ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΩΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ»

Διπλωματική Εργασία: Μελισσάρης Θεμιστοκλής

Επιβλέπων Καθηγητής: Σπυρίδων Α. Μαυράκος

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Στους γονείς μου,

τη γιαγιά μου και την Ντόρα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας αποτελεί το αποκορύφωμα όλων των προσπαθειών μου να αποκτήσω τις κατάλληλες γνώσεις και να διευρύνω τους επιστημονικούς μου ορίζοντες γενικά, αλλά κυρίως στον τομέα που μου κέντρισε περισσότερο το ενδιαφέρον κατά την 5-ετή φοίτησή μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστικά την πρώτη μου ολοκληρωμένη και αυτόνομη προσπάθεια να εκθέσω τις γνώσεις μου στον τομέα των Θαλάσσιων Κατασκευών και συγκεκριμένα στον κλάδο των Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κύριο Σ. Μαυράκο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με τον τομέα αυτό, καθώς και για όλη τη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος και πρωτοποριακού θέματος.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κύριο Θ. Μαζαράκο, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. και Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Μηχανικό του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, που με ενθουσιασμό συνέβαλε καταλυτικά στην επιλογή και περαίωση της εργασίας αυτής. Είμαι ευγνώμων για τη διάθεση του χρόνου του και την προθυμία του κάθε φορά που ζήτησα τη βοήθειά του.

Επιπλέον οφείλω να ευχαριστήσω δεόντως τον κύριο Δ. Κονισπολιάτη, Δρ. Ε.Μ.Π. του τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών και μεταδιδακτορικό ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, που συνέβαλε τα μέγιστα στην εκπόνηση του πρακτικού μέρους της εργασίας, με τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του στα περισσότερα στάδια υλοποίησης της. Είμαι επίσης ευγνώμων για την προθυμία του και τη διάθεση του χρόνου του για μένα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα του γονείς μου, για την υποστήριξή τους και τη συμπαράστασή τους, καθώς και την αρωγή τους όποτε χρειάστηκε, όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και όλων των χρόνων της φοιτητικής μου πορείας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση της συζευγμένης υδρομηχανικής συμπεριφοράς πλωτής Α/Γ, που στηρίζεται σε πλωτή εξέδρα με πολλαπλούς κυλίνδρους, χρησιμοποιώντας στο πεδίο συχνοτήτων και ακριβή και προσεγγιστική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φορτίων. Στην ακριβή μεθοδολογία, χρησιμοποιείται η θεωρία πολλαπλής σκέδασης για την αποτύπωση των φαινομένων υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των κατακόρυφων ανωστικών κυλίνδρων της εξέδρας στήριξης, ενώ στην προσεγγιστική μεθοδολογία, χρησιμοποιείται η μέθοδος της υδροδυναμικής σύνθεσης για την εκτίμηση των υδροδυναμικών φορτίων. Και στις δύο περιπτώσεις οι συζευγμένες υδρο-αερο-ελαστικές εξισώσεις κίνησης της πλωτής κατασκευής λύνονται στο πεδίο συχνοτήτων μαζί με τη δυναμική μιας Α/Γ ισχύος 5MW, πακτωμένη στον πλωτήρα, και ανάγονται δυναμικά στις έξι κινήσεις στερεού σώματος της πλωτής κατασκευής.

Αρμοδιότητά μου ήταν να επεκτείνω υπάρχον προγραμματιστικό κώδικα, αναπτυγμένο εντός του εργαστηρίου και ικανό να αναλύει προβλήματα περίθλασης και ακτινοβολίας γύρω από πολλαπλούς κυλίνδρους, προσθέτοντας τη δυναμική της Α/Γ. Και στις δυο μεθοδολογίες, η συμπεριφορά της κατασκευής μελετήθηκε για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, ενώ ύστερα από την προσθήκη της Α/Γ, εξετάσθηκε η συμπεριφορά της και σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, προς σταθερή όμως κατεύθυνση. Μετά από μια σύντομη περιγραφή της βασικής θεωρίας και τον ορισμό του πλωτού μοντέλου, παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ενώ η εργασία ολοκληρώνεται με κάποιες ενδιαφέρουσες μελοντικές προτάσεις.

