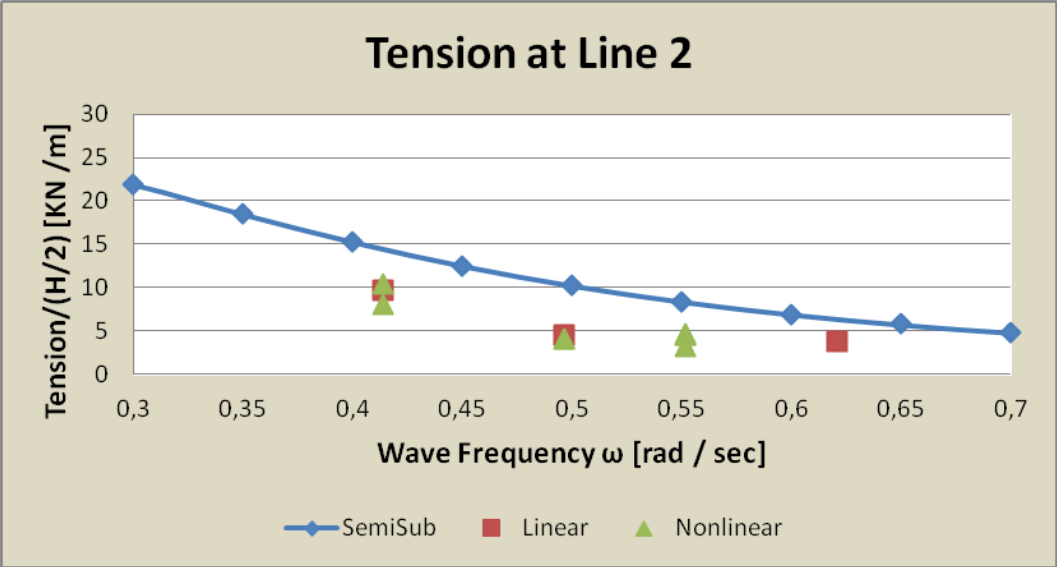
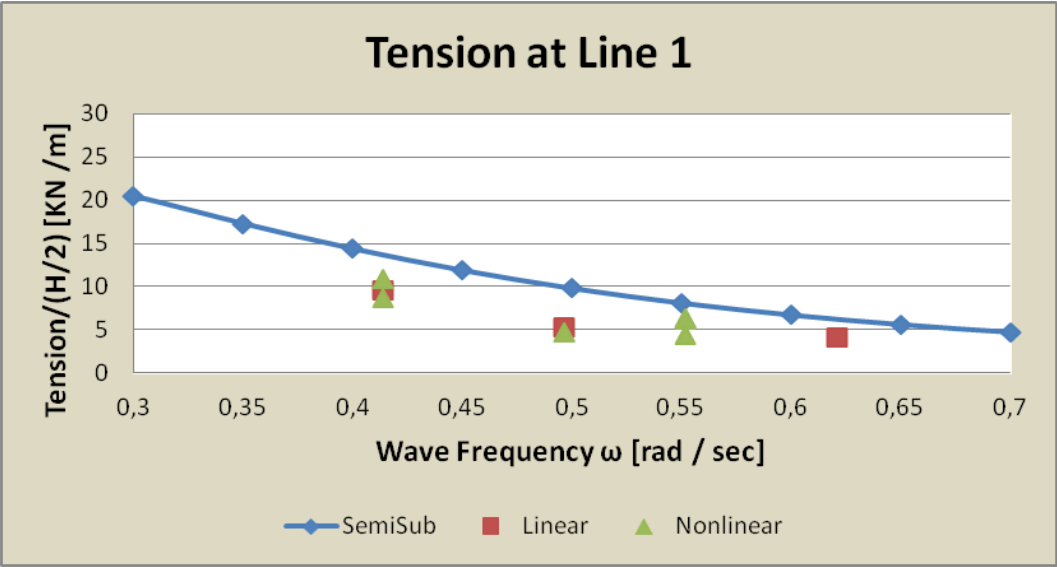
Ακολουθούν τα διαγράμματα των συγκρίσεων στα πειράματα με γωνία πρόσπτωσης 20° .

