



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Διπλωματική εργασία

Υδροδυναμική Ανάλυση πλωτής Ανεμογεννήτριας

αγκυρωμένης με κατακόρυφους κλάδους

αγκύρωσης (TLP)

Tension Leg Platform

Επιβλέπων: Σ.Α. Μαυράκος

Γιώργος Ι. Κοζύρης

Αθήνα 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την υδροδυναμική ανάλυση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, εδρασμένης σε TLP (Tension Leg Platform) κατασκευή με κατακόρυφους κλάδους αγκύρωσης, υπό σταθερή προένταση. 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 στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως στην αιολική, καθώς και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Το δεύτερο Κεφάλαιο περιλαμβάνει κάποιες καίριες έρευνες που έγιναν τα τελευταία χρόνια και αφορούν το συγκεκριμένο είδος πλωτής κατασκευής. Στο τρίτο Κεφάλαιο περιέχεται η περιγραφή της διάταξης και των συνθηκών του πειράματος, καθώς και η μεθοδολογία επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις της θεωρητικής προσέγγισης του προβλήματος, καθώς και η ανάλυση του συστήματος αγκύρωσης της πλωτής κατασκευής. 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 τρία παραρτήματα που περιλαμβάνουν την ανάλυση του συνόλου των πειραμάτων.

Abstract

This thesis deals with the hydrodynamic analysis of a floating wind turbine, mounted on a TLP (Tension Leg Platform) floating structure with vertical mooring lines under constant pretension. 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 renewable energy and specifically in wind energy, as well as in offshore wind farms. The second Chapter includes some key studies conducted in recent years concerning the same type of floating structure. The third Chapter contains the set up and the conditions of the experiment, and the methodology for processing the experimental data. Chapter 4 contains the mathematical relations of the theoretical approach of the problem, and the analysis of the mooring system of the floating structure. 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 three appendices, which include the analysis of all the experiments.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπυρίδωνα Α. Μαυράκο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής.

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 τον απεριόριστο χρόνο που μου αφιέρωσε καθώς και για τη διάθεση που επεδείκνυε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιάννη και Μαίρη, τον αδερφό μου, Μιχάλη, τους παππούδες μου, Γιώργο και Μιχάλη και τις γιαγιάδες μου, Μαρία, Πόπη και Δέσποινα για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΠΕ.....	1
1.2 ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	4
1.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	19
1.3.1 Ιστορική αναδρομή.....	19
1.3.2 Σύγκριση χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	24
1.3.3 Κατηγορίες Α/Γ.....	25
1.3.4 Ισχύς Α/Γ.....	31
1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ Α/Γ.....	34
1.4.1 Κατασκευές σταθερής έδρασης.....	36
1.4.2 Πλωτές – αγκυρωμένες κατασκευές.....	39
2.ΠΛΩΤΕΣ Α/Γ ΕΔΡΑΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΤΥΠΟΥ TLP.....	43
2.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΔΡΑΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΠΛΩΤΕΣ ΕΞΕΔΡΕΣ TLP. ...	44
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5MW ΤΟΥ NREL.....	52
3.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	55
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	55
3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ. ...	59
3.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ-ΜΕΤΡΗΤΩΝ.....	60
3.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.	64
3.5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	68
3.5.1 Αισθητήρες ανύψωσης κύματος (Wave Gauge).....	68
3.5.2 Μετρητές δυνάμεων και ροπών (6comp-4comp).....	70
3.5.3 Μετρητές δυνάμεων αγκύρωσης (mooring).....	71

4.ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	72
4.1 ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	72
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	73
4.2.1 Πεδίο ανέμου.....	74
4.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	85
4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΣΩΜΑΤΑ ...	92
4.5 ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΥΠΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ	102
4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .	106
5.ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	107
5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	109
5.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	124
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	131
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	146

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τις ΑΠΕ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια.^[1]

Μια από τις παρεμβάσεις του ανθρώπου, που δημιουργούν τεράστια προβλήματα για το φυσικό περιβάλλον, είναι οι αναγκαίες σήμερα μεγάλες ποσότητες ενέργειας, που απαιτούνται στη σύγχρονη κοινωνία, θέρμανση, ηλεκτρισμός, μεταφορές είναι αναγκαία σε κάθε νοικοκυριό, ενώ και η παραγωγή αγαθών βασίζεται σήμερα στην ενέργεια (βιομηχανία, βιοτεχνία, γεωργία, ορυκτός πλούτος).

Για να περιοριστεί η ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος από την παραγωγή ενέργειας, γίνονται πολλές προτάσεις, μια από τις οποίες είναι οι ΑΠΕ. Καταρχήν πρέπει να τονίσουμε ότι και οι ΑΠΕ έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όμως σε μικρότερο βαθμό από την παραγωγή ενέργειας με καύσιμη πρώτη ύλη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που έχουν οι ΑΠΕ έναντι των καυσίμων είναι ότι δεν έχουν ημερομηνία λήξης, αφού έχουν διαρκή ανανέωση. Η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Αντίθετα τα καύσιμα, που σήμερα καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό σε ενέργεια, έχουν εξαντλήσιμα αποθέματα. Π.χ. τα υγρά καύσιμα και το φυσικό αέριο προβλέπεται ότι θα εξαντληθούν σε λιγότερο από 1 αιώνα. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη

μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που

στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.^[2]

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

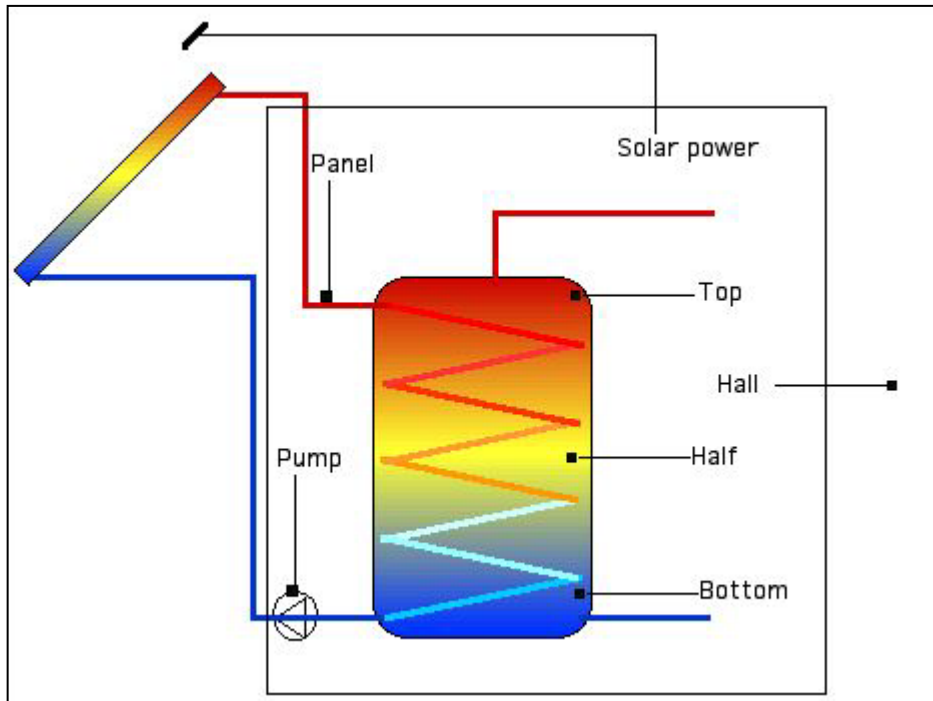
- ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή,
- ο άνεμος - αιολική ενέργεια,
- οι υδατοπτώσεις - υδροηλεκτρική ενέργεια,
- η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια: υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας,
- η βιομάζα: θερμική ή χημική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

1.2 Τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ηλιακή ενέργεια:

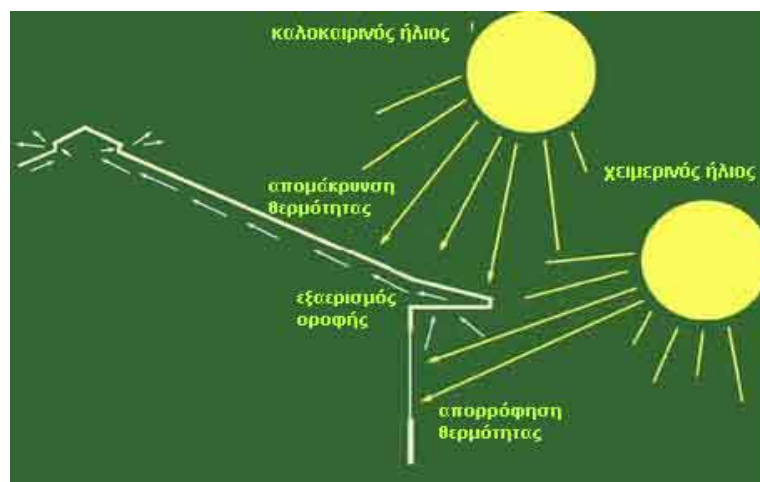
Με τον όρο Ηλιακή Ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Η ακτινοβολία του ήλιου (ηλιακή ακτινοβολία) αποτελεί την κυριότερη πηγή ενέργειας για τη γη εδώ και πολλά χρόνια με ουσιαστική συμβολή στη δημιουργία των ορυκτών καυσίμων. Η ενέργεια του ήλιου, αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια μια σημαντική πηγή ενέργειας, την οποία ο άνθρωπος χρησιμοποίησε είτε άμεσα, (ξήρανση τροφών, στέγνωμα κλπ.), είτε έμμεσα (μέσω της γεωργίας για την παραγωγή σιτηρών). Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα μηδαμινό ποσοστό της καταφθάνουσας στην επιφάνεια του πλανήτη μας ηλιακής ενέργειας με τριών ειδών συστήματα: τα θερμικά ή ενεργητικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

- **Θερμικά Ηλιακά Συστήματα:** Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό, όπως το νερό για παράδειγμα. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών, σκουρόχρωμων δηλαδή επιφανειών καλά προσανατολισμένων στον ήλιο, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με νερό και του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρησιμοποιείται για απλή οικιακή ή πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση, τελευταία δε ακόμη και για τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω κατάλληλων διατάξεων.



Εικόνα 1.1: Ηλιακός Θερμοσίφωνα

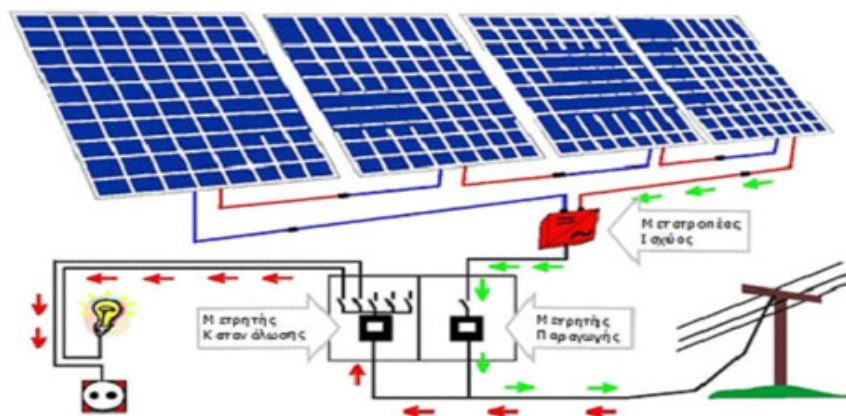
- Παθητικά Ηλιακά Συστήματα: Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων.



Εικόνα 1.2: Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική κτιρίου

- Φωτοβολταϊκά Συστήματα: . Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που, εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των Φ/Β συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά έχει ένα τεράστιο πλεονέκτημα αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση. Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος, τα Φ/Β κατατάσσονται σε:

1. Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επιτόπου και εξολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση
2. Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού. [2]



Εικόνα 1.3: Ηλιακοί συσσωρευτές

Αιολική ενέργεια:

Γενικά αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους.

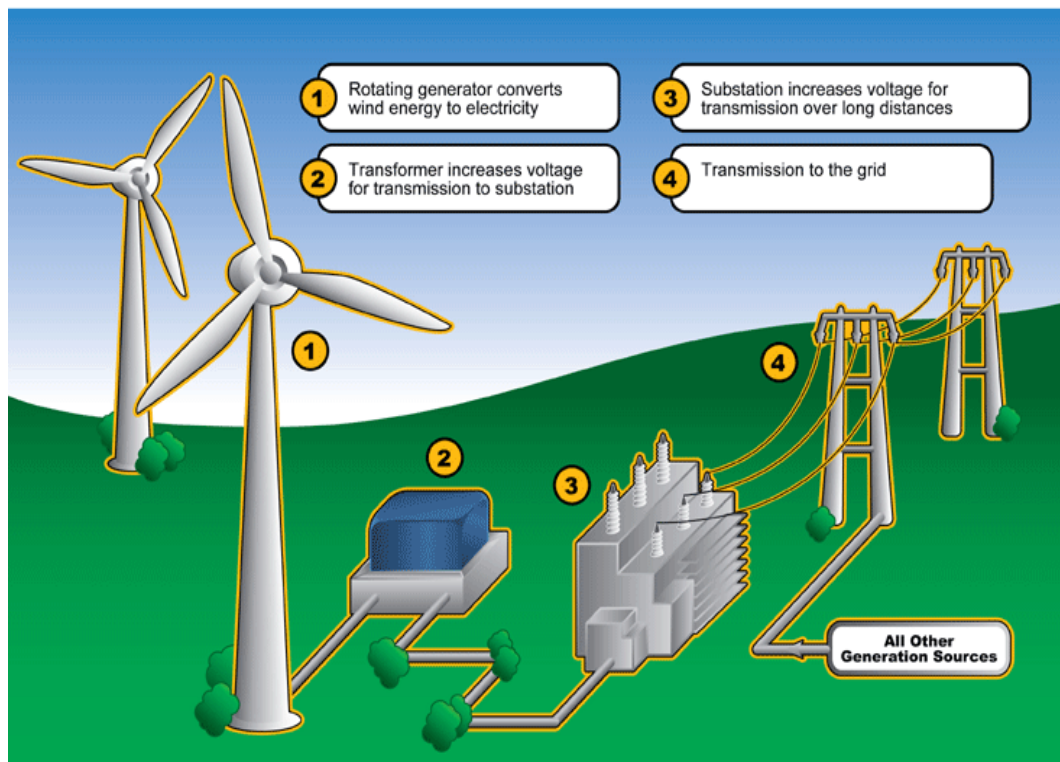
Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου. Η εξαγωγή ισχύος από τον αέρα άρχισε πολύ νωρίς στους αιώνες, με την παροχή κινητήριας δύναμης σε σκάφη, μύλους σιταριού και αλωνιστικές μηχανές.^[3]

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους. Ειδικότερα οι άνεμοι οφείλονται στο γεγονός ότι οι ισημερινές περιοχές της γης δέχονται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία από τις περιοχές των πόλων, προκαλώντας ρεύματα μεταφοράς θερμότητας μεγάλης κλίμακας στην ατμόσφαιρα.

Αν υπήρχε η δυνατότητα, με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1m/sec, σε ύψος 10m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την «πρώτη» περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της περωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι Α/Γ χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών

αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις Α/Γ, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, συχνά αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Η αποθήκευση σήμερα γίνεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης Η/Ε, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες. Η άντληση ύδατος με χρήση Η/Ε παραγόμενης από Α/Γ και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη Η/Ε είναι μεγάλη. ^{[4][5][6]}



Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη με ηλεκτρικό δίκτυο

Υδροηλεκτρική ενέργεια:

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια (Υ/Ε) είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση και τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περωτής του στροβίλου, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της περωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.^[7]

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από το νερό που βρίσκεται σε κίνηση. Μπορεί να θεωρηθεί ως μία μορφή ηλιακής ενέργειας, καθώς ο ήλιος αποτελεί την κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου, ο οποίος δίνει το νερό στη γη. Στον υδρολογικό κύκλο, το νερό της ατμόσφαιρας φθάνει στην επιφάνεια της γης ως βροχόπτωση. Ένα μέρος από αυτό το νερό εξατμίζεται, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του είτε διηθείται στο έδαφος είτε γίνεται επιφανειακή απορροή. Το νερό από τη βροχή και το χιόνι που λιώνει φτάνει τελικά σε λίμνες, σε ταμιευτήρες ή στη θάλασσα, όπου η εξάτμισή του είναι συνεχής. Η υγρασία που διαχέεται στο έδαφος μπορεί να μετατραπεί σε υπόγειο νερό, μέρος του οποίου εισέρχεται επίσης στα υδατικά συστήματα μέσω πηγών ή υπογείων ρευμάτων. Το υπόγειο νερό μπορεί να κινηθεί προς τα επάνω μέσω του εδάφους κατά την διάρκεια ξηρών περιόδων και μπορεί να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης. Οι υδρατμοί περνούν στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης, κυκλοφορούν, συμπυκνώνονται στα σύννεφα, και ένα μέρος επιστρέφει στη γη ως βροχή. Έτσι, κλείνει ο κύκλος του νερού. Η φύση εξασφαλίζει ότι το νερό είναι μία ανανεώσιμη πηγή.



Εικόνα 1.5:Κύκλος νερού

Από την εποχή της αρχαίας Αιγύπτου, οι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει την ενέργεια σε ρέοντα ύδατα για τη λειτουργία μηχανημάτων και άλεσμα σιτηρών και καλαμποκιού. Ωστόσο, η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στις ζωές ανθρώπων κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα από ό, τι σε οποιαδήποτε άλλη στιγμή στην ιστορία. Η υδροηλεκτρική ενέργεια έπαιξε σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των θαυμάτων της ηλεκτρικής ενέργειας και βοήθησε στην ώθηση της βιομηχανικής ανάπτυξης. Υδροηλεκτρική ενέργεια συνεχίζει να παράγει 24% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πρώτος υδροηλεκτρικός σταθμός χτίστηκε το 1882 στο Appleton, Wisconsin και παρήγαγε 12,5kw, και παρείχε φως σε δύο χαρτοβιομηχανίες και ένα σπίτι. Υδροηλεκτρικά εργοστάσια ποικίλουν σε μέγεθος από αρκετές εκατοντάδες κιλοβάτ σε αρκετές εκατοντάδες MW, αλλά μερικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν ικανότητες μέχρι και 10.000MW, και παρέχουν ηλεκτρισμό σε εκατομμύρια ανθρώπους. Σε παγκόσμιο επίπεδο, υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν χωρητικότητα 675.000 μεγαβάτ ετησίως και παράγουν πάνω από 2,3 τρισεκατομμύρια-κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας, ισοδύναμη ενέργεια με 3,6 δισ. βαρέλια πετρελαίου.

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως κινεί έναν στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη

γεννήτρια. Μία τουρμπίνα που είναι εγκατεστημένη σε μεγάλη μονάδα μπορεί να ζυγίζει μέχρι 172 τόνους και να περιστρέφεται με 90rpm. Η ποσότητα του ηλεκτρισμού που παράγεται καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες. Δύο από τους σημαντικότερους είναι ο όγκος του νερού που ρέει και η διαφορά μανομετρικού ύψους μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα και του στροβίλου. Η ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται είναι ανάλογη των δύο αυτών μεγεθών. Συνεπώς, ο παραγόμενος ηλεκτρισμός εξαρτάται από την ποσότητα του νερού του ταμιευτήρα. Για το λόγο αυτόν μόνο σε περιοχές με σημαντικές βροχοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευαστούν υδροηλεκτρικά έργα. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται, χρησιμοποιείται μόνο συμπληρωματικά ως προς άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, καλύπτοντας φορτία αιχμής. Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί περίπου το 9% των ενεργειακών μας αναγκών σε ηλεκτρισμό.



Εικόνα 1.6: Αρχή υδροηλεκτρικής ενέργειας

Τα υδροηλεκτρικά έργα ταξινομούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα διαφέρουν σημαντικά από της μεγάλης κλίμακας σε ότι αφορά τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές μονάδες απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων

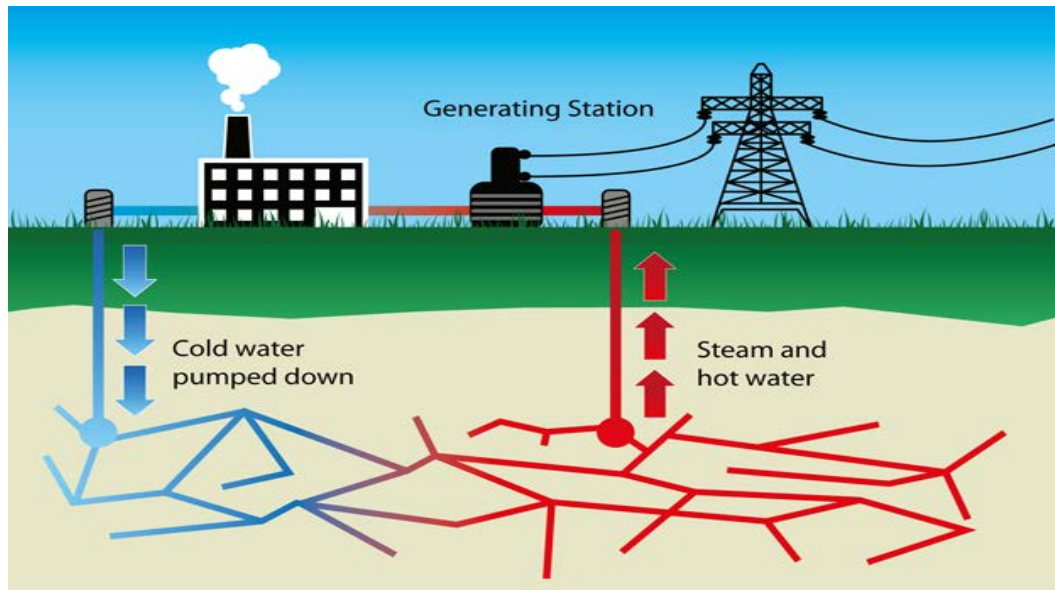
δεξαμενών με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατασκευή φραγμάτων περιορίζει τη μετακίνηση των ψαριών, της άγριας ζωής και επηρεάζει ολόκληρο το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλει ριζικά τη μορφολογία της περιοχής. Αντίθετα, τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια και η λειτουργία τους παρουσιάζει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική όχληση. [8][9][10]

Γεωθερμία:

Ως γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, μεταφέρεται στην επιφάνεια με αγωγή θερμότητας και με την είσοδο στο φλοιό της γης λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της, και γίνεται αντιληπτή με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Είναι μία καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας επειδή η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης είναι ουσιαστικά απεριόριστη.^[11]

Η πηγή της γεωθερμικής ενέργειας, η θερμότητα της Γης, είναι διαθέσιμη 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο. Αντιθέτως, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ημερησίων και εποχιακών διακυμάνσεων και των εναλλαγών του καιρού. Γι' αυτούς τους λόγους, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με την χρήση γεωθερμικής ενέργειας είναι σταθερά πιο αξιόπιστη, από τη στιγμή που αξιοποιείται ο πόρος, από πολλές άλλες μορφές ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμότητα που ρέει συνεχώς από το εσωτερικό της Γης υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί σε 42 εκατομμύρια μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι ένα μεγαβάτ μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 1.000 σπιτιών. Η κύρια κατάταξη των γεωθερμικών πεδίων γίνεται με βάση τη θερμοκρασία τους. Πεδία χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας (50– 150°C) αξιοποιούνται στη μεταφορά θερμότητας σε οικισμούς, θερμοκήπια, αλλά και μικρές βιομηχανικές μονάδες. Πεδία υψηλής θερμοκρασίας (άνω των 150°C) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι ιδιαίτερα οικονομικές και η λειτουργία τους έχει μικρή περιβαλλοντική επίδραση. Παράγουν μόνο το 1/6 του CO₂ από

ό,τι θα παρήγαγε μια μονάδα ίσης δυναμικότητας που λειτουργεί με φυσικό αέριο. [6][11]



Εικόνα 1.7: Σύστημα εκμετάλλευσης γεωθερμίας

Βιομάζα:

Ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ενέργειας, καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.^[12]

Ειδικότερα, η βιομάζα για ενεργειακούς σκοπούς, περιλαμβάνει κάθε τύπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή στερεών, υγρών και / ή αέριων καυσίμων. Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας. Πρώτον, οι υπολειμματικές μορφές (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα και ζωικά απόβλητα και τα απορρίμματα) και δεύτερον η βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

- Υπολειμματικές μορφές:
 1. Βιομάζα γεωργικής προέλευσης: Η γεωργική βιομάζα που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας διακρίνεται στη βιομάζα των υπολειμμάτων των γεωργικών καλλιεργειών (στελέχη, κλαδιά, φύλλα, άχυρο, κλαδοδέματα κ.λπ.) και στη βιομάζα των υπολειμμάτων επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων (υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, πυρηνόξυλο, πυρήνες φρούτων κ.λπ.).
 2. Βιομάζα ζωικής προέλευσης: Το διαθέσιμο δυναμικό βιομάζας ζωικής προέλευσης, περιλαμβάνει κυρίως απόβλητα εντατικής κτηνοτροφίας από πτηνοτροφεία, χοιροστάσια, βουστάσια και σφαγεία. Η εκτροφή προβάτων, αιγών κι αρνιών είναι εκτατική (η οποία είναι επί το πλείστον ποιμενικής μορφής) και τα παραγόμενα απόβλητα διασκορπίζονται σε όλο το βοσκότοπο.
 3. Βιομάζα δασικής προέλευσης: Η βιομάζα δασικής προέλευσης που αξιοποιείται ή μπορεί να αξιοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς συνίσταται στα καυσόξυλα, στα υπολείμματα καλλιέργειας των δασών (αραιώσεων, υλοτομιών), στα προϊόντα καθαρισμών για την προστασία τους από πυρκαγιές καθώς και στα υπολείμματα επεξεργασίας του ξύλου.
 4. Αστικά απόβλητα: Το οργανικό τμήμα των αστικών αποβλήτων.
- Ενεργειακές καλλιέργειες: Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι παραδοσιακές καλλιέργειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων (όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω) είτε φυτά που δεν καλλιεργούνται, προς το παρόν, εμπορικά όπως ο μίσχανθος, η αγριαγκινάρα και το καλάμι που το τελικό προϊόν τους προορίζεται για την παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων. Οι ενεργειακές καλλιέργειες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι:

1. Ετήσιες: σακχαρούχο ή γλυκό σόργο (*Sorghumbicolor* L. Moench), ινώδες σόργο (*Sorghumbicolor* L. Moench), κενάφ (*Hibiscuscannabinus* L.), ελαιοκράμβη (*Brassicanaapus* L.), βραστική η αιθίοπια (*Brassicacarinata* L. Braun)
2. Πολυετείς:
 - Γεωργικές: Αγριαγκινάρα (*Cynaracardunculus*), καλάμι (*Arundodonax* L.), μίσχανθος (*Miscanthusxgiganteus*), switchgrass (*Panicumvirgatum*)
 - Δασικές: Ευκάλυπτος (*Eucalyptuscamaldulensis* Dehnh. & E. Globulus Labill.), ψευδακακία (*Robiniapseudoacacia*).

Τα πιο συνηθισμένα υγρά βιοκαύσιμα του εμπορίου είναι το βιοντίζελ το οποίο παράγεται κυρίως από ελαιούχους σπόρους (ηλίανθος, ελαιοκράμβη, κ.ά.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του ή σε μίγμα με πετρέλαιο κίνησης σε πετρελαιοκινητήρες λόγω της παραπλήσιας χημικής του σύστασης με το ορυκτό ντίζελ και η βιοαιθανόλη η οποία παράγεται από σακχαρούχα, κυτταρινούχα κι αμυλούχα φυτά (σιτάρι, καλαμπόκι, σόργο, τεύτλα, κ.ά.) και χρησιμοποιείται είτε ως έχει σε βενζινοκινητήρες που έχουν υποστεί μετατροπή, είτε σε μίγμα με βενζίνη σε κανονικούς βενζινοκινητήρες, είτε για να μετατραπεί σε ETBE (πρόσθετο βενζίνης).^[6]

Ενέργεια από τη θάλασσα:

Η θάλασσα έχει θεωρηθεί από καιρό ως πηγή ενέργειας. κατά τον Μεσαίωνα (1200-1500) οι αγρότες παγίδευαν το θαλάσσιο νερό στις λίμνες μύλων, για να το χρησιμοποιήσουν στους υδρόμυλους δύναμης . Κατά τη διάρκεια των τελευταίων πενήντα ετών, οι μηχανικοί έχουν αρχίσει να εξετάζουν την παλιρροιακή δύναμη και τη δύναμη των κυμάτων σε μια μεγαλύτερη, βιομηχανική κλίμακα .Οι μορφές θαλάσσιας ενέργειας είναι πολλές και οι ποσότητες ενέργειας οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν τεράστιες. Η θαλάσσια επιφάνεια απορροφά τεράστιες ποσότητες ηλιακής και αιολικής ενέργειας, η οποία εμφανίζεται στη θάλασσα σε διάφορες μορφές, όπως κύματα ή ρεύματα . Επιπλέον, διάφορες άλλες πηγές

ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι το φαινόμενο της παλίρροιας και το θερμικό δυναμικό μεταξύ των ανώτερων (θερμότερων) και των κατώτερων (ψυχρότερων) θαλάσσιων στρωμάτων.^[13]

- **Κυματική ενέργεια:** Η ενέργεια του θαλάσσιου κυματισμού είναι, όπως όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανεξάντλητη. Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μας θα κάλυπτε στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Μεταξύ των διάφορων μορφών κυματισμού, τα ανεμογενή κύματα, που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του ανέμου με τη θαλάσσια επιφάνεια, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για ενεργειακή εκμετάλλευση. Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα συγκεντρώνεται στα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επιπλέον σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες, οι εγκαταστάσεις κυματικής ενέργειας δεν δεσμεύουν γη, ενώ η οπτική και ακουστική όχληση είναι μηδαμινή. Οι τεχνολογίες που αναφέρονται πιο κάτω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροδότηση παράκτιων περιοχών, νησιών:

1. **Παλλόμενη στήλη ύδατος:** πρόκειται για έναν θάλαμο αέρα, βυθισμένο κατακόρυφα στο μισό μήκος του περίπου, ανοικτό προς την πλευρά του πυθμένα. Η παλινδρομική κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας προκαλεί ρυθμική συμπίεση- αποσυμπίεση της αέριας μάζας μέσα στον θάλαμο, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση αεροστρόβιλου
2. **Πλωτήρες:** αγκυρωμένοι στον θαλάσσιο πυθμένα, οι οποίοι ακολουθούν την κατακόρυφη κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας. Η παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα μετατρέπεται μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική για την κίνηση ηλεκτρογεννήτριας.
3. **Πλωτές δεξαμενές:** οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας. Η διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων.

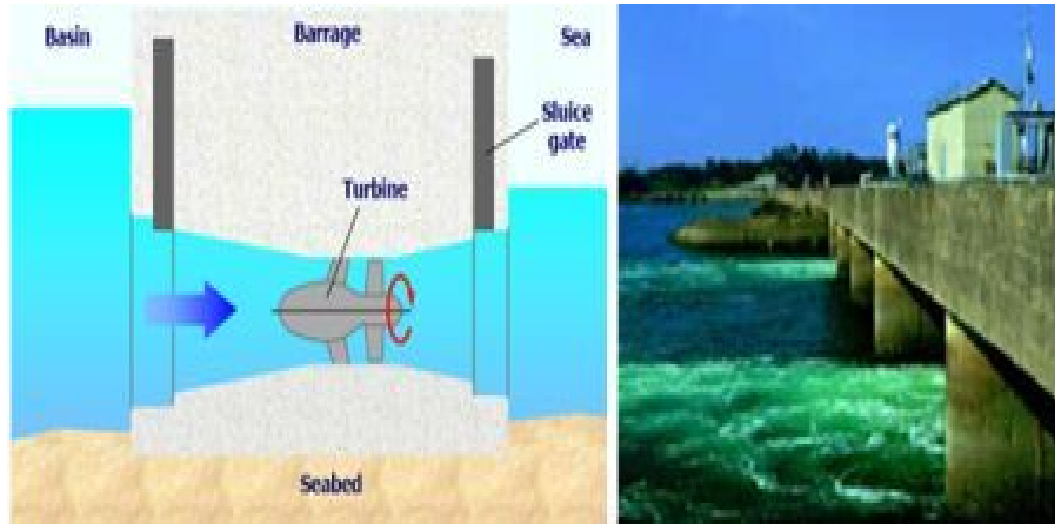
4. Πλωτά αρθρωτά συστήματα: τα οποία στις αρθρώσεις φέρουν αντλίες. Με τις κινήσεις του κυματισμού οι αντλίες συμπιέζουν υδραυλικό υγρό και δίνουν κίνηση σε υδραυλικούς κινητήρες.



Εικόνα 1.8: Συσκευές εκμετάλλευσης ενέργειας κυμάτων

- Παλιρροιακή ενέργεια: Οι τεχνολογίες παλιρροιακής ενέργειας αξιοποιούν την αυξομείωση της θαλάσσιας στάθμης κατά την παλίρροια. Οι αυξομειώσεις της θαλάσσιας στάθμης κατά την παλίρροια είναι συνυφασμένες με «παλιρροιακά ρεύματα», οριζόντιες μετατοπίσεις θαλάσσιας μάζας, οι οποίες έχουν περίπου την ίδια περιοδικότητα. Τα ρεύματα είναι ισχυρά, και θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για ενεργειακή αξιοποίηση, επειδή εμφανίζονται σε σχετικά μικρά βάθη. Η εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας της παλίρροιας γίνεται με την κατασκευή ενός φράγματος στην είσοδο ενός κόλπου ή θαλάσσιου διαύλου, δημιουργώντας έτσι μία φυσική δεξαμενή. Κατά την άνοδο της παλίρροιας το νερό εισέρχεται στη φυσική αυτή δεξαμενή μέσα από υδατοφράκτες, οι οποίοι κλείνουν όταν η παλίρροια φτάσει στο ζενίθ. Οι υδατοφράκτες ανοίγουν πάλι στο ναδίρ της παλίρροιας, επιτρέποντας την έξοδο του νερού διά μέσου υδροστροβίλων. Οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης τους είναι παρόμοιες προς αυτές της αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούν δηλαδή στροβίλους οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα, πλωτούς ή πακτωμένους στον θαλάσσιο πυθμένα. Λόγω της πολύ

μεγαλύτερης πυκνότητας του ύδατος, το μέγεθος ενός στροβίλου παλιρροιακού ρεύματος είναι πολύ μικρότερο, περίπου το 1/4, από αυτό μιας ανεμογεννήτριας της ίδιας ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, η οπτική και ακουστική όχληση από στροβίλους παλιρροιακών ρευμάτων είναι μηδαμινή.



Εικόνα 1.9: Συσκευές εκμετάλλευσης παλιρροιακής ενέργειας

- Θερμοκρασιακές διαφορές νερού θάλασσας: Η θερμική ενέργεια των ωκεανών μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου του πυθμένα. Η τεχνολογία μετατροπής της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιεί σε πρώτη φάση το θερμό νερό για να ζεστάνει σε ειδικό θάλαμο μια ποσότητα υγρού που έχει χαμηλό σημείο βρασμού, όπως η αμμωνία ή ένα μείγμα αμμωνίας και νερού. Όταν το μείγμα αυτό βράσει, το αέριο που απελευθερώνεται δημιουργεί αρκετή πίεση ώστε να οδηγήσει έναν αεριοστρόβιλο ο οποίος παράγει την ενέργεια. Στη συνέχεια το αέριο αυτό παγώνει καθώς διέρχεται μέσα από το ψυχρό νερό του πυθμένα του ωκεανού.^[14]

1.3 Ανεμογεννήτριες

1.3.1 Ιστορική αναδρομή

Η αιολική ενέργεια μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται στην Ελληνική μυθολογία όπου ο Αίολος διορίζεται από τους Θεούς του Ολύμπου ως «Ταμίας των ανέμων». Ο άνθρωπος πρωτοχρησιμοποίησε την αιολική ενέργεια στα ιστιοφόρα πλοία, γεγονός που συνέβαλε αποφασιστικά στην ανάπτυξη της ναυτιλίας. Μια άλλη εφαρμογή της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμόμυλοι. Μαζί με τους νερόμυλους συγκαταλέγονται στους αρχικούς κινητήρες που αντικατέστησαν τους μυς των ζώων ως πηγές ενέργειας.

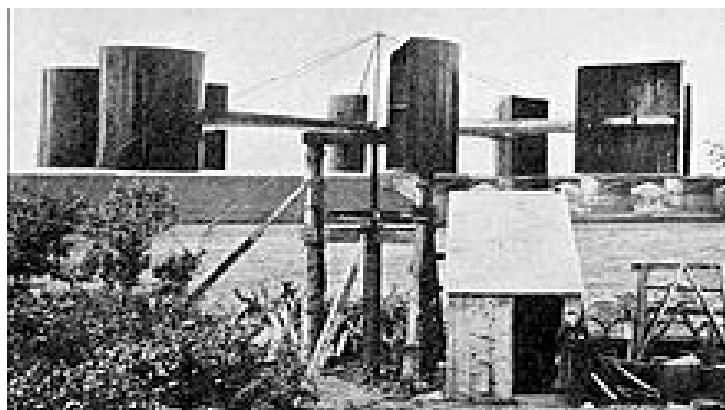
Μέση Ανατολή: Ο ανεμόμυλος είναι μια διάταξη που χρησιμοποιεί ως κινητήρια δύναμη την κινητική ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια). Χρησιμοποιείται για την άλεση σιτηρών, την άντληση νερού και σε άλλες εργασίες. Φαίνεται ότι οι αρχαίοι λαοί της Ανατολής χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους, αν και η πρώτη αναφορά σε ανεμόμυλο (ένα περσικό συγκρότημα ανεμόμυλων του 644 μ.Χ.) εμφανίζεται σε έργα Αράβων συγγραφέων του 9ου μ.Χ. αιώνα. Αυτό το συγκρότημα των ανεμόμυλων βρισκόταν στο Σειστάν, στα σύνορα της Περσίας και Αφγανιστάν και ήταν “οριζόντιου τύπου” δηλαδή με ιστία (φτερά) τοποθετημένα ακτινικά σε έναν “κατακόρυφο άξονα”. Ο άξονας αυτός στηριζόταν σε ένα μόνιμο κτίσμα με ανοίγματα σε αντιδιαμετρικά σημεία για την είσοδο και την έξοδο του αέρα. Κάθε μύλος έδινε απευθείας κίνηση σε ένα μόνο ζεύγος μυλόπετρες. Οι πρώτοι μύλοι είχαν τα ιστία κάτω από τις μυλόπετρες, όπως δηλαδή συμβαίνει και στους οριζόντιους νερόμυλους από τους οποίους φαίνεται ότι προέρχονταν. Σε μερικούς από τους μύλους που σώζονται σήμερα τα ιστία τοποθετούνται πάνω από τις μυλόπετρες. Τον 13ο αιώνα οι μύλοι αυτού του τύπου ήταν γνωστοί στην Βόρεια Κίνα, όπου μέχρι και τον 16ο αιώνα τους χρησιμοποιούσαν για εξάτμιση του θαλασσινού νερού στην παραγωγή αλατιού. Τον τύπο αυτό του μύλου χρησιμοποιούσαν επίσης στην Κριμαία, στις

περισσότερες χώρες της Δυτικής Ευρώπης και στις ΗΠΑ, μόνο που λίγοι από αυτούς διασώζονται σήμερα. [15]



Εικόνα 1.10: Ανεμόμυλος

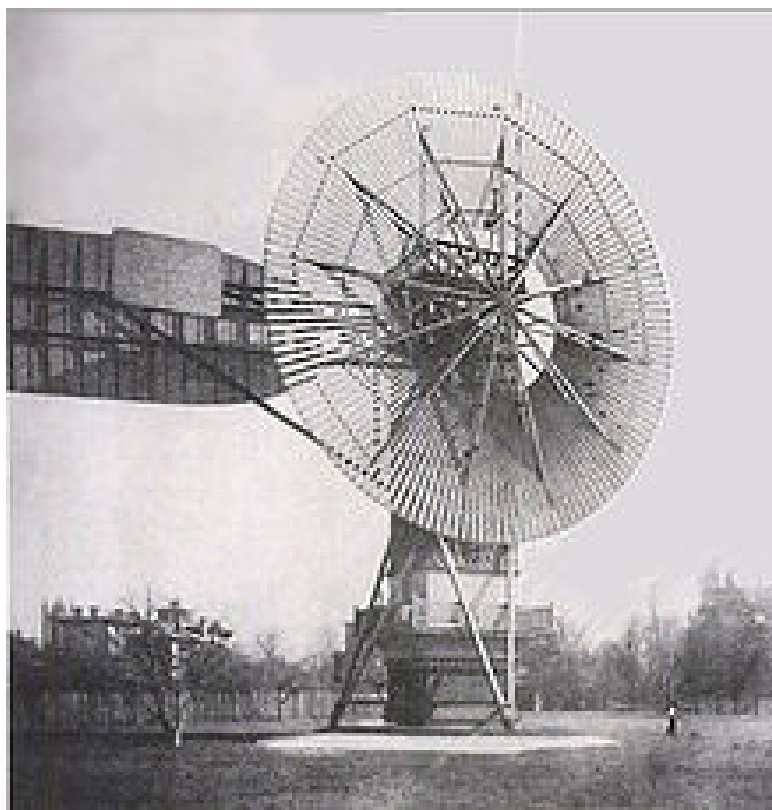
Ο πρώτος ανεμόμυλος που παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα κατασκευάστηκε από τον σκωτσέζο καθηγητή James Blyth. Τον Ιούλιο του 1887 ο Blyth εγκατέστησε στον κήπο του σπιτιού του έναν ανεμόμυλο, τον οποίο χρησιμοποιούσε για να φορτίζει συσσωρευτές. Με την αποθηκευμένη αυτή ηλεκτρική ενέργεια φώτιζε με τη βοήθεια λαμπτήρων το εσωτερικό του σπιτιού του, που έγινε το πρώτο σπίτι που τροφοδοτούνταν αποκλειστικά με ηλεκτρισμό που παραγόταν από αιολική ενέργεια.