ABSTRACT

The following diploma thesis is dealing with the comparative evaluation of the coupled hydromechanical behavior of floating W/T consisting of multi-column supporting structures by using in frequency domain both exact and approximate formulations for the hydrodynamic loads' estimation. In the exact formulation, the multiple scattering approach is used to capture the hydrodynamic interaction effects among multiple vertical buoyant cylinders of the supporting structure, whereas in the approximate formulation, the method of the hydrodynamic synthesis has been used for estimating the hydrodynamic loads. In both cases the coupled hydro-aero-elastic equations of motions of the floating are solved in the frequency domain with the dynamics of a 5MW W/T, mounted on the floater, being dynamically reduced to the six rigid body motions of the floating supporting structure.

My responsibility was to extend already existent, home developed computer software that is suitable to analyse the diffraction and radiation problems around multiple cylinders, by supplementing it with the dynamics of the W/T. In both methodologies, the hydromechanical behavior of the structure has been analyzed for various angles of the incident wave impact and, after the superposition of the W/T, for various wind velocities in certain direction. A brief reference to the theoretical basics and the definition of the floating structure are followed by the presentation and the analysis of the results, whereas in the end some very interesting suggestions are proposed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

1.1 ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Η εντατικοποίηση των δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο περιβάλλον με σκοπό την έρευνα και την εκμετάλλευση των θαλασσών, οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη και εγκατάσταση σε λειτουργία ενός μεγάλου φάσματος θαλασσίων κατασκευών και ναυπηγημάτων. Οι προσπάθειες ιδιαίτερα για την εξαγωγή και εκμετάλλευση υδρογονανθράκων από θαλλάσιο περιβάλλον είχαν σαν συνέπεια την ανάπτυξη της Offshore τεχνολογίας, που για πολλά βιομηχανικά κράτη αποτελεί βαρύνοντα παράγοντα της οικονομίας τους.

Υπάρχουν πολύ λιγότερες υπεράκτιες (offshore) κατασκευές σε όλο τον κόσμο από ό,τι μεταλλικές κατασκευές για τα κοινά κτίρια στη στεριά, και η μεγαλύτερη καθοδήγηση στη μελέτη για υπεράκτιες κατασκευές έγκειται στην έρευνα και την ανάπτυξη, η οποία εξελίσσεται πολύ γρήγορα για να συμβαδίσει με την ανάπτυξη στην παγκόσμια αγορά πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, όλες οι μεγάλες εταιρείες εξερεύνησης και παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου υποστηρίζουν και χορηγούν τις έρευνες για την βελτίωση της μελέτης και της αξιοπιστίας των υπεράκτιων κατασκευών, προκειμένου να αυξήσουν τα έσοδα από τα έργα τους σχετικά με την εξόρυξη πετρελαίου και τα πάγια περιουσιακά τους στοιχεία.

Η Offshore τεχνολογία και η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει αναπτυχθεί αρκετά πέρα από τις αρχικές πλατφόρμες που χρησιμοποιούσαν σωρούς ξύλων για τη στήριξη της βάσης τους. Παρόλα αυτά όμως η κατασκευή τέτοιων ναυπηγημάτων είναι πολύ δαπανηρή και γιαυτό πρωτού γίνει οποιαδήποτε δραστηριότητα, απαιτείται μελέτη και εξερεύνηση για την εξακρίβωση ύπαρξης ή μη πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αυτό γίνεται μέσω κινητών εξεδρών με ειδικά συστήματα γεώτρησης, που αν διαπιστώσουν επαρκή ποσότητα παραμένουν στην πηγή έως ότου κατασκευαστεί μια μόνιμη πλατφόρμα παραγωγής.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η τεχνολογία, η νομοθεσία και η γεωλογία έσπρωξε την εξερεύνηση για κοιτάσματα πετρελαίου πολύ μακρύτερα από τις ακτές των Η.Π.Α., καθώς οι αντίστοιχες χερσαίες επιχειρήσεις έγιναν λιγότερο αποδοτικές, και η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια αυξήθηκε ραγδαία. Η παραγωγή πετρελαίου στα ανοικτά των ακτών της Αμερικής ξεκίνησε με καλές προοπτικές περισσότερο από έναν αιώνα πριν, αλλά η μετάβαση σε επιχειρήσεις βαθέων και υπερ-βαθέων υδάτων είναι ένα σχετικά πρόσφατο φαινόμενο.