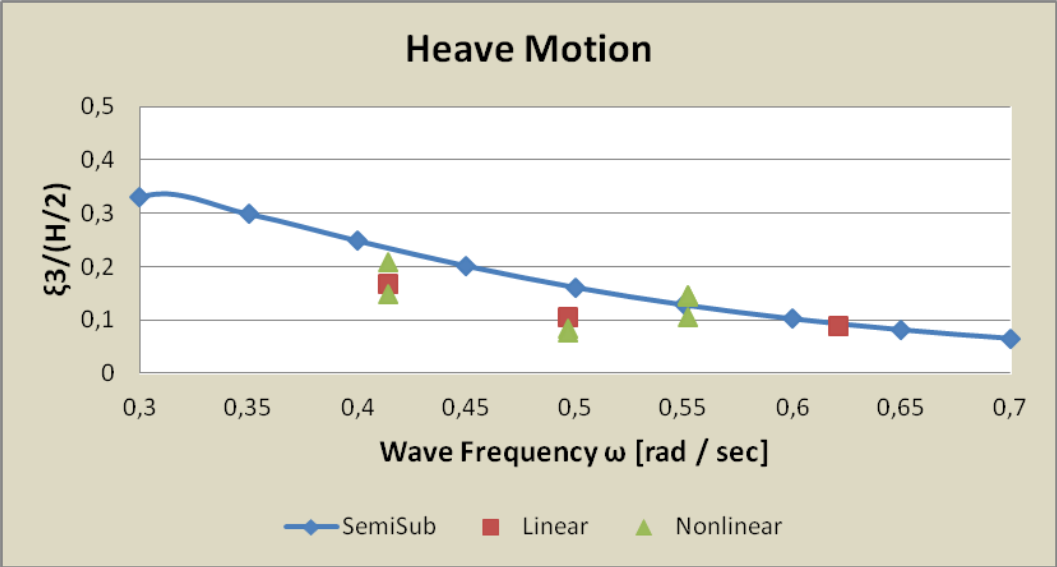
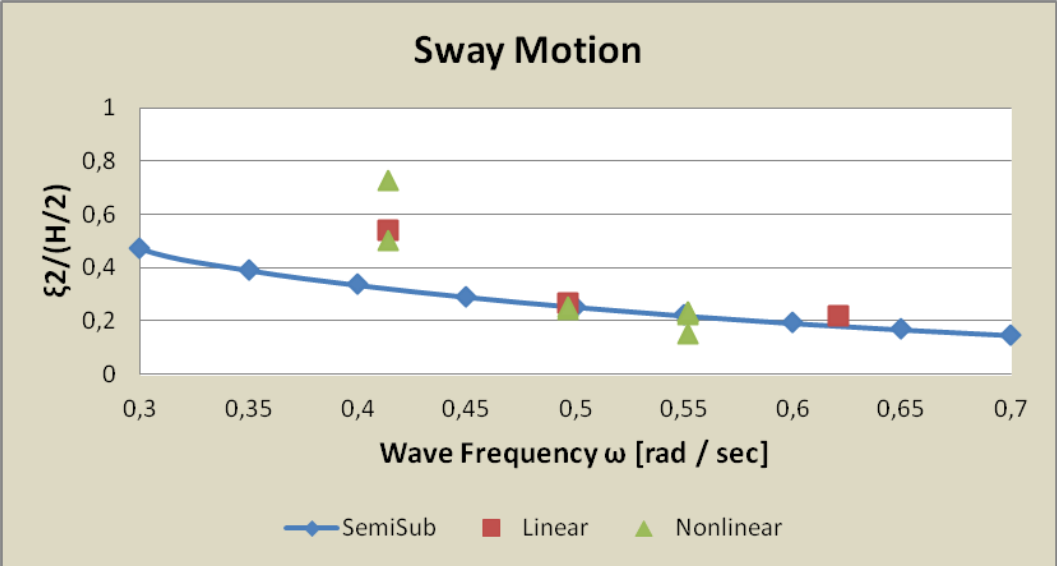
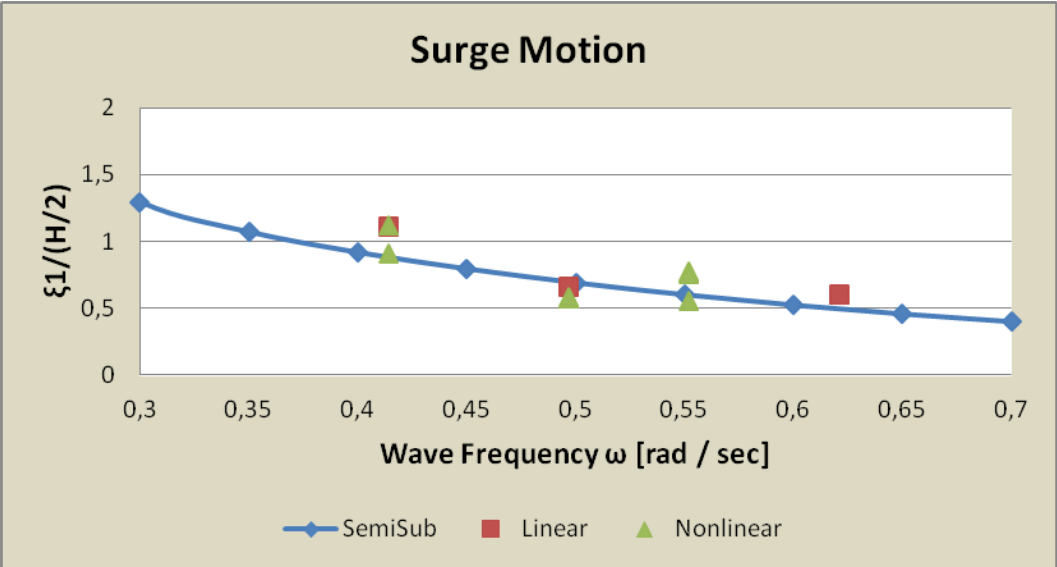