Εικόνα 1.11: Ανεμόμυλος του Blyth

Το χειμώνα του έτους 1887-1888 ο Charles F. Brush κατασκεύασε την πρώτη τροφοδοτούμενη από τον άνεμο γεννήτρια πίσω από το προσωπικό του μέγαρο. Ο βάρους 40 τόνων σιδερένιος πύργος αποτελούνταν από 144 έλικες με επιφάνεια

1800 τετραγωνικά πόδια. Ένα στέλεχος μέσα στον πύργο γυρνούσε με τροχαλίες περιστρέφοντας ένα δυναμό με μέχρι και 500 στροφές το λεπτό. Η ανεμογεννήτρια αυτή λειτουργούσε επί 12 χρόνια μεταφέροντας γύρω στα 16kW ενέργειας στο μέγαρο του Brushμέχρι και το θάνατό του το 1929. ^[16]



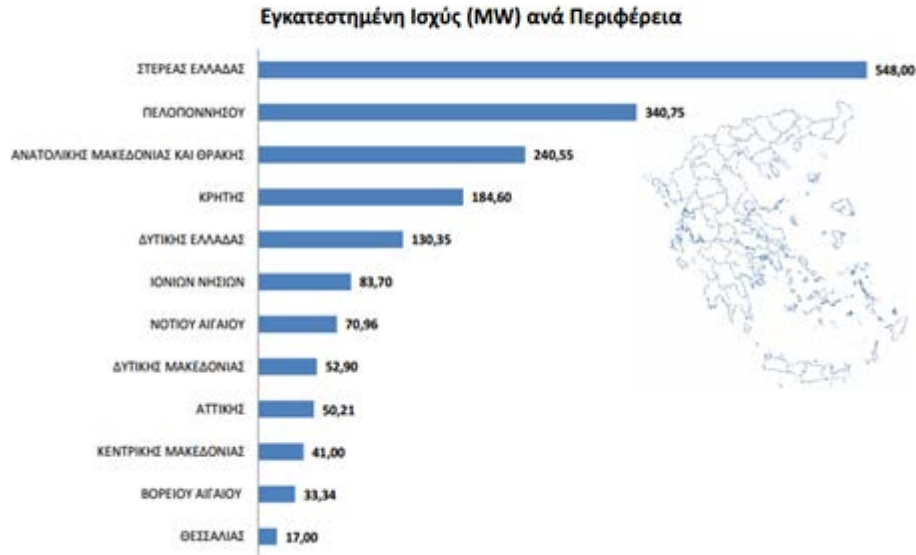
Εικόνα 1.12: Ανεμογεννήτρια Charles F. Brush

Στη συνέχεια παρατηρήθηκε μια μείωση ενδιαφέροντος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο πρώτο μισό του 19ου αιώνα, ανακαλύπτεται το αέριο, ενώ μόλις το 1920 η χρήση του πετρελαίου, καθίσταται εφικτή, με την βελτιστοποίηση της μηχανής εσωτερικής καύσης. Όμως η δομή της βιομηχανίας και η στροφή της προς την ανεξέλεγκτη κατανάλωση ενεργειακών πόρων και η γενικότερη εξάρτησή της ανθρωπότητας από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του, συντελούν στην εμφάνιση φαινομένων στενότητας των ενεργειακών πόρων, με σημαντικές επιπτώσεις στην κοστολόγησή τους. Παράλληλα, οι περιβαλλοντολογικές συνέπειες της αλόγιστης κατανάλωσης ενέργειας διαφαίνονται όλο και εντονότερα, συντελώντας στην ωρίμανση της ιδέας της εξασφάλισης της απαραίτητης για τον άνθρωπο ενέργειας, από εναλλακτικές πηγές, ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, την

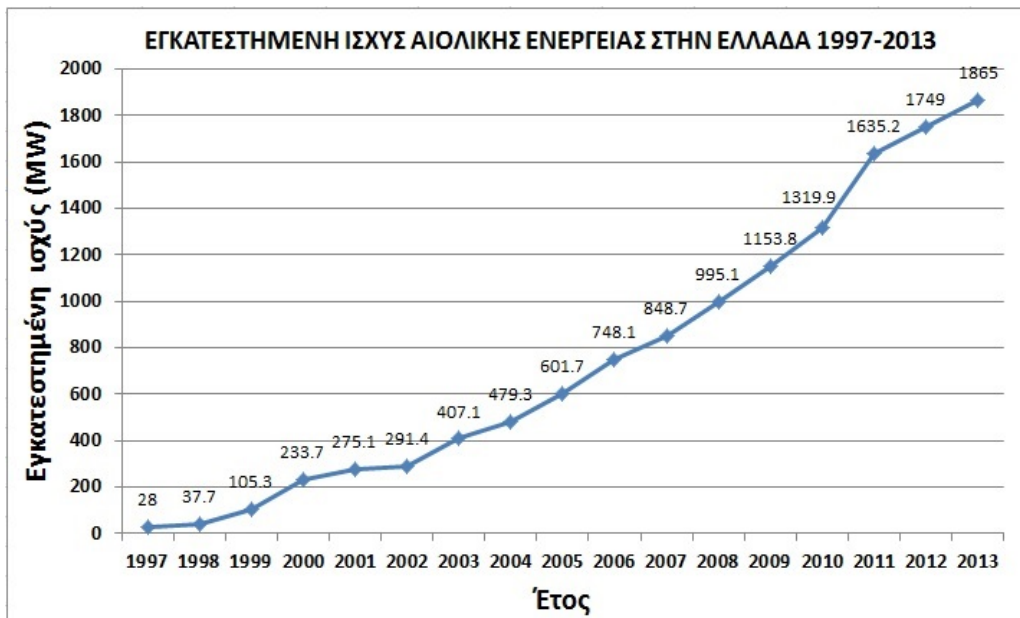
δεκαετία του '70, ανακινείται το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που διατηρείται αμείωτο έως και σήμερα. Κατά την πάροδο αυτών των χρόνων υπήρξε μια κάποια εξέλιξη στην τεχνολογία των ανεμόμυλων. Στις αρχές του 20^{ού} αιώνα ο Δανός Poul La Cour παρατήρησε ότι οι γρήγορα περιστρεφόμενοι ανεμόμυλοι με λιγότερες λεπίδες ήταν πιο αποτελεσματικοί. Επίσης ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής. Σαν φυσική εξέλιξη όλων αυτών κατασκευάστηκε το πρώτο αιολικό πάρκο στον κόσμο το Δεκέμβριο του 1980. Κατασκευάστηκε από την εταιρία US Windpower που ιδρύθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1979 στη Μασαχουσέτη. Ήταν συνολικής ισχύος 0,6kW και αποτελούνταν από 20 ανεμογεννήτριες ισχύος 30kW η κάθε μια. Η ραγδαία ανάπτυξη των ανεμογεννητριών συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.

Η ανάπτυξη αυτή δεν περιορίστηκε μόνο στην κατασκευή χερσαίων αιολικών πάρκων. Πολλοί παράγοντες όπως η έλλειψη χώρου που αντιμετωπίζουν οι παράκτιες περιοχές και η δυναμική του ανέμου στη θάλασσα, οδήγησαν στην κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε στη Δανία, συνολικής δυναμικής 4,95MW αποτελούμενο από 11 ανεμογεννήτριες των 0,45MW η κάθε μια. Σήμερα το ενδιαφέρον για τα υπεράκτια πάρκα συνεχίζει να υπάρχει και να μετουσιώνεται σε πράξη με πρωτοπόρο αυτή τη στιγμή την Αγγλία η οποία ολοκλήρωσε το 2012 το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο, London Array, χωρητικότητας 630MW.

Η αιολική ενέργεια παρουσιάζει σημαντικές επενδυτικές δυνατότητες και στην Ελλάδα. Το εξαιρετικά υψηλό αιολικό δυναμικό της χώρας κατατάσσεται μεταξύ των πλέον ελκυστικών στην Ευρώπη, με μέση ταχύτητα ανέμου πάνω από 8 m/s σε πολλά σημεία της χώρας. Το πρώτο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα κατασκευάστηκε στην Κύθνο το 1982 και αποτελείται από 5 ανεμογεννήτριες MAN των 20kW η κάθε μια. Στη συνέχεια επεκτάθηκε και με εγκατάσταση φωτοβολταϊκών καλύπτοντας σήμερα το 75% των ενεργειακών αναγκών του νησιού. Εκτιμάται ότι σήμερα λειτουργούν περίπου 1800MW από αιολικά πάρκα, και στόχος είναι να εγκατασταθούν 7.500MW μέχρι το 2020, από τα οποία τα 300MW αφορούν υπεράκτια αιολικά πάρκα. ^{[17][18]}



Εικόνα 1.13α: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα



Εικόνα 1.13β: Χρονική εξέλιξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

1.3.2 Σύγκριση χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Μέχρι πριν 25 χρόνια όπως είδαμε και παραπάνω υπήρχαν μόνο χερσαία αιολικά πάρκα και τα υπεράκτια υπήρχαν μόνο σαν ιδέα στο μυαλό του ανθρώπου. Στις μέρες μας αν και τα χερσαία αιολικά πάρκα έχουν εδραιωθεί κατά κάποιο τρόπο, αναμένεται ότι τα υπεράκτια θα αυξηθούν σημαντικά τα επόμενα χρόνια. Όπως αναφέραμε και παραπάνω και η Ελλάδα έχει σαν στόχο την κατασκευή υπεράκτιων μέχρι το 2020. Ας δούμε όμως μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Πλεονεκτήματα:

- Έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι κατά μέσο όρο 50% μεγαλύτερη στη θάλασσα απ' ότι στη στεριά. Όμως ισχύς της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Για διπλάσια ταχύτητα ανέμου οκταπλασιάζεται η ισχύς της ανεμογεννήτριας.
- Οι οπτικές οχλήσεις, καθώς και ο θόρυβος των Α/Γ μετριάζεται η και ακόμα εξαλείφεται εάν οι Α/Γ εγκατασταθούν σε επαρκή απόσταση από την ακτή.
- Οι θαλάσσιες εκτάσεις είναι θεωρητικά απέραντες και οι εγκαταστάσεις δεν καταλαμβάνουν γη, παρεμβαίνοντας στις άλλες χρήσεις της.
- Το μέγεθος μιας Α/Γ δεν περιορίζεται από υλικοτεχνικές υποδομές όπως οδικά και σιδηροδρομικά.
- Ο αέρας πάνω από τη θάλασσα παρουσιάζει λιγότερους στροβιλισμούς, καταπονώντας λιγότερο τις Α/Γ. Αυτό προσδίδει στο πάρκο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Υπάρχει ήδη τεχνογνωσία από την πετρελαϊκή βιομηχανία πάνω στις πλωτές εξέδρες. ^[19]

Μειονεκτήματα:

- Απαιτείται υψηλότερο αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο για τις υπεράκτιες Α/Γ, λόγω του κόστους που συνδέεται με την εγκατάσταση της Α/Γ στη θάλασσα και την πρόσθετη περιπλοκότητα έδρασης/ θεμελίωσης της υποστηρικτικής κατασκευής.
- Παρουσιάζουν συνήθως προβλήματα πρόσβασης κάνοντας τη συντήρησή τους πιο ακριβή και πιο χρονοβόρα.
- Πρέπει να αντέχουν κάποιες φορές ίσως και σε ακραίες υδροδυναμικές συνθήκες φόρτισης που προέρχονται από τα κύματα και τα υποθαλάσσια ρεύματα

1.3.3 Κατηγορίες Α/Γ

Η ενέργεια που υπάρχει στην κίνηση του ανέμου (αιολική ενέργεια) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες. Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία με τη σειρά τους περιστρέφουν ένα μοτέρ το οποίο παράγει ρεύμα. Το ρεύμα αυτό μπορεί να διοχετεύεται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο ρεύματος ή να αποθηκεύεται σε συσσωρευτές και να θερμαίνει νερό. Οι ανεμογεννήτριες, όπως και τα φτερά των αεροσκαφών, περιστρέφονται στον άνεμο και τροφοδοτούν μια ηλεκτρική γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες, τις οριζόντιου άξονα, όπως είναι οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι και οι κάθετου άξονα, όπως είναι το μοντέλο Darrieus. Όλες οι ανεμογεννήτριες, χωρίς να παίζει ρόλο το μέγεθος, αποτελούνται από μερικά βασικά χαρακτηριστικά: το ρότορα, τη γεννήτρια, ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας και τον πύργο. Μερικές μηχανές έχουν συστήματα προστασίας, έτσι ώστε αν ένα μέρος χαλάσει το σύστημα προστασίας σταματάει τα πτερύγια ή βάζει τα φρένα. Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω

Ανεμόμετρο (Anemometer): μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταβιβάζει τα ανεμολογικά δεδομένα σε έναν ελεγκτή.

Πτερύγια (Blades): οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρία πτερύγια. Ο άνεμος πάνω στα πτερύγια δημιουργεί άνωση που έχει σαν

αποτέλεσμα μια ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής και αναγκάζει τα πτερύγια να περιστρέφονται.

Φρένο (Brake): ένα δισκόφρενο το οποίο μπορεί να λειτουργεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά για να σταματήσει τον κινητήρα σε περίπτωση ανάγκης.

Ελεγκτής (Controller): ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή σε ταχύτητες ανέμου περίπου 8-16 μίλια την ώρα και κλείνει τη μηχανή περίπου στα 65 μίλια την ώρα. Οι ανεμογεννήτριες δε μπορούν να δουλεύουν σε ταχύτητες ανέμου πάνω απ' τα 65 μίλια την ώρα γιατί οι γεννήτριές τους μπορούν να υπερθερμανθούν ή/και τα πτερύγιά τους να σπάσουν.

Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox): οι ταχύτητες συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από τις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό στις 1200 με 1500 στροφές ανά λεπτό. Η ταχύτητα περιστροφής απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα ακριβό (και βαρύ) μέρος μιας ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί μελετούν γεννήτριες οι οποίες θα λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δε θα απαιτούνται κιβώτια ταχυτήτων.

Γεννήτρια (Generator): συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 60 κύκλων.

Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speedShaft): οδηγεί τη γεννήτρια.

Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speedShaft): ο ρότορας κινεί τον άξονα χαμηλής ταχύτητας περίπου στις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό.

Κέλυφος (Nacelle): ο ρότορας συνδέεται με το κέλυφος, το οποίο βρίσκεται πάνω απ' τον πύργο και περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Ένα κάλυμμα προστατεύει τα μέρη εντός του κελύφους. Μερικά κελύφη είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μπορεί ένας τεχνικός να κάθεται όρθιος μέσα σε αυτό ενώ δουλεύει.

Κλίση (Pitch): τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ώστε να μειώνουν τα αεροδυναμικά φορτία πάνω

στην περύγωση στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου και να τα μειώνουν στις μικρές ταχύτητες.

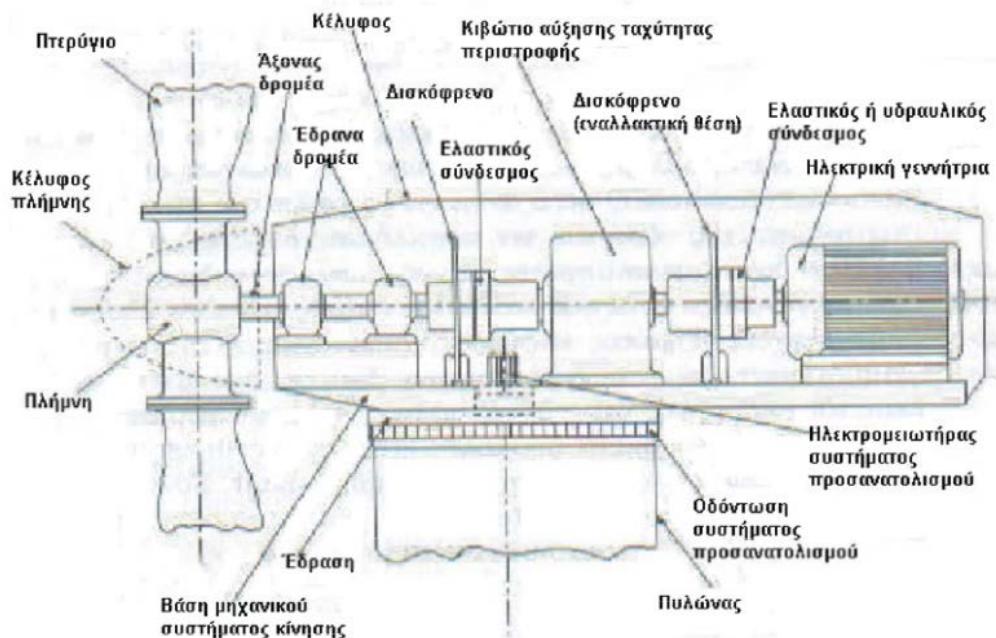
Ρότορας (Rotor): τα περύγια και το κεντρικό σημείο ονομάζονται ρότορας.

Πύργος (Tower): οι πύργοι είναι κατασκευασμένοι από χαλύβδινο κέλυφος ή χωροδικτύωμα. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, οι υψηλοί πύργοι περιέχουν γεννήτριες που συλλέγουν περισσότερη ενέργεια και παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό.

Ανεμοδείκτης (Windvane): υπολογίζει την διεύθυνση και επικοινωνεί με τον οδηγό εκτροπής ώστε να προσανατολίζεται στον άνεμο.

Οδηγός εκτροπής (Yawdrive): φέρνει τις ανεμογεννήτριες προς τον άνεμο. Χρησιμοποιείται για να αφήνει το ρότορα να βρίσκεται προς τον άνεμο καθώς αυτός μεταβάλλεται. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν υπήνεμα δεν απαιτούν οδηγό εκτροπής. Ο άνεμος μόνος φέρνει υπήνεμα το ρότορα.

Κινητήρας εκτροπής (Yawmotor): δίνει ενέργεια στον οδηγό εκτροπής^[20]



Εικόνα 1.14: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

- *Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα:*

Όταν λέμε ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWT- Horizontal Axis Wind Turbines) εννοούμε τις ανεμογεννήτριες που περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα ως προς το επίπεδο του εδάφους. Είναι η συνηθισμένη εικόνα ανεμογεννήτριας που έχουμε οι περισσότεροι στο μυαλό μας και μέχρι στιγμής και η επικρατέστερη. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο και με τη διεύθυνση του ανέμου (head on), αν και κάποτε η διεύθυνσή τους είναι κάθετη προς τη διεύθυνση του ανέμου (cross-wind). Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή ακόμα και πενήντα πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη (upwind), δηλαδή, μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη (downwind), δηλαδή, πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. Στην κατηγορία των αιολικών ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα (περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών).

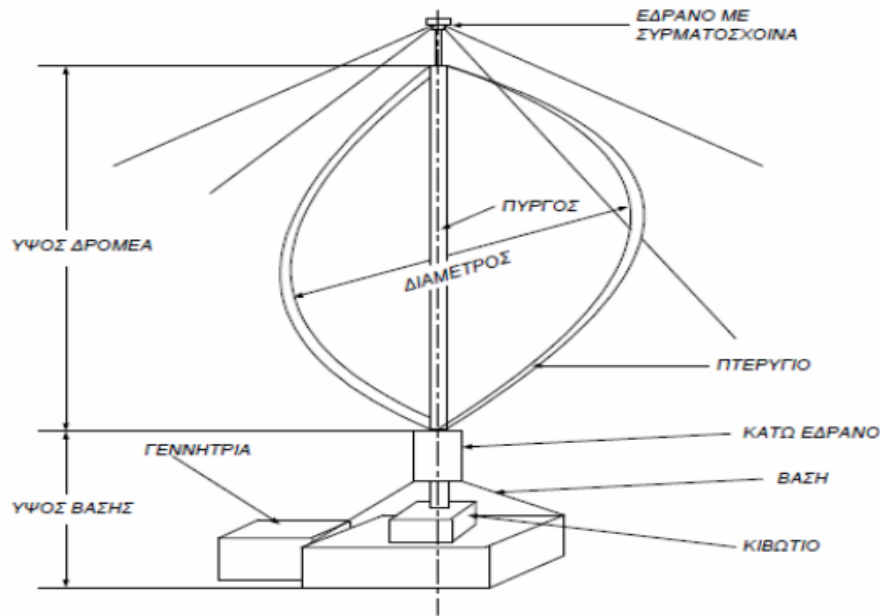


Εικόνα1.15: Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

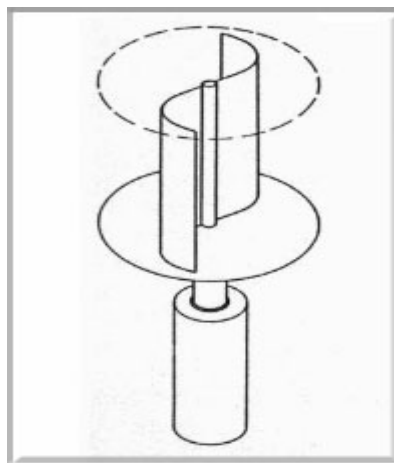
Στην εικόνα παραπάνω βλέπουμε τέτοιες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Τα πτερύγιά τους περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι οριζόντιος ως προς το επίπεδο του εδάφους. Είναι φανερό ότι κάθε στιγμή, πρέπει να προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του ανέμου.

- *Ανεμογεννήτριες κάθετου ή κατακόρυφου άξονα:*

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT – Vertical Axis Wind Turbines) αντίθετα, περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι κάθετος ως προς το επίπεδο του εδάφους. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, από τον τρόπο της κατασκευής τους, «πιάνουν» τον αέρα από κάθε κατεύθυνση. Συνήθως έχουν χαμηλότερη απόδοση σχετικά με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, γι' αυτό δεν είναι και ιδιαίτερα διαδεδομένες. Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον, ενώ είναι πιθανό να είναι πιο αποτελεσματικές στο αστικό περιβάλλον, καθώς έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τους ανέμους διαφορετικών κατευθύνσεων. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, η Savonius και η Darrieus. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστροφής είναι πιο αθόρυβες και επηρεάζονται λιγότερο από τις αναταράξεις και τις δονήσεις, συγκριτικά πάντα με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, επειδή δεν χρειάζονται άνεμο συγκεκριμένης διεύθυνσης για να περιστραφούν. Από την άλλη πλευρά, απαιτούν, σε γενικές γραμμές, μεγαλύτερη αιολική ενέργεια για να τεθούν σε κίνηση και ελαφρώς υψηλότερες ταχύτητες ανέμου για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.



Εικόνα 1.16: Α/Γ Darrieus



Εικόνα 1.17: Savonius

Σύγκριση Α/Γ οριζοντίου και καθέτου άξονα:

1. Ανάλογα με τον τύπο ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα, έχουμε πολύ μεγαλύτερη ευκολία κατασκευής σε σχέση με την κατασκευή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Κυρίως όσον αφορά την ευκολότερη κατασκευή των πτερυγίων και την έλλειψη της ανάγκης για μηχανισμό φρεναρίσματος της ανεμογεννήτριας σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.
2. Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα δεν χρειάζεται να προσανατολίζονται κάθε φορά ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Λόγω κατασκευής «πιάνουν» τον αέρα από όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό τις κάνει

καταλληλότερες σε τοποθεσίες όπου ο αέρας δεν είναι σταθερός ή όπου περιβάλλονται από κάποια μικρά εμπόδια (με σημαντικά μειωμένη απόδοση όμως).

3. Το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλότερο από το κόστος κατασκευής μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα λόγω απλούστερου σχεδιασμού.
4. Είναι ασφαλέστερες διότι δεν υπάρχει ο κίνδυνος να σπάσει κάποιο πτερύγιο, ούτε κινούνται με την μεγάλη ταχύτητα στροφών που κινούνται οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.
5. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι ότι έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Αυτό ισχύει σε μεγάλο βαθμό για τον τύπο Savonius όπου δεν ξεπερνούν το 15%, αλλά και στους άλλους τύπους σε μικρότερο βαθμό (μια καλή μικρή ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα έχει μέση απόδοση 30%- 40%).
6. Από το προηγούμενο προκύπτει ότι για να έχει μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα την ίδια περίπου παραγωγή με μια οριζόντιου άξονα, θα πρέπει η κάθετου άξονα να έχει μέχρι και τριπλάσια επιφάνεια επαφής με τον αέρα. Αυτό συνεπάγεται μεγάλο όγκο και βάρος της κατασκευής.
7. Λόγω χαμηλότερων στροφών περιστροφής ανά λεπτό, χρειάζονται πιο ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσουν την φόρτιση των συσσωρευτών (με δεδομένο το ίδιο μοτέρ σε οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτρια).^{[21][17]}

1.3.4 Ισχύς Α/Γ

Γενικά ισχύς που μπορεί να δώσει μια Α/Γ εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες. Όσο μεγαλύτερα είναι τα πτερύγια, τόσο μεγαλύτερη η ισχύς της. Διπλασιάζοντας το μήκος των πτερυγίων, τετραπλασιάζεται η ισχύς σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη η ισχύς. Με διπλάσια ταχύτητα ανέμου, οκταπλασιάζεται η ισχύς της ίδιας Α/Γ.

Ο αέρας έχει μάζα που όταν έχει ταχύτητα ο προκύπτων άνεμος έχει κινητική ενέργεια. Η ολική ισχύς που υπάρχει στον άνεμο είναι η ισχύς την οποία μπορεί να δεσμεύσει μια αιολική μηχανή. Στην πράξη όμως μια ανεμογεννήτρια δεν δεσμεύει όλη την παραπάνω ενέργεια αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτής. Αυτό συμβαίνει επειδή αφ' ενός μεν ο αέρας πρέπει να απομακρύνεται με κάποια ταχύτητα, αφ' ετέρου δε η φτερωτή της ανεμογεννήτριας προκαλεί εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο την παρακάμπτει χωρίς να την διαπεράσει. Στην

πραγματικότητα η A/Γ εκμεταλλεύεται ένα ποσοστό από την ισχύ του αέρα. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον συντελεστή ισχύος C_p της A/Γ ο οποίος αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό της πτερωτής. Ακόμα και για μια ιδανική πτερωτή, ο συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz (59,3%), δηλαδή: $C_p \leq (16/27) = 0,593$. Εδώ λοιπόν μπαίνει και το όριο του 59,3% αλλά και οι απώλειες της ανεμογεννήτριας (τριβής, καλωδίων κ.α.). Έτσι συνήθως η τελική ισχύς που παίρνουμε από τις A/Γ οριζόντιου άξονα είναι το 30-40% της ισχύος του ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα το αντίστοιχο ποσοστό είναι 15- 30%. Η ισχύς που προσλαμβάνεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

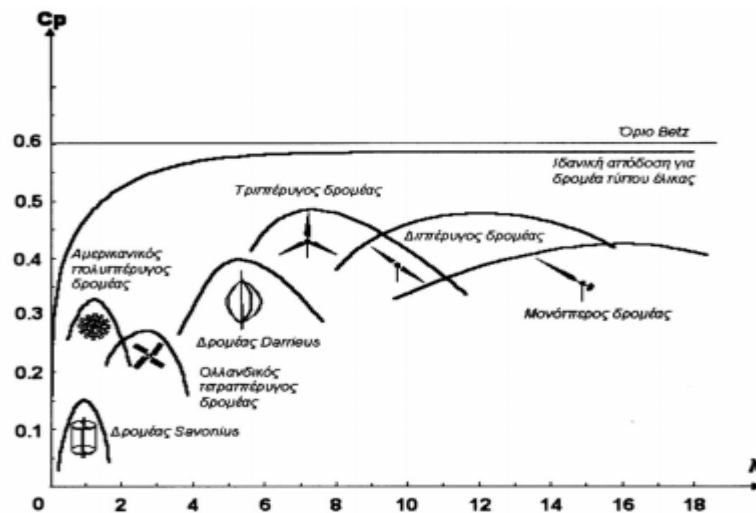
$$P_m = 0.5 * \rho * A * V_w^3 * C_p$$

Όπου:

P , πυκνότητα ανέμου για συγκεκριμένη ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία
 A , η επιφάνεια που διαπερνάει κάθετα ο άνεμος V_w , ταχύτητα του ανέμου.

Για μια δοσμένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση της πτερωτής είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής. Αν η φτερωτή περιστρέφεται πολύ αργά, η απόδοση μειώνεται σημαντικά, επειδή τα πτερύγια της A/Γ αφήνουν πάρα πολύ μεγάλη ποσότητα αέρα να περάσει ανεπηρέαστη. Αν η φτερωτή περιστρέφεται πολύ γρήγορα, η απόδοση μειώνεται καθώς ο στροβιλισμός που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει αυξητικά το επόμενο πτερύγιο. Ο συνήθης τρόπος παρουσίασης της απόδοσης της φτερωτής είναι να την εκφράσουμε ως συνάρτηση του (αδιάστατου) λόγου της ταχύτητας ακροπτερυγίου του δρομέα λ , η οποία ορίζεται ως: $\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$

Όπου R η ακτίνα της πτερωτής, V η ταχύτητα του ανέμου, και ω η γωνιακή ταχύτητα.



Εικόνα 1.18: Απόδοση ανεμογεννήτριας συναρτήσει του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου

Εκτός από τους παραπάνω παράγοντες υπάρχουν και άλλοι που δυσχεραίνουν την όσο το δυνατό καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Ένας απ' αυτούς είναι η ταχύτητα έναρξης της A/Γ , οπότε για χαμηλότερες τιμές ταχύτητας αέρα η A/Γ παραμένει αδρανής. Από μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά η ωφέλιμη ισχύς της A/Γ παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες. Τέλος, για λόγους ασφαλείας, επιβάλλεται η παύση της λειτουργίας της A/Γ για πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου.^{[17][22][23]}

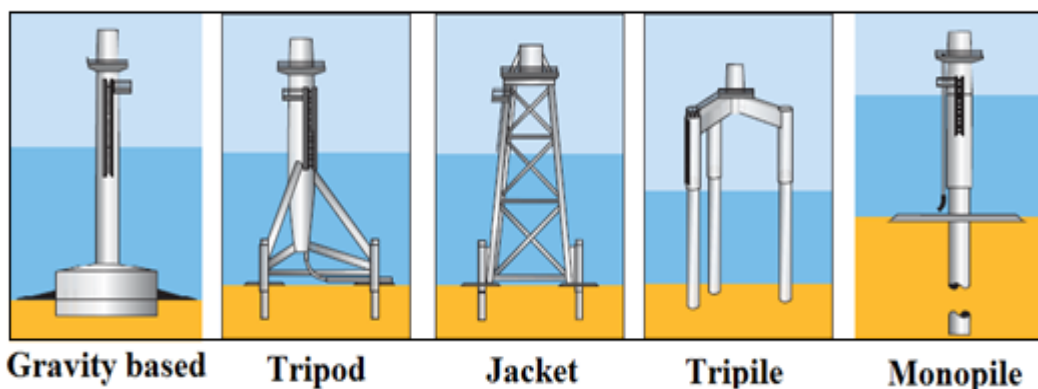
1.4 Κατηγορίες κατασκευών στήριξης υπεράκτιων Α/Γ

Κατά τη μελέτη και σχεδίαση υπεράκτιων ανεμογεννητριών προσφέρεται ένα μεγάλο εύρος λύσεων όσον αφορά την επιλογή της κατασκευής στήριξης που θα καταλήξει ο μελετητής. Τα θετικά και τα αρνητικά της κάθε λύσης είναι δύσκολο να αξιολογηθούν συνολικά, έτσι η επιλογή έγκειται καθαρά στην κρίση του μελετητή και στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που θα γίνει η εγκατάσταση, μερικά από τα οποία είναι:

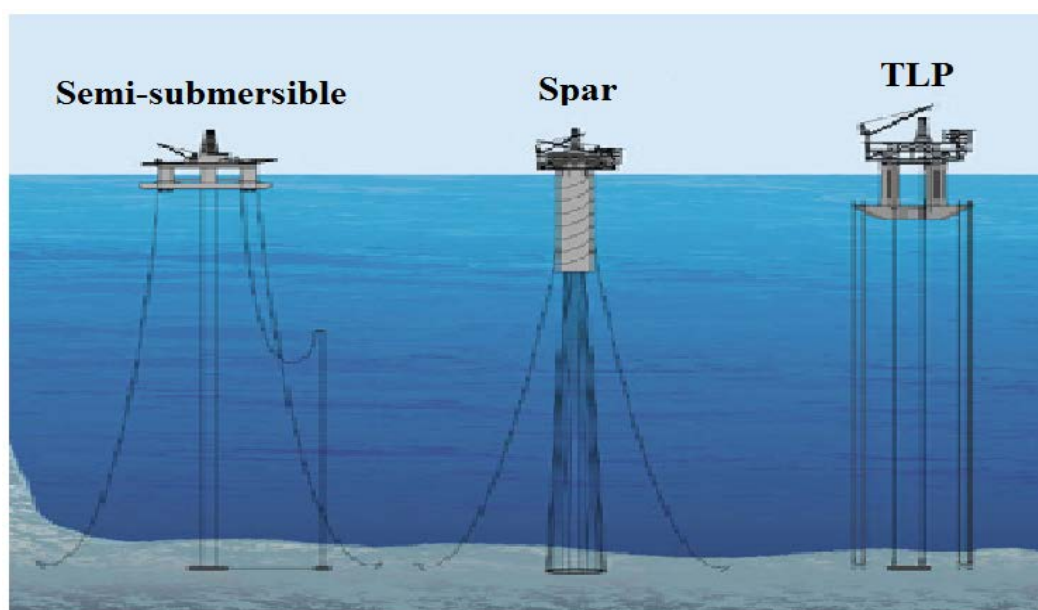
- Βάθος του νερού που θα γίνει η εγκατάσταση.
- Συνολικό βάρος κατασκευής.
- Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή (π.χ. κάμψη).
- Ειδικά χαρακτηριστικά της περιοχής που γίνεται η εγκατάσταση.(π.χ. δυνάμεις από άνεμο και κυματισμούς)
- Μορφολογία του βυθού στο συγκεκριμένο περιβάλλον.
- Περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις που τυχόν προκύπτουν.
- Απαιτήσεις κατασκευής και τοποθέτησης.
- Λειτουργικές και καφαλαιουχικές δαπάνες καθώς και κόστος υλικών.

Οι κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση ανεμογεννητριών χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Σε αυτές που είναι γειωμένες, δηλαδή εδρασμένες στο βυθό, τις κατασκευές σταθερής έδρασης:
 - Μεταλλικοί πύργοι (Jacket)
 - Μονού πυλώνα (Monopile)
 - Βαρύτητας (Gravity based)
 - Τριπλού πυλώνα (Tripile)
 - Τριπόδου (Tripod)
2. Σε αυτές που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού, δηλαδή στις πλωτές-αγκυρωμένες κατασκευές:
 - Spar
 - Semi Submersible
 - TLP (tension leg platform)^[24]



Εικόνα 1.19: Κατασκευές σταθερής έδρασης



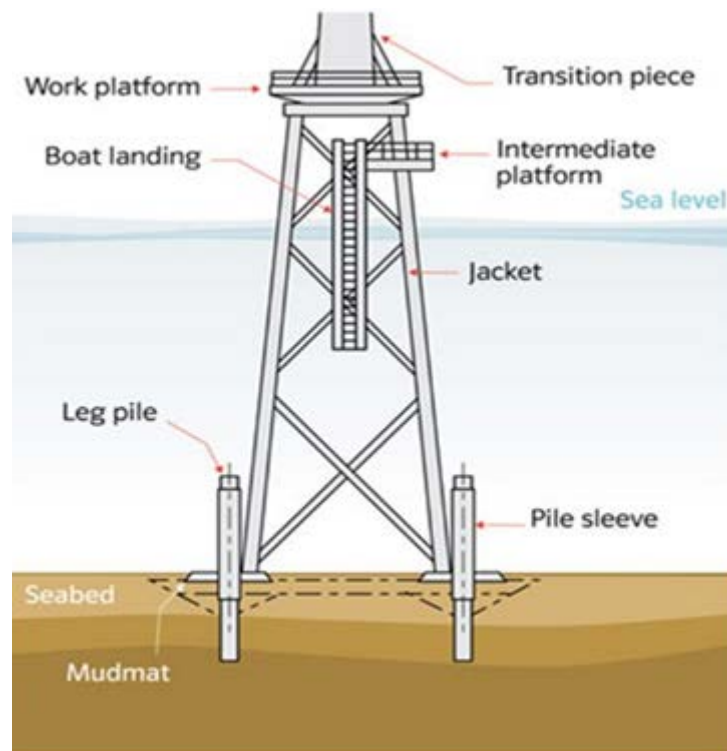
Εικόνα 1.20: Πλωτές- αγκυρωμένες κατασκευές

	Πλωτές (floating)	Εδρασμένες (grounded)
Θετικά	<ul style="list-style-type: none"> Υποστηρίζουν μεγάλα βάθη. Η κατασκευή τους μπορεί να γίνει εξ ολοκλήρου στο ναυπηγείο. 	<ul style="list-style-type: none"> Αισθητά φθηνότερες. Προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες για βάθη έως 50m και κάποιες φορές περισσότερο.
Αρνητικά	<ul style="list-style-type: none"> Πολύ μεγάλο κόστος κτίσης. Εμπορικά αδιάφορες για χώρες με μεγάλες εκτάσεις ρηχού νερού. 	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλο κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης. Οι περισσότερες από αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε βάθη που δεν υπερβαίνουν τα 25m.

1.4.1 Κατασκευές σταθερής έδρασης

Μεταλλικοί πύργοι (Jacket):

Πρόκειται για μεταλλικούς πύργους τριών η τεσσάρων πασσάλων οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο πυθμένα της θάλασσας σε τέτοιο βάθος ώστε να προσδίδουν σταθερότητα στην κατασκευή. Πρόκειται για μία χωροδικτυωμένη κατασκευή. Έχουν καλή εφαρμογή σε βάθος νερού από 20 έως 50 μέτρα. Το μικρότερο βάθος που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι 3,5 μέτρα στο αιολικό πάρκο Tamra της Νότιας Κορέας . Υπάρχει και προοπτική χρησιμοποίησής τους και σε μεγαλύτερα βάθη ως 60- 70 μέτρα. Προπαρασκευάζονται και ρυμουλκούνται μέχρι το σημείο πόντισης τους όπου και εδράζονται στο βυθό.

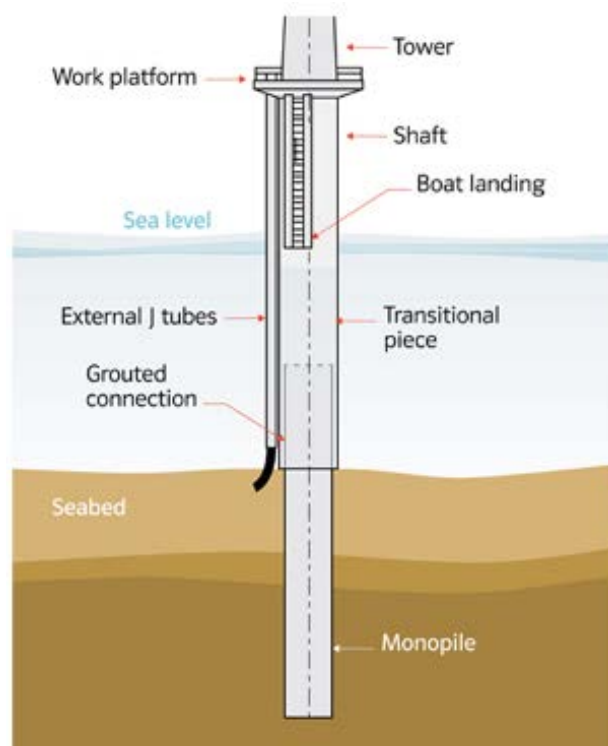


Εικόνα 1.21: Μεταλλικός πύργος (Jacket)

Μονού πυλώνα (Monopile):

Η κατασκευή αποτελείται από ένα χαλύβδινο κυλινδρικό σωλήνα με διάμετρο μεταξύ 3 m και 4.5 m, μάζας από 100 ως 400 t. Η δομή στήριξης αυτών των κατασκευών, είναι σχετικά απλού σχεδιασμού. Ο πύργος της πλατφόρμας υποστηρίζεται από τον πυλώνα, είτε άμεσα είτε μέσω ενός μεταβατικού τμαχίου.

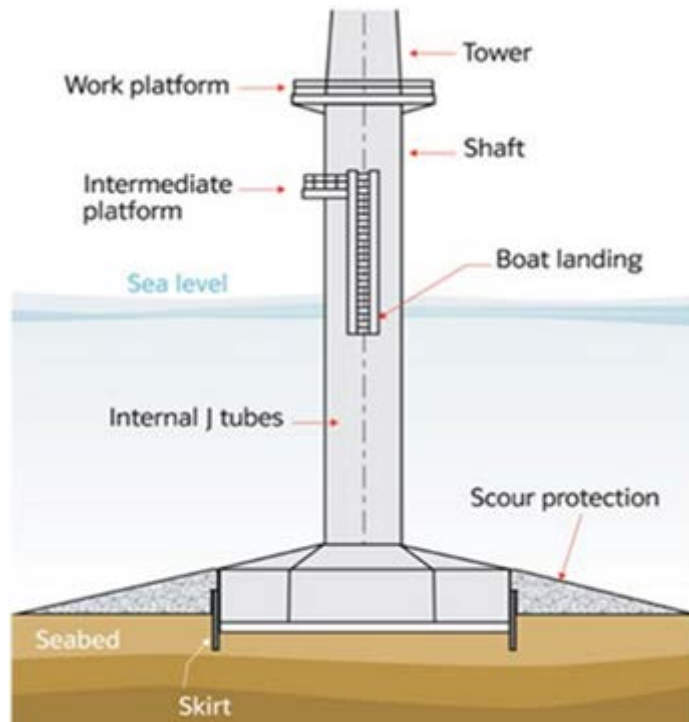
Ο πυλώνας είναι καρφωμένος στο βυθό της θάλασσας. Το βάθος διείδυσης του πυλώνα είναι ρυθμιζόμενο για την καλύτερη απόκριση της κατασκευής στις συνθήκες περιβάλλοντος. Οι κατασκευές μονού πυλώνα είναι κατάλληλες για βάθη από 0 ως 30 μέτρα και είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες για την τοποθέτηση υπεράκτιων ανεμογεννητριών λόγω της ευκολίας τοποθέτησης τους.



Εικόνα 1.22: Μονού πυλώνα (Monopile)

Βαρύτητας (Gravity based):

Αυτές οι κατασκευές βασίζονται στη χρήση της δύναμης της βαρύτητας και αποτελούνται από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Έχουν ένα κεντρικό άξονα, είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα, στον οποίο στηρίζεται ο πύργος τ και αυτός με τη σειρά του στηρίζεται σε μια μεγάλη επίπεδη βάση από σκυρόδεμα και ατσάλι. Το έρμα που απαιτείται για να αποκτήσει η βάση την αναγκαία στιβαρότητα αποτελείται από άμμο, σιδηρομετάλλευμα ή πέτρα . Όπως είναι κατανοητό απαιτείται μια σχετικά επίπεδη βάση ώστε να τοποθετηθεί και απαιτούνται μέτρα προστασίας κατά της αποσάθρωσης του εδάφους τα οποία καθορίζονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.



Εικόνα 1.23: Βαρύτητας (Gravity based)

Τριπλού πυλώνα (Tripile):

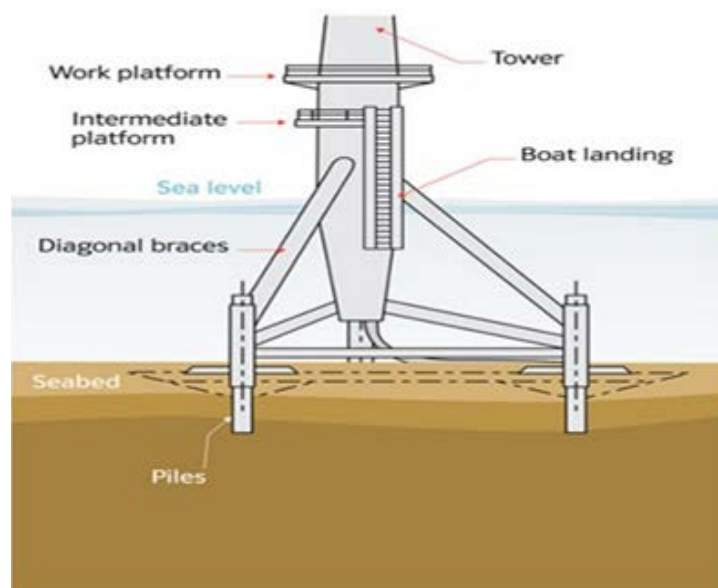
Αυτής της κατηγορίας οι κατασκευές ακολουθούν τη λογική σχεδίασης αυτών του μονού πυλώνα, με τη διαφορά ότι ο πύργος στηρίζεται σε τρεις πυλώνες αντί για έναν. Οι πάσσαλοι καρφώνονται στον πυθμένα και μετά συνδέονται μεταξύ τους. Το μήκος των πασσάλων κυμαίνεται μεταξύ 65 και 90 μέτρων και η διάμετρός τους από 1,5 έως και 3 μέτρα. Τα βάθη που χρησιμοποιούνται είναι 25-40 μέτρα σύμφωνα με τον DNV.