<u>Οι πρώτες προσπάθειες</u>

Οι πρώτες προσπάθειες υπεράκτιων γεωτρήσεων για πετρέλαιο άρχισαν στα ανοικτά των ακτών του Summerfield, στην Καλιφόρνια, ακριβώς νότια της Σάντα Μπάρμπαρα, το 1896. Υπήρχε στην εμφάνιση, στενή ομοιότητα με προβλήτες αναψυχής, δηλαδή σειρές από στενούς ξύλινους διαδρόμους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, εκτεινόμενους μέχρι και 450 μέτρα από την ακτογραμμή, στηριζόμενους σε πασσάλους που έφθαναν μέχρι και τα 10 μέτρα από τον πυθμένα του Ειρηνικού. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες τότε τεχνικές, όπως και στην ξηρά, χαλύβδινοι σωλήνες τοποθετούνταν με σφυροκόπημα 150 μέτρα κάτω από το βυθό της θάλασσας. Το κυνήγι για το πετρέλαιο τότε, απέδωσε τελικά ένα μέτριο κέρδος. Η παραγωγή κορυφώθηκε το 1902, και τα πηγάδια εγκαταλείφθηκαν αρκετά χρόνια αργότερα. Τα έργα εξόρυξης άφησαν πίσω μια ακτή μαυρισμένη από το πετρέλαιο, προβλήτες και εξέδρες εξόρυξης σε σήψη, οι οποίες παρείχαν άσχημες μνήμες της πρωτοποριακής προσπάθειας. Οι κατασκευές αυτής της πρώτης προσπάθειας παρέμειναν μέχρις ότου ένα ισχυρό παλιρροϊκό κύμα αφάνισε τις εναπομείνασες κατασκευές το 1942 [1].

Άλλες αξιοσημείωτες δραστηριότητες γεώτρησης έλαβαν τόπο στην καναδική πλευρά της λίμνης Erie στις αρχές του 1900 και στη λίμνη Caddo στη Λουιζιάνα τη δεκαετία του 1910. Λίγο αργότερα, ανοίχθηκαν πηγάδια σε περιοχές παλιρροιακών ζωνών κατά μήκος της ακτής του Κόλπου του Τέξας και τη Λουιζιάνα. Η κατασκευή του Goose Creek κοντά στο Baytown του Τέξας είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Και σε αυτές τις περιπτώσεις, ξύλινοι πύργοι γεώτρησης τοποθετούνταν σε πρόχειρα φτιαγμένες ξύλινες πλατφόρμες, που κατασκευάζονταν πάνω σε ξύλινους πασσάλους.

Μέχρι και το 1921, προβλήτες χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στο Rincon και στο Elwood της Καλιφόρνια, για τη στήριξη εξεδρών γεώτρησης τύπου ξηράς. Το 1932, ένα νησί με χαλύβδινους προβλήτες (20 × 30 m) κατασκευάστηκε μισό μίλι ανοιχτά της θάλασσας από μια μικρή πετρελαϊκή εταιρεία, Indian Petroleum Corporation, για να στηρίξει μιαν άλλη εξέδρα τύπου ξηράς. Παρά το γεγονός ότι τα πηγάδια ήταν απογοητευτικά και το νησί καταστράφηκε το 1940 από μια καταιγίδα, η κατασκευή αυτή ήταν ο πρόδρομος των χαλύβδινων εξεδρών του σήμερα [2].