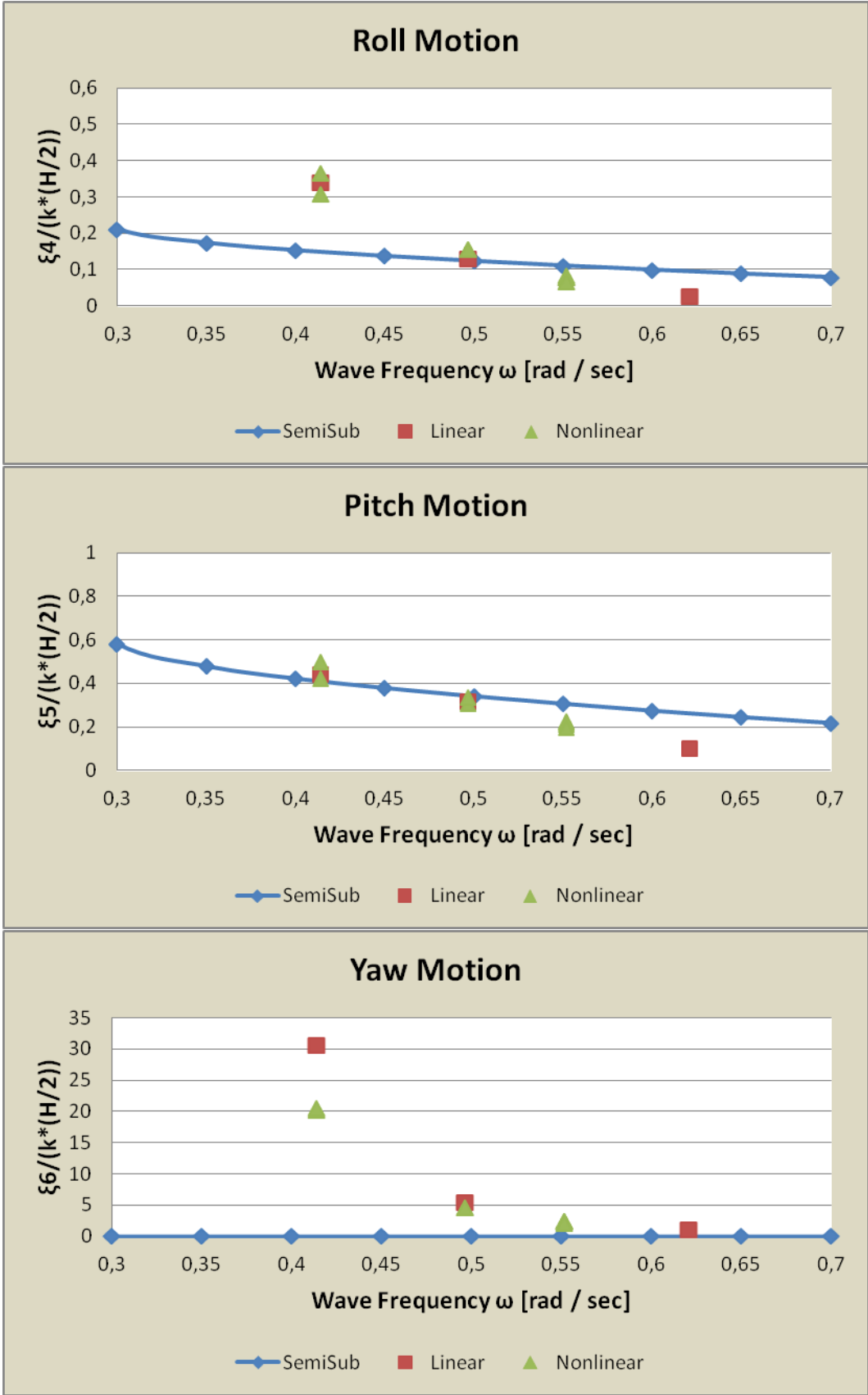












Γράφημα 5.3.1: Σύγκριση πειραμάτων υπό γωνία 20°

5.4 Συμπεράσματα συγκρίσεων και προτάσεις

Για τα πειράματα των 0° εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Δύναμη F_x στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_z στον πλωτήρα: Μεγάλη διασπορά πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_z στον πλωτήρα: Καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, μεγάλη διασπορά στη συχνότητα $\omega=0,414$ rad/s.
- Δύναμη F_x στον πύργο: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πύργο: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 1: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 2: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, εκτός των συχνοτήτων $\omega=0,414$ rad/s και $\omega=0,497$ rad/s.
- Τάση στον κλάδο 3: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Surge: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Heave: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, λόγω του συμβατικού κλάδου αγκύρωσης.
- Pitch: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.

Για τα πειράματα των 20° εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Δύναμη F_x στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_x στον πλωτήρα: Καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_y στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_z στον πλωτήρα: Μεγάλη διασπορά πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_z στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, εκτός της συχνότητας $\omega=0,414$ rad/s.
- Δύναμη F_x στον πύργο: Καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_x στον πύργο: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_y στον πύργο: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πύργο: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 1: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 2: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Surge: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Sway: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Heave: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, λόγω του συμβατικού κλάδου αγκύρωσης.

- Roll: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων, εκτός της συχνότητας $\omega=0,414$ rad/s
- Pitch: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Yaw: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων, μεγάλη διασπορά στη συχνότητα $\omega=0,414$ rad/s.

Γενικά είχαμε πολύ καλή σύγκλιση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα συνολικά. Εντούτοις παρατηρήθηκε μια ασυμπτωτική συμπεριφορά των μετρήσεων στη συχνότητα $\omega=0,414$ rad/s σε ορισμένες περιπτώσεις.

Για να έχουμε όμως μια πιο ολοκληρωμένη γνώση της απόκρισης μιας πλωτής ανεμογεννήτριας εδρασμένης σε Spar κατασκευή, θα ήταν καλό να ληφθούν υπόψη οι εξής προτάσεις:

- Χρήση μοντέλου διαφορετικών διαστάσεων, κλίμακας ή/και βυθίσματος.
- Χρήση κλάδων αγκύρωσης διαφορετικών χαρακτηριστικών (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , διαφορετικό υλικό)
- Μελέτη απόκρισης υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης κυματισμών (45° , 60°).
- Μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής υπό την ταυτόχρονη επίδραση θαλάσσιων ρευμάτων και αέρα.
- Εκτέλεση πειράματος με διάταξη πολλαπλών κυλίνδρων (τύπου Wind Farm).
- Επιλογή διαφορετικού τύπου ανεμογεννήτριας (10 MW)
- Δοκιμές με διαφορετικό σημείο πρόσδεσης συστήματος αγκύρωσης στον πλωτήρα.

Βιβλιογραφία

1. Μπεργελές Γεώργιος Χ., Ανεμοκινητήρες, 2006
2. Offshore wind power
(http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power).
3. History of wind power
(http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power).
4. Wind Energy Foundation History
(<http://www.windenergyfoundation.org/about-wind-energy/history>).
5. The Guardian, Timeline: The history of wind power, October 18, 2008
(<http://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>).
6. Trillium Power Wind Corporation
(<http://www.trilliumpower.com/energy/offshore-wind-vs-other-energy-sources/>).
7. Offshore wind: part of UK's energy mix, August 1, 2013
(<https://www.gov.uk/offshore-wind-part-of-the-uks-energy-mix>).
8. LCA of Wind: Onshore vs. Offshore Wind
(<https://sites.google.com/site/lcaofwind/onshore-vs-offshore-wind>).
9. The European offshore wind industry- key trends and statistics, 2013
(http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/European_offshore_statistics_2013.pdf).
10. List of offshore wind farms
(http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms).

11. Wind in our Sails: The coming of Europe's offshore wind energy industry, A report by the European Wind Energy Association, 2011

(http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/members_lounge/1._Make_the_right_connections/Offshore_Wind_Industry_Advisory_Group/Wind_in_our_Sails__The_coming_of_Europe_s_offshore_wind_energy_industry_.pdf).

12. Global Wind Energy Council

(<http://www.gwec.net/>).

13. Αιολική ενέργεια

(http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1).

14. Enterprise Greece: Αιολική ενέργεια

(<http://www.investingreece.gov.gr/default.asp?pid=36§orID=48&la=2>).

15. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας : Αιολικές Εγκαταστάσεις

(<http://eletaen.gr/%ce%b5%ce%b3%ce%ba%ce%b1%cf%84%ce%b1%cf%83%cf%84%ce%ac%cf%83%ce%b5%ce%b9%cf%82/>).

16. Gravity Based Support Structures, June 5, 2013

(<http://www.4coffshore.com/windfarms/gravity-based-support-structures-aid274.html>).

17. Monopiles Support Structures, June 5, 2013

(<http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid269.html>).