Εικόνα 1.24: Τριπλού πυλώνα (Tripile)

Τριπόδου (Tripod):

Οι κατασκευή τριπόδου θεωρείται μια ελαφριά Jacket κατασκευή τριών χαλύβδινων ποδιών. Κάτω από την κεντρική στήλη χάλυβα, η οποία είναι κάτω από την Α/Γ, υπάρχει ένα χαλύβδινο πλαίσιο το οποίο μεταφέρει τις δυνάμεις από τον πύργο στα τρία χαλύβδινα πόδια. Η κατασκευή τριπόδου έχει καλή σταθερότητα και συνολική ακαμψία. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη σε βάθη νερού μικρότερα των 6- 7m, καθώς αυτό προκαλεί προβλήματα στα πλοία που προσεγγίζουν τη βάση. Είναι κατάλληλη για βάθη πάνω από 30 μέτρα.



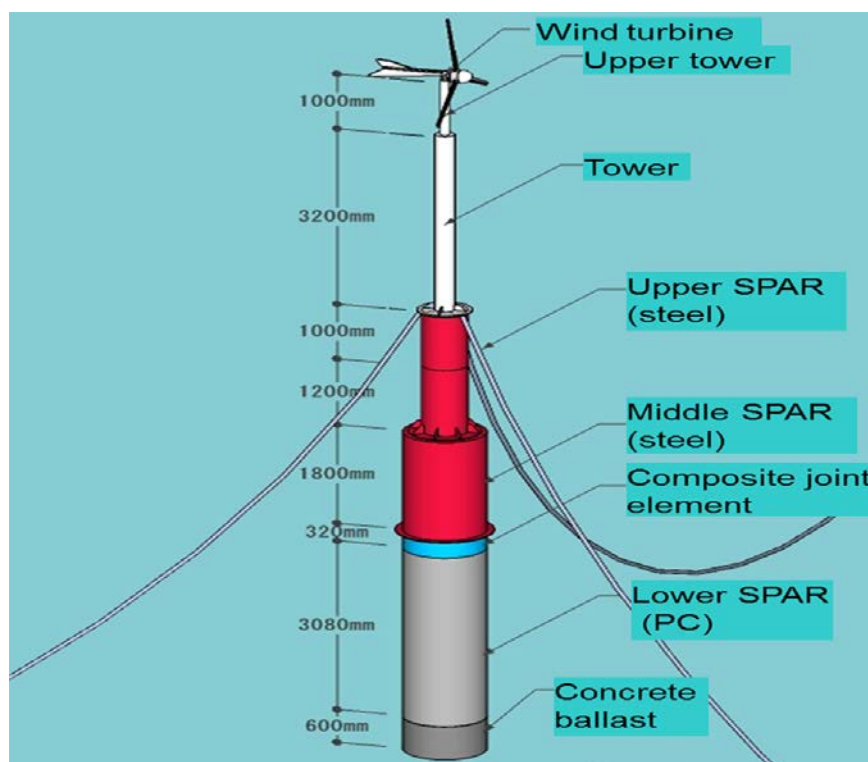
Εικόνα 1.25: Τριπόδου (Tripod)

1.4.2 Πλωτές – αγκυρωμένες κατασκευές

Spar:

Αποτελούνται από έναν κατακόρυφο κύλινδρο μεγάλης διαμέτρου που υποστηρίζει την Α/Γ. Αυτός ο κύλινδρος επιπλέει λόγω του αέρα που βρίσκεται στην κορυφή του και του έρματος στο κάτω μέρος του. Είναι σχετικά μια καινούρια κατασκευή και για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το 1997. Το κέντρο πλευστότητας τους είναι πολύ πιο πάνω από το κέντρο βάρους τους κάνοντάς αυτές τις κατασκευές αρκετά σταθερές. Αγκυρώνονται είτε με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης είτε με συρματόσχοινα υπό προένταση. Να σημειωθεί ότι είναι κατάλληλες και για πολύ μεγάλα βάθη.

Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε χρησιμοποιούσε πλωτή κατασκευή τύπου Spar. Η Hywind είναι σχέδιο της Statoil και εγκαταστάθηκε στη δυτική ακτή της Νορβηγίας το Σεπτέμβριο του 2009. Είναι εξοπλισμένη με μια ανεμογεννήτρια 2.3MW από τη Siemens Wind Power.



Εικόνα 1.26: Spar

Semi Submersible:

Όπως λέει και το όνομά τους πρόκειται για ημιβυθισμένες πλατφόρμες. Αποτελούνται από μία ημιβυθισμένη φορηγίδα αγκυρωμένη με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης. Αποκτούν την πλευστότητά τους από ποντόνια με έρμα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Η υποστηριζόμενη κατασκευή μπορεί να τοποθετηθεί σε αρκετά μεγάλο ύψος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας λόγω της καλής ευστάθειας που προσδίδει μια Semi Submersible, κρατώντας την μακριά από τα θαλάσσια κύματα. Όμως λόγω της μικρής επιφάνειας που έχει με το νερό μια Semi Submersible, είναι αρκετά ευάλωτη σε απότομες αλλαγές φορτίου. Κατασκευάζονται και συναρμολογούνται πλήρως στην ξηρά και μετά ρυμουλκούνται μέχρι την περιοχή χρήσης τους.

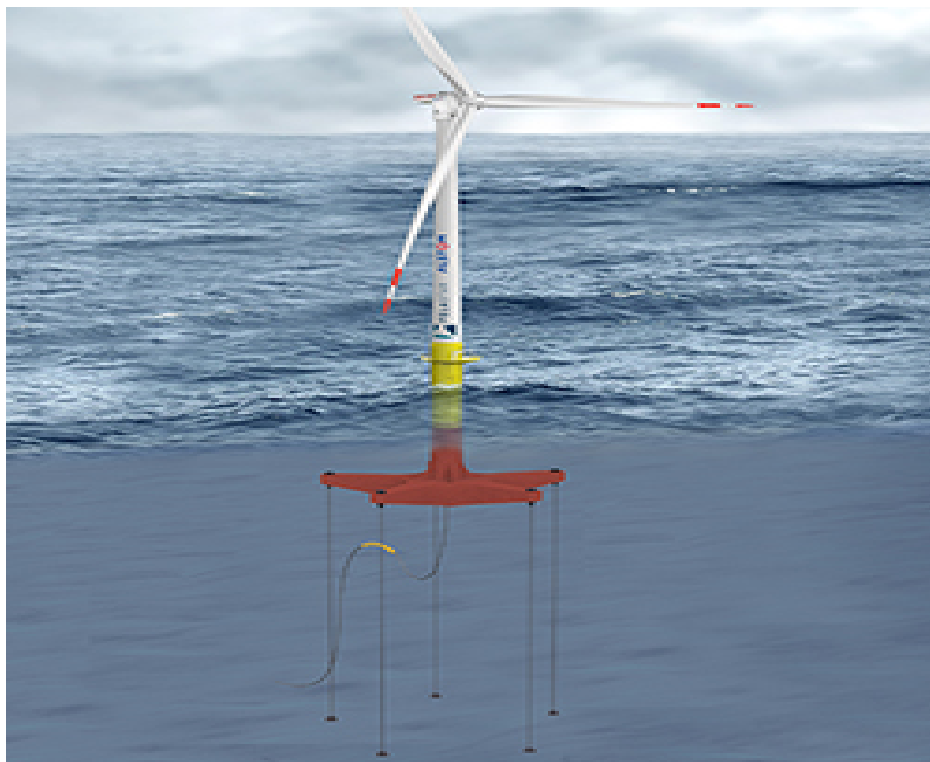


Εικόνα 1.27: Semi Submersible

TLP (Tension Leg Platform):

Οι TLP είναι πλωτές κατασκευές δεμένες στον πυθμένα της θάλασσας με κάθετους σωλήνες από χάλυβα ή αλλιώς συρματόσχοινα. Αυτή η δομή τους προσδίδει πολύ ακαμψία στο κάθετο επίπεδο και ευελιξία στο οριζόντιο, κάνοντάς τις ιδιαίτερα ανθεκτικές στις επιπτώσεις των κυμάτων. Οι TLP έχουν περίσσεια πλευστότητα κρατώντας τα συρματόσχοινα υπό προένταση συνέχεια. Είναι ευαίσθητες όταν φέρουν μεγάλα φορτία στην κορυφή καθώς επηρεάζονται τα υπό προένταση συρματόσχοινα. Ο βασικός σχεδιασμός μιας TLP περιλαμβάνει τέσσερις κολώνες γεμάτες με αέρα σχηματίζοντας ένα τετράγωνο. Αυτές οι κολώνες υποστηρίζονται και συνδέονται από ποντόνια.

Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω της ιδιότυπης αγκύρωσης τους, δεν προκαλούν τόσες συνέπειες στο τοπικό οικοσύστημα που τοποθετούνται αλλά ούτε σε τυχόν περαστικά πλοία σε σχέση με τις άλλες κατασκευές αυτής της κατηγορίας. [24][25][26][27][28]



Εικόνα 1.29: TLP

2. Πλωτές Α/Γ εδρασμένες σε κατασκευές τύπου TLP

Η αιολική ενέργεια όπως προαναφέρθηκε είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της τάξης του 25- 30%, με τη συντριπτική πλειοψηφία της να παράγεται σε χερσαία αιολικά πάρκα. Η ανάπτυξη τους όμως περιορίζεται λόγω της οπτικής όχλησης και της έλλειψης φθηνής γης. Έτσι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα είναι το επόμενο σύνορο.

Τεράστιες θαλάσσιες εκτάσεις που χαρακτηρίζονται από σταθερότερους και ισχυρότερους ανέμους είναι πλέον διαθέσιμες προς εκμετάλλευση. Πλωτές ανεμογεννήτριες σε απόσταση 20 χιλιομέτρων από την ακτογραμμή είναι μετά βίας ορατές. Οι τρέχουσες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι εδρασμένες κατά ένα συντριπτικό ποσοστό σε κατασκευές μονού πυλώνα (monopiles) σε μικρή απόσταση από την ακτογραμμή και σε βάθη νερού 10- 15 μέτρα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα αυτών των κατασκευών είναι η οπτική τους επίδραση καθώς και το αυξημένο κόστος όσο το βάθος του νερού αυξάνεται. Αναπόφευκτα το ενδιαφέρον στρέφεται πλέον στις πλωτές ανεμογεννήτριες καθώς και στις πλωτές κατασκευές που θα τις υποστηρίζουν.

Για το σχεδιασμό μιας πλωτής ανεμογεννήτριας απαιτείται η μελέτη τεσσάρων επιπλέον παραγόντων:

- Βάθος νερού: Για τη σωστή μελέτη της κατασκευής και τη σωστή επιλογή των χαρακτηριστικών της.
- Φορτία Κυμάτων: Τα κύματα προκαλούν περισσότερα φορτία και ροπές στην πλωτή κατασκευή από την ανεμογεννήτρια.
- Κατάσταση εδάφους: Για την επίτευξη σταθερότητας και αξιοπιστίας στην κατασκευή.
- Φορτία λόγω ανεμογεννήτριας: Η ανεμογεννήτρια δρα και αντιδρά με τα φορτία κυμάτων, υποβάλλοντας σε νέα και πιθανότατα μεγαλύτερα φορτία την κατασκευή τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Οι ανεμογεννήτριες εδρασμένες σε πλωτές εξέδρες τύπου TLP (Tension Leg Platform Wind Turbines- TLPWT) αντιπροσωπεύουν μια πιθανή μέθοδο για

πρόσβαση στο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό. Οι περιορισμένες κινήσεις της TLP αναμένεται να μειώσουν το δυναμικό φορτίο που αναπτύσσεται στον πύργο και τη φτερωτή σε σχέση με τις άλλες πλωτές κατασκευές, χωρίς να απαιτείται το μεγάλο βύθισμα μιας Spar, ή ο συμβατικός κλάδος αγκύρωσης μιας semi-submersible. Αν και οι TLPWT αποτελούν τομέα έρευνας ακόμα και σήμερα, δεν υπάρχουν σαφή αποτελέσματα για το βέλτιστο σχεδιασμό τους.

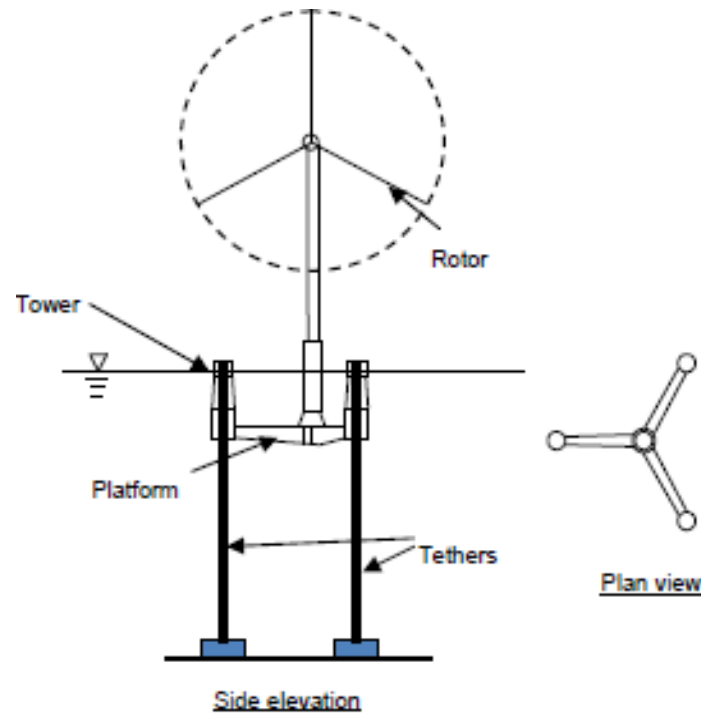
2.1 Εξέλιξη ανεμογεννητριών εδρασμένες σε πλωτές εξέδρες TLP.

Ο Withee κι ο Σκλαβούνος το 2004 έκαναν μια προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου, των αποκρίσεων μιας ανεμογεννήτριας 1,5MW εδρασμένης σε TLP, υπό την επίδραση του ανέμου και των δυνάμεων κυματισμού. Παρουσίασαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τους, που πραγματοποιείται για την εκτίμηση της απόσβεσης, που προκύπτουν από το ρότορα της ανεμογεννήτριας και της απόσβεσης του κύματος και του ιξώδους, που προκύπτουν από την πλωτή κατασκευή. Παρατήρησαν, ότι οι δύο μηχανισμοί απόσβεσης ήταν συγκρίσιμοι και ότι η απόσβεση της φτερωτής φαίνεται να υπακούει σε έναν γραμμικό νόμο. Δόθηκαν επίσης οι αποκρίσεις του συστήματος και οι ροπές που προκύπτουν λόγω της φτερωτής, για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.^[29]

Ο Lee την ίδια χρονιά πραγματοποίησε ανάλυση της απόκρισης στο πεδίο συχνοτήτων δύο μοντέλων πλωτών ανεμογεννητριών, μιας εδρασμένης σε TLP και μιας σε Spar, προκειμένου να συγκρίνει τις επιδόσεις των δύο μοντέλων. Ανακάλυψε ότι οι TLP παρουσίαζαν μια πιο ήπια απόκριση στη διαμήκη οριζόντια ταλάντωση (surge) και στην εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (sway) ενώ ήταν εξαιρετικά άκαμπτες σε περιστροφή. Αντίθετα οι Spar ήταν άκαμπτη στη διαμήκη-οριζόντια ταλάντωση (surge-sway), αλλά παρουσίαζε μια πιο ήπια συμπεριφορά σε περιστροφή.^[30]

Ο Suzuki το 2009 ανέπτυξε ένα σχέδιο πλωτής κατασκευής τύπου TLP για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ο σχεδιασμός του βασίστηκε στην προηγούμενη εμπειρία στο σχεδιασμό και στην κατασκευή TLP, που λαμβάνει υπόψη τη

σταθερότητα της κατασκευής, την αγκύρωση και την ευκολία συντήρησης. Από τη δυναμική ανάλυση της συγκεκριμένης κατασκευής, διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη TLP έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά στην δυναμική απόκριση και ότι έχει πολύ καλή αντοχή σε εξαιρετικά ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος, φορτίων ανέμου, ακόμα και σεισμών.^[31]



Εικόνα 2.1: Πλωτή ανεμογεννήτρια εδρασμένη σε TLP (Suzuki, 2009)

Ο Weinzettel το ίδιο έτος πραγματοποίησε μια εκτίμηση του κύκλου ζωής μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας που είναι εδρασμένη σε TLP. Η προκαταρκτική εκτίμηση του κύκλου ζωής εξέτασε τις περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις της πλωτής ανεμογεννήτριας και τόνισε τη σημασία του σεναρίου παροπλισμού σύμφωνα με την οποία τα υλικά ανακυκλώνονται για να αμβλύνουν τις αρνητικές συνέπειες που προκύπτουν για το περιβάλλον.^[32]

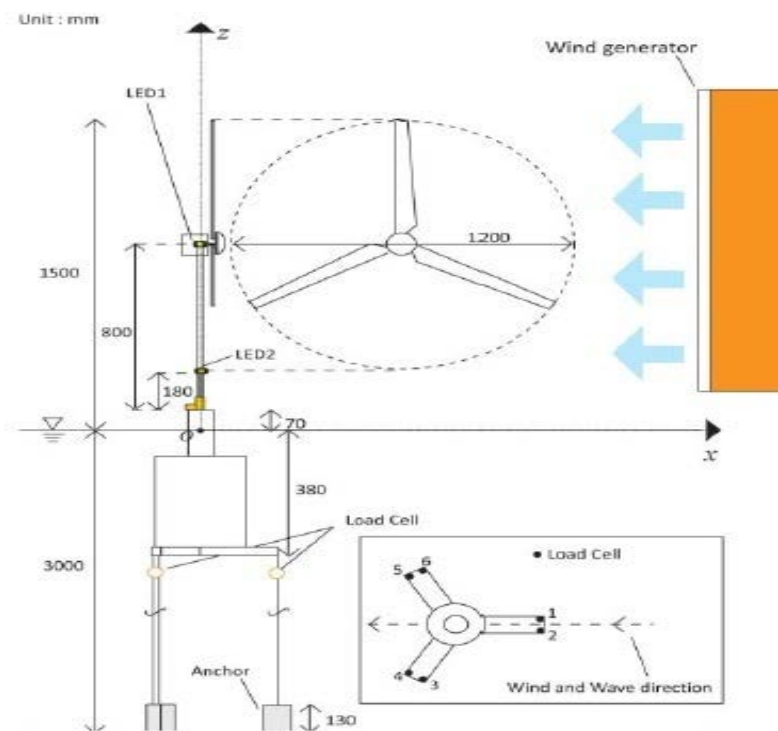
Ο Bae το 2010 πραγματοποίησε μια δυναμική ανάλυση μιας μικρής TLP πλωτής ανεμογεννήτριας. Η προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου περιλάμβανε δυναμική ανάλυση του συστήματος φτερωτής-ρότορα και της αγκύρωσης καθώς και μελέτη των κινήσεων της πλωτής κατασκευής. Η δυναμική σύζευξη μεταξύ της περιστρεφόμενης φτερωτής και της πλωτής κατασκευής, επιπρόσθετα με την δυναμική σύζευξη αγκύρωσης και πλωτής κατασκευής, αξιολογήθηκε σε αυτήν

την έρευνα. Σε σχέση με τα μη συζευγμένα μοντέλα παρατηρήθηκε μια πιο έντονη δυναμική επίδραση του ρότορα σε υψηλές συχνότητες, που έχει σαν αποτέλεσμα τη σκληρότερη καταπόνηση της κατασκευής και τη μείωση της διάρκειας ζωής της. Η μελέτη αυτή προσπάθησε να μεταφέρει το μήνυμα ότι αυτή η μεθοδολογία ήταν εφαρμόσιμη στις πλωτές ανεμογεννήτριες που υπόκεινται σε τυχαίους κυματισμούς, ανέμους και σταθερά ρεύματα.^[33]

Οι Nihei και Fujioka την ίδια περίοδο διερεύνησαν τις χαρακτηριστικές κινήσεις μιας TLPWT υπό την επίδραση των δυνάμεων κυματισμού και ανέμου. Πραγματοποίησαν δοκιμές με ένα μοντέλο κλίμακας 1:100, μετρώντας τις τάσεις που αναπτύσσονταν στο σύστημα αγκύρωσης, τις ροπές που δημιουργούσε η ανεμογεννήτρια και παρατηρώντας τις χαρακτηριστικές κινήσεις του μοντέλου. Τα πειράματά τους έδειξαν ότι στην περίπτωση εφαρμογής κυμάτων και ανέμου, η επίδραση του ανέμου είχε ευεργετικά αποτελέσματα στη σταθεροποίηση της κατασκευής ως προς τον προνευτασμό (pitch) αλλά και στη μείωση των δονήσεων των κλάδων αγκύρωσης. Επίσης παρατηρήθηκε μια μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της κλίσης της κατασκευής. Τέλος τονίστηκε ότι η μείωση λόγω του προνευτασμού (pitch) δε λήφθηκε υπόψη.^[34]

Ο Yasunori Nihei μαζί με τους Midori Matsuura, Hiroyuki Fujioka και Hideyuki Suzuki διετέλεσαν μια έρευνα το 2011 για τη βέλτιστη σχεδίαση ανεμογεννήτριας εδρασμένης σε πλωτή εξέδρα τύπου TLP. Πραγματοποίησαν μια καινούρια προσέγγιση για αυτές τις κατασκευές. Οι TLP που χρησιμοποιούνται για εξόρυξη πετρελαίου σε βαθύ νερό έχουν υψηλό κόστος. Όμως μια ανεμογεννήτρια των 5MW ζυγίζει περίπου 450 τόνους, βάρος πολύ χαμηλότερο από ότι εκείνο των εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου. Ως εκ τούτου το εκτόπισμα καθώς και η επιφάνεια επαφής της πλατφόρμας με το νερό θα μπορούσε να είναι μικρότερα. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των δυνάμεων του κυματισμού. Αυτή η ιδέα, που οδηγεί σε χαμηλό κόστος, δοκιμάστηκε σε δύο μοντέλα TLP κλίμακας 1:100. Οι δοκιμές έγιναν σε μια δεξαμενή υπό την ταυτόχρονη επίδραση ανέμων και κυματισμού. Μέτρησαν όχι μόνο τις χαρακτηριστικές κινήσεις και τις δυνάμεις που δέχονται οι κλάδοι της αγκύρωσης, αλλά και την ταχύτητα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Τα χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων που χρησιμοποίησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μοντέλο 350		Πλήρες μέγεθος		Μέγεθος μοντέλου	
Στοιχείο	μονάδα	τιμή	μονάδα	τιμή	
Εκτόπισμα	tons	846	g	846	
Βύθισμα	meters	21.5	cm	21.5	
Αρχική τάση	kg	900	g	900	
Αριθμός κλάδων	-	6	-	6	
Μοντέλο 550		Πλήρες μέγεθος		Μέγεθος μοντέλου	
Στοιχείο	μονάδα	τιμή	μονάδα	τιμή	
Εκτόπισμα	tons	3500	g	3500	
Βύθισμα	meters	38	cm	35	
Αρχική τάση	kg	2260	g	2260	
Αριθμός κλάδων	-	6	-	6	

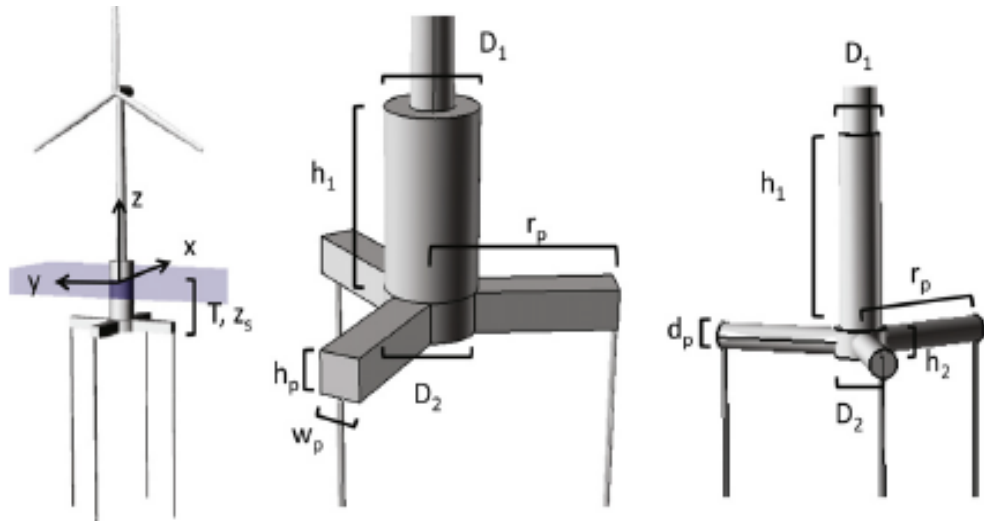


Εικόνα 2.2: Πειραματική διάταξη

Μετά το πέρας της έρευνας είχε εκτιμηθεί το κατάλληλο εκτόπισμα που πρέπει να έχει μια TLP που φέρει ανεμογεννήτρια 5MW. Επίσης εκτιμήθηκαν τα φορτία στα οποία υποβάλλεται η αγκύρωση λόγω των δυνάμεων και των ροπών που προκύπτουν από τα κύματα με τη βοήθεια του τύπου του Morison. Η δύναμη του

ανέμου στην ανεμογεννήτρια υπολογίστηκε με τη βοήθεια της θεωρίας της ορμής. Για το μοντέλο 550 επιβεβαιώθηκε ότι οι κλάδοι της αγκύρωσης παραμένουν υπό προένταση ακόμα και σε ακραίες συνθήκες. Τέλος για το μοντέλο 350 παρατηρήθηκαν φαινόμενα ανατροπής και αποκοπής κλάδου αγκύρωσης (slacking) για κάποιες ταχύτητες ανέμου. Για αυτά τα φαινόμενα οφείλονται η κλίση της κατασκευής και η περιστροφή της ανεμογεννήτριας.^[35]

Το 2012 οι Erin E. Bachynski, Torgeir Moan, ανέλυσαν ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων των πλωτών ανεμογεννητριών που είναι εδρασμένες σε κατασκευές TLP. Εκτέλεσαν τις δοκιμές σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες ανέμου-κύματος χρησιμοποιώντας τα προγράμματα RIFlex, Simo και AeroDyn για την αξιολόγηση των κινήσεων της πλατφόρμας και των φορτίων που δέχεται η ανεμογεννήτρια και η αγκύρωση. Η προσεκτική επιλογή της φυσικής περιόδου, διαμέτρου στην ίσαλο γραμμή, προέντασης, και ακτίνας ποντονίων οδηγεί σε βελτίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και βάθη νερού. Επειδή το κόστος της κατασκευής αυξάνεται περίπου γραμμικά με το εκτόπισμα και την προένταση, ο στόχος του σχεδιασμού είναι η επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης με το ελάχιστο απαιτούμενο εκτόπισμα και προένταση. Τα πειράματα έγιναν στα εξής πέντε μοντέλα:



	TLPWT 1	TLPWT 2	TLPWT 3	TLPWT 4	TLPWT 5
Pontoons	Rect.	Rect.	Rect.	Rect.	Round
D_1 (m)	18.0	14.0	14.0	6.5	6.5
D_2 (m)	18.0	14.0	14.0	10.0	6.5
h_1 (m)	52.6	40.0	26.0	33.0	23.0
h_2 (m)	2.4	5.0	6.0	6.0	5.0
r_p (m)	27.0	32.0	28.0	25.0	32.5
h_p/w_p or d_p (m)	2.4/2.4	5.0/5.0	6.0/6.0	6.0/6.0	5.0
BF	0.55	0.60	0.40	0.40	0.40
n_p	4	3	3	4	3
z_s	-43.8	-32.5	-19.0	-19.0	-15.5
d_t (m)	1.4	1.1	1.3	1.2	0.9
t_t (mm)	46.2	36.3	42.9	39.6	29.7
Steel mass (tonnes)	2322	1518	1293	859	505
V (m ³)	11,866	7263	5655	4114	2320
T_t (kN)	6868	4963	8262	5556	3384

Εικόνα 2.3: Μοντέλα δοκιμών

Συνοψίζοντας κατέληξαν ότι γενικά τα σχέδια με μεγαλύτερο εκτόπισμα παρουσίασαν λιγότερες κινήσεις και αυτά με την υψηλότερη προένταση λιγότερη διακύμανση τάσης. Οι αποκρίσεις των κατασκευών επηρεάζονταν περισσότερο από αλλαγές στην περίοδο και την ακαμψία από ότι στη διάμετρο, το βάθος νερού, το έρμα και την ακτίνα των ποντονίων. Αν και τελικά δεν βρέθηκε ο βέλτιστος σχεδιασμός για μια πλωτή ανεμογεννήτρια εδρασμένη σε TLP, τα μοντέλα 3 και 4 με αυξημένη ακτίνα ποντονίων, έτειναν να δείχνουν καλύτερη συνολική συμπεριφορά. Τέλος τονίζεται ότι η εξέταση των διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών ήταν πολύ περιορισμένη, έτσι απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για να προβλεφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η καταπόνηση της κατασκευής και οι αποκρίσεις της σε πιο ακραίες συνθήκες.^[36]

Το 2012 οι Yongsheng Zhao, Jianmin Yang και Yanping He, έκαναν μια προκαταρκτική μελέτη για μια κατασκευή TLP πολλαπλού πυλώνα (Windstar TLP) για μια ανεμογεννήτρια ισχύος 5MW (NREL 5MW), σε περιβαλλοντικές συνθήκες ίδιες με αυτών που έγιναν οι δοκιμές της OC3- Hywind (NREL). Διεξήγαγαν μια αερο- υδρο- ελαστική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου με το πρόγραμμα FAST. Λήφθηκαν και αναλύθηκαν στατιστικά στοιχεία για τις βασικές παραμέτρους.

Στοιχείο	Τιμή
Διάμετρος κεντρικής κολώνας (m)	6
Διαστάσεις γωνιακής κολώνας (m)	4,8x4,8
Απόσταση γωνιακής-κεντρικής κολώνας (m)	20
Βάθος (m)	42,8
Βύθισμα σχεδιασμού (m)	21,5
Προένταση (t)	1950
Συνολικό εκτόπισμα (t)	4275

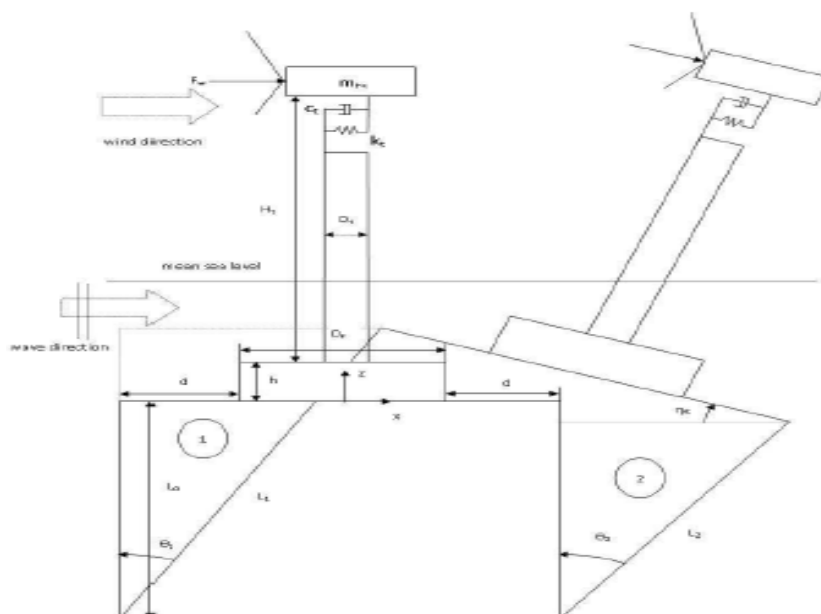
Πίνακας 2.4: Στοιχεία Windstar TLP



Εικόνα 2.4β: Windstar TLP

Συνοψίζοντας κατέληξαν ότι η Windstar TLP, με μια ελαφρύτερη και μικρότερη δομή παρουσίασε αρκετά ικανοποιητικές επιδόσεις, έτσι η προτεινόμενη κατασκευή μπορεί να χαρακτηριστεί ως έχουσα σημαντική προοπτική για περαιτέρω ανάπτυξη. Παρουσίασε πολύ καλά χαρακτηριστικά απόκρισης κάτω από ακραίες συνθήκες κυμάτων και ανέμου. Τέλος αναφέρθηκε ότι πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω πειράματα για την βελτιστοποίηση των διαστάσεων της κατασκευής και για μεγαλύτερο εύρος καταστάσεων φόρτισης ώστε να αξιολογηθεί η δομική ακεραιότητά της.^[37]

Το ίδιο έτος έγινε μια δοκιμή από τους G.K.V. Ramachadran, H. Bremdose, J.N. Sorensen και J.J. Jensen, που αφορούσε την τρισδιάστατη δυναμική απόκριση μιας TLPWT, υπό τη δράση ανέμου και κυματισμού. Το συνολικό σύστημα διαμορφώνεται με τη χρήση 17 βαθμών ελευθερίας, 6 για τις κινήσεις της πλατφόρμας και 11 για την ανεμογεννήτρια. Τριών διαστάσεων υδροδυναμικά φορτία χρησιμοποιήθηκαν. Τα φορτία κύματος υπολογίζονται από την κινηματική χρησιμοποιώντας τον τύπο του Morison. Τα αεροδυναμικά φορτία μοντελοποιούνται με τη θεωρία BEM (Blade-Element-Momentum), συμπεριλαμβάνοντας το συντελεστή διόρθωσης Glauert. Το αεροδυναμικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τη διάτμηση του ανέμου καθώς και την επίδραση των αναταράξεων.



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση της υπό μελέτη TLP

Συνοψίζοντας η έρευνα έδειξε ότι από τα κύματα των 90 και 180 μοιρών προκύπτουν οι κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης της κατασκευής, αν και αυτό απαιτεί περαιτέρω υπολογισμούς για ακραίες καταστάσεις θάλασσας. Οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι η διακυμάνσεις της ροπής του ρότορα της ανεμογεννήτριας προκαλούν μεγάλα φαινόμενα διατοιχισμού (roll), το οποίο απαιτεί βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πλωτής κατασκευής. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι η στροφική οριζόντια ταλάντωση (yaw), μπορεί να μειωθεί με την ενσωμάτωση αποσβεστήρα ή με την αύξηση μάζας επιλέγοντας κατάλληλες διαστάσεις ακτινών μέσα από μια παραμετρική μελέτη. Τέλος τονίστηκε ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις πρέπει να επικυρωθούν από προχωρημένο αερο-ελαστικό κώδικα.^[38]

2.2 Περιγραφή υπεράκτιας ανεμογεννήτριας 5MW του NREL.

Για την υποστήριξη των μελετών που στοχεύουν στην αξιολόγηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, το NREL (National Renewable Energy Laboratory) ανέπτυξε τις προδιαγραφές μιας αντιπροσωπευτικής κλίμακας ανεμογεννήτριας γνωστή ως "NREL offshore 5MW baseline wind turbine". Πρόκειται για μια συμβατική ανεμογεννήτρια τριών λεπίδων σε προσήνεμη διάταξη. Το μοντέλο αυτό βασίστηκε σε κάποιες γενικές πληροφορίες που αφορούν το σχεδιασμό ανεμογεννητριών, από δημοσιεύσεις που προέρχονται από κατασκευαστικές εταιρίες ανεμογεννητριών, με έμφαση στο μοντέλο Repower 5M με το οποίο έχει περίπου όμοια χαρακτηριστικά. Το μοντέλο ήταν και θα συνεχίσει να είναι κατά πάσα πιθανότητα, ένα σημείο αναφοράς για να τυποποιηθούν οι έρευνες που διεξάγονται πάνω στο θέμα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Ο βασικός λόγος που επέλεξαν μια ανεμογεννήτρια των 5MW, είναι το ότι για να θεωρηθεί κερδοφόρο ένα υπεράκτιο πάρκο που εδράζεται σε βαθύ νερό, πρέπει να φέρει ανεμογεννήτριες που η κάθε μια να είναι τουλάχιστον τέτοιας

ισχύος. Έτσι περιόρισαν την επιλογή τους σε ένα εύρος ισχύος από 5 έως 20MW. Δευτερευόντως επέλεξαν αυτή την ισχύ για να υποστηριχθούν κάποιες έρευνες που ήταν εκείνη την περίοδο υπό μελέτη, ή είχαν ήδη ολοκληρωθεί και στηρίζονταν σε ιδιότητες που αντιπροσωπεύουν ανεμογεννήτριες των 5MW. Παρακάτω ακολουθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της εν λόγω ανεμογεννήτριας.^[39]

Βασικές ιδιότητες της NREL 5MW	
Ισχύς	5 MW
Προσανατολισμός του ρότορα	Προσήνεμα
Αριθμός πτερυγίων	3
Σύστημα μετάδοσης	Υψηλής ταχύτητας, πολλαπλών βαθμίδων
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 γύρο 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 2.10: Ιδιότητες της NREL 5MW

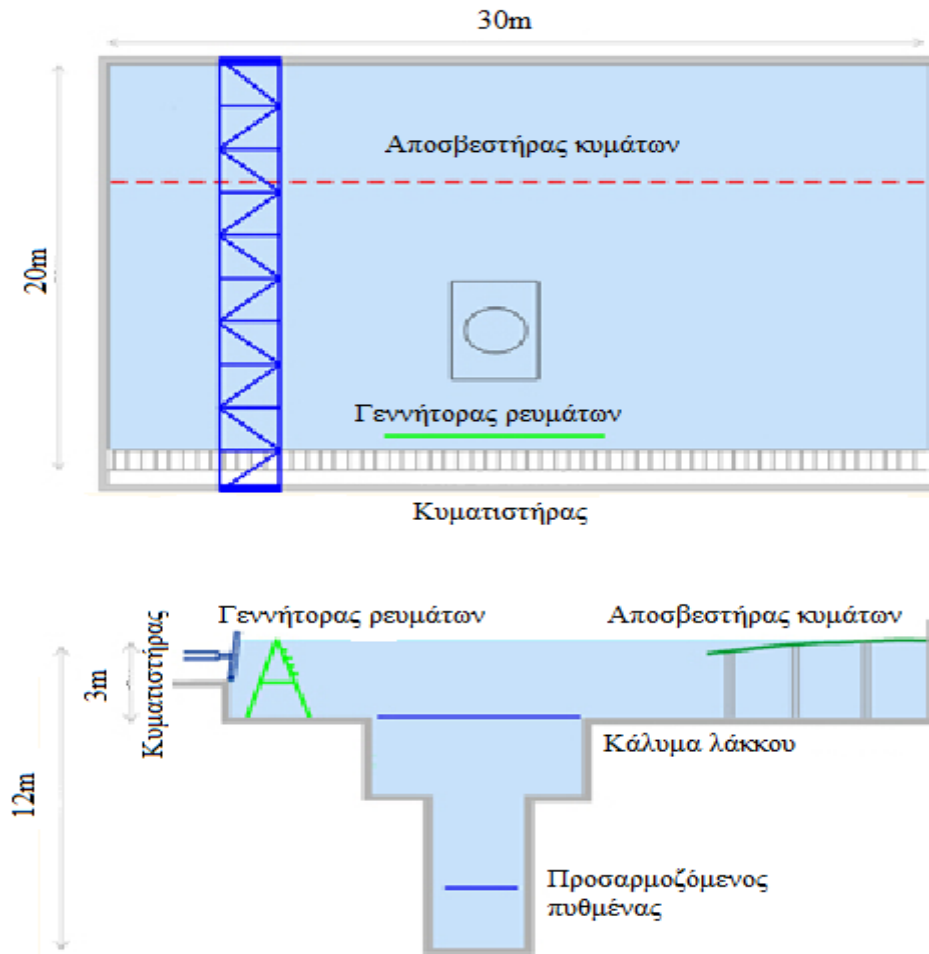
3. Περιγραφή Πειράματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του πειράματος που αφορούν τη δυναμική απόκριση των πλωτών υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε τυχαίους κυματισμούς υπό την επίδραση και του αέρα. Το πείραμα αυτό έλαβε χώρα στο DHI (Danish Hydraulic Institute) τον Οκτώβρη του 2012, διήρκεσε 28 ημέρες και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν τον Ιανουάριο του 2013. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πειραματικά μοντέλα, μιας TLP και μιας Spar. Στην παρούσα έρευνα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της κατασκευής TLP και στη συνέχεια θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα που μας δίνει το πρόγραμμα.

Στόχος των δοκιμών που έγιναν ήταν η συλλογή δεδομένων για τη συμπεριφορά δύο πλωτών υπεράκτιων ανεμογεννητριών μιας TLP και μιας Spar, για τον προσδιορισμό των συνδυασμένων επιπτώσεων των αλυσίδων των αγκυρών και της ανεμογεννήτριας στην απόκριση του επιπλέοντος σώματος. Επιπροσθέτως είχε ως σκοπό να μελετήσει την υδροδυναμική συμπεριφορά μιας πλωτής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας υπό την ταυτόχρονη επίδραση κανονικών ή τυχαίων κυματισμών και της δύναμης του αέρα. Τέλος στοχεύουν στο να δημιουργήσουν μια βάση δεδομένων για την αριθμητική βαθμονόμηση του μοντέλου καθώς και για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων αυτών.

3.1 Πειραματική διάταξη

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην δεξαμενή της DHI, μήκους 30m πλάτους 20m και βάθους 3m. Σε ένα σημείο της δεξαμενής υπάρχει μια επέκταση του βάθους, δίνοντας τη δυνατότητα προσαρμογής πυθμένα ώστε να γίνουν δοκιμές σε συνθήκες βαθέως νερού. Ο κυματιστήρας που αποτελείται από 60 αυτόνομα πτερύγια μήκους 1,5m, είναι σε θέση να παράγει πρακτικά κύματα όλων των φασμάτων καθώς και συνδυασμούς τους. Ένας παραβολικός αποσβεστήρας βρίσκεται απέναντι από τον κυματιστήρα, για να περιορίζει τις ανακλάσεις του κύματος στο ελάχιστο. Ρεύματα στην δεξαμενή παράγονται από ακροφύσια υψηλής πίεσης τα οποία αντλούν νερό και βρίσκονται μπροστά από τον κυματιστήρα. Τα φορτία του ανέμου προσομοιώνονται με τη χρήση ανεμιστήρων ελεγχόμενων από υπολογιστή.