Η πρώτη πλωτή κατασκευή στην οποία δεν υπήρχε πρόσβαση από τη στεριά (χωρίς διαδρόμους προς την εξέδρα) κατασκευάστηκε στους βάλτους της Λουιζιάνα στις αρχές της δεκαετίας του 1930 με τη χρήση φορτηγίδων μικρού βυθίσματος. Αυτές οι φορτηγίδες ήταν ορθογώνιες με μια στενή σχισμή στο πρυμναίο άκρο τους για τον αγωγό του πηγαδιού. Κανάλια δημιουργούνταν μέσω εκβάθυνσης, έτσι ώστε ρυμουλκά να μπορούν να μετακινούν τις φορτηγίδες σε συγκεκριμένες θέσεις. Αργότερα, οι φορτηγίδες σταθεροποιούνταν με μια χαλύβδινη πλεγματική δομή πάνω από τη φορτηγίδα, που τους επέτρεπε να εργαστούν σε μεγαλύτερα βάθη νερού με βύθιση της φορτηγίδας στον πυθμένα. Αυτές οι φορτηγίδες συνήθως απαιτούσαν πασσάλους γύρω τους για να αποφύγουν αλλαγές της θέσης τους από τους ανέμους και τα κύματα [3].

Οι πρώτες βυθισμένες δεξαμενές (submersible platforms)

Μια άλλη υπεράκτια κατασκευή ορόσημο, ανεγέρθη το 1947, όταν η εταιρεία Kerr-McGee Oil Industries έκανε, στις 9 Σεπτεμβρίου, την πρώτη εξόρυξη που δεν ήταν ορατή από τη στεριά, με τη βοήθεια μιας πλατφόρμας παραγωγής και εξόρυξης πετρελαίου σε βάθος νερού 6 μέτρα και περίπου 30 χιλιόμετρα από την ακτή στον Κόλπο του Μεξικού (Gulf of Mexico). Μέχρι εκείνη τη χρονική περίοδο, η τεχνολογία γεωτρήσεων είχε προχωρήσει πολύ πέρα από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνταν για να σκάψουν τα πρώτα πηγάδια στο Summerfield. Εξελιγμένα περιστροφικά γεωτρύπανα είχαν αντικαταστήσει τα αντίστοιχα προηγούμενα μονής κατεύθυνσης. Οι επιχειρήσεις επέλεγαν ολοένα και περισσότερο χαλύβδινες κατασκευές έναντι των ξύλινων, αναγνωρίζοντας τη μεγαλύτερη δομική ακεραιότητα του μετάλλου για εξέδρες και το χαμηλότερο συνολικό κόστος κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης του πηγαδιού. Offshore φορείς, όπως η Texaco και η Shell, γρήγορα έγιναν πρωτοπόροι στη χρήση κινητών φορτηγίδων, αντίστοιχων με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στους βάλτους της Λουιζιάνας, έτσι ώστε να μπορούν να μετακινούν τις πλατφόρμες σε νέα σημεία όταν τελείωνε μια γεωτρητική διαδικασία. Καθώς οι εταιρείες πετρελαίου αυξήθηκαν και άρχισαν να δραστηριοποιούνται με μεγαλύτερη ευχέρεια στο περιβάλλον υπεράκτιων κατασκευών, υιοθέτησαν μεθόδους γεώτρησης ξηράς, ειδικά στην περιοχή του κόλπου του Μεξικού, που χαρακτηρίζεται από αξιοσημείωτα ρηχά νερά [1].