18. Tripile Support Structures, June 5, 2013
(<http://www.4coffshore.com/windfarms/tripile-support-structures-aid272.html>).
19. Tripod Support Structures, June 5, 2013
(<http://www.4coffshore.com/windfarms/tripod-support-structures-aid273.html>).
20. Jacket or Lattice Structures, June 12, 2013
(<http://www.4coffshore.com/windfarms/jacket-or-lattice-structures-aid271.html>).
21. Spar (platform)
([http://en.wikipedia.org/wiki/Spar_\(platform\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Spar_(platform))).
22. Μαυράκος, Σ. Α., Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, 1999.
23. Μαυράκος, Σ. Α., Συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών, 2012
24. Kokkinowrachos, K., Mavrakos, S. A., Asorakos, S., Behaviour of vertical bodies of revolution in waves, Ocean Engng. vol.13, no.6, pages 505-538, 1986.
25. Mavrakos, S. A., Koumoutsakos, P., Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves, 1987.
26. Μαυράκος, Σ. Α., Χατζηγεωργίου, Ι. Κ., Αγκυρώσεις πλωτών κατασκευών, Νοέμβριος, 2007.
27. Jonkman, J. 2010. Definition of the floating system for phase IV of OC3, Technical Report NREL/TP-500-47535.
28. Mavrakos, S. A., Mooring System Analysis for the Spar Buoy (SB) floating wind turbine concept applicable to the experimental campaign within a HYDRALAB IV program in DHI, Denmark, June, 2012.

29. Vryhof. 2005. Anchor manual 2005, The digital version
(www.vryhof.com).
30. STATMOOR User's manual: Laboratory for Floating Structures and Mooring Systems, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, 1992.
31. Mavrakos, S.A., Papazoglou, V.J., Triantafyllou, M.S. Hatjigeorgiou, J. 1996. Deep Water Mooring Dynamics, *Marine Structures*, **9**, pp.181 – 209.
32. DYNAMOOR User's manual: Laboratory for Floating Structures and Mooring Systems, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, 1996.
33. Summary Experts Meeting on Computer Code Validation for Offshore Wind System Modeling, May 15-16, 2012.
34. Tong, K. C., Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp.74-76,399-410, 1998.
35. Skaare B., Hanson T. D., Nielsen F. G., Yttervik R., Hansen A. M., Thomsen K. and Larsen T. J, Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines, 2007. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Milan, May 7-10 2007.
36. Moriya Y., Anno, K., Hara M., Fukumoto Y., Suzuki H. and Fujita K., Motion characteristics of cylindrical body for offshore wind power generation, *Journal of Civil Engineering in the Ocean*, JSCE, 23, pp. 985-990, (in Japanese), 2007.
37. Matsukuma H. and Utsunomiya T., Motion analysis of a floating offshore wind turbine considering rotor-rotation, *The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, 1(4), pp. 268-279, 2008.

38. Nishida E., Utsunomiya T. and Sato I., Irregular wave experiment on motion of floating foundations of cylindrical shape for offshore wind turbine, *Journal of Civil Engineering in the Ocean, JSCE*, 24, pp.135-140, (in Japanese), 2008.
39. Utsunomiya T., Sato T., Matsukuma H. and Yago K., Experimental validation for motion of a spar-type floating offshore wind turbine using 1/22.5 scale model, *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA, May 31 - June 5, 2009, OMAE2009-79695.
40. Utsunomiya T., Nishida E. and Sato T., Wave Response Experiment on SPAR- type Floating Bodies for Offshore Wind Turbine, *Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, June 21-26, 2009.
41. Utsunomiya T., Matsukuma H., Minoura S., Ko K., Hanamura H., Kobayashi O., Sato I., Nomoto Y. and Yasui K., On sea experiment of a hybrid spar for floating offshore wind turbine using 1/10 scale model, *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, June 6-11, 2010, OMAE2010- 20730.
42. Karimirad, M., Moan, T., Extreme structural response of a spar type wind turbine. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 6-11, 2010, OMAE2010-20044.
43. Sultania A., Manuel L., Long- Term reliability analysis of a Spar buoy-supported floating offshore wind turbine. *Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 19-24, 2011, OMAE2011-50072.

44. Ivar F., Petter A. B., Wind- An optimization tool for floating support structures for deep water wind turbines, *Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 19-24, 2011, OMAE2011- 49985.
45. Karimirad, M., Moan, T., A simplified method for coupled analysis of floating offshore wind turbines, 2012.
46. Yoshida S., Utsunomiya T., National Maritime Research Institute Mitaka, Tokyo, Japan, Model experiment of a spar type offshore wind turbine in storm condition, *Proceedings of the ASME 2012, 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, July 1- 6, 2012, OMAE2012- 83993.
47. Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scott G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, February, 2009.
48. D'Alessandro F., Armenio E., Dynamic response of floating offshore wind turbines under random waves and wind action HyIV- DHI- 01 Offshore wave basin, DHI, Data Storage Report, January 22, 2013.
49. Mavrakos, S., A., (2014). User's Manual for the software SEMISUB- VER.10. School of Naval Architecture and Marine Engineering, Laboratory for Floating Structures and Mooring Systems.
50. Mazarakos, K. P., Analysis of loads and motions on a TLP on the time domain and comparisons with experiments, Master Thesis, NTUA, 2008.
51. Mazarakos, T. P., Second-Order Wave Loading and Wave Drift Damping on Floating Marine Structures, Ph.D. Thesis, NTUA, pages 1-272, 2010 48
52. 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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Typical output of the STATMOOR computer software

```
-----  
STATIC ANALYSIS  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 1  ERROR=   -250.0000  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 2  ERROR=    680.0909  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 3  ERROR=   -151.0435  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 4  ERROR=    -5.4847  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 5  ERROR=     1.5111  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 6  ERROR=     0.0070  
-----  
NUMBER OF ITERATIONS= 7  ERROR=     0.0000  
-----  
ITERATIONSPROCESS SUCCESFULLY COMPLETED  
-----  
  OUTPUT OF STATIC ANALYSIS  
-----  
NUMBER OF SEGMENTS = 1  
TOTAL LENGTH OF THE CABLE =  902.  M  
-----  
CHARACTERISTICS OF THE CABLE  
-----  
SEGMENT NUMBER 1  
COORDINATES = 0.0000000E+00 M - 902.0000  M  
LENGTH SEGMENT      = 902.0000  M  
MASS PER UNIT LENGTH = 77.70660  KG/M  
ADDED MASS PER UNIT LENGTH = 6.250000  KG/M  
WEIGHT PER UNIT LENGTH = 698.0940  N/M  
DIAMETER            = 0.9000000E-01 M  
EA                  = 0.3840000E+09 N  
BREAKING TENSION    = 8100000.  N  
-----  
STATIC DATA INPUT  
-----  
NUMBER OF DISCRETIZATION POINTS = 102  
HORIZONTAL FORCE AT THE TOP =  734800.000(N)  
DEPTH =  250.000(M)  
NO CURRENT  
NORMAL DRAGCOEFFICIENT =  1.00000  
TANGENTIAL DRAG COEFFICIENT =  0.50000  
ERROR IN DEPTH =  -0.00002  
NUMBER OF ITERATIONS =  7  
LINE CAN LAY ON THE BOTTOM  
-----  
  SUMMARY OF STATIC RESULTS  
-----  
TENSION AT THE TOP      =  909216.375 (N)  
TENSION AT THE BOTTOM   =  734800.625 (N)  
ANGLE AT THE TOP        =    36.083 (DEGREES)  
ANGLE AT THE BOTTOM     =     0.000 (DEGREES)  
X FORCE AT THE TOP      =  734800.000 (N) (ON THE CABLE)
```