Εικόνα 3.1: Σκαρίφημα δεξαμενής

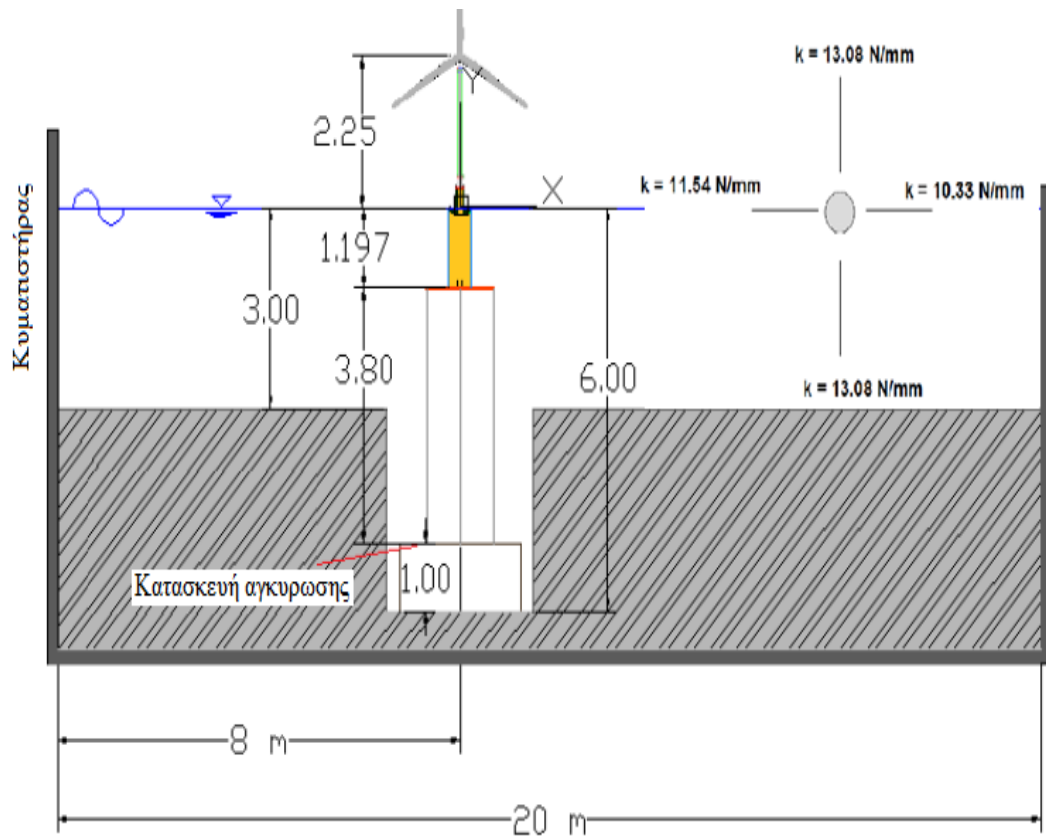


Εικόνα 3.2: Κυματιστήρας

Προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά η δυναμική συμπεριφορά, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με συντελεστή κλίμακας 1:40 σε σχέση με το πρωτότυπο MIT/NREL για TLP, και υποβλήθηκε σε αεροδυναμική και υδροδυναμική φόρτιση.

Το μοντέλο TLP κατασκευάστηκε από πλαστικό με πυκνότητα υλικού 1200kg/m^3 . Ο κύριος κύλινδρος είχε εξωτερική διάμετρο 450mm και ύψος 1m. Το κάλυμμα της δομής ήταν αφαιρούμενο ώστε να μπορεί να προστίθεται μέσα και έρμα. Ήταν βιδωμένο στον κύριο κύλινδρο και περιείχε ένα μικρότερο κύλινδρο εσωτερικά διαμέτρου 162,55mm και μήκους 300mm. Σε αυτόν το μικρότερο κύλινδρο τοποθετήθηκαν ο μετρητής δύναμης των 6 βαθμών ελευθερίας καθώς και ο πύργος της ανεμογεννήτριας πάνω από τον μετρητή. Το μοντέλο αποτελούνταν από 4 γραμμές πρόσδεσης, καθεμία από τις οποίες ήταν αγκυροβολημένη σε μία κατασκευή αγκύρωσης σε βάθος 5m. Στο κάτω μέρος της TLP, μια πλάκα χάλυβα συνέδεε τους 4 κλάδους αγκύρωσης με την κατασκευή. Τα πόδια που ακουμπούσαν οι κλάδοι αγκύρωσης ήταν κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Το συνολικό ύψος της κατασκευής έφτασε έτσι τα 1.497m.

Το σχεδιασμένο βάθος νερού (Still Water Level) , έφτανε ακριβώς στην άκρη του καλύμματος του μεγαλύτερου κυλίνδρου. Στο τέλος κάθε κλάδου αγκύρωσης τοποθετήθηκαν ελατήρια με συντελεστές από 10,3 έως 13,08N/mm. Οι γραμμές πρόσδεσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σύρματα πάχους 8mm και αποτελούνταν από ίνες πυρήνα Vectran, εμποτισμένες με πολυεστέρα. Στα σχοινιά πρόσδεσης επετεύχθη εκτατική ακαμψία 40N/mm. Η συνολική δύναμη στους τένοντες υπολογίστηκε να είναι 49,6kg, έτσι ώστε κάθε γραμμή πρόσδεσης να έχει προτανυστεί με βάρος περίπου 12,4kg. Για ερματισμό προστέθηκαν μπάρες μολύβδου και μικρές σφαίρες στο κάτω μέρος της κατασκευής, βάρους 92,5kg. Στην κορυφή του πύργου είχε τοποθετηθεί ένας μετρητής δύναμης τεσσάρων βαθμών ελευθερίας, ενώ η άτρακτος και ο ρότορας της ανεμογεννήτριας ήταν σταθερά εδρασμένα πάνω στην κατασκευή. Ο ρότορας είχε διάμετρο 3,15m. Τέλος στη βάση της κατασκευής τοποθετήθηκε και ένα σύστημα εντοπισμού της κίνησης της πλωτής κατασκευής έξι βαθμών ελευθερίας. Ο πύργος έχει συνολικό ύψος 1,8625m.



Εικόνα 3.3 : Επισκόπηση μοντέλου TLP και κλάδων αγκύρωσης

Μάζα (MIT/NREL TLP)	Πλήρης Κλίμακα	Μονάδα (S.I.)	Συντελεστής Κλίμακας	Πειραματικό Μοντέλο
Μάζα ρότορα	110000	kg	λ^3	1,6768
Μάζα ατράκτου	240000	kg	λ^3	3,6585
Μάζα πύργου	347500	kg	λ^3	5,2973
Μάζα κατασκευής με έρμα	8600000	kg	λ^3	131,0976
Συνολική μάζα	9297500	kg	λ^3	141,7302
Εκτόπισμα	12180	m^3	λ^3	0,1903
Πλευστότητα	12484500	kg	λ^3	190,3125
Δύναμη προέντασης αγκύρωσης	796750	kg	λ^3	12,1456

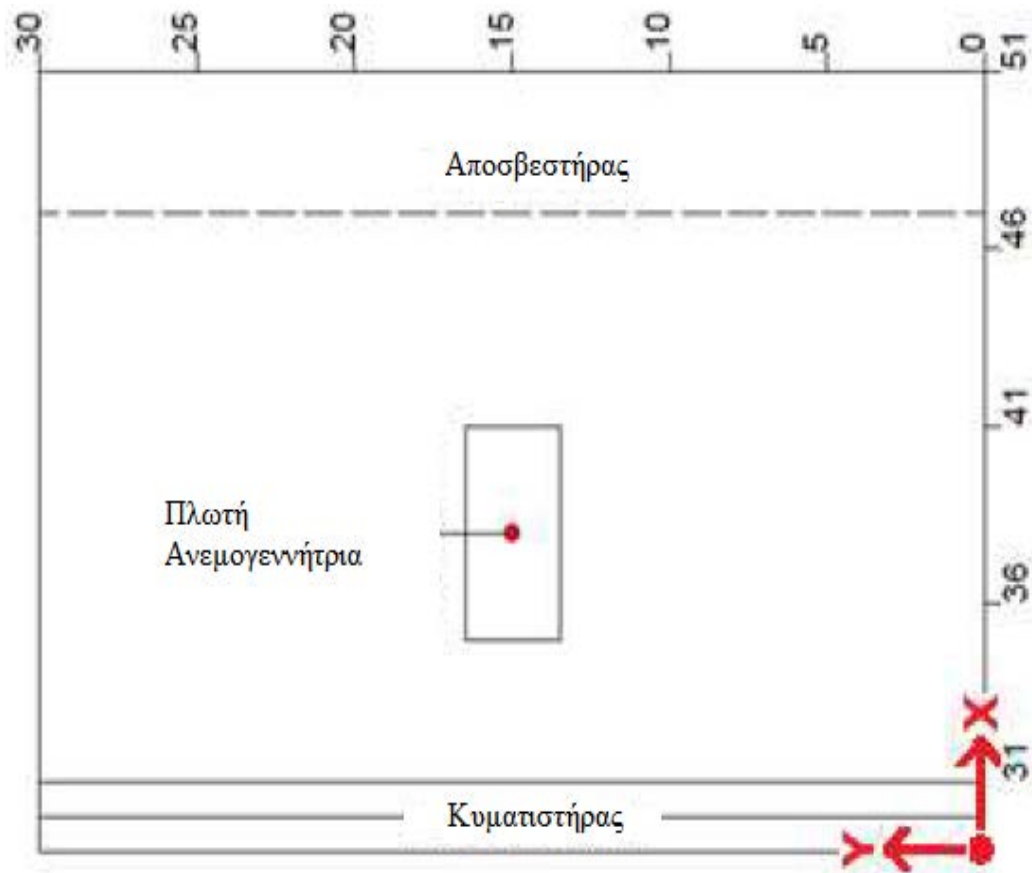
TLP (MIT/NREL PROTOTYPE)	Πλήρης Κλίμακα	Μονάδα (S.I.)	Συντελεστής Κλίμακας	Πειραματικό Μοντέλο
Διάμετρος πλατφόρμας	18	m	λ	0,45
Βύθισμα	47,89	m	λ	1,1973
Βάθος αγκύρωσης στο πυθμένα	200	m	λ	5
Ακτίνα πρόσδεσης	27	m	λ	0,675
Βάθος πρόσδεσης αγκύρωσης	47,89	m	λ	1,1973
Cm κάτω από SWL	40,61	m	λ	1,0153
Ύψος πύργου ως την πλήμνη	90	m	λ	2,25
Μάζα πύργου	347500	kg	λ ³	5,2973
Μάζα κατασκευής με έρμα	8600000	kg	λ ³	131,0976
Εκτόπισμα	12180	m ³	λ ³	0,1903
Ροπή στον άξονα X (Roll)	5,716·10 ⁸	Kg·m ²	λ ⁵	5,582
Ροπή στον άξονα Y (Pitch)	5,716·10 ⁸	Kg·m ²	λ ⁵	5,582
Ροπή στον άξονα Z (Yaw)	3,614·10 ⁸	Kg·m ²	λ ⁵	3,5293
Αρχικό μήκος αγκύρωσης	151,7	m	λ	3,7925
Διάμετρος αγκύρωσης	0,127	m	λ	0,0032
Πυκνότητα μάζας αγκύρωσης	116	Kg/m	λ ²	0,0707
Ακαμψία γραμμής αγκύρωσης	1,529·10 ⁷	Kg	λ ³	238,906

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες TLP (MIT/NREL PROTOTYPE) και μοντέλου

3.2 Προσδιορισμός συστήματος συντεταγμένων του πειράματος.

Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στη δεξιά γωνία του κυματιστήρα. Η πλωτή κατασκευή τοποθετήθηκε στο κέντρο της τάφρου σε απόσταση 7m από τον κυματιστήρα, ο οποίος εκτείνεται σε όλο το μήκος της δεξαμενής. Οι συντεταγμένες κατά το μήκος της δεξαμενής εκτείνονται από 0-30m ξεκινώντας από τα δεξιά. Οι συντεταγμένες κατά το πλάτος εκτείνονται από 31- 51m. Ο κατακόρυφος άξονας είναι θετικός προς τα πάνω. Έτσι το μοντέλο

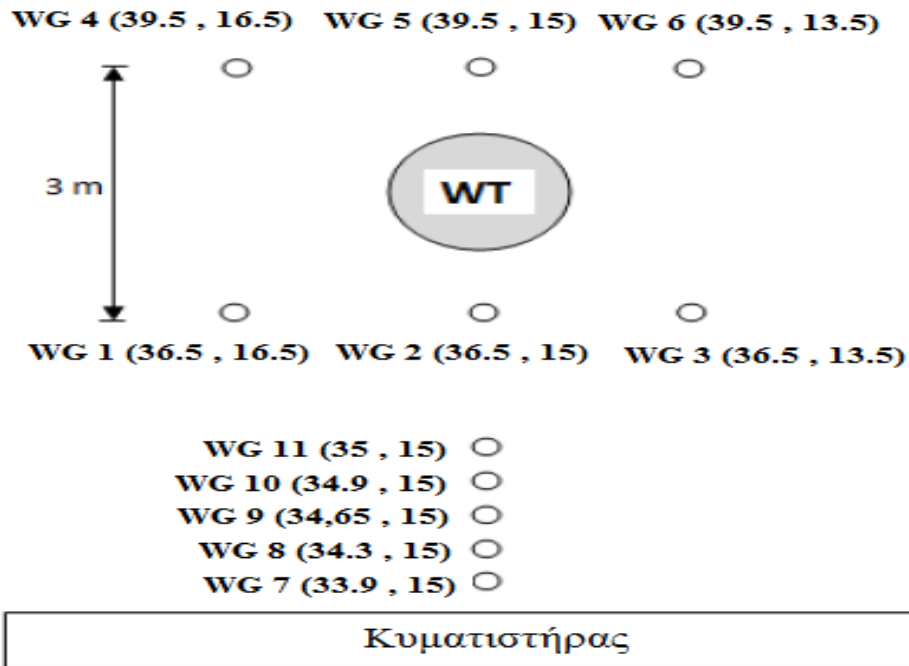
τοποθετήθηκε στο $x=38, y=15$. Κατά τη διάρκεια του πειράματος δημιουργούνται κύματα $0^\circ, 20^\circ$.



Εικόνα 3.4 : Σύστημα συντεταγμένων δεξαμενής

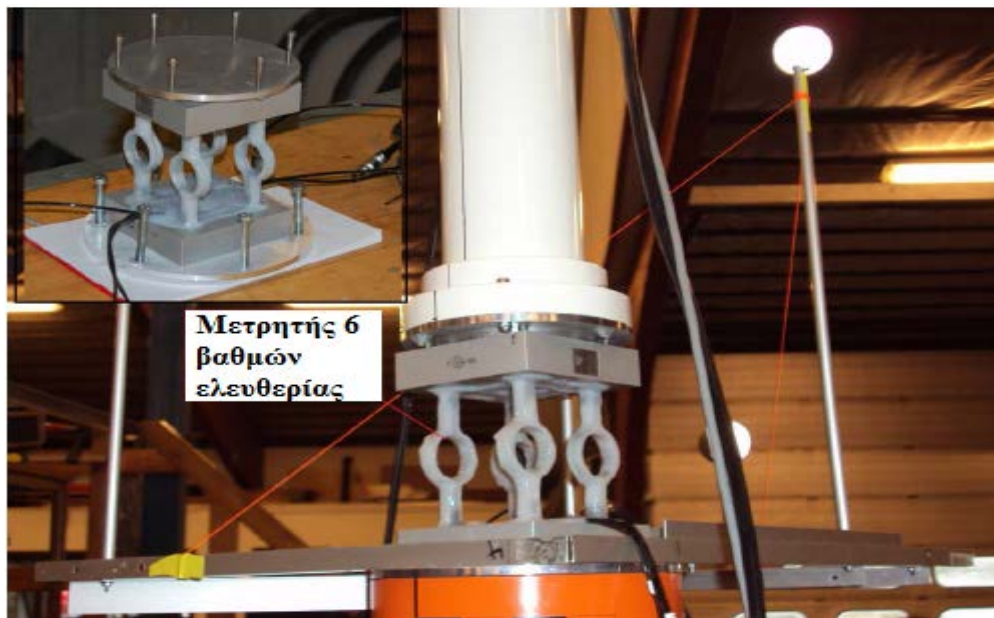
3.3 Τοποθέτηση και βαθμονόμηση οργάνων-μετρητών.

Συνολικά τοποθετήθηκαν έντεκα μετρητές ύψους κύματος (Wave Gauges) , μήκους 60cm, γύρω από την κατασκευή. Η ανάκλαση του κύματος μετρήθηκε με μια σειρά από πέντε μετρητές. Αυτή η σειρά μετρητών κατά τη βαθμονόμηση τοποθετήθηκε στο κέντρο της τάφρου 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 και οι άλλοι τρεις 1,5m πίσω από την πλωτή κατασκευή. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών η διάταξη των μετρητών φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.5 : Σκαρίφημα μετρητών κύματος

Στη βάση του πύργου έχει τοποθετηθεί μετρητής δύναμης 6 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 στην πλωτή κατασκευή με έξι μπουλόνια όμοια και με τη βάση του πύργου.



Εικόνα 3.6 : Μετρητής 6 βαθμών ελευθερίας

Ο πύργος ήταν ένας λεπτός πλαστικός κύλινδρος εξωτερικής διαμέτρου 80mm και ύψους 161,5cm. Στην 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 κορυφή του μετρητή τοποθετήθηκε η άτρακτος της ανεμογεννήτριας. Ένα μοτέρ στο εσωτερικό της άτρακτου έδινε κίνηση στα πτερύγια.



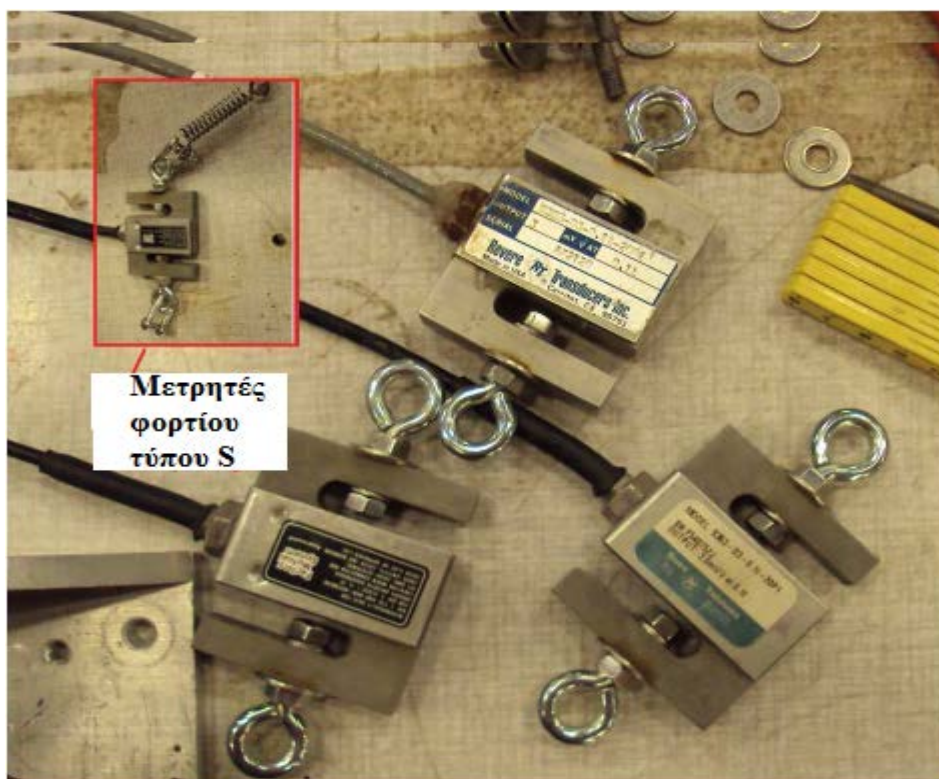
Εικόνα 3.7: Μετρητής τεσσάρων βαθμών ελευθερίας πύργου

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 ζητούμενη ώθηση προστέθηκε μια δύναμη 7N από ένα βάρος που ήταν δεμένο στη άτρακτο μέσω ενός σχοινιού.

Επίσης στο τέλος των κλάδων αγκύρωσης τοποθετήθηκαν ελατήρια τα οποία ήταν συνδεδεμένα με μετρητές φορτίου 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 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 αυτής της συσκευής μεταφέρονταν απευθείας ως αναλογική έξοδος στο

κύριο σύστημα απόκτησης δεδομένων για συγχρονισμό με τα υπόλοιπα καταγεγραμμένα δεδομένα.



Εικόνα 3.8: Μετρητές φορτίου αγκύρωσης

Γενικά μια δοκιμή ξεκινά όταν η ελεύθερη επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Η συλλογή δεδομένων ξεκινά μαζί με τον κυματιστήρα. Όταν τελειώσει η δοκιμή η καταγραφή δεδομένων όπως και ο κυματιστήρας σταματούν. Όλες οι μετρήσεις συλλέγονται με ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων.

3.4 Συνθήκες και δεδομένα εξόδου πειράματος.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν προσομοιώνοντας τρεις βασικές μετεωρολογικές προϋποθέσεις:

- Πρώτα μελετήθηκε η δυναμική της κατασκευής χωρίς περιστροφή της ανεμογεννήτριας.
- Μετά η κατασκευή μελετήθηκε υπό την ταυτόχρονη επίδραση των κυμάτων και της περιστροφής της ανεμογεννήτριας
- Επιπλέον εξετάστηκαν ακραίες καιρικές συνθήκες που προσομοιώθηκαν με κύματα που προκύπτουν μια φορά στα πενήντα χρόνια, χωρίς όμως την περιστροφή του ρότορα.

Η κατασκευή ελέγχθηκε με τη χρήση μονής κατεύθυνσης κανονικών και τυχαίων κυματισμών. Οι τυχαίοι κυματισμοί προέκυψαν με δυο διαφορετικές υλοποιήσεις ενός φάσματος JONSWAP ($\gamma=3,3$) για κάθε σημαντικό ύψος κύματος.

Τα πειράματα διεξήχθησαν με προσπίπτοντες κυματισμούς 0° και 20° . Οι δοκιμές στην κατασκευή TLP έγιναν με μέγιστο ύψος κύματος 20cm για κανονικά κύματα και 15cm για τυχαίους κυματισμούς.

Η περιστροφική κίνηση του ρότορα διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια των δοκιμών στις 38rpm, η οποία αντιστοιχεί σε μια 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 και χωρίς αγκύρωση και με και χωρίς την τοποθέτηση του πύργου. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες δοκιμές με το μοντέλο υπό κλίση.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι διάφορες συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων καθώς και τα αρχεία που αντιστοιχούν στην κάθε μία.^[40]

H(cm)	T(s)	REG/IRR	Όνομα αρχείου		Rotation
			0°	20°	
2.5	1.6	REG	1274	1286	NR
3.9	2		1275	1287	NR
4.5	2.4		1277	1288	NR
10	1.8		1278	1289	NR
15			1279	1290	NR
20			1280	1291	NR
15	2		1281	1292	NR
15	2,4		1282	1293	NR
10	1.6	IRR	1283-1284	1294-1295	NR
15	1.6		1322	1323	NR

Πίνακας 3.9α : Συνθήκες πειραμάτων χωρίς περιστροφή ρότορα

H(cm)	T(s)	REG/IRR	Όνομα αρχείου		Rotation
			0°	20°	
2.5	1.6	REG	1298	1309	R
3.9	2		1299	1310	R
4.5	2.4		1300	1311	R
10	1.8		1301	1312	R
15			1302	1313	R
20			1303	1314	R
15	2		1304	1315	R
15	2,4		1305	1316	R
10	1.6	IRR	1306-1307	1317-1318	R
15	1.6		-	-	R

Πίνακας 3.10α : Συνθήκες πειραμάτων με περιστροφή ρότορα

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 επαναλυτική 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:

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

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

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

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

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

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

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

$$\kappa_3=1,006 \quad \text{και} \quad \lambda_3=6,245$$

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

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

Όνομα αρχείου					
0°	Βάθος	Γραμμικότητα	20°	Βάθος	Γραμμικότητα
1274	Βαθύ νερό	Linear	1286	Βαθύ νερό	Linear
1275	Βαθύ νερό	Linear	1287	Βαθύ νερό	Linear
1277	Βαθύ νερό	Linear	1288	Βαθύ νερό	Linear
1278	Βαθύ νερό	Nonlinear	1289	Βαθύ νερό	Nonlinear
1279	Βαθύ νερό	Nonlinear	1290	Βαθύ νερό	Nonlinear
1280	Βαθύ νερό	Nonlinear	1291	Βαθύ νερό	Nonlinear
1281	Βαθύ νερό	Nonlinear	1292	Βαθύ νερό	Nonlinear
1282	Βαθύ νερό	Nonlinear	1293	Βαθύ νερό	Nonlinear
1283-1284	Βαθύ νερό	Nonlinear	1294-1295	Βαθύ νερό	Nonlinear
1322	Βαθύ νερό	Nonlinear	1323	Βαθύ νερό	Nonlinear

Πίνακας 3.9β : Συνθήκες πειραμάτων χωρίς περιστροφή ρότορα

Όνομα αρχείου					
0°	Βάθος	Γραμμικότητα	20°	Βάθος	Γραμμικότητα
1298	Βαθύ νερό	Linear	1309	Βαθύ νερό	Linear
1299	Βαθύ νερό	Linear	1310	Βαθύ νερό	Linear
1300	Βαθύ νερό	Linear	1311	Βαθύ νερό	Linear
1301	Βαθύ νερό	Nonlinear	1312	Βαθύ νερό	Nonlinear
1302	Βαθύ νερό	Nonlinear	1313	Βαθύ νερό	Nonlinear
1303	Βαθύ νερό	Nonlinear	1314	Βαθύ νερό	Nonlinear
1304	Βαθύ νερό	Nonlinear	1315	Βαθύ νερό	Nonlinear
1305	Βαθύ νερό	Nonlinear	1316	Βαθύ νερό	Nonlinear
1306-1307	Βαθύ νερό	Nonlinear	1317-1318	Βαθύ νερό	Nonlinear

Πίνακας 3.10β : Συνθήκες πειραμάτων με περιστροφή ρότορα

3.5 Συνθήκες και δεδομένα εξόδου πειράματος

Οι αισθητήρες είναι μετρητικά όργανα που αντιλαμβάνονται τη μεταβολή κάποιου μεγέθους ως μεταβολή ρεύματος η οποία καταγράφεται σε αρχεία ως μεταβολή τάσης σε Volt. Η μετατροπή των μετρήσεων των αρχείων 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 $y=a \cdot x+b$, όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι το μετρούμενο μέγεθος σε Volt και η εξαρτημένη μεταβλητή αποκτά τις πραγματικές μονάδες του μεγέθους όπως αυτές καθορίζονται από το σύστημα S.I.. Η διαδικασία που απαιτείται ώστε να παραχθούν οι κατάλληλες εξισώσεις μεταφοράς ονομάζεται βαθμονόμηση. 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 απόκριση και επηρεάζεται από διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες, έτσι η βαθμονόμησή τους έγινε με διαφορετική διαδικασία για κάθε μια ομάδα αισθητήρων.

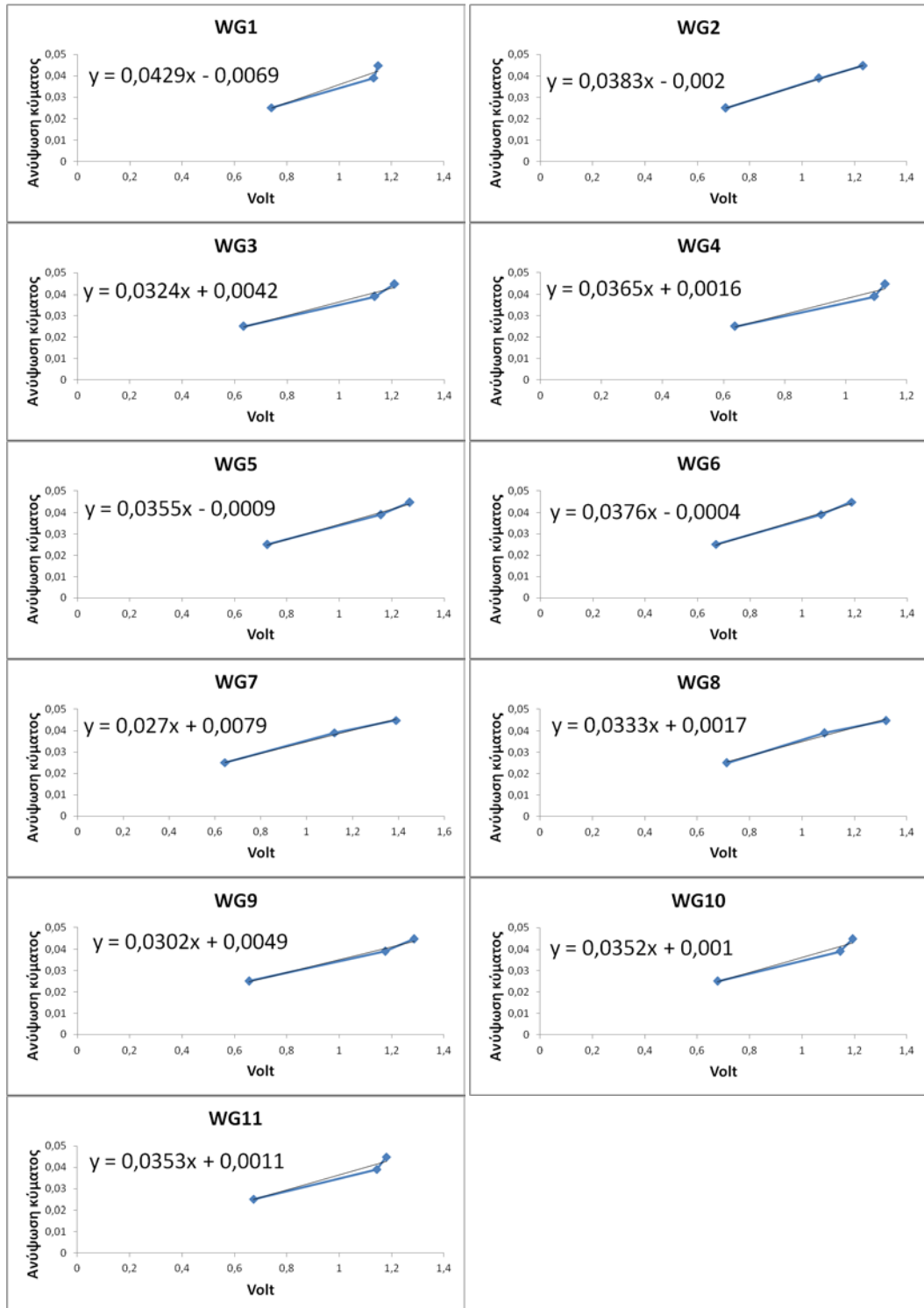
Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης κάθε ομάδας αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς τους.

3.5.1 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 γωνία πρόσπτωσης 0°

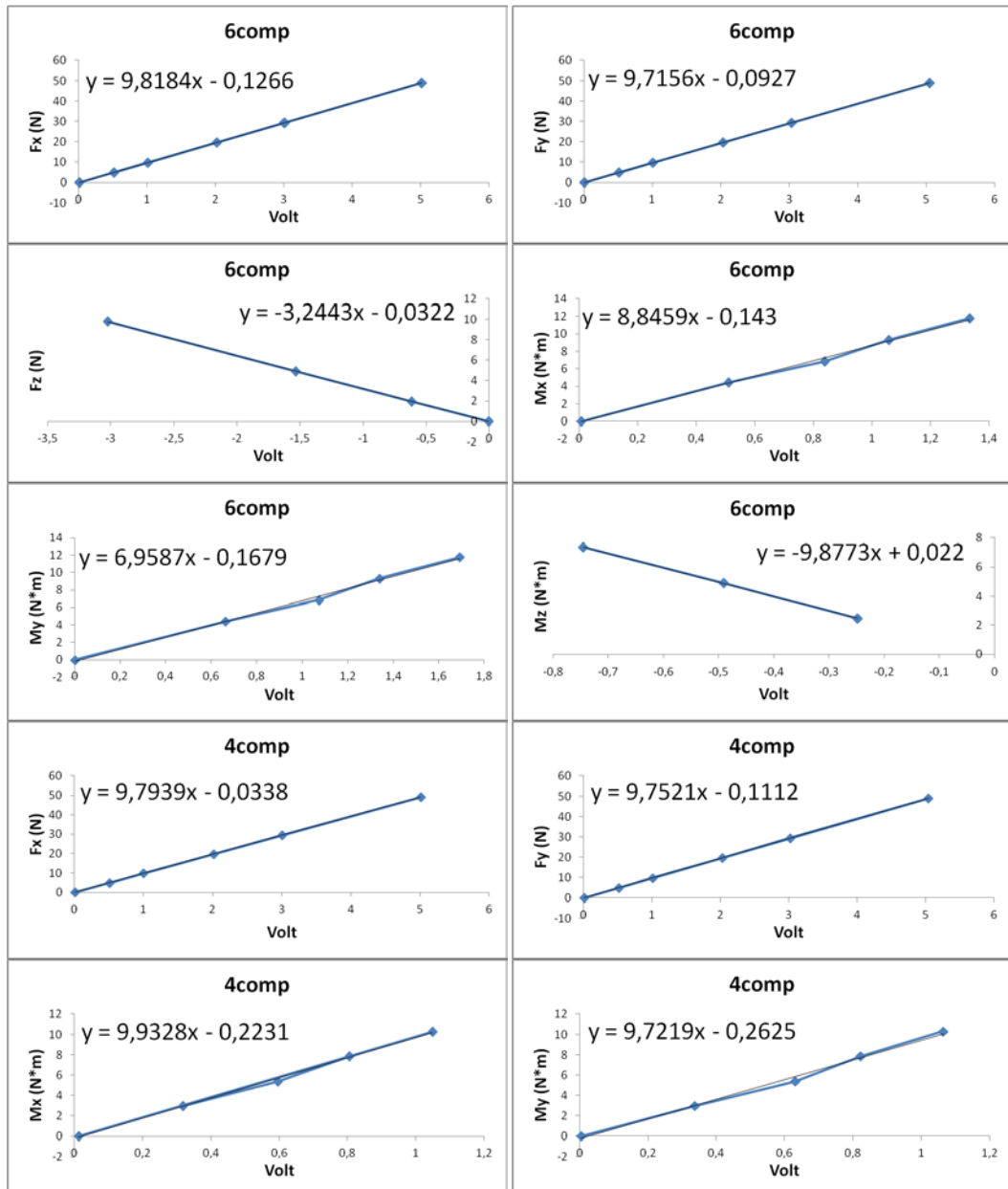
Από τα αρχεία που είχαμε στη διάθεσή μας πήραμε για κάθε WG στο ανάλογο πείραμα το μέσο εύρος Volt ανά περίοδο που καταγράφηκαν και το αντιστοιχήσαμε με το ύψος κύματος. Με τον τρόπο αυτό είχαμε μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάκτηση των σημείων για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων μεταφοράς.

Πιο κάτω παρατίθενται τα διαγράμματα με τα σημεία που εξήχθησαν από τα αρχεία βαθμονόμησης όλων των WG μαζί με τις συναρτήσεις μεταφοράς τους.



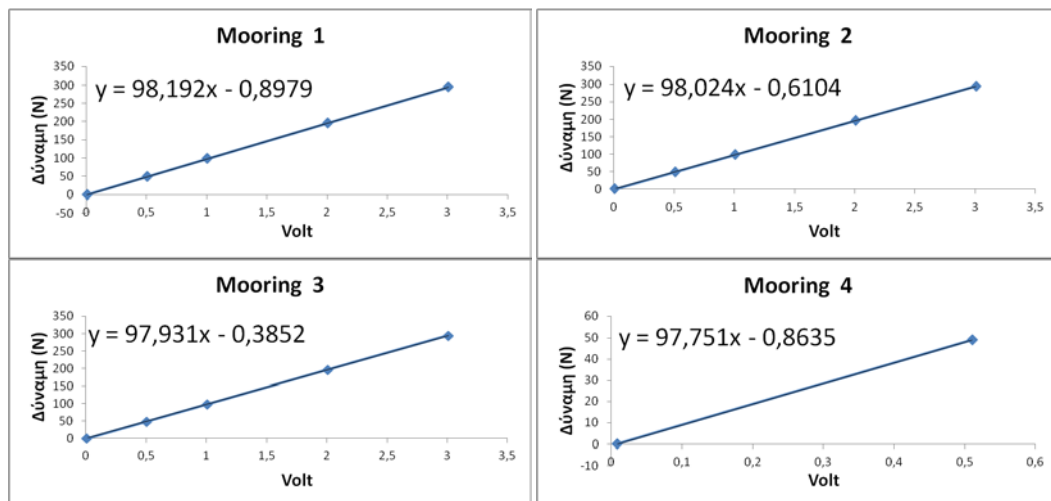
3.5.2 Μετρητές δυνάμεων και ροπών (6comp-4comp)

Η βαθμονόμηση των δύο αυτών οργάνων αφορούσαν τις δυνάμεις F_x , F_y , F_z και τις ροπές M_x , M_y , M_z . Τα αρχεία βαθμονόμησης περιείχαν τοποθέτηση βαρών για την αντιστοιχία δύναμης με volt και την τοποθέτηση βαρών σε απόσταση από το όργανο για την αντιστοιχία ροπής με volt. Παίρνοντας ξανά τους μέσους όρους καταλήξαμε στα παρακάτω:



3.5.3 Μετρητές δυνάμεων αγκύρωσης (mooring)

Για τους μετρητές της αγκύρωσης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με τους μετρητές δυνάμεων τεσσάρων και έξι βαθμών ελευθερίας. Ακολουθούν οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς:



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	$y=98.192x-0.8979$	Mooring3	$y=97.931x-0.3852$
Mooring2	$y=98.024x-0.6104$	Mooring4	$97.751x-0.8635$
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 3.11: Συναρτήσεις μεταφοράς

4. Μαθηματική επίλυση του προβλήματος

4.1 Αρχές και μέθοδοι σχεδίασης πλωτών κατασκευών

Η πλειονότητα των πλωτών κατασκευών, και ιδιαίτερα οι διάφορες μορφές και τα είδη που αναπτύχθηκαν στο πρώτο 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.^{[41][42]}

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

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

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

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.

4.2 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.

4.2.1 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 :

$$V = \bar{V}_{tz} + v' \quad (4.2.1)$$

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 :

$$\bar{V}_{tz} = a \bar{V}_{1hr10} \left(\frac{z}{10} \right)^\beta \quad (4.2.2)$$

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 4.1. 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 4.1: Συντελεστές α, β της σχέσης (4.2.2)

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

$$fS(f) = 4k\bar{V}_{1hr10} \frac{\tilde{f}}{(2 + \tilde{f})^{\frac{5}{6}}} \quad (4.2.3)$$

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.

4.2.2 Θαλάσσια ρεύματα

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

$$V_{\text{ρευμ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) + V_{\text{ανεμ}}(z) \quad (4.2.4)$$

Και

$$V_{\text{παλ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) \left(\frac{d+z}{d} \right)^{1/7}, z \leq 0 \quad (4.2.5)$$

$$V_{\text{ανεμ}}(z) = V_{\text{ανεμ}}(z) \left(\frac{d_0+z}{d_0} \right)^{1/7}, -d_0 \leq z \leq 0 \quad (4.2.6)$$

$$V_{\text{ανεμ}}(z) = 0, z < -d_0 \quad (4.2.7)$$

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 (4.2.7)

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

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

$V_{\text{ανεμ}} = 0.02\bar{V}_{1hr10}$ (4.2.8), όπου τα μεγέθη $V_{\text{ανεμ}}$ και \bar{V}_{1hr10} ορίστηκαν προηγουμένως.

4.2.3 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

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (4.2.9)$$

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

p: η πίεση

μ: συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας

ρ: η πυκνότητα και

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

- Η εξίσωση συνέχειας:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2.10)$$

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 (4.2.9) ανάγονται σε αυτές του Euler. Εφ' όσον δε η κίνηση του ρευστού είναι και αστρόβιλη τότε υπάρχει δυναμικό ροής φ τέτοιο, ώστε :

$$\vec{V} = \nabla \cdot \Phi \quad (4.2.11)$$

Οπότε η εξίσωση συνέχειας (4.2.10) μετασχηματίζεται στην εξίσωση του Laplace:

$$\Delta \Phi = 0 \Leftrightarrow \nabla^2 \Phi = 0 \quad (4.2.12)$$

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{p}{\rho} = \text{σταθ.} \quad (4.2.13)$$

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.)

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{\nabla} \Phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.2.14)$$

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:

$$\frac{D}{Dt} (z - \zeta) = 0 \quad (4.2.15)$$

ή επειδή

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\nabla} \vec{V} \quad (4.2.16)$$

προκύπτει

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (4.2.17)$$

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:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = \sigma \tau \alpha \theta. \quad (4.2.18)$$

για $z = \zeta(x, y, t)$

και αν εκλέξουμε σταθερά ίση με το μηδέν (χωρίς να χάσουμε από τη γενικότητα) τότε η (4.2.18) γίνεται :

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g \zeta = 0 \quad (4.2.19)$$

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:

$$\Phi(x, y, z; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \Phi^{(n)}(x, y, z, t) \quad (4.2.20)$$

Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta(x, y; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \zeta^{(n)}(x, y; t) \quad (4.2.21)$$

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 (4.2.17) και (4.2.19) 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 :

$$\Phi \Big|_{z=\zeta} = \Phi \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.22)$$

Και τις παραγώγους:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.23)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.24)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial z^3} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.25)$$

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 (4.2.20) έως (4.2.25) στις μη γραμμικές οριακές συνθήκες (4.2.17) και (4.2.19) και διατάσσοντας τους εμφανιζόμενους όρους κατά δυνάμεις του ε αντίστοιχα, έχουμε:

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

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

(4.2.26)

για $z=0$

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

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

(4.2.27)

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 (4.2.20) στην ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι προκύπτουν:

Πρόβλημα 1^{ης} τάξης (n=1)

Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} = 0, \text{ για } z=0 \quad (4.2.28)$$

Δυναμική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g \zeta^{(1)} = 0 \quad (4.2.29)$$

Πρόβλημα 2^{ης} τάξης (n=2)

Κινηματική συνθήκη

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y}, \text{ για } z=0 \quad (4.2.30)$$

Δυναμική συνθήκη

$$g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial z^2} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} = 0 \quad (4.2.31)$$

για $z=0$

Από τη διατύπωση των οριακών συνθηκών (4.2.30) και (4.2.31) είναι προφανές ότι για την εύρεση της προσεγγιστικής λύσης 2^{ης} τάξης απαιτείται η προηγούμενη γνώση, εκείνη της 1^{ης} τάξης. Γενικά οι σχέσεις (4.2.30) και (4.2.31) για τη n-στη τάξη μπορούν να γραφούν στη μορφή:

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(n)}}{\partial t} = G^{(n-1)}, \text{ για } z=0 \quad (4.2.32)$$

και

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial t} + g \zeta^{(n)} = F^{(n-1)}, \text{ για } z=0 \quad (4.2.33)$$

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 (4.2.32) και (4.2.33) τη συνθήκη στον πυθμένα (4.2.14) καθώς και την εξ. του Laplace (4.2.12) δηλαδή για τον n-στο όρο της σειράς (4.2.20) θα πρέπει:

$$\Delta\Phi^{(n)} = 0, \text{ στο πεδίο ροής} \quad (4.2.34)$$

$$\frac{\partial\Phi^{(n)}}{\partial\vec{n}} = \vec{\nabla}\Phi^{(n)}\vec{n} = 0, \text{ στον πυθμένα} \quad (4.2.35)$$

Γραμμική θεωρία- απλά αρμονικά κύματα

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σαν λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις εξ. (4.2.28), (4.2.29), (4.2.34) και (4.2.35) για n=1. Η λύση του προβλήματος μας δίνει τα εξής αποτελέσματα για πεπερασμένο βάθος νερού:

- Για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta^{(1)}(x; y; t) = \frac{H}{2} \cos[k(x\cos\theta + y\sin\theta) - \omega t] \quad (4.2.36)$$

- Για το δυναμικό του πεδίου ροής:

$$\Phi^{(1)}(x; y; z; t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x\cos\theta + y\sin\theta) - \omega t] \quad (4.2.37)$$

Όπου:

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

Σε περίπτωση σύμπτωσης των δύο διευθύνσεων οι εξ. (4.2.36) και (4.2.37) που θα περιγράφουν απλό αρμονικό κυματισμό κινούμενο κατά τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα x, γίνονται :

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (4.2.38)$$

$$\Phi^{(1)}(x; z; t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh [k(z+d)]}{\cosh (kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4.2.39)$$

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

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \text{Re} \left[\frac{H}{2} e^{i[k(x\cos\theta + y\sin\theta) - \omega t]} \right] \quad (4.2.40)$$

$$\Phi^{(1)}(x; z; t) = \text{Re} \left[-i \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} e^{i[k(x\cos\theta + y\sin\theta) - \omega t]} \right] \quad (4.2.41)$$

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.