X FORCE AT THE BOTTOM = -734800.625 (N) (ON THE CABLE)
 Z FORCE AT THE TOP = 535484.188 (N) (ON THE CABLE)
 Z FORCE AT THE BOTTOM = 0.000 (N) (ON THE CABLE)
 X COORDINATE BOTTOM END = -847.03668 (M)
 Z COORDINATE BOTTOM END = -249.99998 (M)

 ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN SEGMENTS

SEGMENT NUMBER = 1
 LOCATION OF MAXIMUM TENSION = 902.0000 (M)
 MAXIMUM TENSION IN SEGMENT = 909216.4 (M)
 BREAKING TENSION OF SEGMENT = 0.3840000E+09(M)
 RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.2367751E-02

\ STATIC VARIABLES \						

\ DISTANCE (M) \	TENSION (N) \	ANGLE	\ X AXIS (M) \	Z AXIS (M) \	VEL \	

\ 0.000 \	734800.625 \	0.0000 \	-847.037 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 8.932 \	734800.625 \	0.0000 \	-838.101 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 17.863 \	734800.625 \	0.0000 \	-829.165 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 26.793 \	734800.625 \	0.0000 \	-820.230 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 35.724 \	734800.625 \	0.0000 \	-811.294 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 44.655 \	734800.625 \	0.0000 \	-802.359 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 53.585 \	734800.625 \	0.0000 \	-793.423 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 62.516 \	734800.625 \	0.0000 \	-784.487 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 71.447 \	734800.625 \	0.0000 \	-775.552 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 80.377 \	734800.625 \	0.0000 \	-766.616 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 89.308 \	734800.625 \	0.0000 \	-757.681 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 98.239 \	734800.625 \	0.0000 \	-748.745 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 107.169 \	734800.625 \	0.0000 \	-739.809 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 116.100 \	734800.625 \	0.0000 \	-730.874 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 125.031 \	734800.625 \	0.0000 \	-721.938 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 133.962 \	734800.625 \	0.0000 \	-713.003 \	-250.000 \	0.00 \	
\ 142.892 \	734821.312 \	0.4331 \	-704.067 \	-249.970 \	0.00 \	
\ 151.823 \	734894.875 \	0.9192 \	-695.132 \	-249.865 \	0.00 \	
\ 160.754 \	735021.312 \	1.4051 \	-686.198 \	-249.684 \	0.00 \	
\ 169.684 \	735200.625 \	1.8909 \	-677.266 \	-249.427 \	0.00 \	
\ 178.615 \	735432.750 \	2.3763 \	-668.337 \	-249.094 \	0.00 \	
\ 187.546 \	735717.625 \	2.8614 \	-659.411 \	-248.686 \	0.00 \	
\ 196.476 \	736055.188 \	3.3461 \	-650.488 \	-248.202 \	0.00 \	
\ 205.407 \	736445.375 \	3.8303 \	-641.570 \	-247.643 \	0.00 \	
\ 214.338 \	736888.125 \	4.3140 \	-632.657 \	-247.008 \	0.00 \	
\ 223.269 \	737383.312 \	4.7971 \	-623.750 \	-246.298 \	0.00 \	
\ 232.199 \	737930.812 \	5.2795 \	-614.849 \	-245.514 \	0.00 \	
\ 241.130 \	738530.562 \	5.7611 \	-605.955 \	-244.654 \	0.00 \	
\ 250.061 \	739182.438 \	6.2419 \	-597.068 \	-243.720 \	0.00 \	
\ 258.991 \	739886.250 \	6.7218 \	-588.190 \	-242.711 \	0.00 \	
\ 267.922 \	740641.875 \	7.2008 \	-579.320 \	-241.628 \	0.00 \	
\ 276.853 \	741449.125 \	7.6788 \	-570.459 \	-240.471 \	0.00 \	
\ 285.783 \	742307.875 \	8.1557 \	-561.609 \	-239.240 \	0.00 \	
\ 294.714 \	743217.938 \	8.6315 \	-552.769 \	-237.936 \	0.00 \	
\ 303.645 \	744179.125 \	9.1060 \	-543.940 \	-236.558 \	0.00 \	
\ 312.575 \	745191.250 \	9.5794 \	-535.123 \	-235.107 \	0.00 \	
\ 321.506 \	746254.062 \	10.0514 \	-526.318 \	-233.584 \	0.00 \	
\ 330.437 \	747367.375 \	10.5220 \	-517.526 \	-231.988 \	0.00 \	
\ 339.368 \	748530.938 \	10.9912 \	-508.747 \	-230.321 \	0.00 \	
\ 348.298 \	749744.562 \	11.4589 \	-499.983 \	-228.581 \	0.00 \	
\ 357.229 \	751008.000 \	11.9250 \	-491.232 \	-226.770 \	0.00 \	
\ 366.160 \	752320.938 \	12.3896 \	-482.497 \	-224.889 \	0.00 \	

\ 375.090 \	753683.188 \	12.8525 \	-473.777 \	-222.936 \	0.00 \
\ 384.021 \	755094.438 \	13.3137 \	-465.074 \	-220.913 \	0.00 \
\ 392.952 \	756554.438 \	13.7732 \	-456.386 \	-218.821 \	0.00 \
\ 401.882 \	758062.938 \	14.2309 \	-447.716 \	-216.659 \	0.00 \
\ 410.813 \	759619.562 \	14.6867 \	-439.063 \	-214.428 \	0.00 \
\ 419.744 \	761224.125 \	15.1406 \	-430.429 \	-212.128 \	0.00 \
\ 428.674 \	762876.250 \	15.5926 \	-421.812 \	-209.760 \	0.00 \
\ 437.605 \	764575.625 \	16.0426 \	-413.215 \	-207.324 \	0.00 \
\ 446.536 \	766321.938 \	16.4906 \	-404.637 \	-204.821 \	0.00 \
\ 455.467 \	768114.875 \	16.9365 \	-396.079 \	-202.251 \	0.00 \
\ 464.397 \	769954.125 \	17.3803 \	-387.541 \	-199.615 \	0.00 \
\ 473.328 \	771839.375 \	17.8220 \	-379.023 \	-196.913 \	0.00 \
\ 482.259 \	773770.250 \	18.2615 \	-370.527 \	-194.145 \	0.00 \
\ 491.189 \	775746.438 \	18.6988 \	-362.052 \	-191.313 \	0.00 \
\ 500.120 \	777767.562 \	19.1338 \	-353.598 \	-188.416 \	0.00 \
\ 509.051 \	779833.312 \	19.5666 \	-345.167 \	-185.455 \	0.00 \
\ 517.981 \	781943.312 \	19.9970 \	-336.759 \	-182.431 \	0.00 \
\ 526.912 \	784097.188 \	20.4251 \	-328.373 \	-179.344 \	0.00 \
\ 535.843 \	786294.625 \	20.8509 \	-320.010 \	-176.194 \	0.00 \
\ 544.773 \	788535.250 \	21.2742 \	-311.672 \	-172.983 \	0.00 \
\ 553.704 \	790818.625 \	21.6951 \	-303.357 \	-169.710 \	0.00 \
\ 562.635 \	793144.438 \	22.1136 \	-295.066 \	-166.376 \	0.00 \
\ 571.565 \	795512.312 \	22.5296 \	-286.799 \	-162.982 \	0.00 \
\ 580.496 \	797921.875 \	22.9431 \	-278.558 \	-159.528 \	0.00 \
\ 589.427 \	800372.750 \	23.3541 \	-270.341 \	-156.015 \	0.00 \
\ 598.357 \	802864.562 \	23.7626 \	-262.150 \	-152.444 \	0.00 \
\ 607.288 \	805396.938 \	24.1685 \	-253.984 \	-148.814 \	0.00 \
\ 616.219 \	807969.500 \	24.5719 \	-245.844 \	-145.127 \	0.00 \
\ 625.149 \	810581.812 \	24.9726 \	-237.731 \	-141.382 \	0.00 \
\ 634.080 \	813233.562 \	25.3708 \	-229.643 \	-137.581 \	0.00 \
\ 643.011 \	815924.312 \	25.7664 \	-221.582 \	-133.725 \	0.00 \
\ 651.941 \	818653.688 \	26.1594 \	-213.548 \	-129.813 \	0.00 \
\ 660.872 \	821421.312 \	26.5497 \	-205.541 \	-125.846 \	0.00 \
\ 669.803 \	824226.812 \	26.9374 \	-197.560 \	-121.824 \	0.00 \
\ 678.733 \	827069.812 \	27.3224 \	-189.607 \	-117.749 \	0.00 \
\ 687.664 \	829949.875 \	27.7048 \	-181.682 \	-113.621 \	0.00 \
\ 696.595 \	832866.688 \	28.0845 \	-173.784 \	-109.440 \	0.00 \
\ 705.525 \	835819.812 \	28.4616 \	-165.914 \	-105.207 \	0.00 \
\ 714.456 \	838808.875 \	28.8360 \	-158.072 \	-100.923 \	0.00 \
\ 723.387 \	841833.500 \	29.2077 \	-150.257 \	-96.587 \	0.00 \
\ 732.317 \	844893.312 \	29.5767 \	-142.471 \	-92.202 \	0.00 \
\ 741.248 \	847987.875 \	29.9431 \	-134.714 \	-87.766 \	0.00 \
\ 750.179 \	851116.875 \	30.3067 \	-126.984 \	-83.281 \	0.00 \
\ 759.109 \	854279.938 \	30.6677 \	-119.283 \	-78.747 \	0.00 \
\ 768.040 \	857476.625 \	31.0261 \	-111.611 \	-74.165 \	0.00 \
\ 776.971 \	860706.625 \	31.3817 \	-103.968 \	-69.535 \	0.00 \
\ 785.901 \	863969.562 \	31.7347 \	-96.353 \	-64.858 \	0.00 \
\ 794.832 \	867265.000 \	32.0850 \	-88.767 \	-60.134 \	0.00 \
\ 803.763 \	870592.625 \	32.4326 \	-81.210 \	-55.364 \	0.00 \
\ 812.693 \	873952.062 \	32.7776 \	-73.682 \	-50.549 \	0.00 \
\ 821.624 \	877342.938 \	33.1199 \	-66.182 \	-45.688 \	0.00 \
\ 830.555 \	880764.875 \	33.4596 \	-58.712 \	-40.783 \	0.00 \
\ 839.485 \	884217.562 \	33.7966 \	-51.271 \	-35.834 \	0.00 \
\ 848.416 \	887700.562 \	34.1310 \	-43.859 \	-30.842 \	0.00 \
\ 857.347 \	891213.562 \	34.4628 \	-36.477 \	-25.806 \	0.00 \
\ 866.277 \	894756.250 \	34.7920 \	-29.123 \	-20.728 \	0.00 \
\ 875.208 \	898328.188 \	35.1185 \	-21.798 \	-15.608 \	0.00 \
\ 884.139 \	901929.125 \	35.4425 \	-14.503 \	-10.446 \	0.00 \
\ 893.069 \	905558.625 \	35.7638 \	-7.237 \	-5.243 \	0.00 \
\ 902.000 \	909216.375 \	36.0826 \	0.000 \	0.000 \	0.00 \

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Typical output of the multi- leg mooring line static analysis

2α. Excitation incidence 0 degrees

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS

UNDER PRETENSION CONDITIONS - NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF LINES = 3

ALL MOORING LINES ARE ASSUMED IDENTICAL

WRITING DATA OUTPUT FOR CHECK IS MADE ONLY FOR ONE LINE

DESCRIPTION OF MOORING LINE 1

NUMBER OF SEGMENTS = 1

TOTAL LENGTH OF THE CABLE = 902. M

CHARACTERISTICS OF THE CABLE

SEGMENT NUMBER 1

COORDINATES = 0.0000000E+00 M - 902.2000 M

LENGTH SEGMENT = 902.2000 M

MASS PER UNIT LENGTH = 77.70660 KG/M

ADDED MASS PER UNIT LENGTH = 6.250000 KG/M

WEIGHT PER UNIT LENGTH = 698.0940 N/M

DIAMETER = 0.9000000E-01 M

EA = 0.3842430E+09 N

TBREAK = 8100000. N

STATIC DATA INPUT

NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF DISCRETIZATION POINTS = 102