4.3 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:
 - o Άνεμος
 - o Θαλάσσια ρεύματα
 - o Θαλάσσιοι κυματισμοί
 - o Σεισμοί
 - Έμμεση δράση:
 - o Δυνάμεις αγκυρώσεων
 - o Δυνάμεις λόγω κινήσεων της κατασκευής
 - o 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.

4.3.1 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).

4.3.2 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:

$$F = f(D, d, \rho, g, H, \lambda, \mu) \quad (4.3.1)$$

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:

$$\frac{F}{\rho g \pi H \frac{D^2}{8}} = f \left(\frac{2\pi D}{\lambda}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{gD^3}} \right) \quad (4.3.2)$$

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:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{c}{\sqrt{gD}} \quad (4.3.3)$$

Ο αριθμός Reynolds προσδιορίζεται ως:

$$Re = \frac{\text{Αδρανειακές Δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Τριβής}} = \frac{cD}{\nu} \quad (4.3.4)$$

Διαιρώντας μεταξύ τους, τους συντελεστές:

$$\frac{Fr}{Re} = \frac{\text{Δυνάμεις Τριβής}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}} \quad (4.3.5)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχει συνδυασμένη επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, τριβής και των αδρανειακών δυνάμεων. Από την εξίσωση (4.3.5) προκύπτει ότι αυξανόμενης της διαμέτρου του κυλίνδρου, αυξάνει και η σχετική σημασία των δυνάμεων βαρύτητας έναντι εκείνων της τριβής.

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

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

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

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

Παρατήρηση:

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

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

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

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

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

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

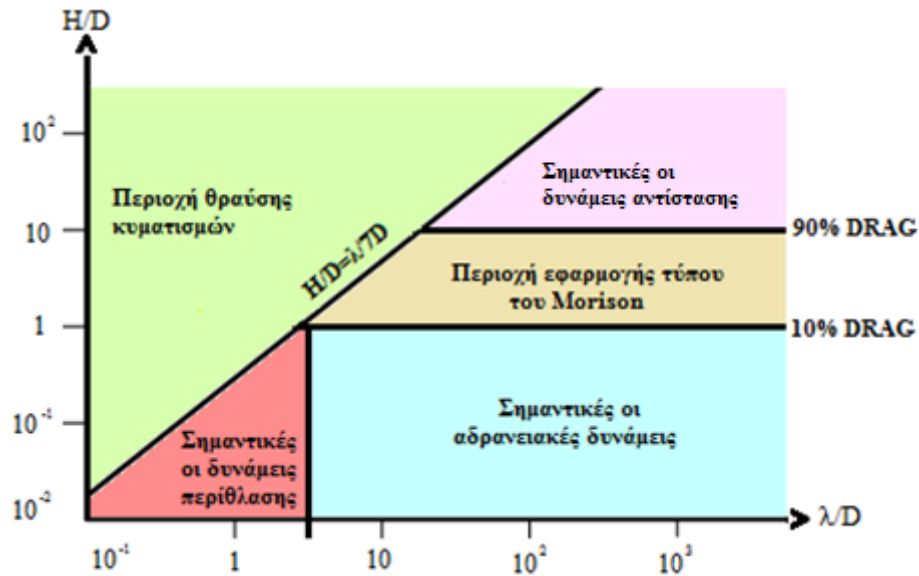
$$\frac{F}{\frac{1}{2}\rho u^2 Dd} = f(N_{KC}, Re, \frac{d}{D}, \frac{k}{D})$$

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 4.2: Η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων σε διάφορες περιοχές

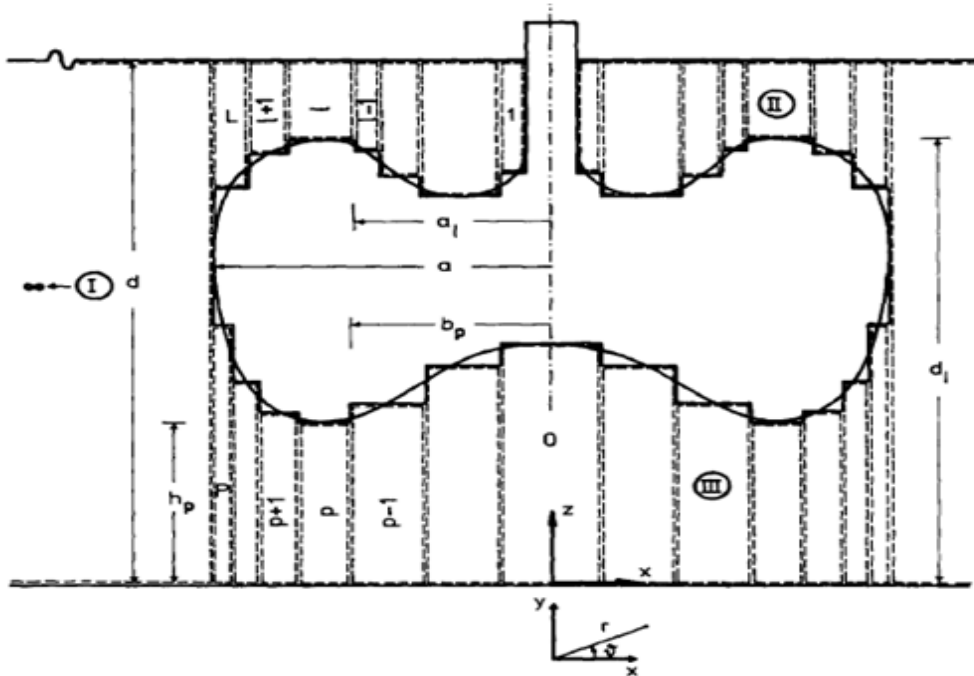
Στο όριο $\frac{\lambda}{D} < 5$ που εμφανίζεται στο παραπάνω σχήμα, γίνεται ο διαχωρισμός των κατασκευών σε υδροδυναμικά «ογκώδεις» και «λεπτές» .

4.4 Ανάλυση των φορτίσεων από κυματισμούς σε σύνθετα σώματα

4.4.1 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.^{[43][44]}

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 4.3).



Εικόνα 4.3: Διακριτοποίηση του πεδίου ροής γύρω από αξονοσυμμετρικό σώμα με κατακόρυφο άξονα συμμετρίας

Στο σχέδιο διακριτοποίησης γίνεται διάκριση μεταξύ των «πεπερασμένων» στοιχείων, τα οποία αφορούν οριοθετημένες περιοχές του ρευστού, και των «άπειρων» στοιχείων, τα οποία εκτείνονται οριζοντίως στο άπειρο, (Εικόνα 4.3). Υπάρχουν δύο τύποι «πεπερασμένων» στοιχείων ανάλογα με το αν αυτά εκτείνονται προς την ελεύθερη επιφάνεια, (τύπος II), ή μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας, (τύπος III). Για το «άπειρο» στοιχείο δακτυλίου, (τύπος I), οι επιλεγμένες συναρτήσεις για την προσέγγιση του δυναμικού ταχύτητας πρέπει να πληρούν τη συνθήκη ακτινοβολίας.

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

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

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

(4.4.1)

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:

$$\Phi_D(r, \vartheta, z, t) = \varphi_D^{-i\omega t} = (\varphi_0 + \varphi_7)e^{-i\omega t} \quad (4.4.2)$$

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

$$\varphi_0(r, \vartheta, z)e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2} \frac{\cosh(kz)}{k \sinh(kd)} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_j i^m J_m(kr) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (4.4.3)$$

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

$$\epsilon_0 = 1, \epsilon_m = 2(m \geq 1) \quad (4.4.4)$$

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

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (4.4.5)$$

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

$$\varphi_D e^{-i\omega t} = -i\omega \frac{H}{2} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_j i^m \Psi_{Dm}(r, z) \cos(m\vartheta) \right] e^{-i\omega t} \quad (4.4.6)$$

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:

$$\varphi_1 e^{-i\omega t} = \Psi_{11}(r, z) \cos(\vartheta) e^{-i\omega t} \quad (4.4.7)$$

$$\varphi_3 e^{-i\omega t} = \Psi_{30}(r, z) e^{-i\omega t} \quad (4.4.8)$$

$$\varphi_5 e^{-i\omega t} = \Psi_{51}(r, z) \cos(\vartheta) e^{-i\omega t} \quad (4.4.9)$$

Στις συναρτήσεις Ψ_{jm} των εξισώσεων (4.4.6- 4.4.9) ο πρώτος δείκτης $j=D,1,3,5$ υποδηλώνει το σχετικό πρόβλημα οριακών τιμών, ενώ ο δεύτερος αναφέρεται στις τιμές του m που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος. Έτσι, οι συναρτήσεις Ψ_{Dm} , ($m = 0,1,2 \dots$), Ψ_{11} , Ψ_{30} και Ψ_{51} παραμένουν οι κύριοι άγνωστοι του προβλήματος.

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

$$\Delta\varphi_j = \frac{\partial^2\varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\varphi_j}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2\varphi_j}{\partial z^2} = 0 \text{ σε ολόκληρο το πεδίο του ρευστού} \quad (4.4.10)$$

$$-\omega^2\varphi_j + g\frac{\partial\varphi_j}{\partial z^2} = 0, \text{ για } z = d \quad (4.4.11)$$

$$\frac{\partial\varphi_j}{\partial r^2} = 0, \text{ για } z = 0 \quad (4.4.12)$$

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

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{kr} \left(\frac{\partial\varphi_j}{\partial z^2} - ik\varphi_j \right) = 0 \quad (4.4.13)$$

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

$$\left. \frac{\partial\varphi_7}{\partial n} \right|_{S_0} = - \left. \frac{\partial\varphi_0}{\partial n} \right|_{S_0} \quad \text{ή} \quad \left. \frac{\partial\varphi_D}{\partial r} \right|_{S_0} = 0 \quad (4.4.14)$$

και

$$\left. \frac{\partial\varphi_j}{\partial n} \right|_{S_0} = n_j, \quad (j = 1,3,5) \quad (4.4.15)$$

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:

$$(n_1, n_2, n_3) = n, \quad (n_4, n_5, n_6) = r \times n \quad (4.4.16)$$

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 4.3), η συνθήκη για τη στεγανότητα επί της βρεχόμενης επιφάνειας του σώματος, όπως εκφράζεται στις εξισώσεις (4.4.14) και (4.4.15), μπορεί να διαμορφωθεί ξεχωριστά για τα προβλήματα περίθλασης ($j = D$) και ακτινοβολίας ($j = 1,3,5$) ως εξής:

- Οριζόντιες οριακές συνθήκες:

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

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = V_j, \quad \text{όταν } z = d_l \text{ για } a_l \leq r \leq a_{l+1} \quad (4.4.17)$$

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

$$\text{όπου } V_D = V_l = 0, V_3 = l \text{ και } V_5 = -r \quad (4.4.18)$$

- Κατακόρυφες οριακές συνθήκες:

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

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

$$\frac{\partial \psi_{jm}}{\partial z} = U_j, \quad \text{όταν } r = a_l \text{ για } \min\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq \max\{d_l, d_{l-1}\} \quad (4.4.19)$$

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

$$\text{όπου } U_D = U_3 = 0, U_1 = 1, U_5 = (z - e) \quad (4.4.20)$$

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 4.3). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

$$\psi_{jm}^1(a, z) = \psi_{jm}^{(L)}(a, z), \text{ για } d_L \leq z \leq d \quad (4.4.21)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \infty} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(L)}}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} \quad (4.4.22)$$

$$\psi_{jm}^1(a, z) = \psi_{jm}^{(P)}(a, z), \text{ για } 0 \leq z \leq h_p \quad (4.4.23)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(P)}}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a} \quad (4.4.24)$$

$$\psi_{jm}^1(a_l, z) = \psi_{jm}^{(l-1)}(a_{l-1}, z), \text{ για } \begin{matrix} \max\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq d \\ l = 2, 3, \dots, L \end{matrix} \quad (4.4.25)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^1}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a_l} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(l-1)}}{\partial r} \right|_{r \rightarrow a_l}, \text{ για } \begin{matrix} \max\{d_l, d_{l-1}\} \leq z \leq d \\ l = 2, 3, \dots, L \end{matrix} \quad (4.4.26)$$

$$\psi_{jm}^{(p)}(b_p, z) = \psi_{jm}^{(p-1)}(b_p, z), \text{ για } \begin{matrix} 0 \leq z \leq \min\{h_p, h_{p-1}\} \\ p = 1, 2, \dots, P \end{matrix} \quad (4.4.27)$$

$$\left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} = \left. \frac{\partial \psi_{jm}^{(p-1)}}{\partial r} \right|_{r=b_p} \quad (4.4.28)$$

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

- Δυναμικά ταχύτητας περίθλασης και ακτινοβολίας για τους διάφορους τύπους μακροστοιχείων:

Για κάθε τύπο μακροστοιχείου προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις για τις συναρτήσεις Ψ_{Dm} , ($m = 0, 1, 2, \dots$), Ψ_{11} , Ψ_{30} και Ψ_{51} όπως ορίζονται στις εξισώσεις (4.4.6- 4.4.9).

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

$$\frac{1}{\delta_j} \psi_{jm}^1(r, z) = g_{jm}^1(r, z) + \sum F_{j,ma} \frac{K_m(ar)}{K_m(aa)} Z_a(z) \quad (4.4.29)$$

όπου

$$g_{Dm}^l(r, z) = \left\{ J_m(kr) - \frac{J_m(ka)}{H_m(ka)} H_m(kr) \right\} \frac{Z_k(z)}{dZ_k'(z)} \quad (4.4.30)$$

$$g_{ll}^l(t, z) = g_{30}^l(r, z) = g_{51}^l(r, z) = 0 \quad (4.4.31)$$

$$\delta_D = \delta_1 = \delta_3 = d, \quad \delta_5 = d^2 \quad (4.4.32)$$

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:

$$Z_k(z) = N_k^{-1/2} \cosh(kz) \quad (4.4.33)$$

$$Z_a(z) = N_a^{-1/2} \cosh(az), a : \text{πραγματικός} \quad (4.4.34)$$

όπου:

$$N_k = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \quad (4.4.35)$$

$$N_a = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sinh(2ad)}{2ad} \right], a : \text{πραγματικός} \quad (4.4.36)$$

και a είναι οι ρίζες της υπερβατικής εξίσωσης:

$$\frac{\omega^2}{g} + a \tan(ad) = 0 \quad (4.4.37)$$

Η εξίσωση (4.4.37) 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 (4.4.36) και (4.4.34), προκύπτουν άμεσα οι εξισώσεις (4.4.35) και (4.4.33).

- 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 $k=1,3$

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

$$M_k(t) = -\iint_{S_0} p(r \times n_k) dS = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \phi_D(r \times n_k) dS =$$

όπου:

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

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:

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

και: $F'_5(t) = M'_1(t) + M'_3(t)$

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:

$$F_{kj}(t) = \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) n_k dS \quad (4.4.38)$$

$$M_{kj}(t) = \iint_{S_0} \psi_{jm}(r, z) \cos(m\vartheta) (r \times n_k) dS, \text{ για } D=1,3,5 \quad (4.4.39)$$

Εισάγοντας τις αντίστοιχες σχέσεις για τις συναρτήσεις δυναμικού στα ανωτέρω ολοκληρώματα, προκύπτουν οι εξισώσεις (4.4.38) και (4.4.39), κατόπιν ολοκληρώσεως ως προς τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες μαθηματικές εκφράσεις:

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

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

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

KQ1

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

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

$$j = 1, 3, 5$$

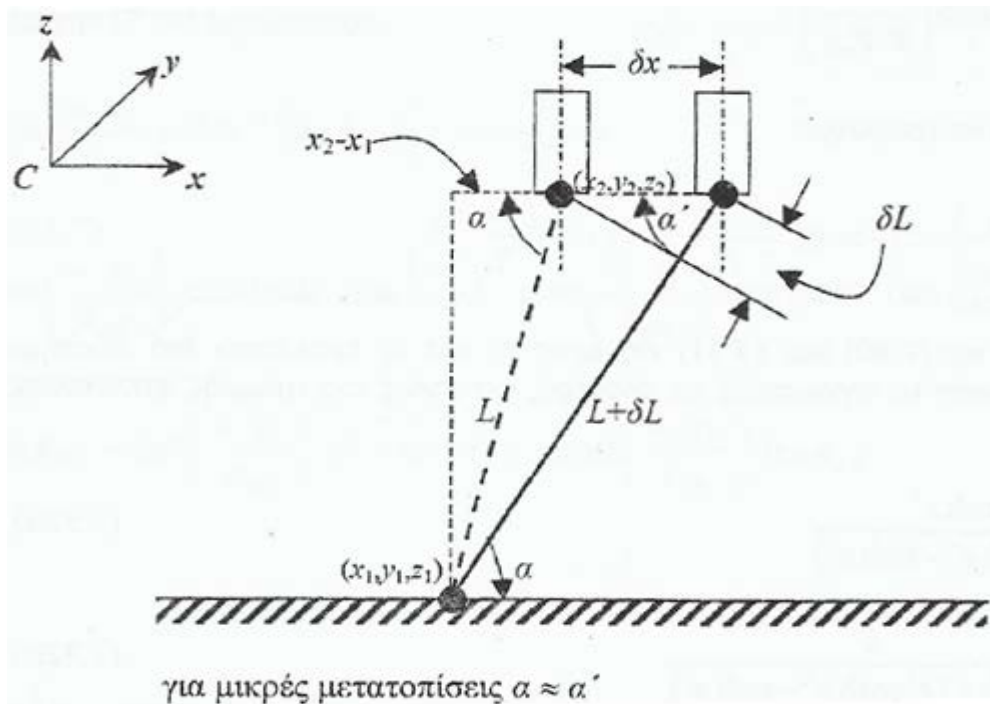
για $S = 0, 1, 2, \dots, P$ ή

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

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

4.5 Αγκύρωση υπό κατακόρυφη προέκταση

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστεί όλη η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών επαναφοράς για μια πλωτή κατασκευή η οποία συγκρατείται στη θέση της με κατακόρυφη γραμμή αγκύρωσης υπό υψηλή προέκταση (σχήμα 4.4). Χάριν πληρότητας, θα αναπαραχθούν οι εξισώσεις που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα από τις σημειώσεις του μαθήματος «Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών»^[45]



Σχήμα 4.4

Οι ασκούμενες δυνάμεις επαναφοράς μπορούν να γραφούν στην ακόλουθη μητρική μορφή:

$$F_{Mi} = k_{ij} \cdot \xi_j \quad (4.5.1)$$

όπου:

F_{Mi} : είναι η i συνιστώσα του διανύσματος της δύναμης αγκύρωσης.

ξ_j : είναι ένα 6×1 διάνυσμα που περιέχει τις κινήσεις στους 6 βαθμούς ελευθερίας κίνησης της κατασκευής.

k_{ij} : είναι το 6×6 μητρώο ακαμψίας. Τα στοιχεία του υποδηλώνουν τη συνεισφορά στην i κατεύθυνση της δύναμης αγκύρωσης που προκαλείται λόγω της μετατόπισης στη j διεύθυνση της κατασκευής.

Έστω T η σταθερή κατα μήκος της γραμμής αγκύρωσης ένταση, λ η σταθερά της ελαστικής ακαμψίας, (x_1, y_1, z_1) οι συντεταγμένες του σημείου πρόσδεσης στον πυθμένα και (x_2, y_2, z_2) οι συντεταγμένες του σημείου πρόσδεσης στην πλωτή κατασκευή.

Τότε:

$$\cos \alpha = \frac{x_2 - x_1}{L}; \quad \cos \beta = \frac{y_2 - y_1}{L}; \quad \cos \gamma = \frac{z_2 - z_1}{L} \quad (4.5.2)$$

$$L = \{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.3)$$

Εάν δx είναι η μικρή οριζόντια απόσταση μετακίνησης της πλατφόρμας, τότε υπό την προϋπόθεση ότι $\alpha' \approx \alpha$ μπορούμε να καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$L + \delta L \approx L + \delta x \cdot \cos \alpha = L + \frac{x_2 - x_1}{L} \cdot \delta x \quad (4.5.4)$$

Η δύναμη επαναφοράς κατά μήκος του x - άξονα μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \cos \alpha' - T \cdot \cos \alpha \quad (4.5.5)$$

Επίσης

$$\cos \alpha' = \frac{x_2 - x_1 + \delta x}{L + \delta L} = \frac{(x_2 - x_1) \left[1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)} \right]}{L \cdot \left(1 + \frac{\delta L}{L} \right)} \quad (4.5.6)$$

Συνδυάζοντας τις 4.5 και 4.6 εξάγουμε:

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \left(\frac{x_2 - x_1}{L} \right) \cdot \left[\frac{1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)}}{1 + \frac{\delta L}{L}} \right] - \frac{T \cdot (x_2 - x_1)}{L} \quad (4.5.7)$$

Αναπτύσσοντας τον παρονομαστή στην αγκύλη της παραπάνω εξίσωσης σε σειρά Taylor λαμβάνουμε :

$$\frac{1}{1 + \frac{\delta L}{L}} = 1 - \frac{\delta L}{L} + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 + O(\varepsilon^3) = 1 - \frac{\delta L}{L} + O(\varepsilon^2) \quad (4.5.8)$$

Από τις 4.5.7 και 4.5.8 παίρνουμε:

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \cos \alpha \cdot \left[1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)} \right] \cdot \left[1 - \frac{\delta L}{L} \right] - T \cdot \cos \alpha \quad (4.5.9)$$

ή αλλιώς

$$\delta T_x = T \cdot \cos \alpha \cdot \left[\frac{\delta x}{(x_2 - x_1)} - \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta T}{T} \right] + O(\varepsilon^2) \quad (4.5.10)$$

ή ισοδύναμα δεδομένου ότι $\delta L = \delta x \cdot \cos \alpha$

$$\delta T_x = \frac{T}{L} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ \left[\frac{L \cdot \delta x}{(x_2 - x_1)} \right] \cos \alpha \cdot \delta x + \frac{\lambda \cdot (x_2 - x_1)}{T} \cdot \delta x \right\} =$$

$$(\lambda \cdot \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \alpha) \cdot \delta x \quad (4.5.11)$$

Στο όριο, καθώς $\delta x \rightarrow 0$

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{\delta T_x}{\delta x} = \frac{\partial T_x}{\partial x} = k_{11} = \lambda \cdot \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \alpha \quad (4.5.12)$$

Οι υπόλοιποι όροι που δίνουν τους συντελεστές επαναφοράς λόγω μετατοπίσεων, μπορούν να εξαχθούν κατά αναλογία με το συντελεστή k_{11} και είναι:

$$k_{21} = k_{12} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (4.5.13)$$

$$k_{31} = k_{13} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma \quad (4.5.14)$$

$$k_{22} = \lambda \cdot \cos^2 \beta + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \beta \quad (4.5.15)$$

$$k_{32} = k_{23} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma \quad (4.5.16)$$

$$k_{33} = \lambda \cdot \cos^2 \gamma + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \gamma \quad (4.5.17)$$

Οι υπόλοιποι όροι που εκφράζουν :

- ροπές λόγω μεταφορικών κινήσεων
- δυνάμεις λόγω περιστροφών, και
- ροπές λόγω περιστροφών

προκύπτουν από τους εννέα πρώτους όρους:

$$k_{41} = k_{31} \cdot y_2 - k_{21} \cdot z_2 \quad (4.5.18)$$

$$k_{51} = k_{11} \cdot z_2 - k_{31} \cdot x_2 \quad (4.5.19)$$

$$k_{61} = k_{22} \cdot x_2 - k_{11} \cdot y_2 \quad (4.5.20)$$

$$k_{42} = k_{32} \cdot y_2 - k_{22} \cdot z_2 \quad (4.5.21)$$

$$k_{52} = k_{21} \cdot z_2 - k_{32} \cdot x_2 \quad (4.5.22)$$

$$k_{62} = k_{22} \cdot x_2 - k_{21} \cdot y_2 \quad (4.5.23)$$

$$k_{43} = k_{33} \cdot y_2 - k_{32} \cdot z_2 \quad (4.5.24)$$

$$k_{53} = k_{31} \cdot z_2 - k_{33} \cdot x_2 \quad (4.5.25)$$

$$k_{63} = k_{32} \cdot x_2 - k_{31} \cdot y_2 \quad (4.5.26)$$

$$k_{44} = k_{33} \cdot y_2^2 - 2 \cdot k_{32} \cdot y_2 \cdot z_2 + k_{22} \cdot z_2^2 \quad (4.5.27)$$

$$k_{54} = k_{31} \cdot y_2 \cdot z_2 - k_{21} \cdot z_2^2 - k_{33} \cdot y_2 \cdot x_2 + k_{32} \cdot x_2 \cdot z_2 \quad (4.5.28)$$

$$k_{64} = k_{32} \cdot y_2 \cdot x_2 - k_{31} \cdot y_2^2 - k_{22} \cdot z_2 \cdot x_2 + k_{21} \cdot y_2 \cdot z_2 \quad (4.5.29)$$

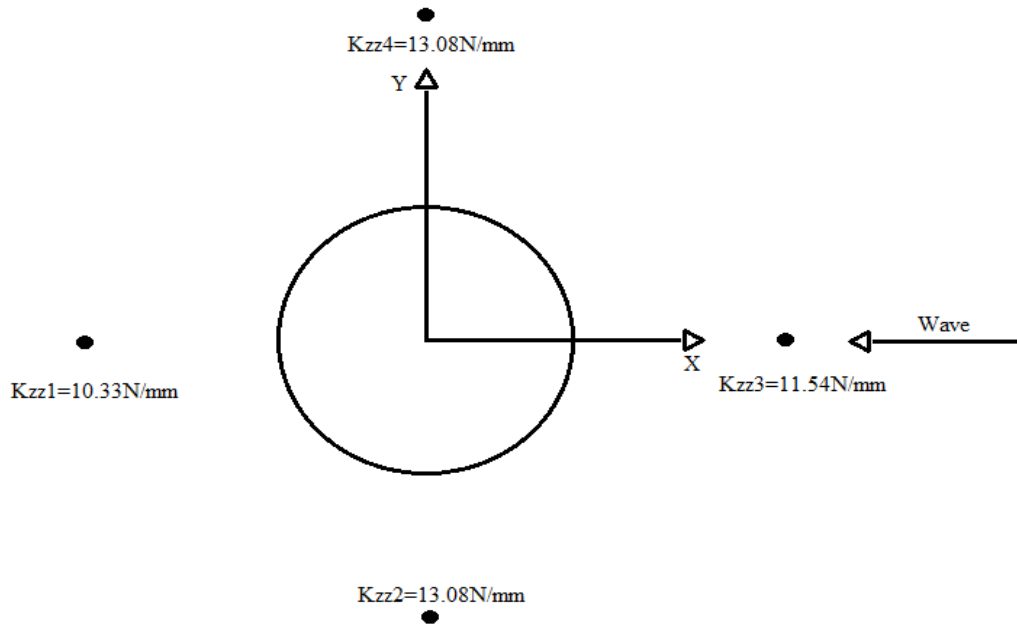
$$k_{55} = k_{11} \cdot z_2^2 - 2 \cdot k_{31} \cdot x_2 \cdot z_2 + k_{33} \cdot x_2^2 \quad (4.5.30)$$

$$k_{65} = k_{21} \cdot y_2 \cdot x_2 - k_{32} \cdot x_2^2 - k_{11} \cdot y_2 \cdot z_2 + k_{31} \cdot x_2 \cdot y_2 \quad (4.5.31)$$

$$k_{66} = k_{22} \cdot x_2^2 - 2 \cdot k_{21} \cdot y_2 \cdot x_2 + k_{11} \cdot y_2^2 \quad (4.5.32)$$

4.6 Υπολογισμός σταθερών ελατηρίου και προέντασης πειράματος

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι σταθερές των ελατηρίων στον άξονα Z που χρησιμοποιήθηκαν για την τοποθέτηση του μοντέλου στη δεξαμενή, όπως παρουσιάστηκαν στην έκθεση του πειράματος.



Εικόνα 4.5: Σταθερές ελατηρίων στον άξονα Z

Από την έκθεση του πειράματος μας δίνεται η προένταση στον άξονα Z. Με βάση αυτήν υπολογίζουμε τα K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} της πραγματικής κατασκευής.

$$K_{zz}^1 = 10,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 40^2 = 16528 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{zz}^2 = 13,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 40^2 = 20928 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{zz}^3 = 11,54 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 40^2 = 18464 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{zz}^4 = 13,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 40^2 = 20928 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$K_{xx} = K_{yy} = \frac{F_{pr}^Z}{l} = \frac{796750 \text{ Kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{200 - 47,89} = 51384,6 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 51,385 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{pr}^Z = 7816117,5 \text{ N} = 7816,1 \text{ kN}$$

5. Ανάλυση πειραματικών μετρήσεων

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 3, καθώς και η αποτύπωση των μεγεθών αυτών σε γραφήματα συναρτήσει 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^[46] 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

Στον παρακάτω πίνακα επεξηγείται η συντομογραφία των μετρούμενων πειραματικών μεγεθών.

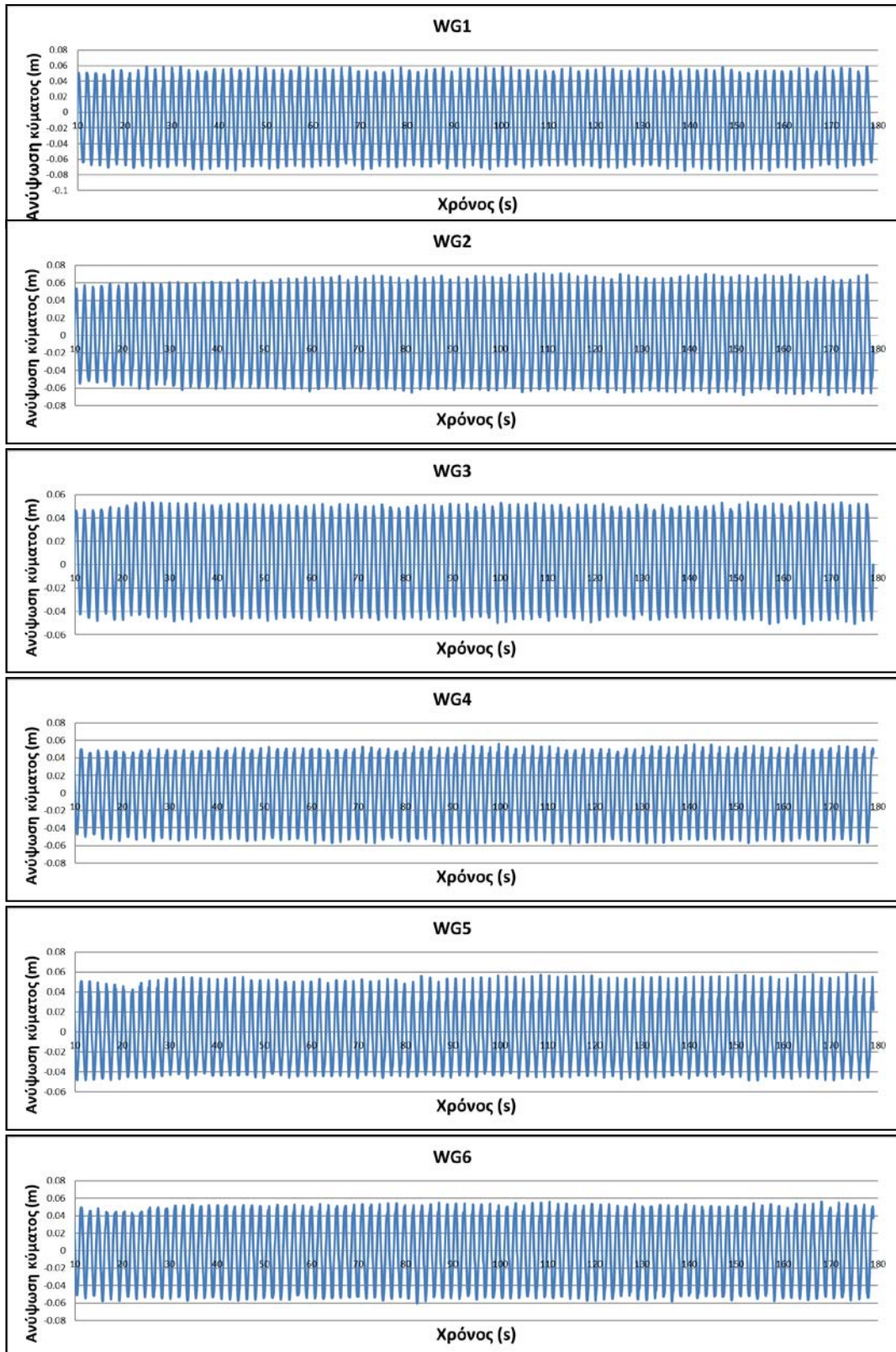
Συντομογραφία	Επεξήγηση
WG1-11	Ανύψωση κύματος (m)
6 comp Fx	Δύναμη στον άξονα x στον πλωτήρα (N)
6 comp Fy	Δύναμη στον άξονα y στον πλωτήρα (N)
6 comp Fz	Δύναμη στον άξονα z στον πλωτήρα (N)
6 comp Mx	Ροπή στον άξονα x στον πλωτήρα (N·m)
6 comp My	Ροπή στον άξονα y στον πλωτήρα (N·m)
6 comp Mz	Ροπή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

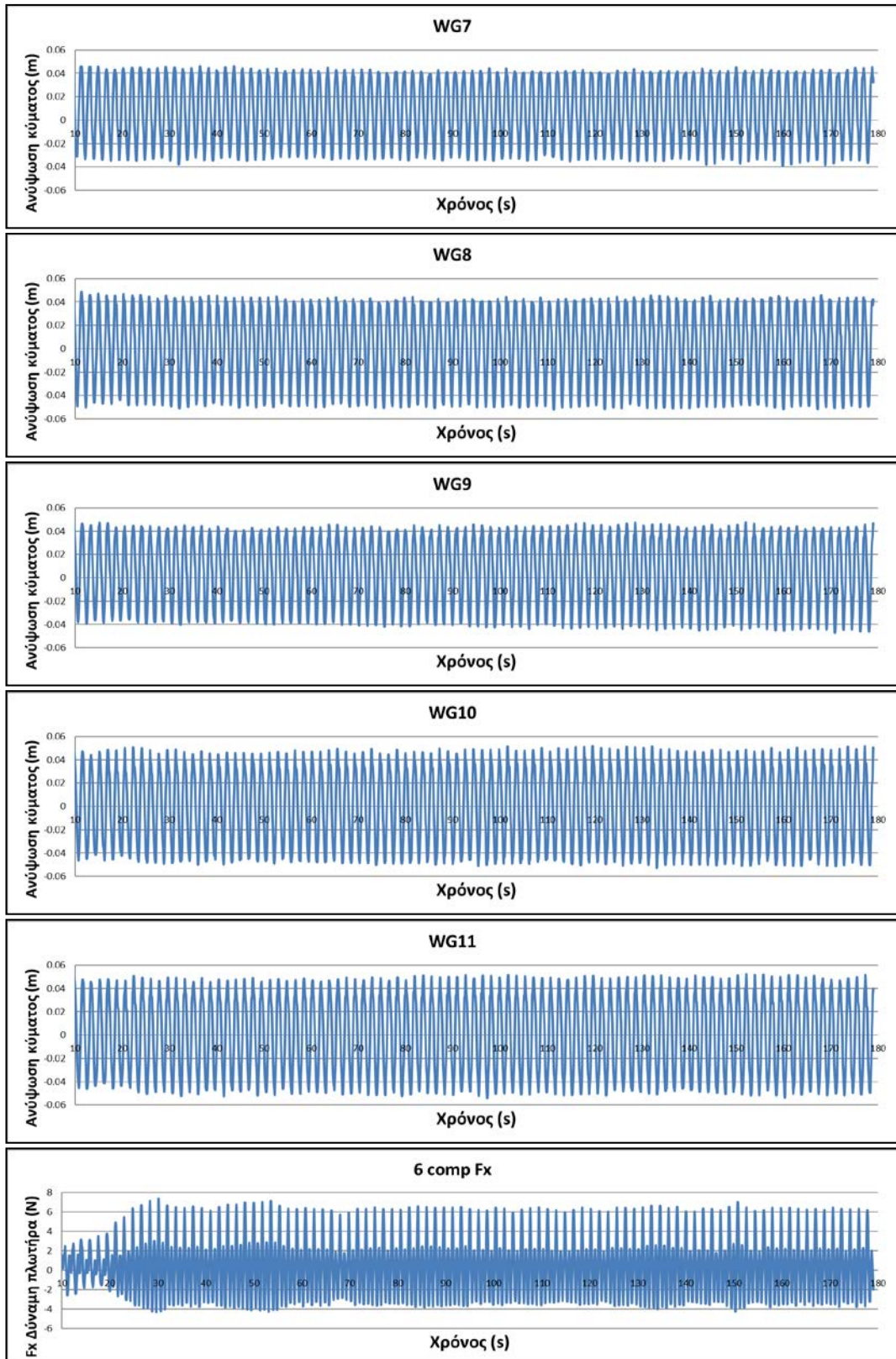
5.1 Παρουσίαση πειραματικών μετρήσεων

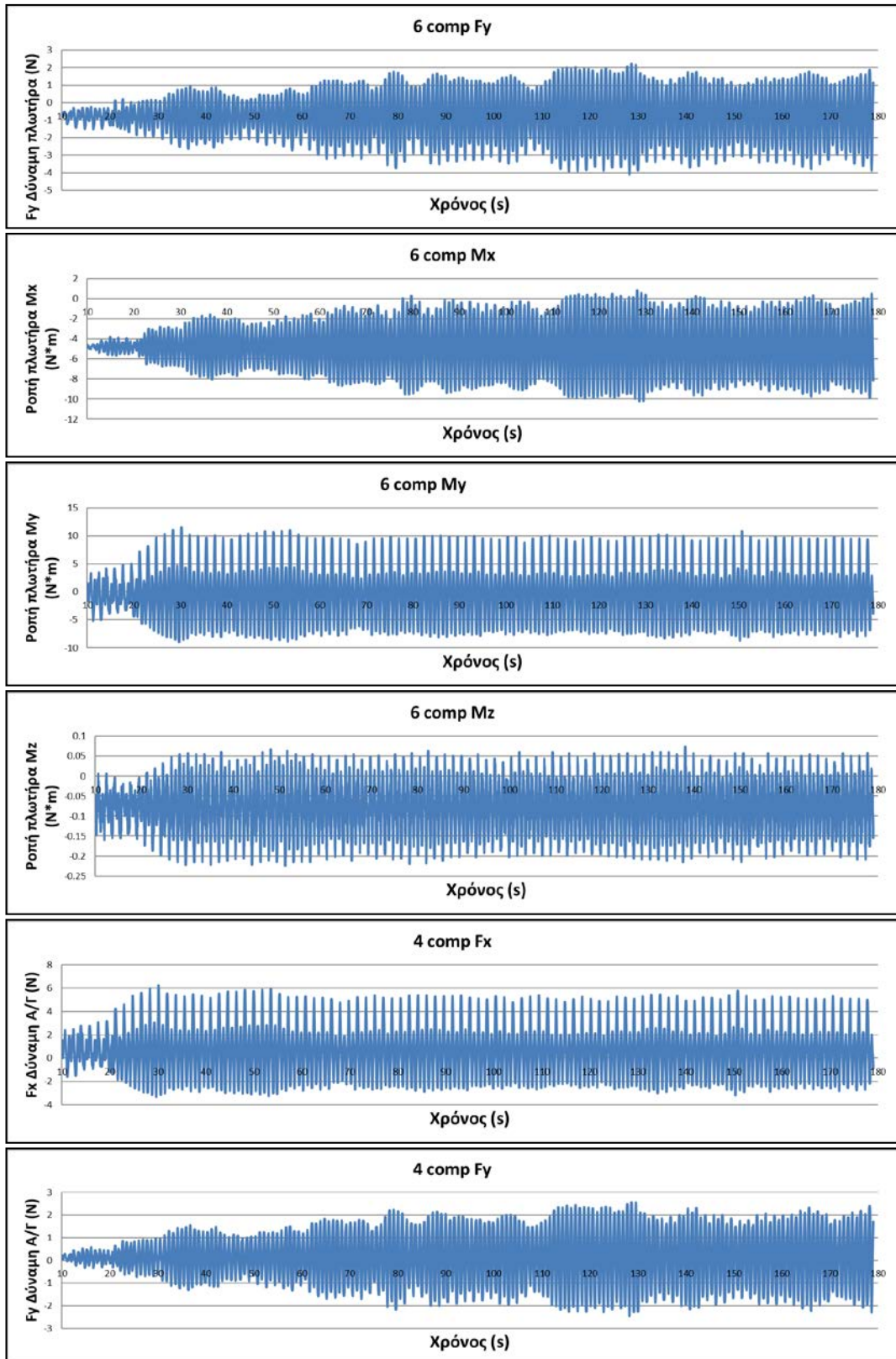
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων για κανονικούς κυματισμούς. Η συνολική τους παρουσίαση παρατίθεται στο Παράρτημα 1.