HORIZONTAL PRE-TENSION FORCE AT THE TOP = 734800.000(N)

DEPTH = 250.000(M)

NO CURRENT

NORMAL DRAG COEFFICIENT = 1.20000

TANGENTIAL DRAG COEFFICIENT = 0.50000

ERROR IN DEPTH = 0.00093

NUMBER OF ITERATIONS = 6

LINE CAN LAY ON THE BOTTOM

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES WITH ONLY PRETENSION

TENSION AT THE TOP = 908952.750 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 734801.188 (N)

ANGLE AT THE TOP = 36.0598 (DEGREES)

ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)

HORIZONTAL FORCE AT TOP = 734800.000 (N)

HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM = 734801.188 (N)

VERTICAL FORCE AT TOP = 535036.562 (N)

VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)

X COORDINATE BOTTOM END = -848.58887 (M)

Z COORDINATE BOTTOM END = -250.00093 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER PRETENSION CONDITION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT = 908952.8 (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT = 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.1122164

SUMMARY OF MULTI-LEG CONFIGURATION

UNDER PRETENSION CONDITIONS - NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF LINES = 3

LINE NUMBER = 1

X COORDINATE TOP = -5.200 (M)

Y COORDINATE TOP = 0.000 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 179.9998 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = -853.789 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = 0.002 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

LINE NUMBER = 2

X COORDINATE TOP = 2.600 (M)

Y COORDINATE TOP = 4.503 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 60.0000 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = 426.894 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = 739.403 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

LINE NUMBER = 3

X COORDINATE TOP = 2.600 (M)

Y COORDINATE TOP = -4.503 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 300.0000 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = 426.895 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = -739.402 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

TOTAL FORCES AND MOMENTS FOR PRE-TENSION CONFIGURATION

(THESE SHOULD BE SMALL FORCES AND MOMENTS)

TOTAL FORCE IN X DIR = -0.9375E-01 (N)
TOTAL FORCE IN Y DIR = 2.250 (N)
TOTAL MOMENT AROUND ORIGIN = -6.008 (NM)

OUTPUT OF MULTILEG ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFTFORCES

TOTAL FORCES AND MOMENTS

TOTAL FORCE IN X DIR = 0.1000E+07 (N)
TOTAL FORCE IN Y DIR = 0.0000E+00 (N)
TOTAL MOMENT AROUND ORIGIN = 0.0000E+00 (NM)

TOTAL MOTIONS

TOTAL X MOTION = 16.67 (M)
TOTAL Y MOTION = 0.1730E-03 (M)
TOTAL ROTATION = -0.7016E-04 (DEGREES)

SPRING CONSTANTS OF THE MULTI-LEG SYSTEM AT THE NEW POSITION

SXX(N/M) SXY(N/M) SXM(N/RAD)

114301.5 -0.2402344 0.7976074

SYX(N/M) SY Y(N/M) SYM(N/RAD)

-0.2402344 30095.71 -3047.985

SMX(MOM/M) SMY(MOM/M) SMM(MOM/RAD)

0.7976074 -3047.985 0.1387845E+08

SUMMARY OF MULTI-LEG LOADING

NUMBER OF LINES = 3

LINE NUMBER = 1

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 865.262 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.154E+07 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.172E+07 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 179.9999 (DEGREES)

LINE NUMBER = 2

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 840.376 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.557E+06 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.731E+06 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 60.9845 (DEGREES)

LINE NUMBER = 3

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 840.377 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.557E+06 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.731E+06 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 299.0155 (DEGREES)

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES

DESCRIPTION OF A LINE 1 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 1719634.125 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 1545849.000 (N)
ANGLE AT THE TOP = 26.4304 (DEGREES)
ANGLE AT THE BOTTOM = 5.0327 (DEGREES)
HORIZONTAL FORCE AT TOP = 1539890.000 (N)
HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 1539889.500 (N)
VERTICAL FORCE AT TOP = 765428.000 (N)
VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 135607.500 (N)
X COORDINATE BOTTOM END = -865.30200 (M)
Z COORDINATE BOTTOM END = -249.99930 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1
LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)
MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 1719634. (N)
BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)
RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.2123005

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES
DESCRIPTION OF A LINE 2 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 730765.812 (N)
TENSION AT THE BOTTOM = 556533.938 (N)
ANGLE AT THE TOP = 40.3966 (DEGREES)
ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)
HORIZONTAL FORCE AT TOP = 556534.000 (N)
HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 556533.938 (N)
VERTICAL FORCE AT TOP = 473591.125 (N)
VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)
X COORDINATE BOTTOM END = -840.53253 (M)

Z COORDINATE BOTTOM END = -250.00012 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 730765.8 (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.9021800E-01

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES

DESCRIPTION OF A LINE 3 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 730771.750 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 556540.125 (N)

ANGLE AT THE TOP = 40.3965 (DEGREES)

ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)

HORIZONTAL FORCE AT TOP = 556540.000 (N)

HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 556540.125 (N)

VERTICAL FORCE AT TOP = 473593.281 (N)

VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)

X COORDINATE BOTTOM END = -840.53284 (M)

Z COORDINATE BOTTOM END = -250.00003 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 730771.8 (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.9021874E-01

6β. Excitation incidence 30 degrees

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS

UNDER PRETENSION CONDITIONS - NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF LINES = 3

ALL MOORING LINES ARE ASSUMED IDENTICAL

WRITING DATA OUTPUT FOR CHECK IS MADE ONLY FOR ONE LINE

DESCRIPTION OF MOORING LINE 1

NUMBER OF SEGMENTS = 1

TOTAL LENGTH OF THE CABLE = 902. M

CHARACTERISTICS OF THE CABLE

SEGMENT NUMBER 1

COORDINATES = 0.0000000E+00 M - 902.2000 M

LENGTH SEGMENT = 902.2000 M

MASS PER UNIT LENGTH = 77.70660 KG/M

ADDED MASS PER UNIT LENGTH = 6.250000 KG/M

WEIGHT PER UNIT LENGTH = 698.0940 N/M

DIAMETER = 0.9000000E-01 M

EA = 0.3842430E+09 N

TBREAK = 8100000. N

STATIC DATA INPUT

NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF DISCRETIZATION POINTS = 102

HORIZONTAL PRE-TENSION FORCE AT THE TOP = 734800.000(N)

DEPTH = 250.000(M)