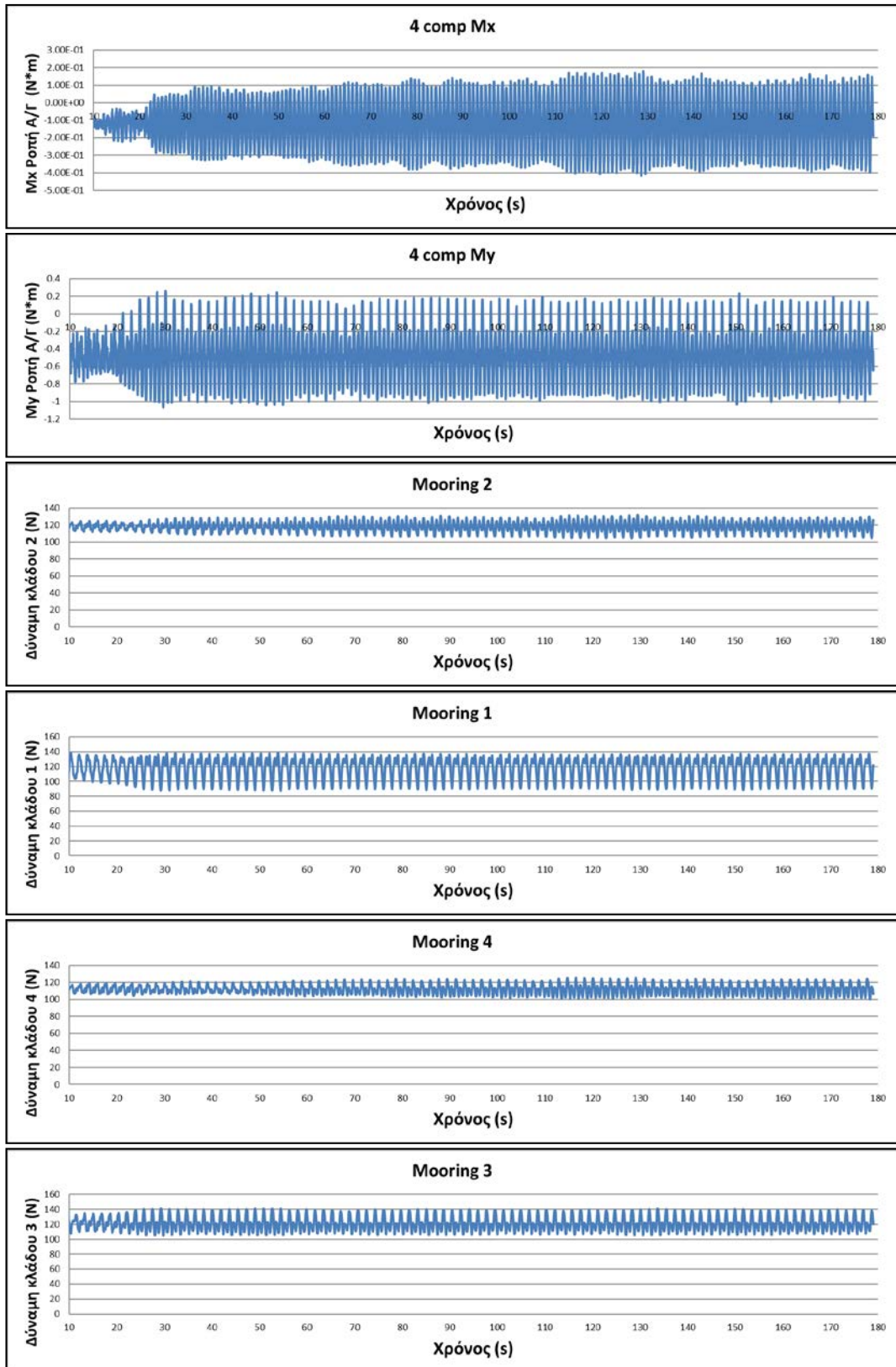
Πείραμα 1278

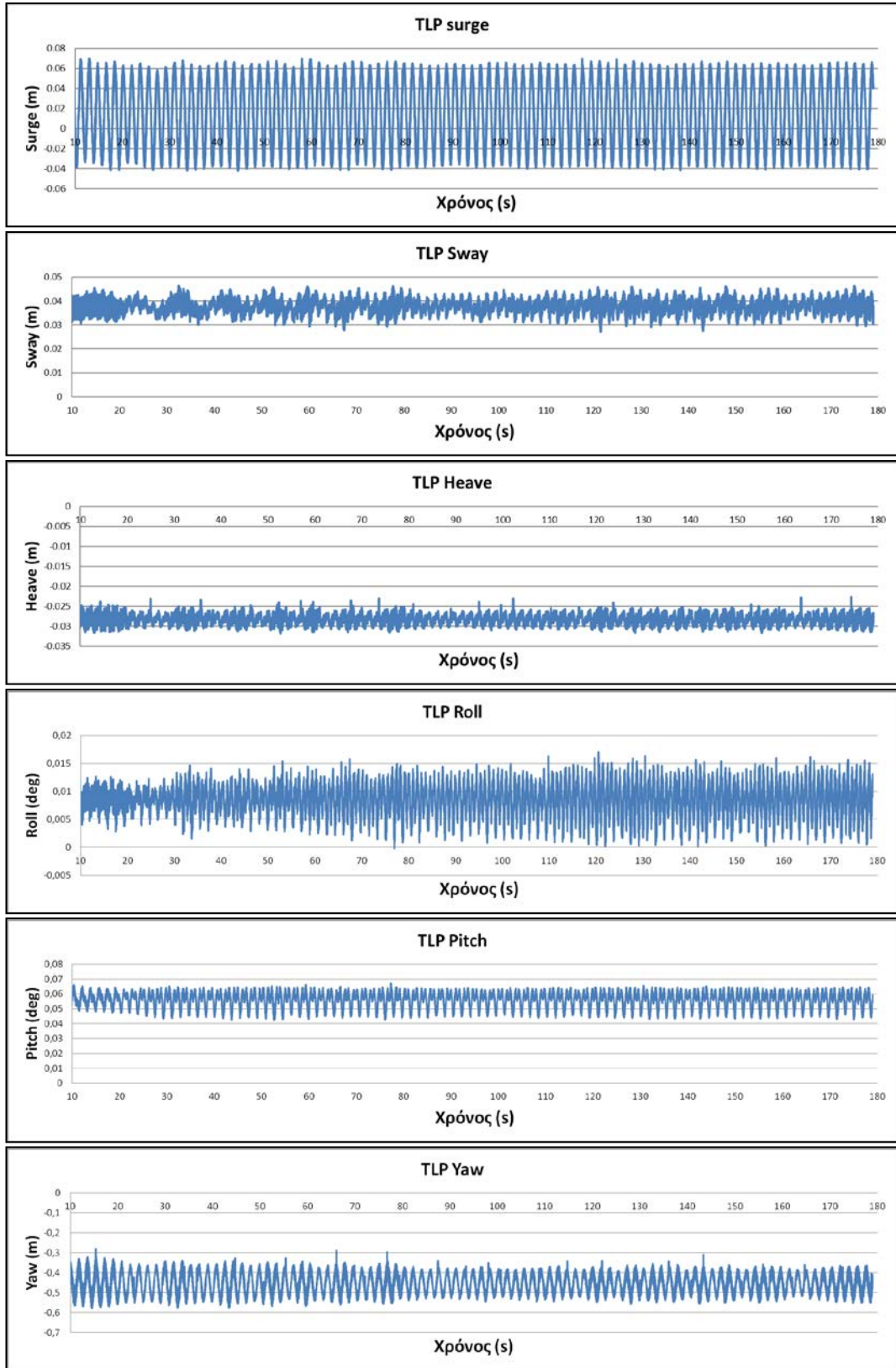
Ύψος Κύματος (m)				0,1			
Περίοδος Κύματος (s)				1,8			
0/20 (Degrees)				0			
Rotation/No Rotation				NR			
	WG1 (m)	WG2 (m)	WG3 (m)	WG4 (m)	WG5 (m)	WG6 (m)	WG7 (m)
MIN	-0,0744	-0,0675	-0,0509	-0,0584	-0,0483	-0,0601	-0,0393
MAX	0,0586	0,0710	0,0538	0,0565	0,0588	0,0561	0,0464
MEDIAN	-0,0088	-0,0020	0,0042	0,0019	-0,0039	-0,0013	0,0081
MEAN	-0,0025	-0,0002	0,0013	0,0004	-0,0004	-0,0003	0,0026
STDEV	0,0414	0,0425	0,0333	0,0353	0,0314	0,0358	0,0266
	WG8 (m)	WG9 (m)	WG10 (m)	WG11 (m)	6Comp Fx (N)	6Comp Fy (N)	
MIN	-0,0519	-0,0474	-0,0530	-0,0542	-4,2905	-4,0807	
MAX	0,0490	0,0504	0,0520	0,0526	7,3522	2,2200	
MEDIAN	0,0054	0,0077	0,0022	0,0018	0,3211	-0,7476	
MEAN	0,0007	0,0019	0,0002	0,0003	0,1458	-0,2561	
STDEV	0,0314	0,0291	0,0326	0,0335	2,7286	1,3775	
	6Comp Fz (N)	6Comp Mx	6Comp My (N·m)	6Comp Mz (N·m)	4Comp Fx (N)	4Comp Fy (N)	
MIN	34,3768	-10,2278	-8,8842	-0,2250	-3,3172	-2,4509	
MAX	34,3768	0,8153	11,5927	0,0729	6,2418	2,5738	
MEDIAN	34,3768	-4,8181	-0,4339	-0,0776	0,6207	0,1358	
MEAN	11,3309	-1,5811	-0,1074	-0,0257	0,2230	0,0416	
STDEV	0,0000	2,6006	4,5874	0,0626	2,0651	1,1486	
	4Comp Mx (N·m)	4Comp My	Mooring2 (N)	Mooring1 (N)	Mooring4 (N)	Mooring3 (N)	
MIN	-0,4160	-1,0660	104,3792	87,7784	100,3147	104,5675	
MAX	0,1798	0,2580	132,1592	138,0526	125,4191	140,8323	
MEDIAN	-0,1197	-0,4891	118,5231	123,9797	112,0428	120,0641	
MEAN	-0,0396	-0,1601	39,1138	39,1497	37,0884	40,1317	
STDEV	0,1412	0,2755	5,9880	13,8296	5,3900	9,3737	
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)	Yaw (Deg)	
MIN	-0,0414	0,0274	-0,0318	-0,0001	0,0426	-0,5746	
MAX	0,0695	0,0464	-0,0227	0,0170	0,0670	-0,2793	
MEDIAN	0,0161	0,0378	-0,0283	0,0087	0,0573	-0,4495	
MEAN	0,0048	0,0125	-0,0093	0,0028	0,0186	-0,1482	
STDEV	0,0343	0,0031	0,0014	0,0030	0,0053	0,0504	





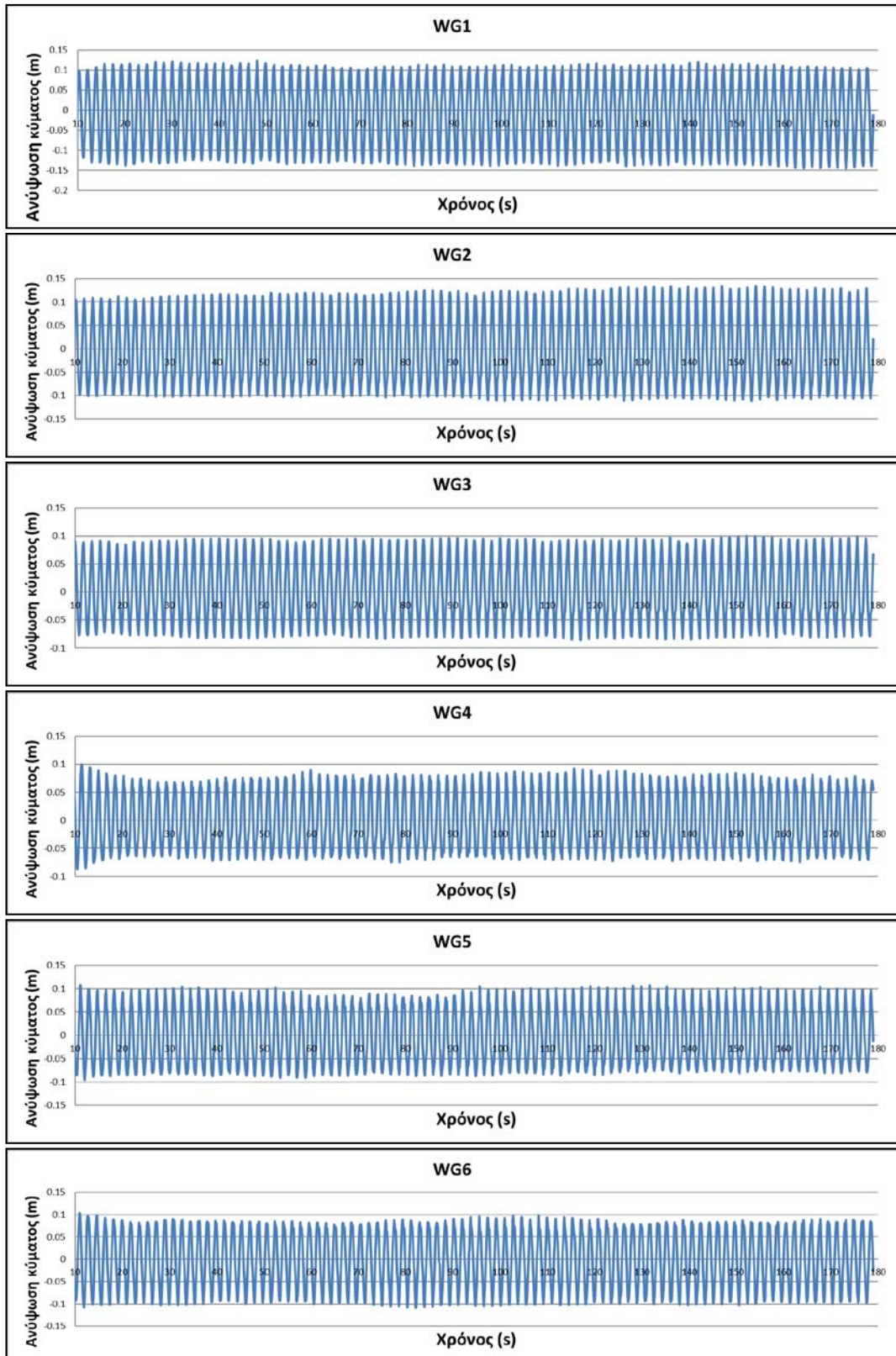


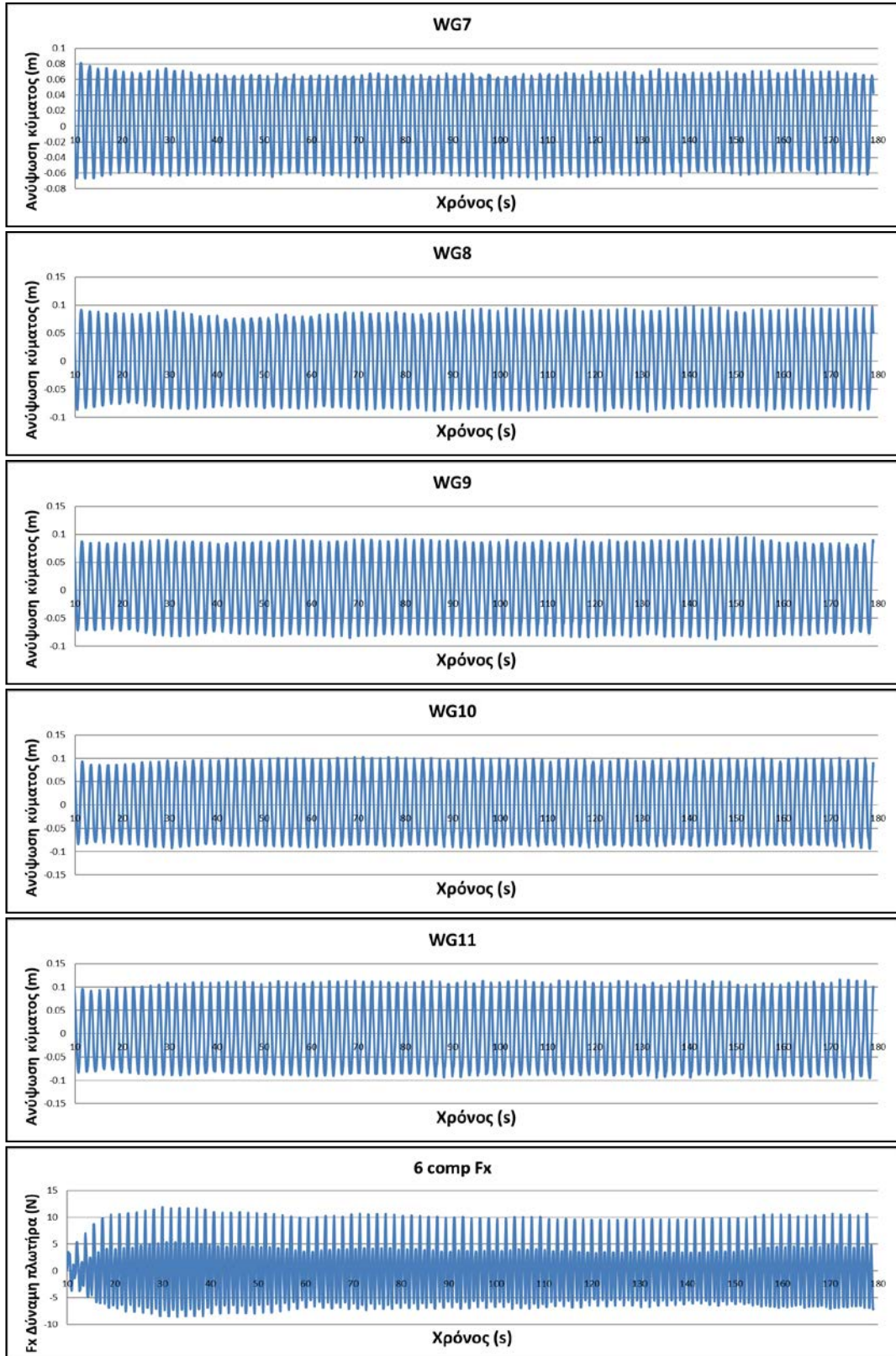


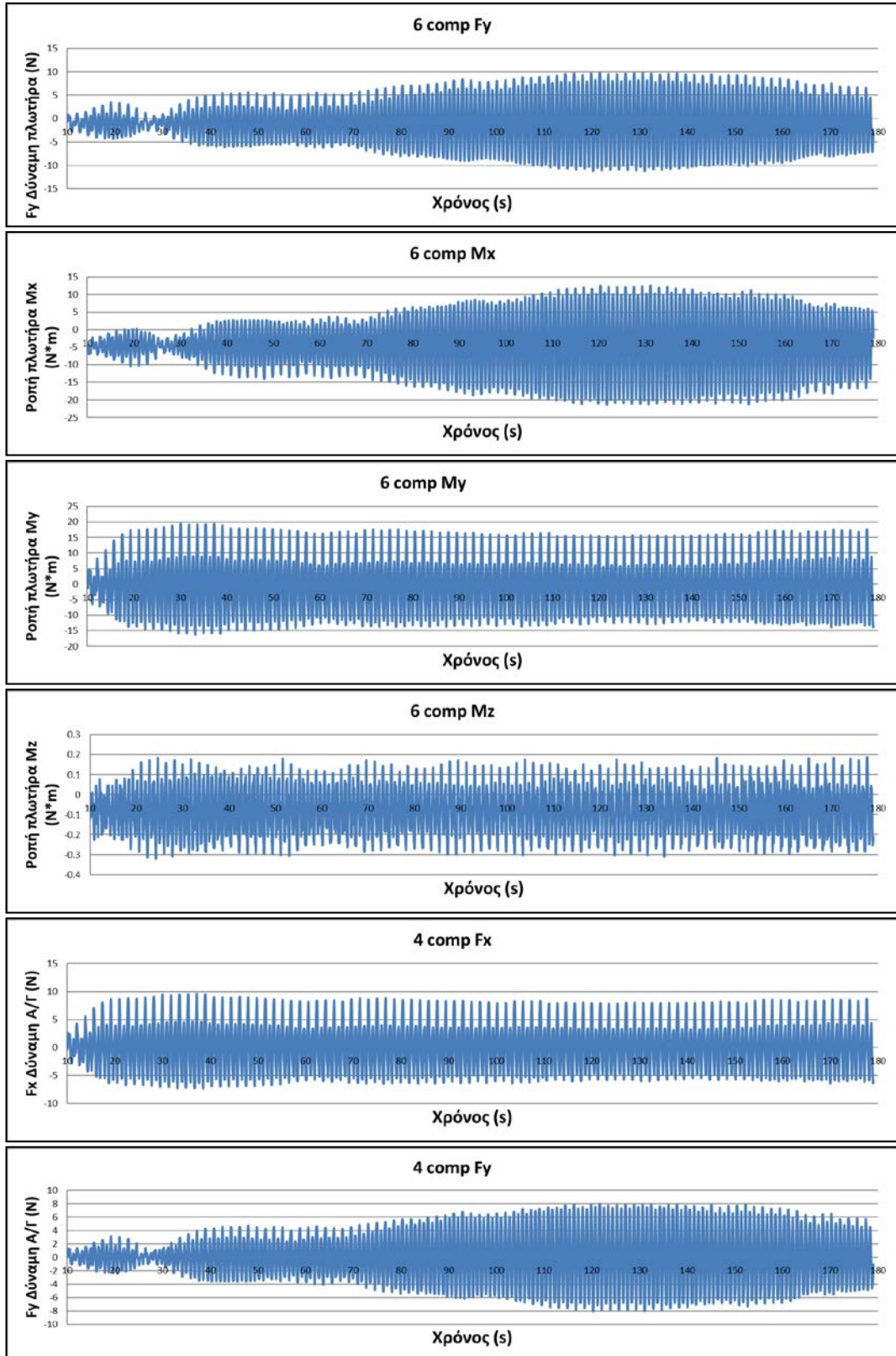


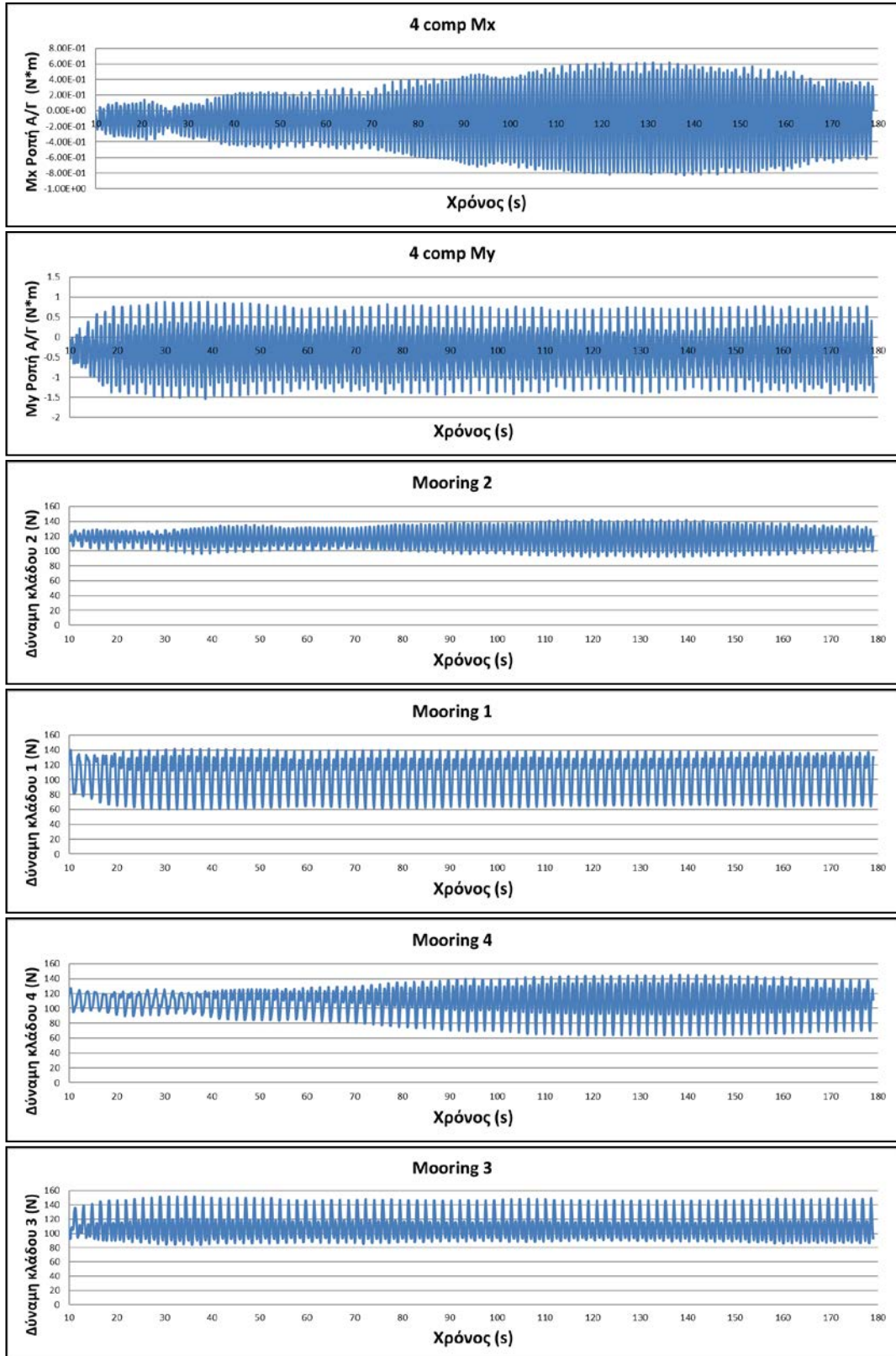
Πείραμα 1291

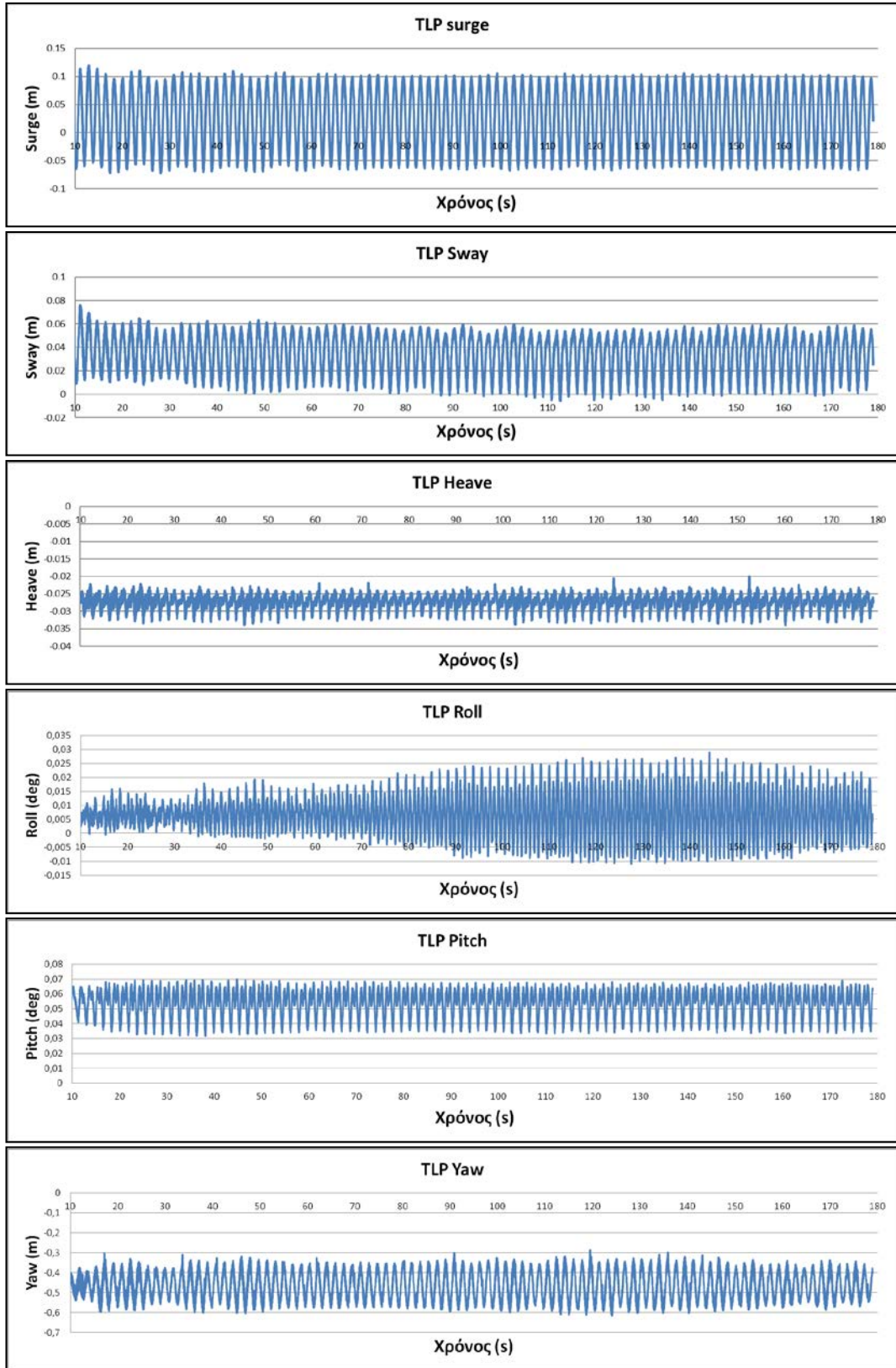
Υψος Κύματος (m)		0,2					
Περίοδος Κύματος (s)		1,8					
0/20 (Degrees)		20					
Rotation/No Rotation		NR					
	WG1 (m)	WG2 (m)	WG3 (m)	WG4 (m)	WG5 (m)	WG6 (m)	WG7 (m)
MIN	-0,1453	-0,1112	-0,0860	-0,0874	-0,0957	-0,1089	-0,0680
MAX	0,1221	0,1342	0,1008	0,0996	0,1079	0,1031	0,0816
MEDIAN	-0,0054	-0,0085	-0,0003	-0,0049	-0,0046	-0,0013	0,0113
MEAN	-0,0027	-0,0003	0,0012	-0,0001	-0,0007	-0,0009	0,0025
STDEV	0,0821	0,0748	0,0569	0,0504	0,0596	0,0629	0,0459
	WG8 (m)	WG9 (m)	WG10 (m)	WG11 (m)	6Comp Fx (N)	6Comp Fy (N)	
MIN	-0,0900	-0,0881	-0,0939	-0,0966	-8,5694	-11,1501	
MAX	0,0982	0,0951	0,1037	0,1158	11,8922	9,7651	
MEDIAN	0,0025	0,0053	-0,0013	-0,0044	0,2160	-0,9934	
MEAN	0,0006	0,0018	0,0002	0,0003	0,1089	-0,3169	
STDEV	0,0578	0,0563	0,0649	0,0674	4,8743	4,9230	
	6Comp Fz (N)	6Comp Mx	6Comp My (N·m)	6Comp Mz (N·m)	4Comp Fx (N)	4Comp Fy (N)	
MIN	34,3768	-21,3397	-16,1611	-0,3210	-7,4075	-8,0353	
MAX	34,3768	12,5870	19,4947	0,1882	9,5954	7,9938	
MEDIAN	34,3768	-4,5485	-0,3527	-0,0744	0,0571	0,0409	
MEAN	11,3309	-1,5201	-0,0793	-0,0257	0,0375	0,0277	
STDEV	0,0000	7,8573	8,3750	0,1122	4,0666	3,7548	
	4Comp Mx (N·m)	4Comp My	Mooring2 (N)	Mooring1 (N)	Mooring4 (N)	Mooring3 (N)	
MIN	-0,8250	-1,5389	92,0781	60,7149	63,5788	84,0225	
MAX	0,6147	0,8759	142,2351	141,4599	145,1657	151,6282	
MEDIAN	-0,1132	-0,3284	117,9986	116,5928	113,5003	108,5053	
MEAN	-0,0388	-0,1059	39,0245	35,8893	36,5091	36,7184	
STDEV	0,3268	0,5235	11,7539	23,4565	18,3098	17,0443	
	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (Deg)	Pitch (Deg)	Yaw (Deg)	
MIN	-0,0727	-0,0057	-0,0340	-0,0108	0,0318	-0,6124	
MAX	0,1193	0,0774	-0,0202	0,0289	0,0699	-0,2867	
MEDIAN	0,0259	0,0385	-0,0271	0,0068	0,0555	-0,4621	
MEAN	0,0075	0,0121	-0,0090	0,0023	0,0178	-0,1520	
STDEV	0,0563	0,0174	0,0021	0,0077	0,0090	0,0685	







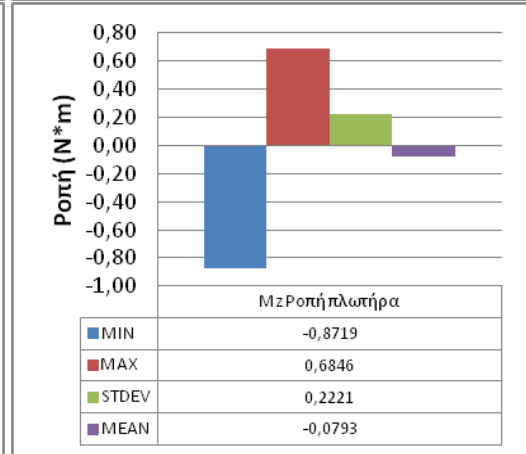
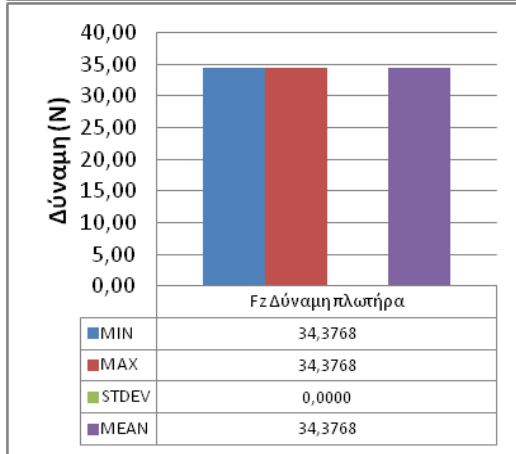
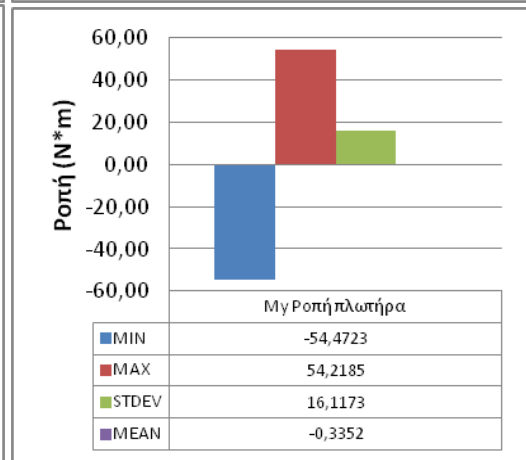
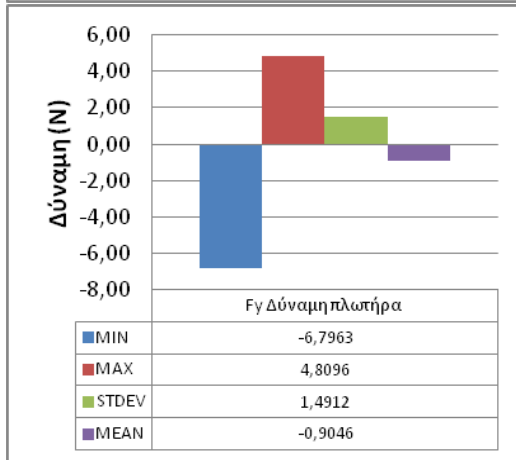
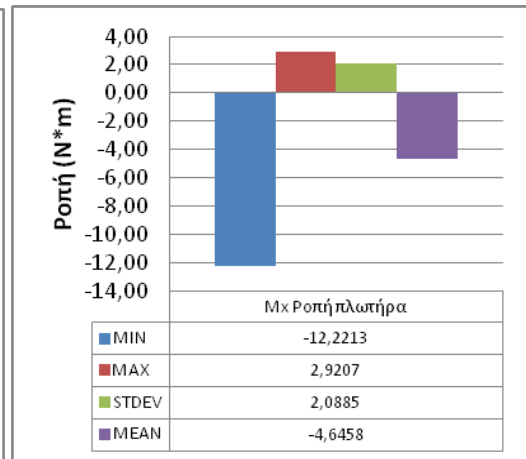
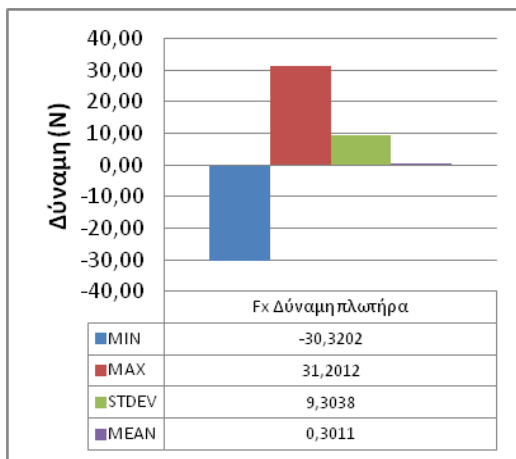


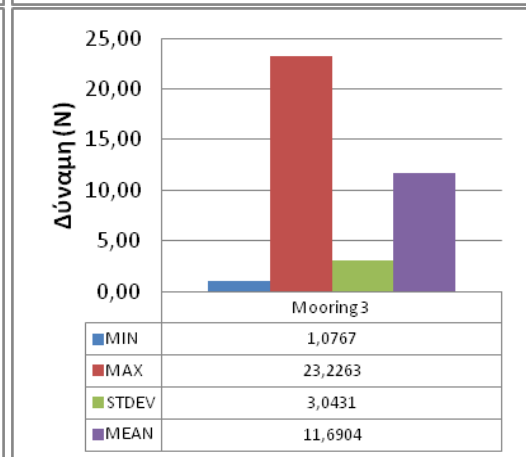
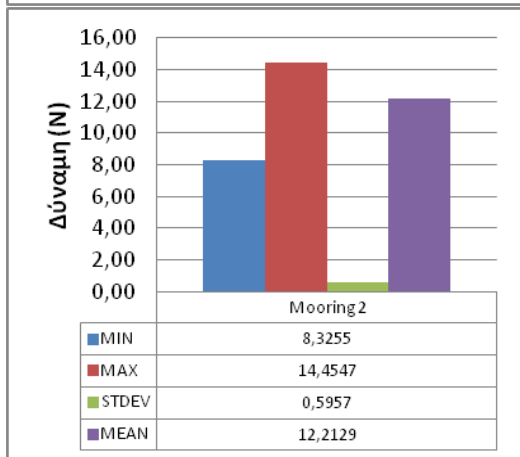
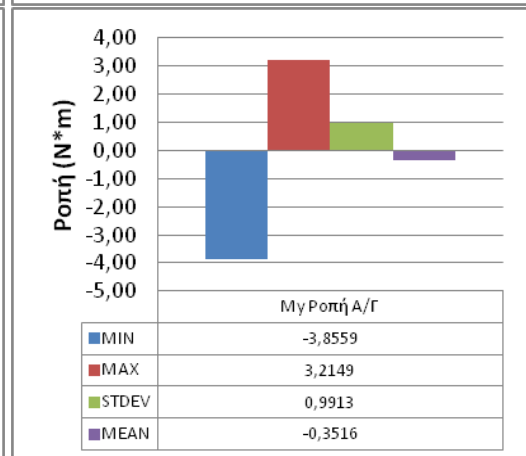
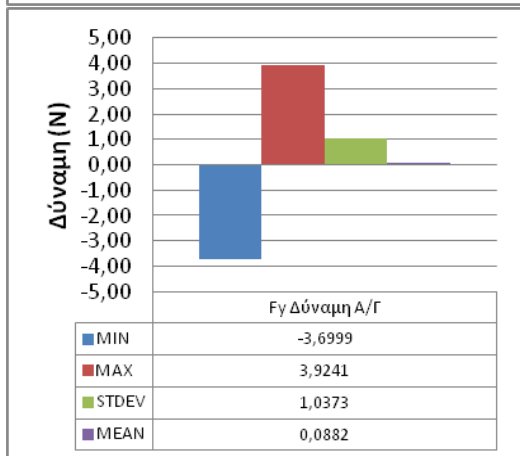
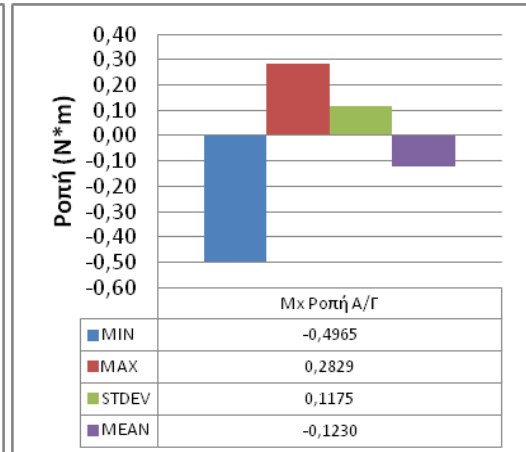
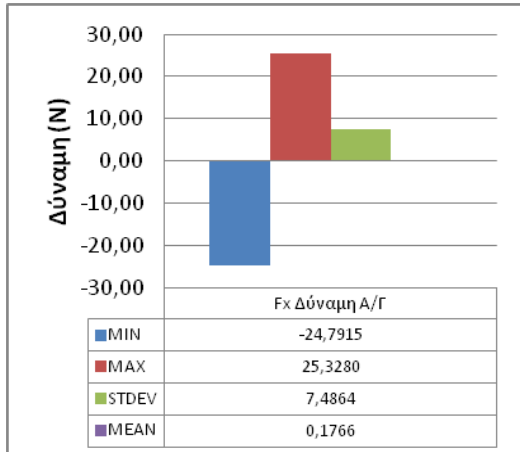


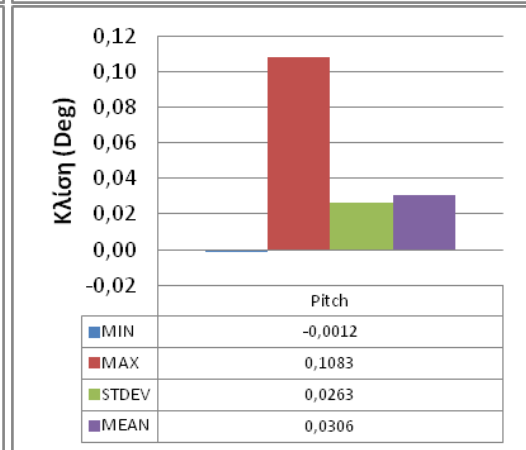
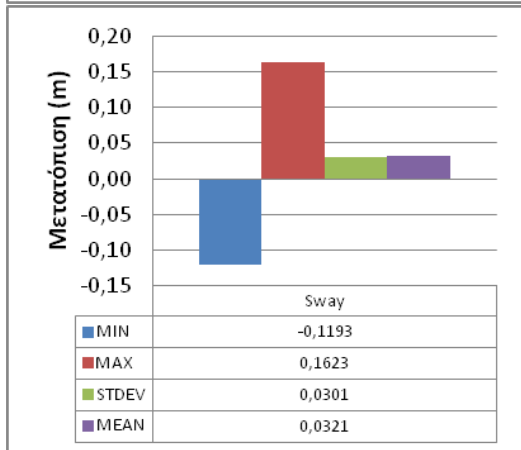
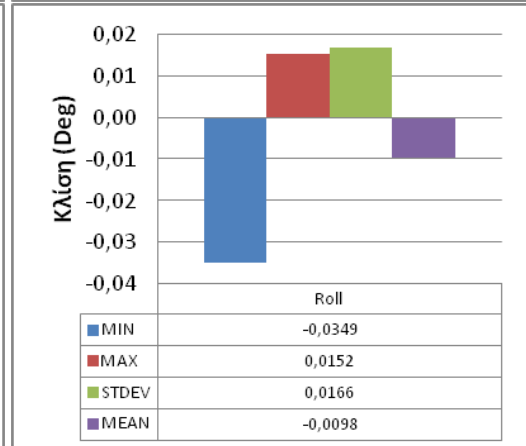
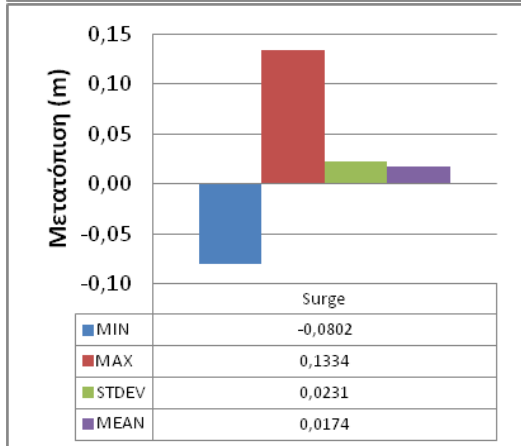
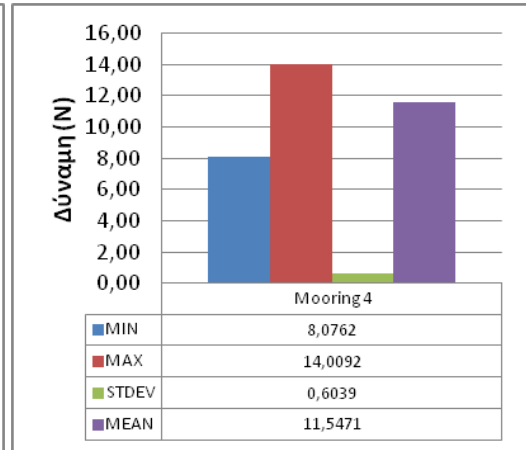
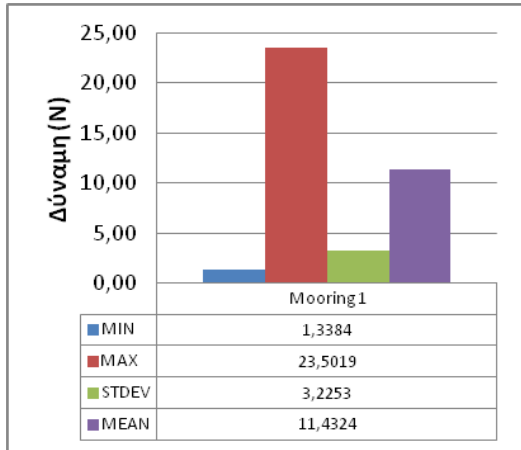
Ακολουθεί ενδεικτική παρουσίαση της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων για τυχαίους κυματισμούς. Η συνολική τους παρουσίαση παρατίθεται στο Παράρτημα 2.