NO CURRENT

NORMAL DRAG COEFFICIENT = 1.20000

TANGENTIAL DRAG COEFFICIENT = 0.50000

ERROR IN DEPTH = 0.00092

NUMBER OF ITERATIONS = 6

LINE CAN LAY ON THE BOTTOM

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES WITH ONLY PRETENSION

TENSION AT THE TOP = 908952.750 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 734801.188 (N)

ANGLE AT THE TOP = 36.0598 (DEGREES)

ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)

HORIZONTAL FORCE AT TOP = 734800.000 (N)

HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM = 734801.188 (N)

VERTICAL FORCE AT TOP = 535036.562 (N)

VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)

X COORDINATE BOTTOM END = -848.58887 (M)

Z COORDINATE BOTTOM END = -250.00092 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER PRETENSION CONDITION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT = 908952.8 (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT = 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.1122164

SUMMARY OF MULTI-LEG CONFIGURATION

UNDER PRETENSION CONDITIONS - NO EXTERNAL FORCES

NUMBER OF LINES = 3

LINE NUMBER = 1

X COORDINATE TOP = -5.200 (M)

Y COORDINATE TOP = 0.000 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 179.9998 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = -853.789 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = 0.002 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

LINE NUMBER = 2

X COORDINATE TOP = 2.600 (M)

Y COORDINATE TOP = 4.503 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 60.0000 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = 426.894 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = 739.403 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

LINE NUMBER = 3

X COORDINATE TOP = 2.600 (M)

Y COORDINATE TOP = -4.503 (M)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 300.0000 (DEGREES)

X COORDINATE ANCHOR = 426.895 (M)

Y COORDINATE ANCHOR = -739.402 (M)

HORIZONTAL DISTANCE OF ANCHOR AND TOP OF THE LINE= 848.589 (M)

TOTAL FORCES AND MOMENTS FOR PRE-TENSION CONFIGURATION

(THESE SHOULD BE SMALL FORCES AND MOMENTS)

TOTAL FORCE IN X DIR = -0.9375E-01 (N)

TOTAL FORCE IN Y DIR = 2.250 (N)

TOTAL MOMENT AROUND ORIGIN = -6.008 (NM)

OUTPUT OF MULTILEG ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES

TOTAL FORCES AND MOMENTS

TOTAL FORCE IN X DIR = 0.8660E+06 (N)

TOTAL FORCE IN Y DIR = 0.5000E+06 (N)

TOTAL MOMENT AROUND ORIGIN = 0.0000E+00 (NM)

TOTAL MOTIONS

TOTAL X MOTION = 16.00 (M)

TOTAL Y MOTION = 15.36 (M)

TOTAL ROTATION = 0.1283 (DEGREES)

SPRING CONSTANTS OF THE MULTI-LEG SYSTEM AT THE NEW POSITION

SXX(N/M)	SXY(N/M)	SXM(N/RAD)
----------	----------	------------

108381.2	-8206.106	-7072.016
----------	-----------	-----------

SYX(N/M)	SYY(N/M)	SYM(N/RAD)
----------	----------	------------

-8206.106	37410.20	-588.0850
-----------	----------	-----------

SMX(MOM/M)	SMY(MOM/M)	SMM(MOM/RAD)
------------	------------	--------------

-7072.016	-588.0850	0.1446518E+08
-----------	-----------	---------------

SUMMARY OF MULTI-LEG LOADING

NUMBER OF LINES = 3

LINE NUMBER = 1

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 864.729 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.148E+07 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.166E+07 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 181.0170 (DEGREES)

LINE NUMBER = 2

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 827.307 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.373E+06 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.547E+06 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 60.4272 (DEGREES)

LINE NUMBER = 3

HORIZONTAL DISTANCE TOP-ANCHOR= 854.162 (M)

HORIZONTAL FORCE TOP = 0.908E+06 (N)

TOTAL FORCE TOP = 0.108E+07 (N)

ORIENTATION ANGLE OF LINE = 298.5542 (DEGREES)

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES

DESCRIPTION OF A LINE 1 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 1663027.375 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 1489217.750 (N)

ANGLE AT THE TOP = 26.8018 (DEGREES)

ANGLE AT THE BOTTOM = 4.6237 (DEGREES)
HORIZONTAL FORCE AT TOP = 1484371.000 (N)
HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 1484371.250 (N)
VERTICAL FORCE AT TOP = 749868.688 (N)
VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 120048.484 (N)
X COORDINATE BOTTOM END = -864.75031 (M)
Z COORDINATE BOTTOM END = -249.99910 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1
LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)
MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 1663027. (N)
BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)
RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.2053120

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES
DESCRIPTION OF A LINE 2 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 547019.125 (N)
TENSION AT THE BOTTOM = 372706.156 (N)
ANGLE AT THE TOP = 47.0561 (DEGREES)
ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)
HORIZONTAL FORCE AT TOP = 372673.969 (N)
HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 372706.156 (N)
VERTICAL FORCE AT TOP = 400429.844 (N)
VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)
X COORDINATE BOTTOM END = -827.58490 (M)
Z COORDINATE BOTTOM END = -249.99716 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 547019.1 (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.6753322E-01

OUTPUT OF STATIC ANALYSIS - GIVEN SLOW DRIFT FORCES

DESCRIPTION OF A LINE 3 OF THE MOORING

SUMMARY OF STATIC RESULTS FOR THE LINES UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

TENSION AT THE TOP = 1082345.125 (N)

TENSION AT THE BOTTOM = 908274.062 (N)

ANGLE AT THE TOP = 32.9480 (DEGREES)

ANGLE AT THE BOTTOM = 0.0000 (DEGREES)

HORIZONTAL FORCE AT TOP = 908266.062 (N)

HORIZONTAL FORCE AT BOTTOM= 908274.062 (N)

VERTICAL FORCE AT TOP = 588662.750 (N)

VERTICAL FORCE AT BOTTOM = 0.000 (N)

X COORDINATE BOTTOM END = -854.27795 (M)

Z COORDINATE BOTTOM END = -249.99828 (M)

ANALYSIS OF MAXIMUM TENSION IN LINE UNDER SLOW DRIFT EXCITATION

SEGMENT NUMBER = 1

LOCATION OF THE MAXIMUM TENSION = 902.2000 (M)

MAXIMUM TENSION IN SEGMENT= 1082345. (N)

BREAKING TENSION IN SEGMENT= 8100000. (N)

RATIO OF MAXIMUM AND BREAKING TENSION = 0.1336229