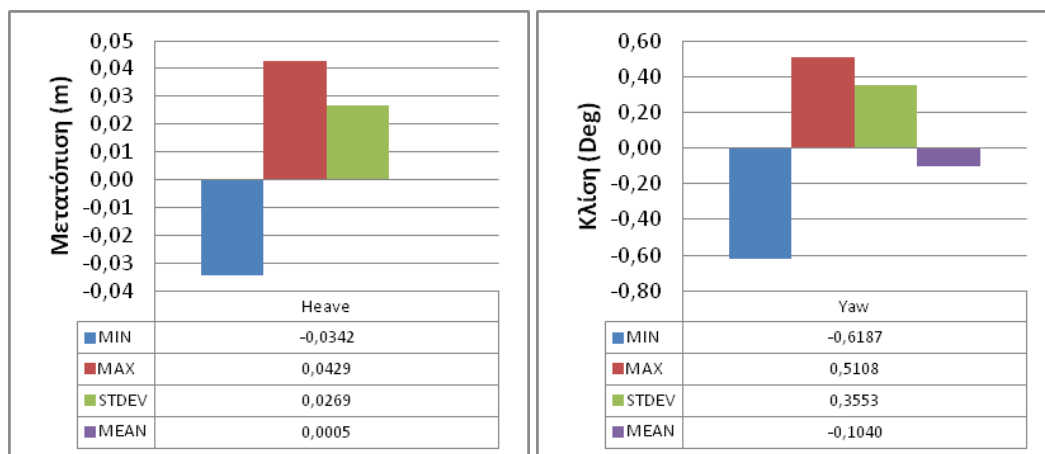
Πείραμα 1283-1284

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









5.2 Στατιστική ανάλυση πειραματικών μετρήσεων

Στο επόμενο βήμα της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων έγινε στατιστική ανάλυση των μετρημένων μεγεθών. Βασικό εργαλείο της στατιστικής ανάλυσης στον τομέα του σχεδιασμού πλοίων και πλωτών κατασκευών είναι ο συντελεστής RAO (Response Amplitude Operator), που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την πιθανή συμπεριφορά πλωτών σωμάτων σε κατάσταση θάλασσας. Ο RAO προκύπτει είτε από πειραματικές δοκιμές πρότυπων μοντέλων, είτε από τρεξίματα ειδικών προγραμμάτων CFD.

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.^{[48][49]}

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

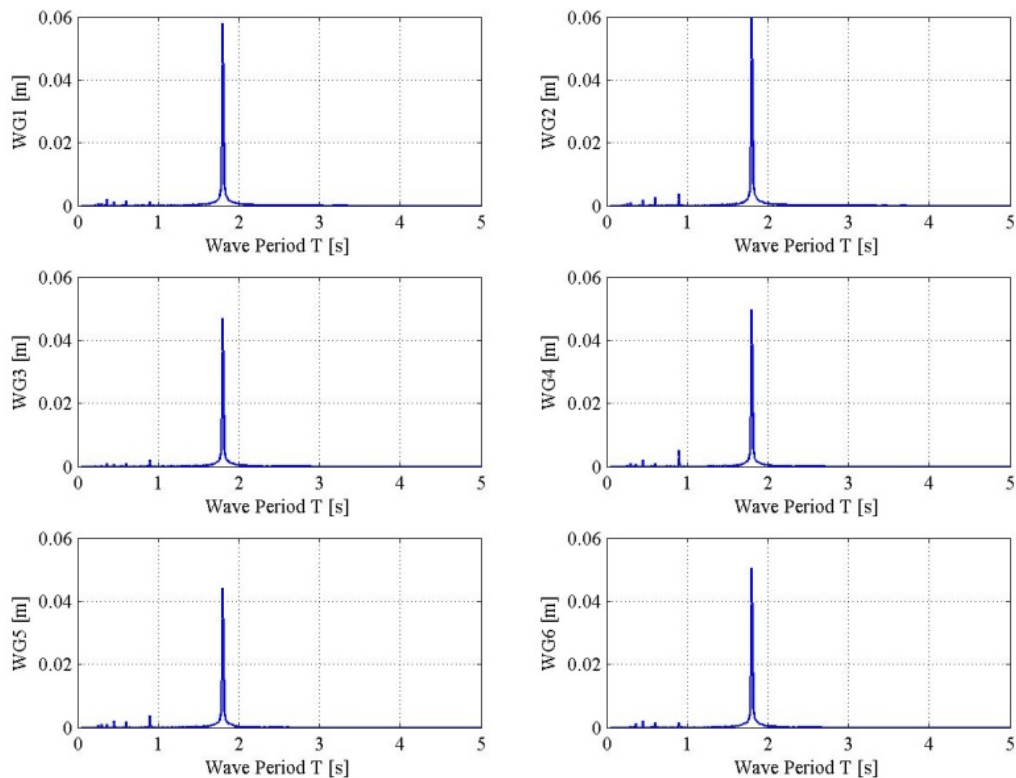
1. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για την αρχή της πειραματικής μέτρησης (5s για τους απλούς αρμονικούς κυματισμούς και 1s στο ήρεμο νερό). Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: Zmin, Zmax, Zmean, Zstd.

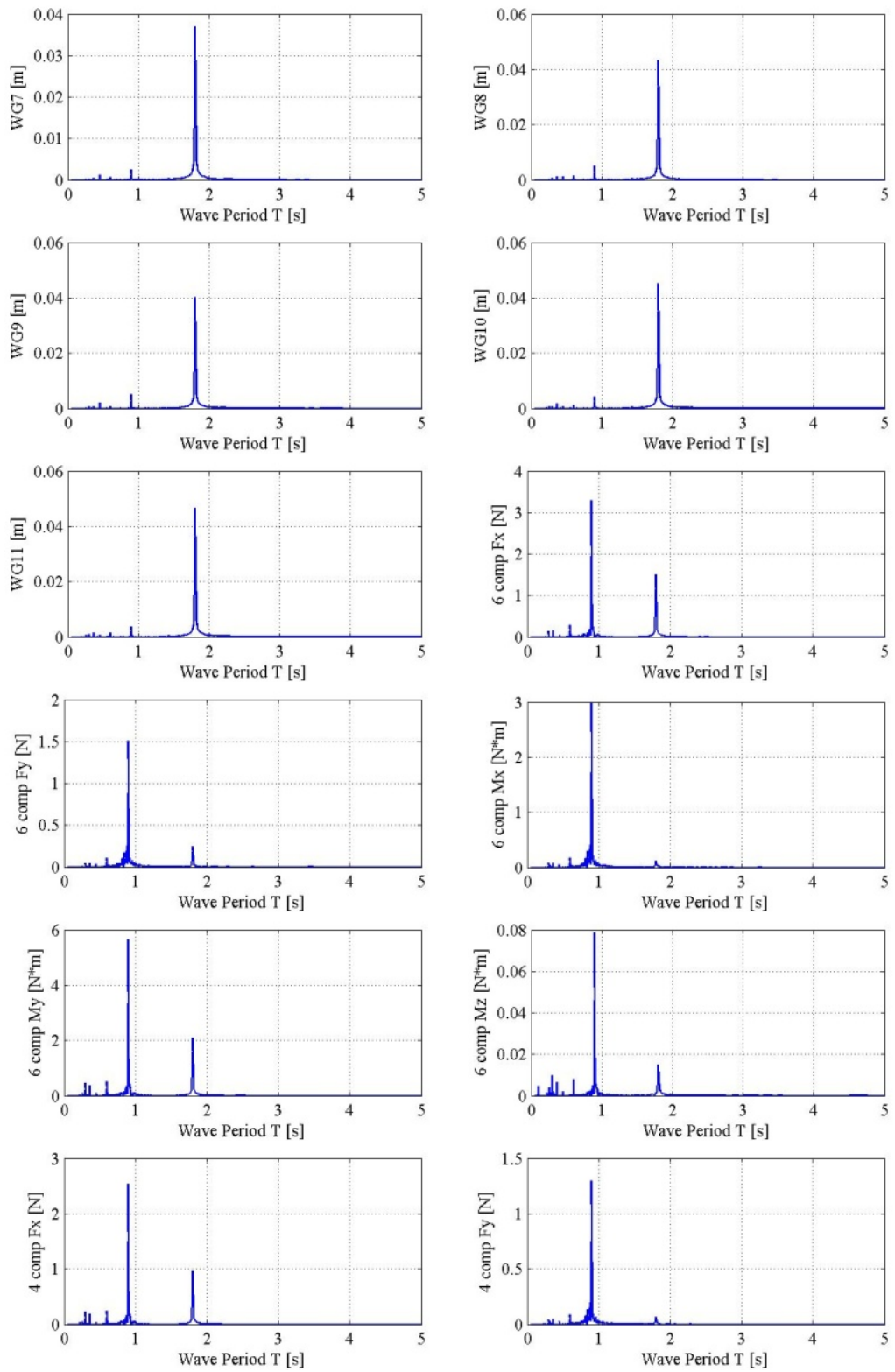
2. Min, Max, Mean, Std σε κάθε κανάλι για επιλεγμένο διάστημα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα: Vmin, Vmax, Vmean, Vstd.

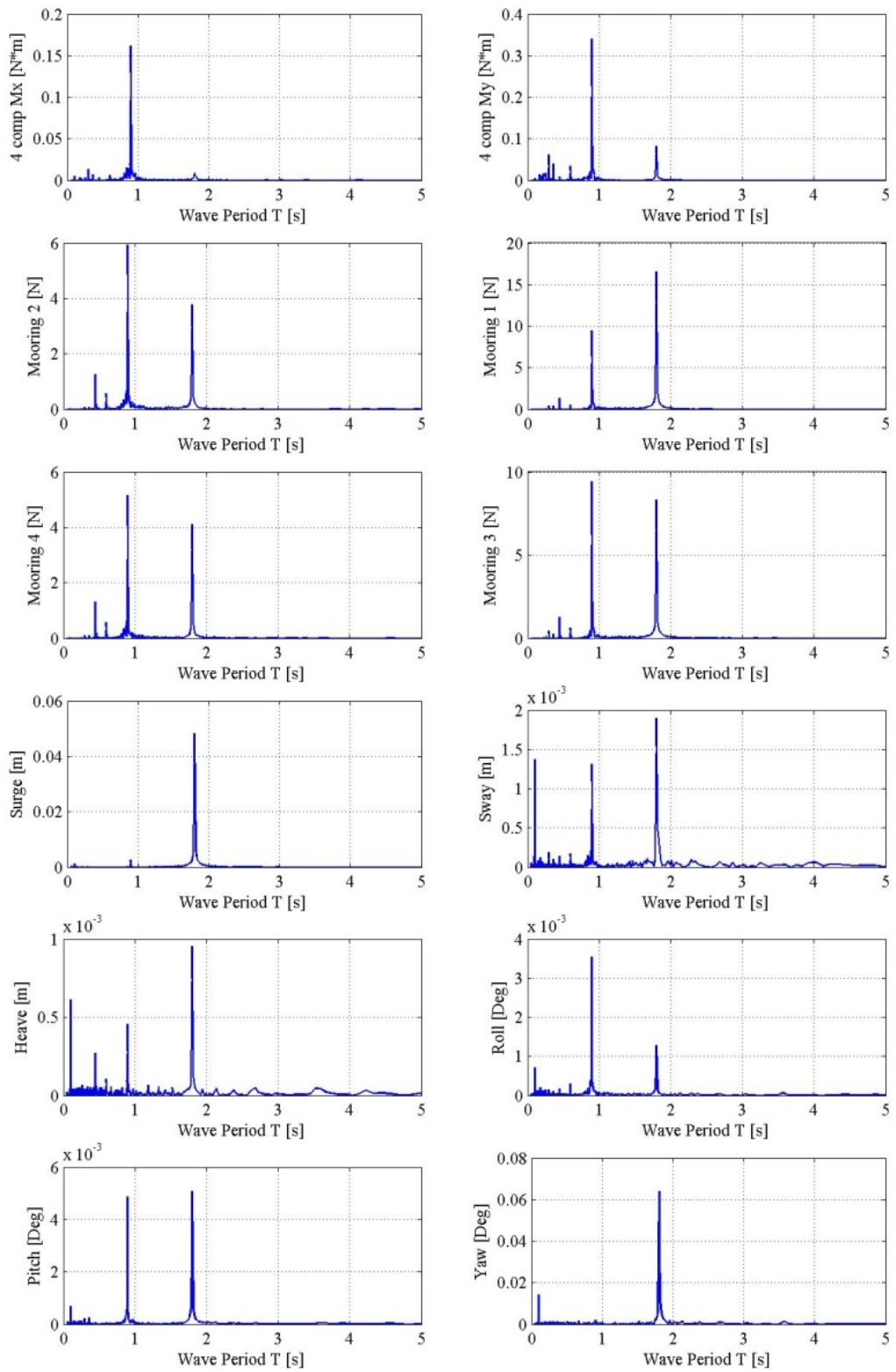
3. Οι μέσες τιμές στην αρχή πρέπει να αφαιρεθούν από τις μέσες τιμές κατά τη διάρκεια του επιλεγμένου διαστήματος ως εξής: Vmean-Zmean.

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 3.

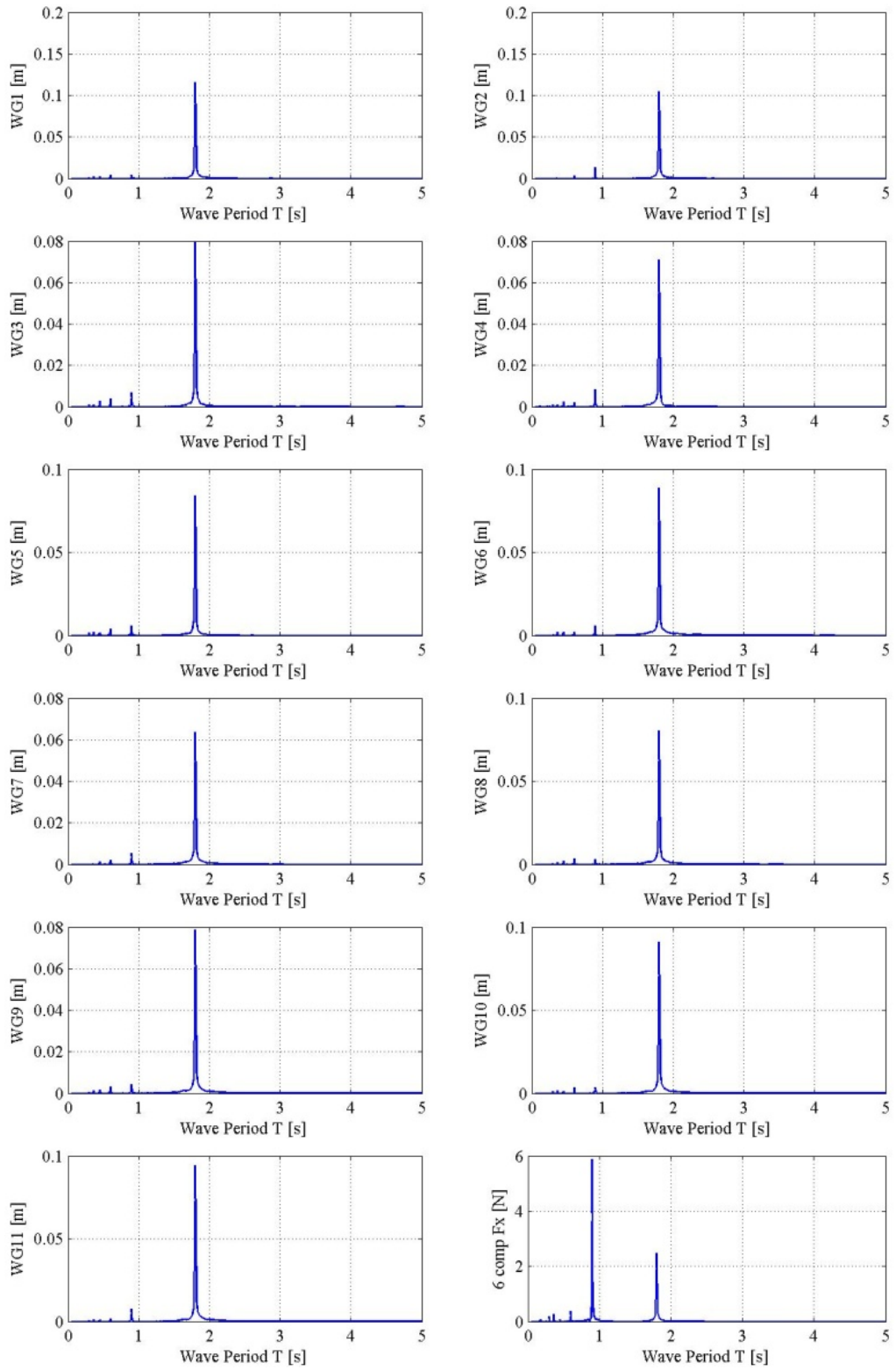
Πείραμα 1278

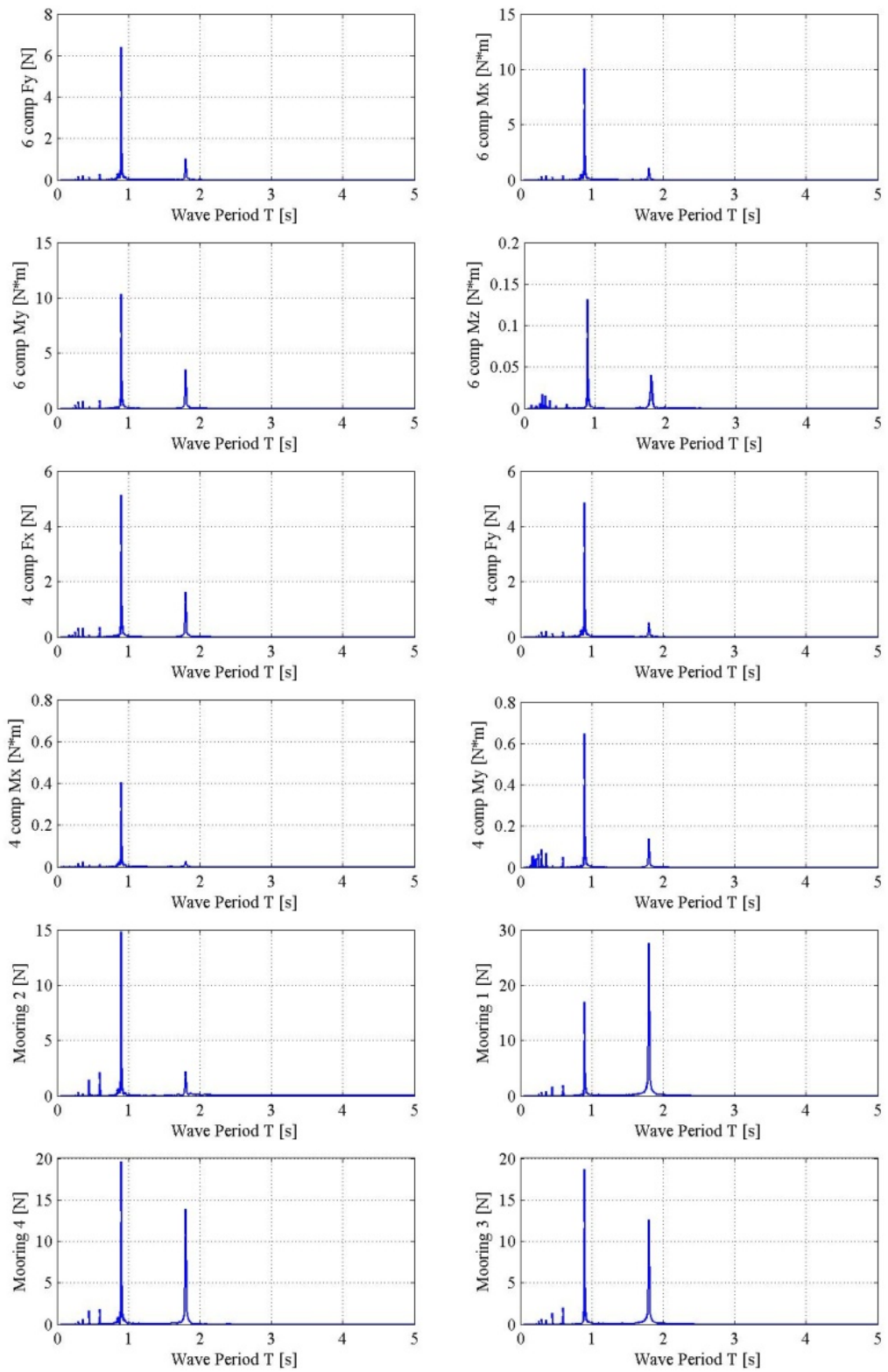


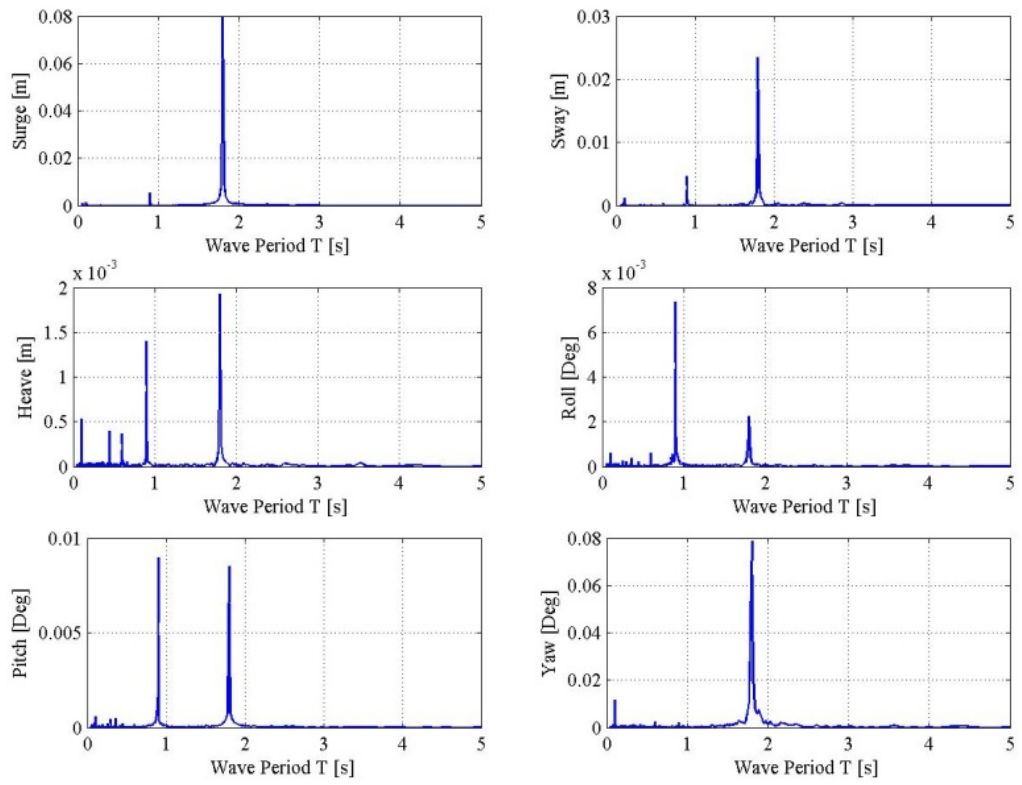




Πείραμα 1291







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 5.1 μερικά από αυτά όπως προέκυψαν από τους ανάλογους υπολογισμούς.

FLOATING WIND TURBINE - TLP CONFIGURATION KOZIRIS with moorings

1	00705040001010600030400000000							
2	200.0	2.000	1000.0	1.025	9.81			
7	44.000	10.12	3.300	0.000				
	000000 0							
	0100000100	-27.0	0.000	-47.89				
	01							
	0100000100	0.0000	-27.00	-47.89				
	02							
	0100000100	27.00	0.0000	-47.89				
	03							
	0100000100	0.000	27.000	-47.89				
	04							
	0100060000	0.000	0.0000	12.000				
16	020304050607							
	0100040000	0.000	0.0000	87.600				
18	03040506							
19	0101							
20	0.000	0.000	-23.945	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	-40.61	8606.44	571600.0	571600.0	361400.0			
24	0202							
	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	43.40	347.75	674777.27	674777.27	1821.592			
25	0302							
	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			
26	0402							
	-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			
27	0502							
	-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			
28	0502							
	-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			
29	0502							
	-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			
	01							
30	-27.00	0.000	-47.89					
31	51.385	51.385	16528.					
32	0.000	0.000	7816.1					
	01							
	0.000	-27.00	-47.89					
33	51.385	51.385	20928.					
	0.000	0.000	7816.1					
	01							
	27.00	0.0000	-47.89					
34	51.385	51.385	18464.					
	0.000	0.000	7816.1					
	01							
	0.000	27.00	-47.89					
35	51.385	51.385	20928.					
	0.000	0.000	7816.1					

Εικόνα 5.1: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων στο SemiSub

Όπου:

1) Περιέχει κατά σειρά: πλήθος στοιχείων, τύποι διαφορετικών στοιχείων, πλήθος ελατηρίων, στοιχεία αγκύρωσης, κατανεμημένες μάζες, πλήθος διατμητικών δυνάμεων, αλληλεπίδραση, πλήθος στοιχείων εξόδου, 2) Βάθος αγκύρωσης κύματος, 3) Ύψος κύματος, 4) Λόγος H/λ, 5) Πυκνότητα νερού, 6) Επιτάχυνση της βαρύτητας, 7) Σημαντικό ύψος κύματος, 8) Περίοδος κυματισμού, 9) Παράγοντας γ στο φάσμα JONSWAP, 10) Γωνία πρόσπτωσης κυματισμού, 11-14) Συντεταγμένες 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου} και 4^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 15) Συντεταγμένες 6 comp, 16) Στοιχεία τομής στο σημείο του 6 comp, 17) Συντεταγμένες 4 comp, 18) Στοιχεία τομής στο σημείο του 4 comp, 19) Στοιχεία πλωτήρα, 20) Συντεταγμένες κέντρου πλωτήρα, 21) Κέντρο μάζας από SWL, 22) Μάζα πλωτήρα, 23) I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} πλωτήρα, 24) Στοιχεία Tower, 25) Στοιχεία Nacelle, 26) Στοιχεία Hub, 27-29) Στοιχεία Blades 1-3, 30) Συντεταγμένες 1^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 31) K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 1^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 32) Προένταση στις ανάλογες διευθύνσεις, 33) Στοιχεία 2^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 34) Στοιχεία 3^{ου} κλάδου αγκύρωσης, 35) Στοιχεία 4^{ου} κλάδου αγκύρωσης.

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:

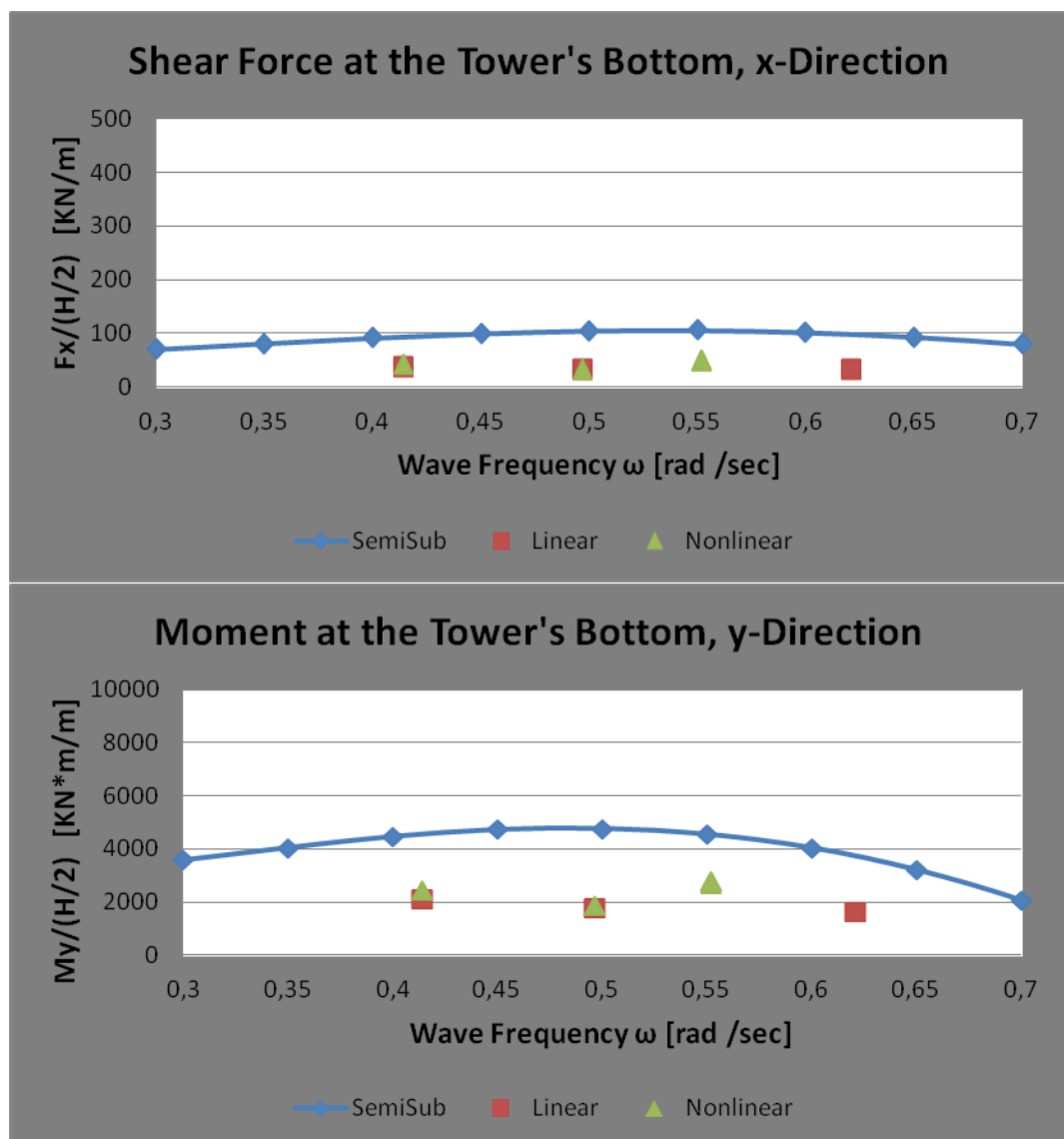
$$x' = \frac{x}{\left(\frac{H}{2}\right)}$$

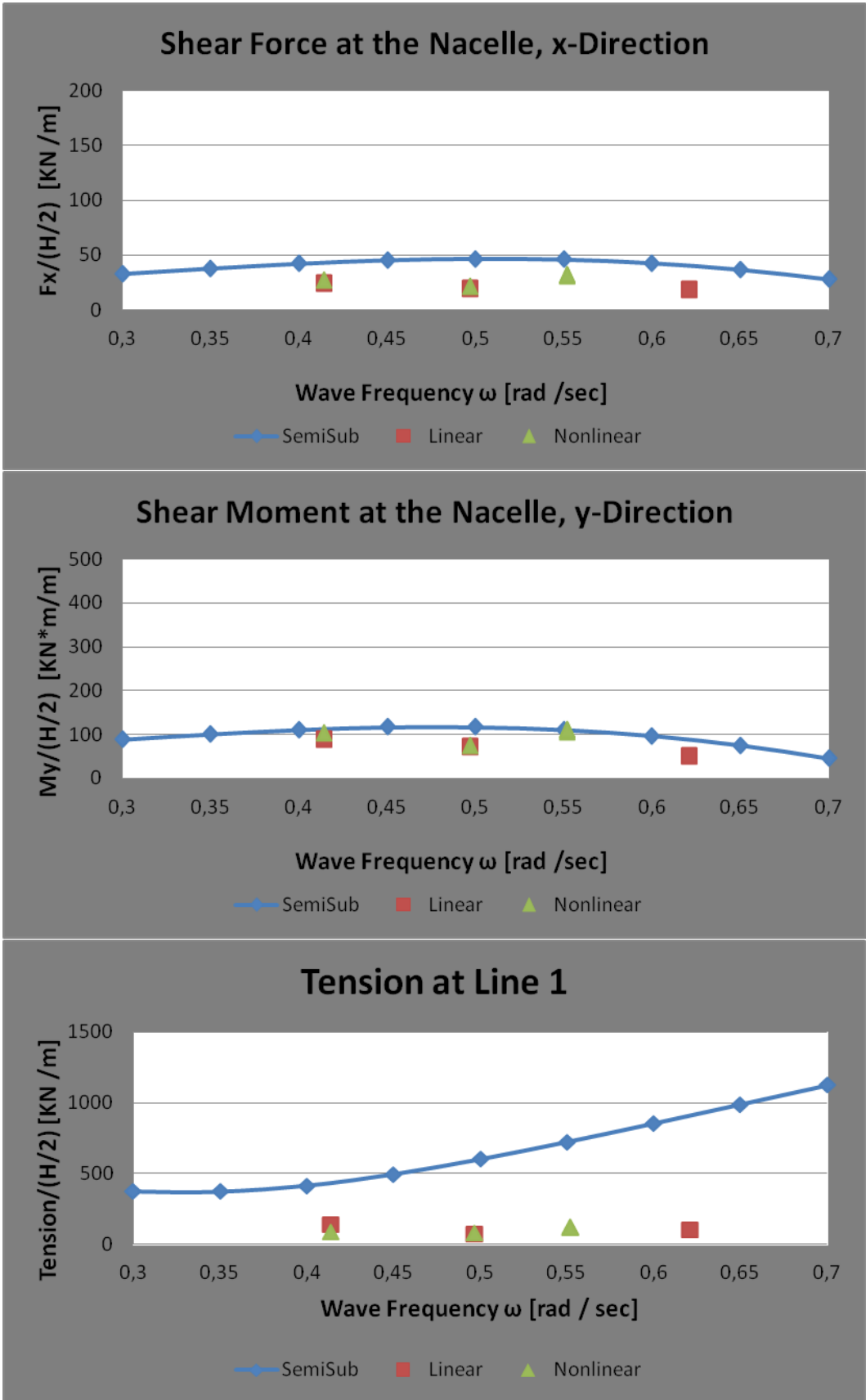
- Για τις περιστροφές roll, pitch και yaw:

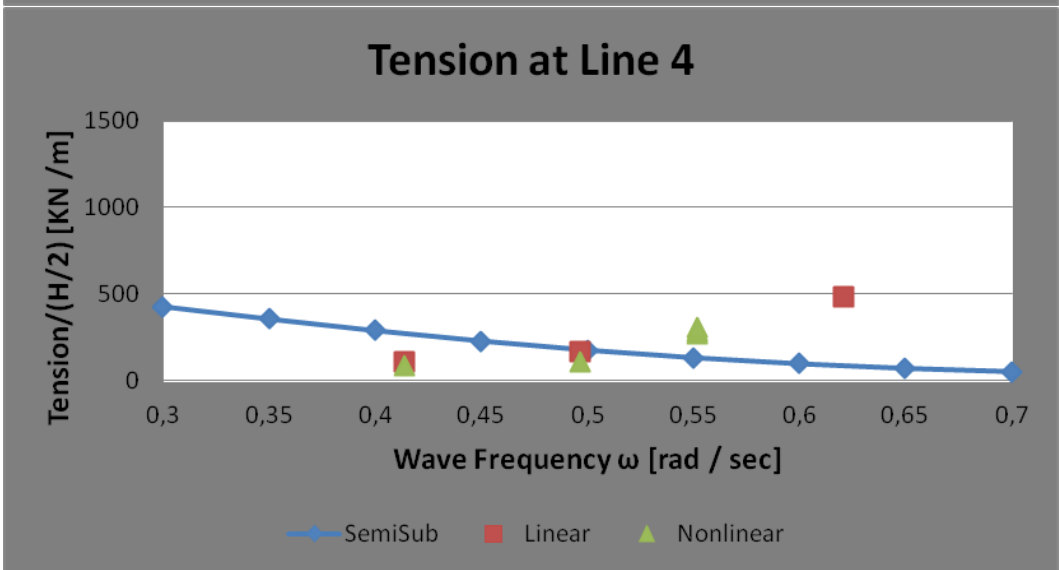
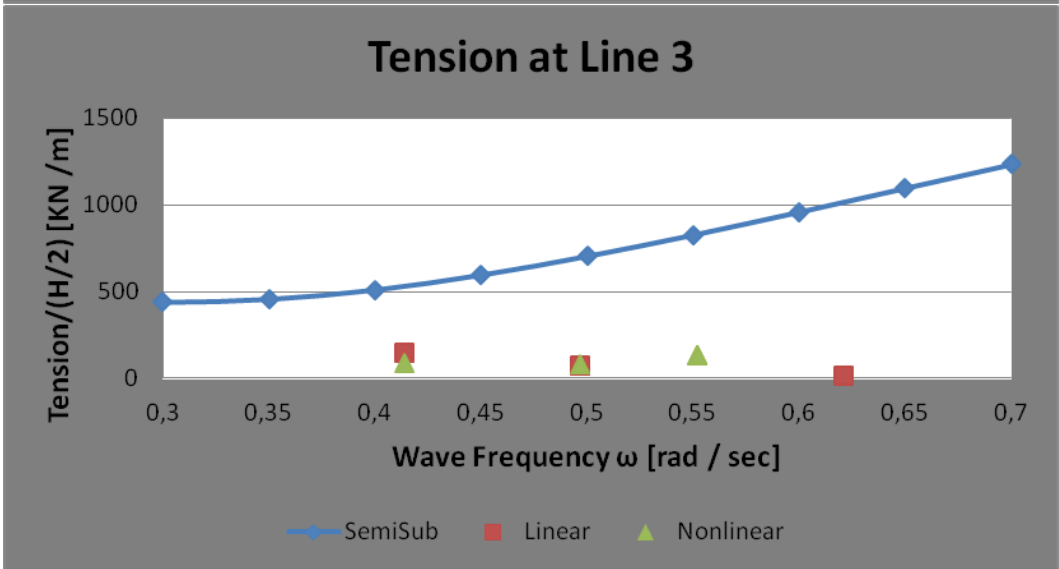
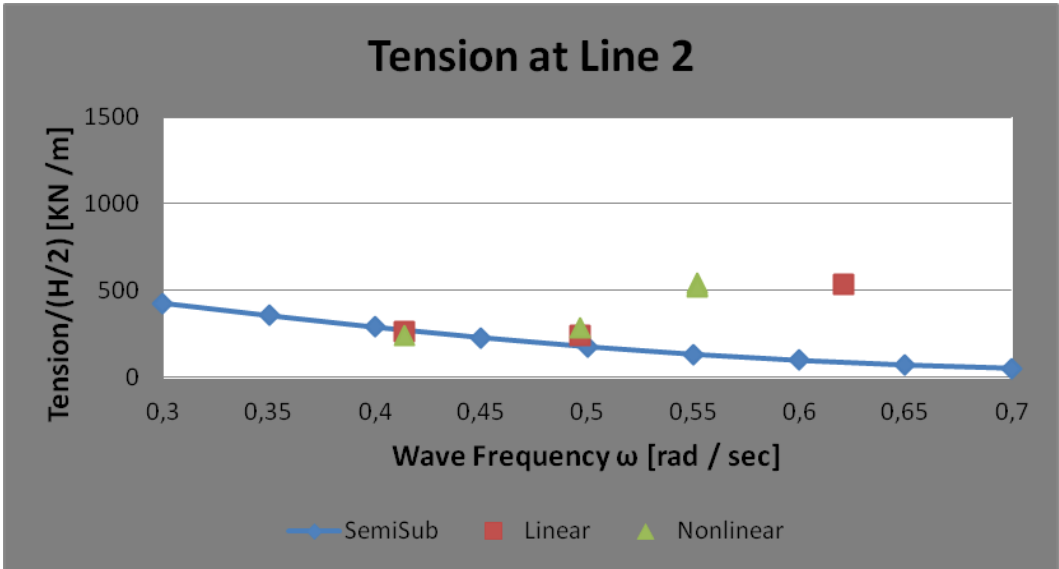
$$r' = \frac{r}{\left(\frac{H}{2}\right) \cdot k}$$

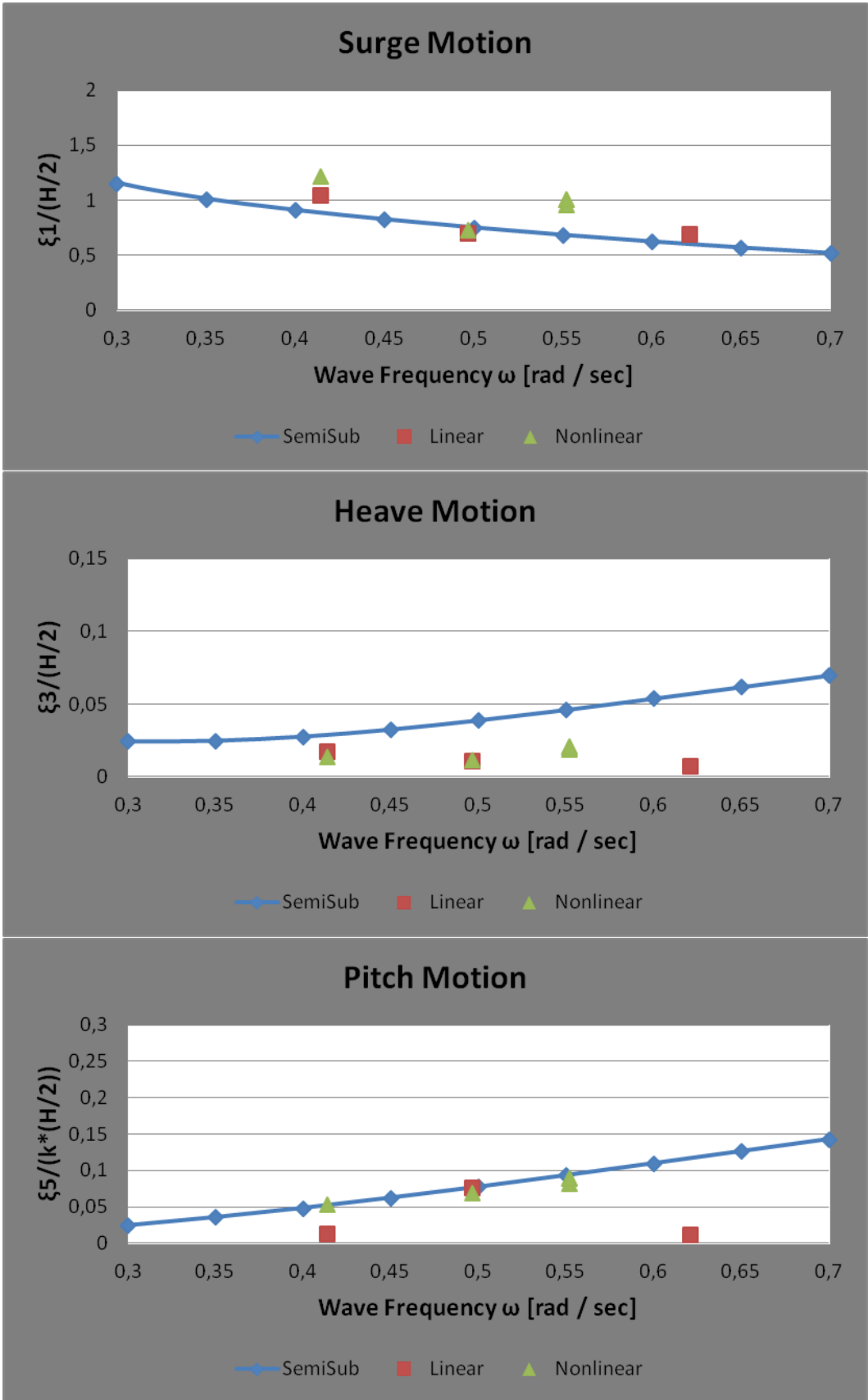
,όπου H και k ύψος κύματος και κυματάριθμος μοντέλου.

Ακολουθούν τα διαγράμματα των συγκρίσεων στα πειράματα με γωνία πρόσπτωσης 0° . Να σημειωθεί ότι σε όλη τη διάρκεια του πειράματος ο αισθητήρας 6 Comp δεν έπαιρνε μέτρηση για την δύναμη Fz.

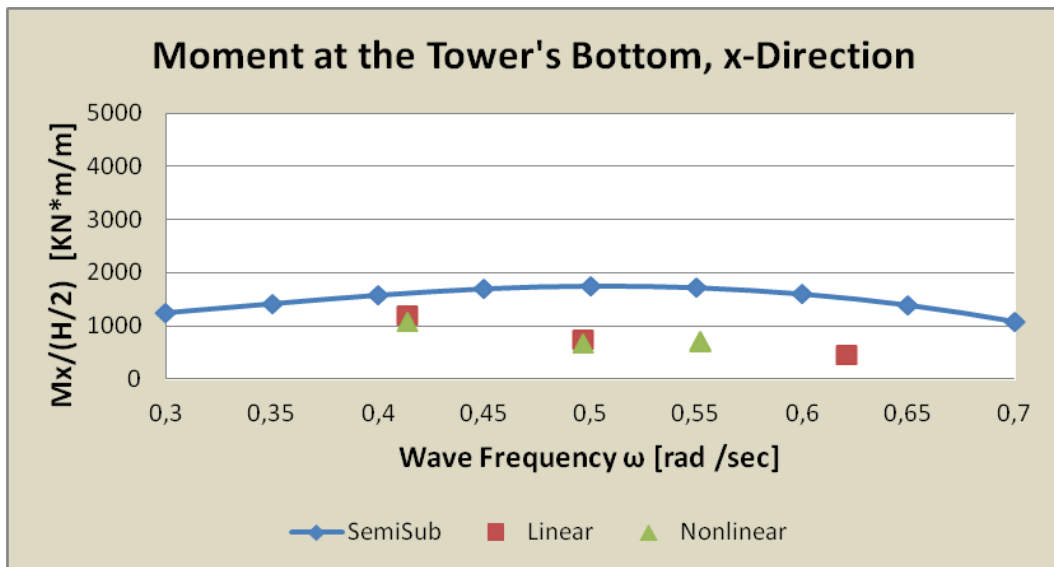
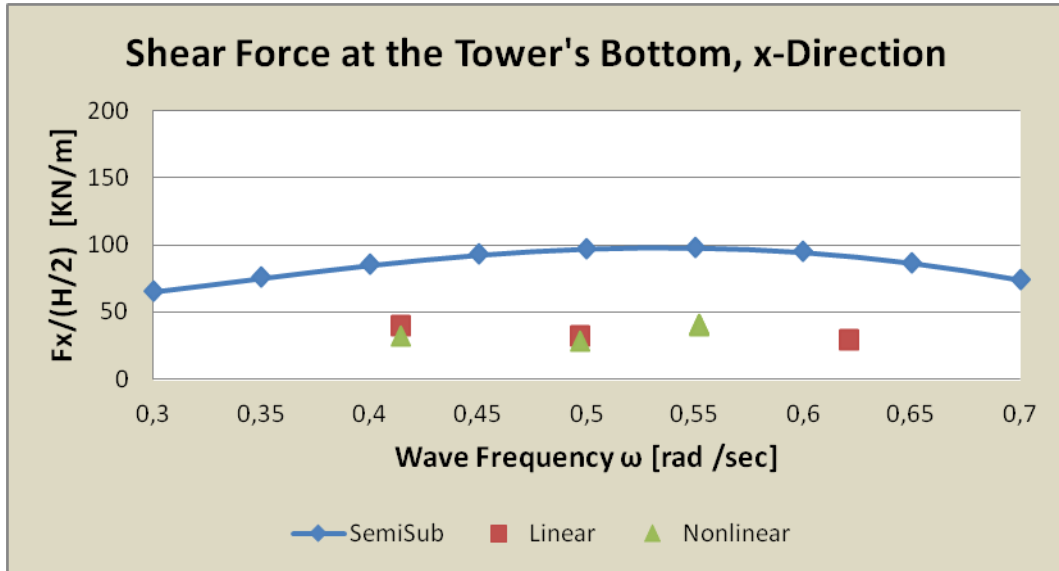


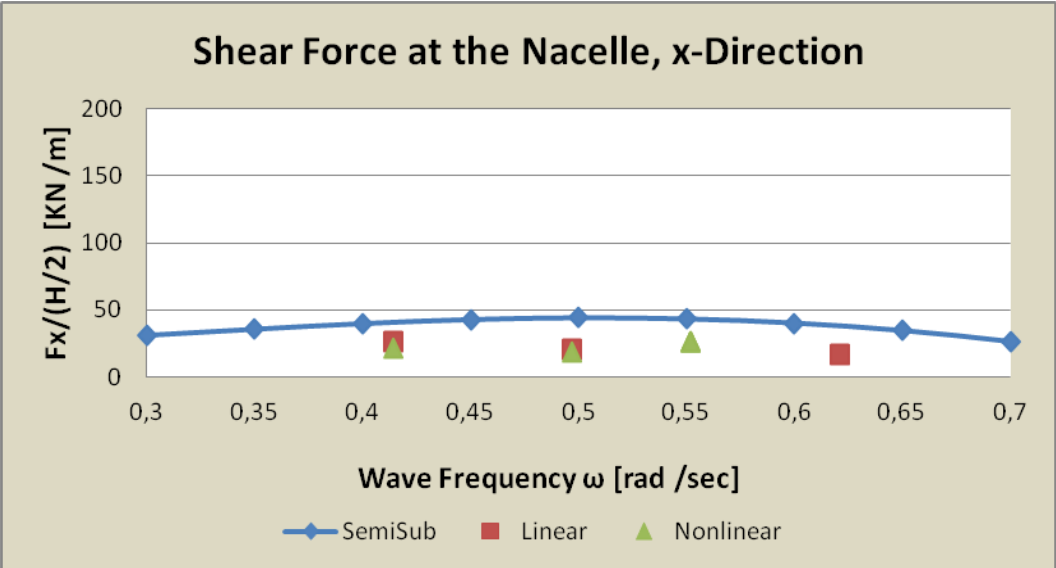
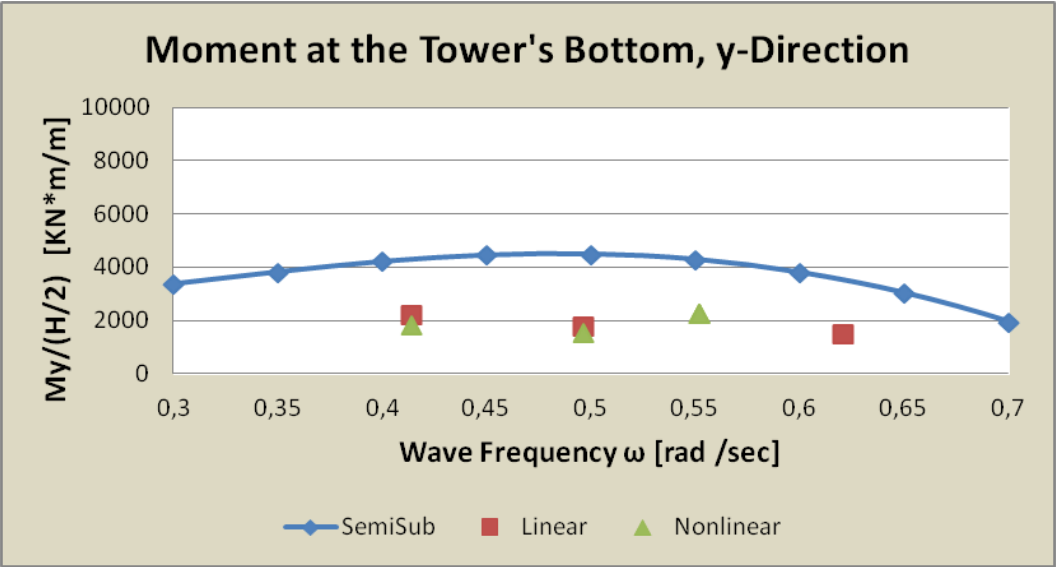
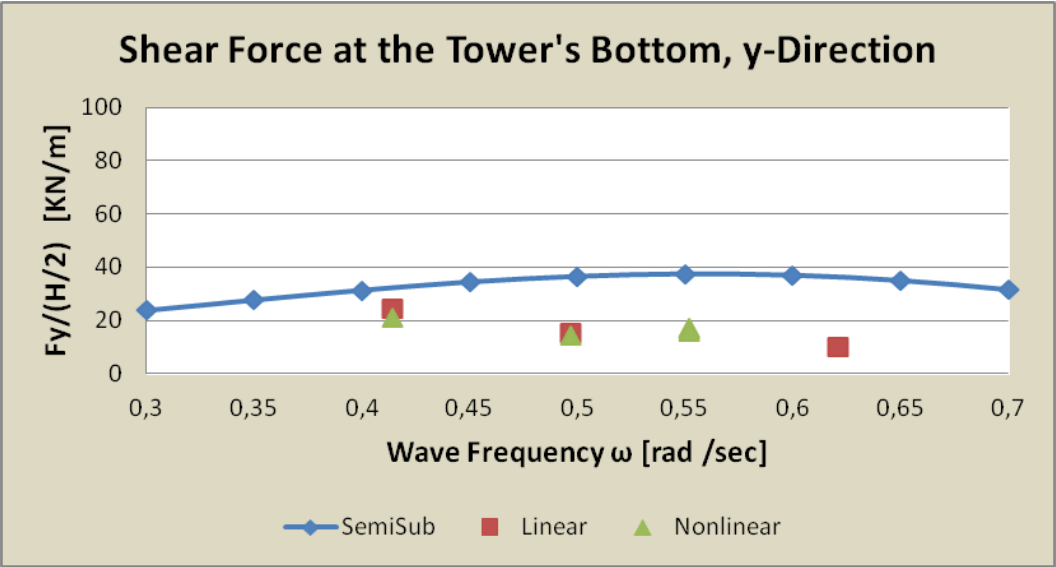


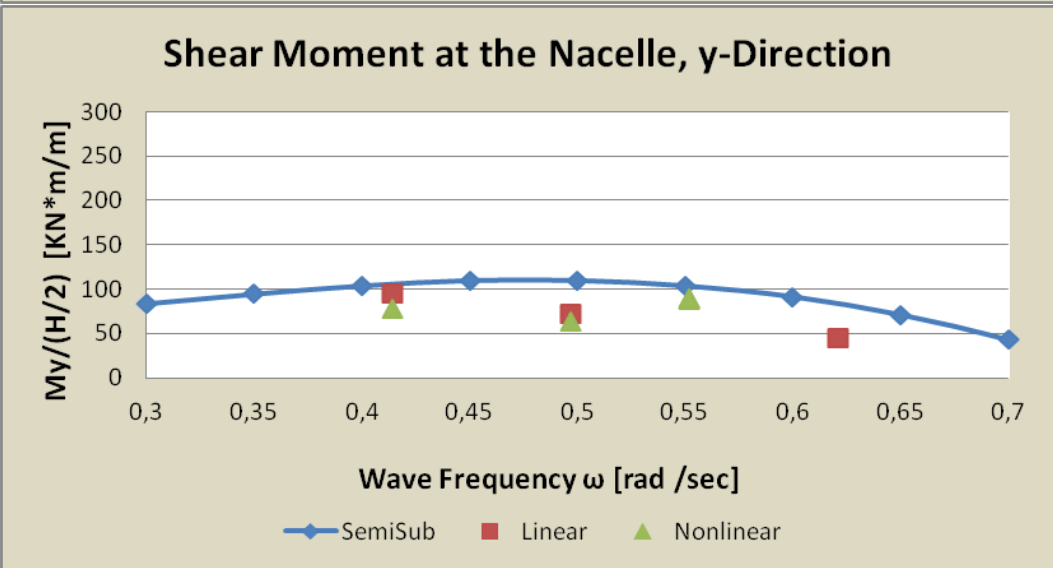
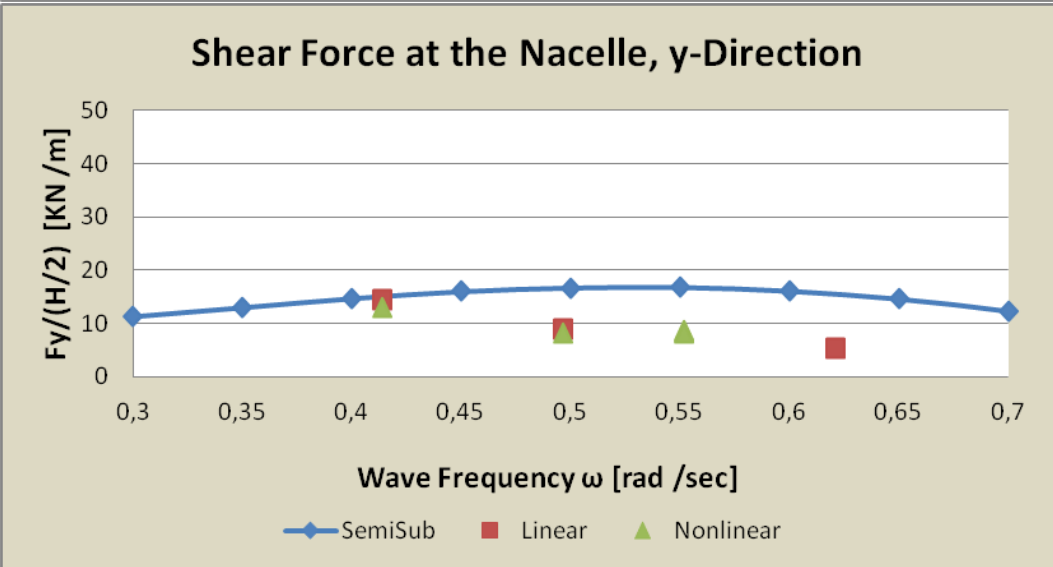
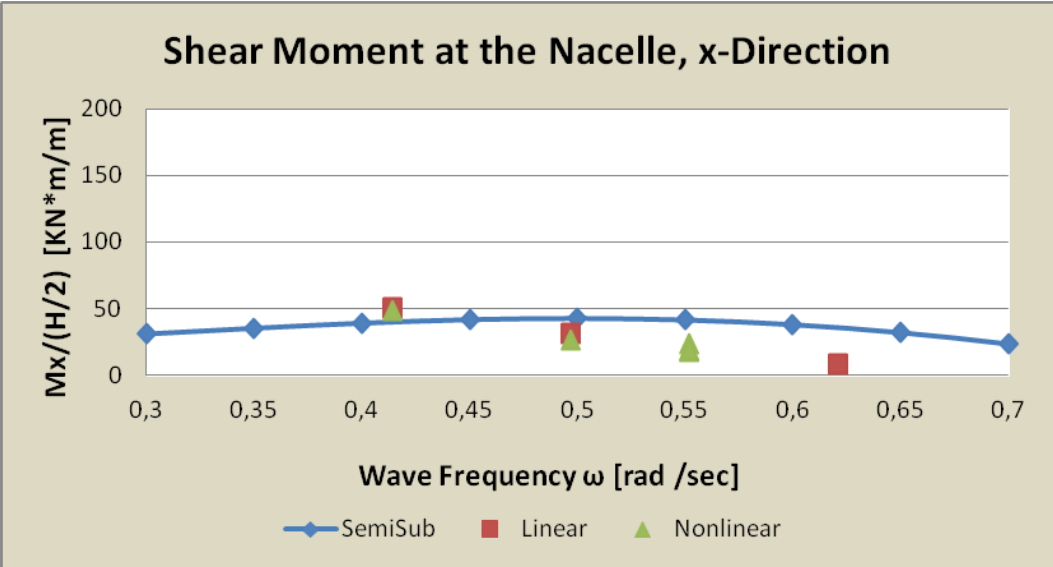


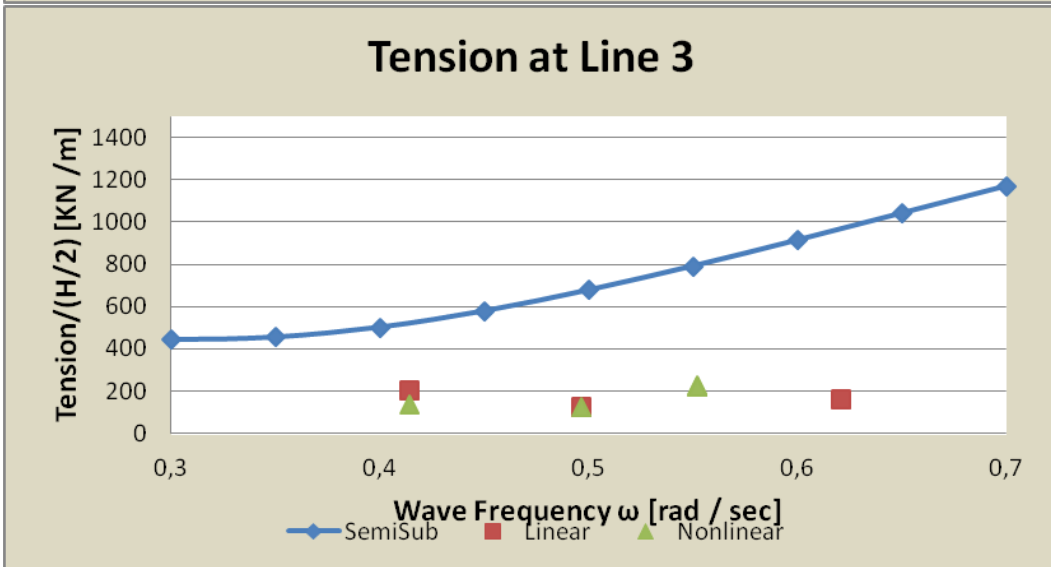
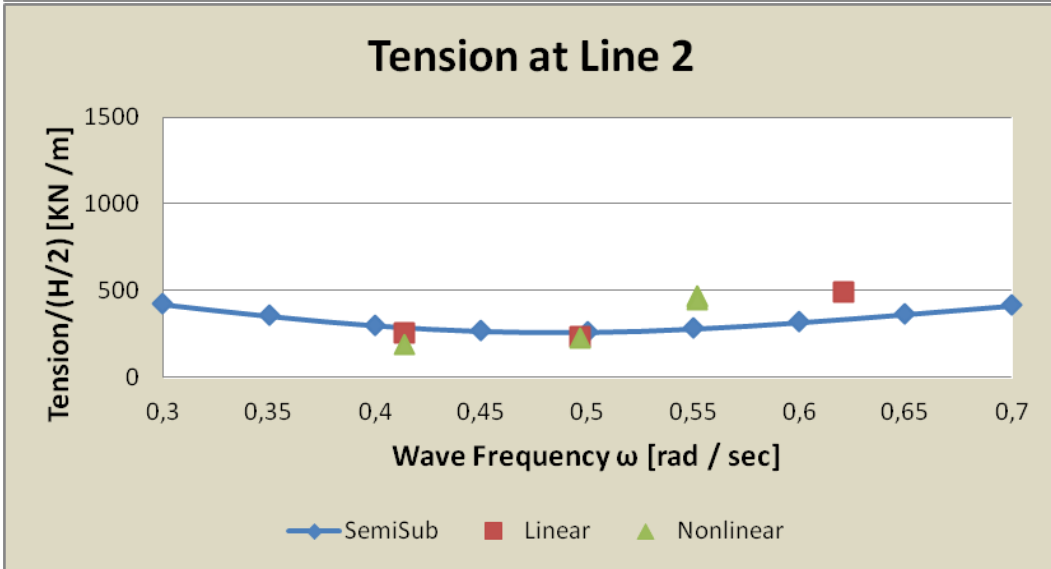
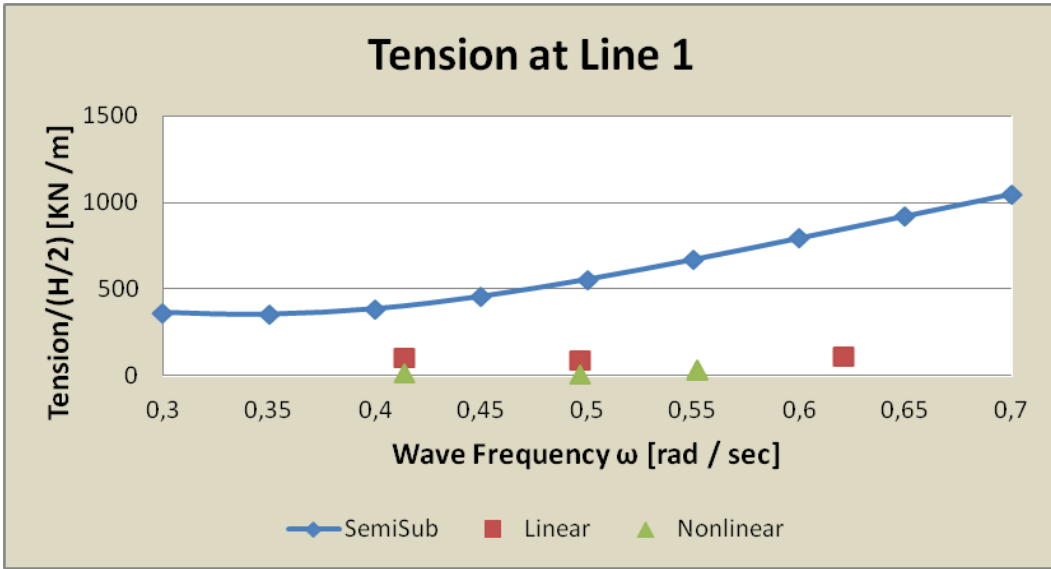


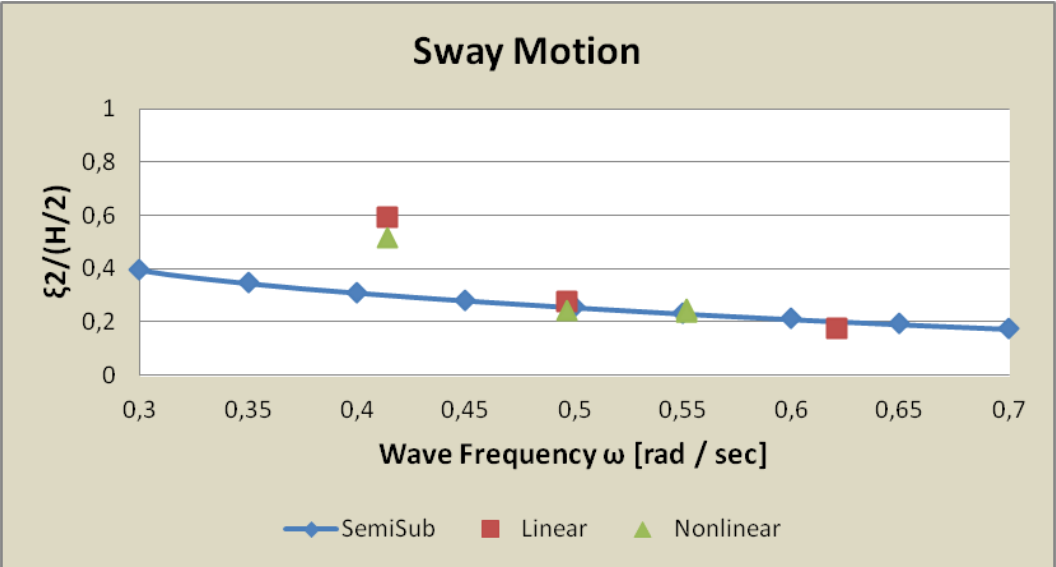
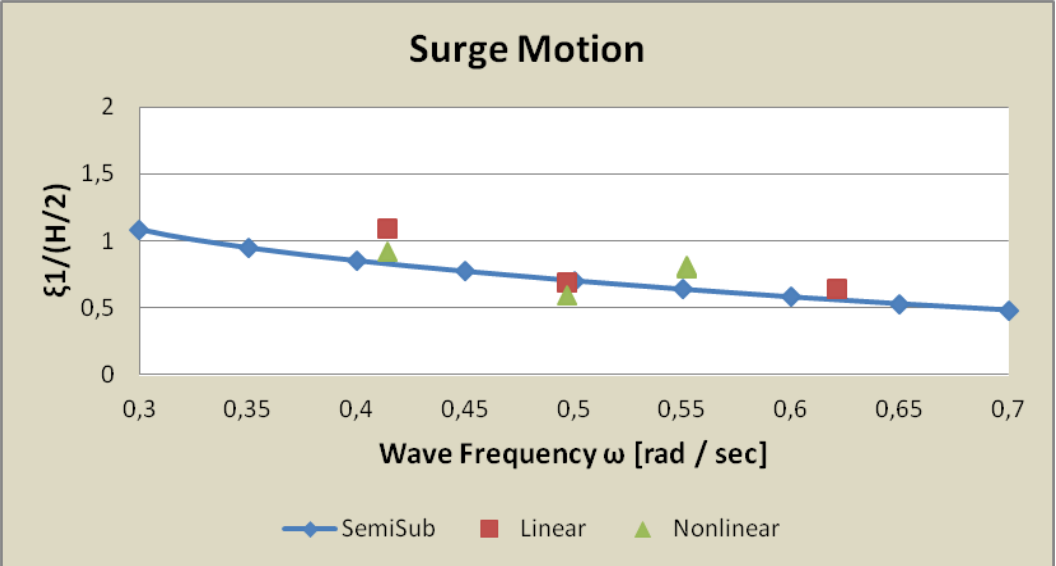
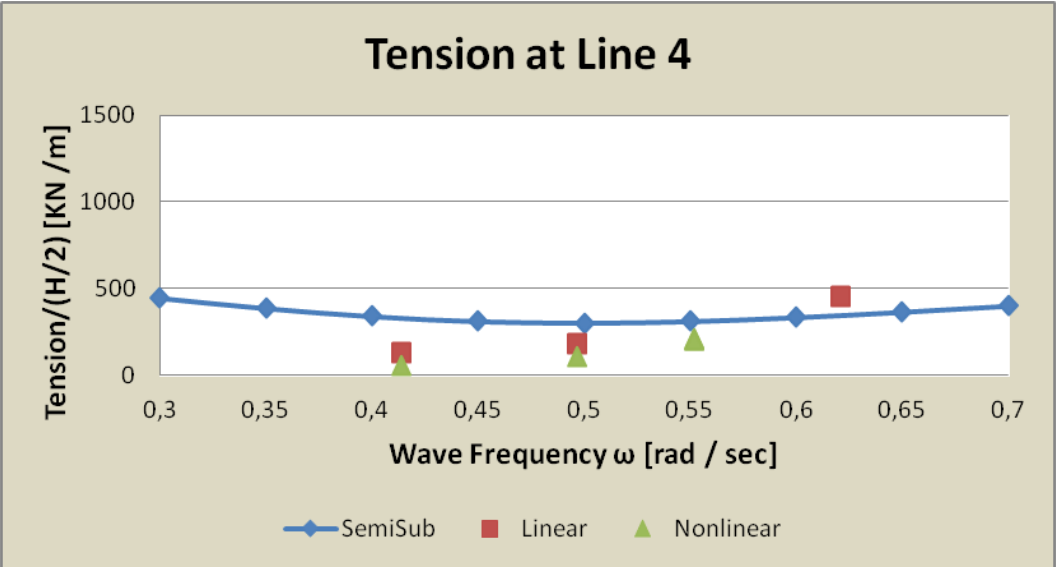
Ακολουθούν τα διαγράμματα των συγκρίσεων στα πειράματα με γωνία πρόσπτωσης 20°.

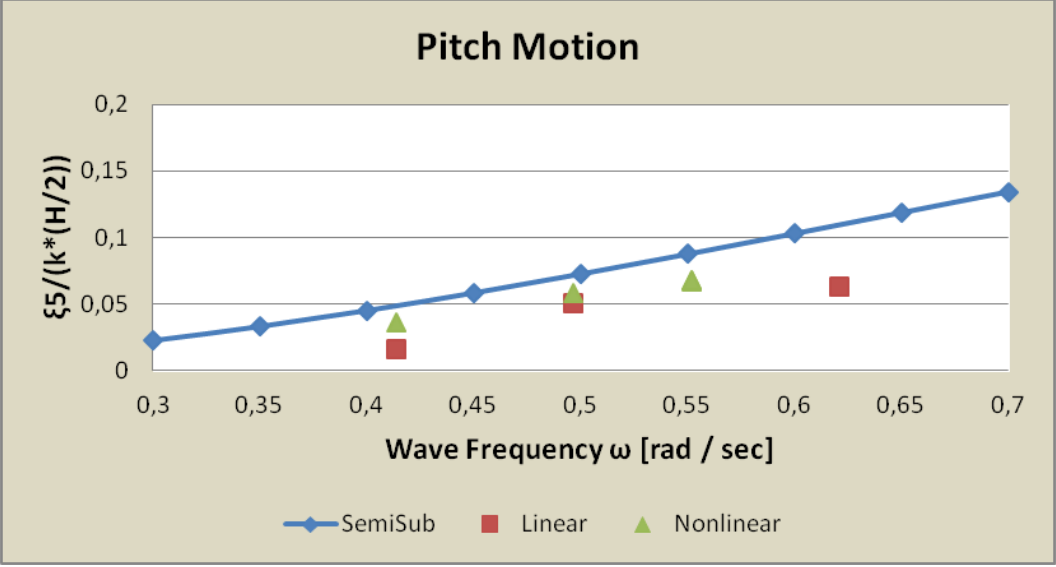
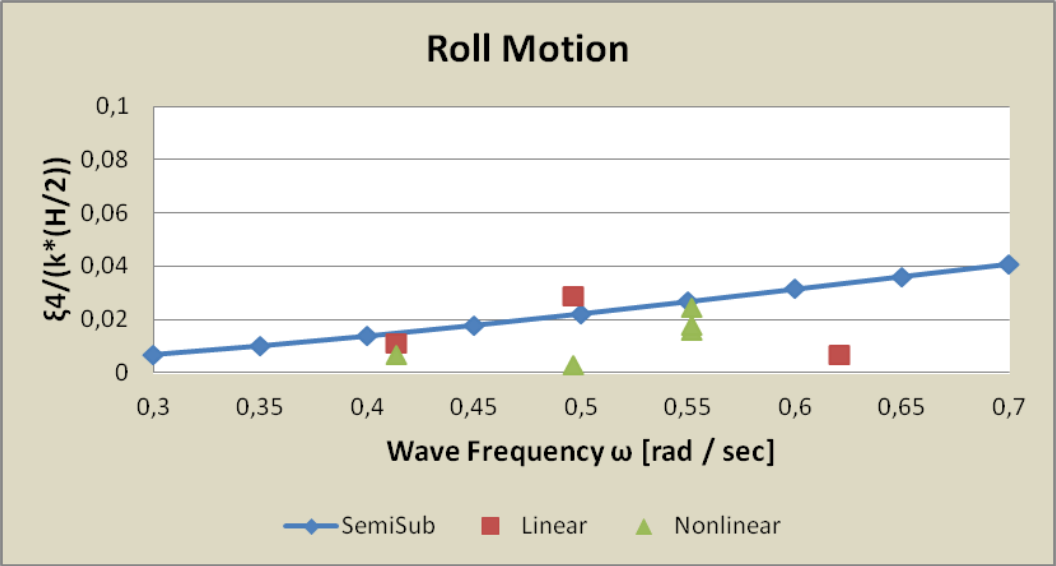
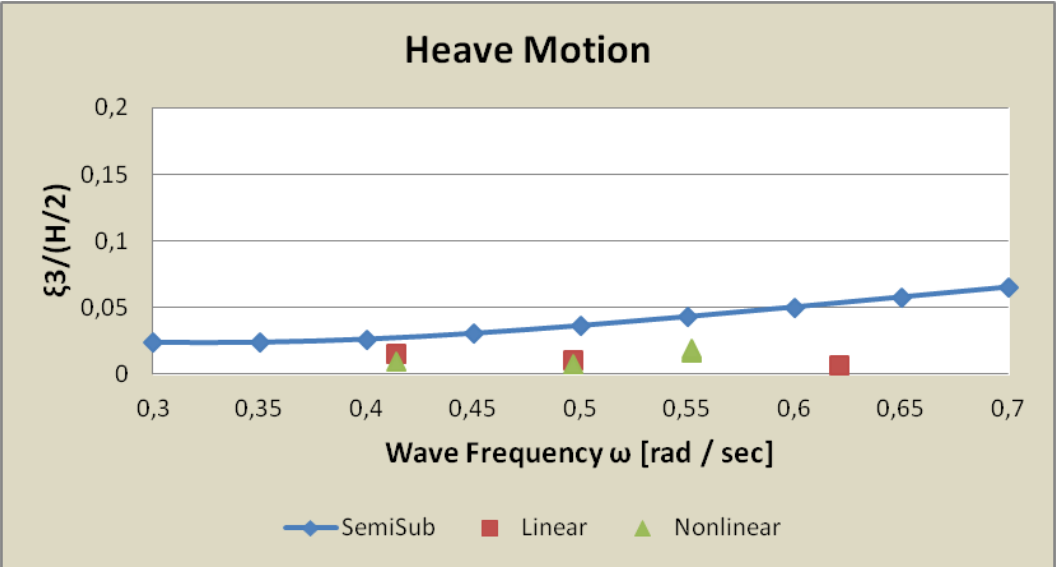












5.4 Συμπεράσματα συγκρίσεων και προτάσεις

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: Καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_x στον πύργο: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πύργο: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 2: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, εκτός των συχνοτήτων $\omega=0,552$ rad/s και $\omega=0,621$ rad/s.
- Τάση στον κλάδο 4: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, εκτός των συχνοτήτων $\omega=0,552$ rad/s.
- Surge: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων.
- Heave: Καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, όπως αναμενόταν από την ιδιότητα του κλάδου αγκύρωσης.
- Pitch: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών-θεωρητικών μετρήσεων, ενδεχομένως να μην είναι σωστή η μέτρηση για $\omega=0,621$ rad/s.

Για τα πειράματα των 20° εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Δύναμη F_x στον πλωτήρα: Καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_x στον πλωτήρα: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_y στον πλωτήρα: Καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_y στον πλωτήρα: Καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Δύναμη F_x στον πύργο: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Ροπή M_x στον πύργο: Πάρα 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 2: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Τάση στον κλάδο 4: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Surge: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων.
- Sway: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων, εκτός της συχνότητας $\omega=0,414$ rad/s.
- Heave: Πάρα πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων, όπως αναμενόταν από την ιδιότητα του κλάδου αγκύρωσης.
- Roll: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων, εκτός των συχνοτήτων $\omega=0,497$ rad/s και $\omega=0,621$ rad/s.

- Pitch: Πολύ καλή σύγκλιση πειραματικών- θεωρητικών μετρήσεων εκτός της συχνότητας $\omega=0,621$ rad/s.

Γενικά είχαμε πολύ καλή σύγκλιση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα συνολικά. Εντούτοις παρατηρήθηκε μια ασυμπτωτική συμπεριφορά των μετρήσεων στη συχνότητα $\omega=0,621$ rad/s σε ορισμένες περιπτώσεις.

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

- Χρήση μοντέλου διαφορετικών διαστάσεων, κλίμακας ή/και βυθίσματος.
- Χρήση κλάδων αγκύρωσης με διαφορετική προένταση ή/και υλικού.
- 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)
- Διεξαγωγή πειραμάτων σε "Survival" συνθήκες.

Βιβλιογραφία

1. Υπουργείο περιβάλλοντος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής
(<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=285&language=el-GR>).
2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
(<http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>).
3. 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).
4. Αιολική ενέργεια
(<http://www.allaboutenergy.gr/AiolikiEnergeia.html>).
5. Αιολική ενέργεια
(http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/wind_energy.html).
6. Ενεργειακή αποδοτικότητα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
(http://www.ener-supply.eu/downloads/ENER_handbook_gr.pdf).
7. Υδροηλεκτρική ενέργεια
(<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=484&language=el-GR>).
8. Υδροηλεκτρική ενέργεια
(http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/ydrauliki.html).
9. Υδραυλική ενέργεια
(<http://www.allaboutenergy.gr/YdravlikiEnergeia.html>).
10. Υδροηλεκτρική ενέργεια
(<http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-4>).
11. Γεωθερμική ενέργεια
(<http://www.allaboutenergy.gr/GeothermikiEnergeia.html>).
12. Βιομάζα
(http://users.sch.gr/kpara/ape2009_10/biomaza.html).
13. Ενέργεια κυμάτων
(<http://www.allaboutenergy.gr/EnergeiaOkeanon.html>).
14. Παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα
(http://bioenergynews.blogspot.gr/2008/04/blog-post_1246.html).

- 15.Ανεμόμυλος
(<http://www.tallos.gr/library.asp?id=5>).
- 16.Wind turbine
(http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine).
- 17.Άνεμος ως πηγή ενέργειας
(http://blogs.sch.gr/8lyk-pat/files/2012/02/anemos_ergasia.pdf).
- 18.Poul la Cour
(http://en.wikipedia.org/wiki/Poul_la_Cour).
- 19.Floating Wind Turbines, Paul D. Sclavounos
(<http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/P6%20-%20Sclavounos.pdf>).
- 20.Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας- 1^ο ΕΠΑΛ ΣΥΡΟΥ
(<http://ape1epalsyrou.weebly.com/alphanuepsilonpsilonmuomicrongammaepsilonpsilonnuu942taurhoiotaepsilonsigmaf.html>).
- 21.How do wind turbines work ?
(<http://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>).
- 22.Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες
(<http://www.anemogennitria.gr/>).
- 23.Ανεμογεννήτριες, Γιάννης Κατσίγιαννης
(http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI_Pres_02_Wind_Turbines.pdf).
- 24.Support Structures for offshore wind turbines
(<http://www.4coffshore.com/windfarms/support-structures-for-offshore-wind-turbines-aid268.html>).
25. Support Structures for offshore wind turbines
(<http://www.lorc.dk/>).
- 26.Types of Offshore Wind
(<http://tethys.pnnl.gov/>).
- 27.Offshore wind turbines on ttps- assesment of floating support structures for offshore wind farms in German waters
(http://www.gl-garradhassan.com/assets/downloads/dewek_2010.pdf).
- 28.Ben C. Gerwick, Construction of Marine and Offshore Structures Second edition, 2000.

29. Withee J.E. and Sclavounos P.D. (2004). Fully coupled dynamic analysis of a floating wind turbine system. *Proceedings of the 8th World Renewable Energy Congress*, Denver, Colorado, USA.
30. Lee K.H. (2004). *Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation*, Master of Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
31. Suzuki K., Yamaguchi H., Akase M., Nakada S and Imakita A. (2009b). Development of TLP type floating structure for offshore wind farms, Technology Report of Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd., No. 198 (In Japanese).
32. Weinzettel J., Reenaas M., Solli C., Hertwich E.G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine, *Renewable Energy*, 34 (3), 742-747.
33. Bae, Y. H., Kim, M. H., & Shin, Y. S. (2010). Rotor-floater-mooring coupled dynamic analysis of mini TLP-type offshore floating wind turbines. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 6-11, 2010, OMAE2010- 20555.
34. Nihei, Y., & Fujioka, H. (2010). Motion characteristics of a TLP type offshore wind turbine in waves and wind. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 6-11, 2010, OMAE2010-21126.
35. Nihei Y. ,Matsuura M. , Fujioka H., Suzuki H.. AN APPROACH FOR THE OPTIMUM DESIGN OF TLP TYPE OFFSHORE WIND TURBINES. *Proceedings of the Asme 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 19-24, 2011, OMAE 2011-50258.
36. Erin E. Bachynski, Torgeir Moan. Design considerations for tension leg platform wind turbines, September 16, 2012.
37. Zhao Y., Yang J., He Y., Preliminary Design of a Multi-Column TLP Foundation for a 5-MW Offshore Wind Turbine, October 15, 2012.
38. G.K.V. Ramachandran, H. Bremdose, J.N. Sorensen, J.J. Jensen, FULLY COUPLED THREE-DIMENSIONAL DYNAMIC RESPONSE OF A TLP

- FLOATING WIND TURBINE IN WAVES AND WIND, *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, July 1-6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil, OMAE2012-83371
39. Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scott G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, February, 2009.
 40. 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.
 41. Μαυράκος, Σ. Α., Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, 1999.
 42. Μαυράκος, Σ. Α., Συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών, 2012
 43. 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.
 44. Mavrakos, S. A., Koumoutsakos, P., Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves, 1987.
 45. Μαυράκος, Σ. Α., Χατζηγεωργίου, Ι. Κ., Αγκυρώσεις πλωτών κατασκευών, Νοέμβριος, 2007.
 46. 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.
 47. Mazarakos, K. P., Analysis of loads and motions on a TLP on the time domain and comparisons with experiments, Master Thesis, NTUA, 2008.
 48. Mazarakos, T. P., Second-Order Wave Loading and Wave Drift Damping on Floating Marine Structures, Ph.D. Thesis, NTUA, pages 1-272, 2010
 49. 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