Δύο χρόνια αργότερα, το 1949, ο John T. Hayward σχεδίασε και κατασκεύασε την εξέδρα Breton 20 (Εικ. 1.1). Ήταν μια μεγάλη βυθισμένη φορτηγίδα η οποία πιστώθηκε με την εξόρυξη μερικών από τα πρώτα πηγάδια στα ανοικτά ύδατα της Λουιζιάνα. Ήταν διαφορετική από την εξέδρα του Kerr-McGee στο ότι το σύνολο του εξοπλισμού ήταν όλο πάνω σε μια φορτηγίδα, και μπορούσε να ρυμουλκηθεί ως πλήρης μονάδα. Η μονάδα, η οποία ήταν μια μετατροπή από μια αντίστοιχη εξέδρα ξηράς, είχε δύο σταθεροποιητικά ποντόνια, ένα σε κάθε πλευρά της φορτηγίδας, που ανεβοκατέβαιναν υδραυλικά, καθώς η φορτηγίδα βυθιζόταν ή ανέβαινε προς τα πάνω. Τα ποντόνια αυτά παρείχαν την απαραίτητη ευστάθεια για τη διεργασία αυτή. Η εξέδρα Breton 20, αργότερα γνωστή ως Transworld 40, ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός, διότι εκμηδένισε το κόστος και το χρόνο που απαιτείται για να κατασκευαστεί μια ξύλινη πλατφόρμα που θα στηρίζει ολόκληρη ή ένα μέρος της υπεράκτιας εξέδρας. Αν και λειτούργησε μόνο σε κατ 'εξοχήν προστατευμένους κολπίσκους και ρηχά νερά (λιγότερο από 6,5 m), η εξέδρα Breton 20 μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η πρώτη κινητή μονάδα υπεράκτιας εξόρυξης (Mobile Offshore Drilling Unit, MODU) [4,5].

Εικ. 1.1 Εξέδρα Breton 20, κατασκευάστηκε στα νερά της Λουιζιάνας το 1949. Λειτούργησε μέχρι το 1962 [4].

Η πρώτη πραγματική κινητή μονάδα υπεράκτιας εξόρυξης (MODU) ήταν η εξέδρα Mr. Charlie (Εικ. 1.2), η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εκ του μηδενός από την Ocean Drilling and Exploration Co. (ODECO), με επικεφαλή τον εφευρέτη και πρόεδρό της, τον Alden J. Laborde. Η εξέδρα αυτή ήταν μια βυθισμένη φορτηγίδα, που χτίστηκε ειδικά για να επιπλέει στο κατώτερο τμήμα της γάστρας της και βυθίζοντας σταδιακά την πρύμνη προς τα κάτω, κατέληγε να ακουμπά στον πυθμένα, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της γεώτρησης. Η εξέδρα Mr. Charlie πήγε στην πρώτη της τοποθεσία τον Ιούνιο του 1954 και μπορούσε να λειτουργήσει μέχρι και 13m βάθος περίπου, ενώ αποτέλεσε οδηγό για τον τρόπο κατασκευής των περισσοτέρων εξεδρών τέτοιου τύπου στον Κόλπο του Μεξικού [6].

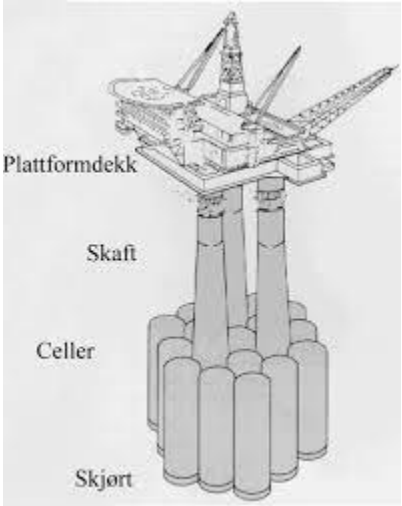
Εικ. 1.2 Εξέδρα Mr. Charlie, η πρώτη ουσιαστικά εξέδρα τύπου MODU. Κατασκευάστηκε το 1954 και λειτούργησε ως το 1986. Τώρα λειτουργεί σαν μουσείο και εξέδρα εκπαίδευσης στην πόλη Morgan της Λουιζιάνα [6].

Σταθερές εξέδρες

Όταν οι προσπάθειες υπεράκτιας εξόρυξης μεταφέρθηκαν σε βαθύτερα νερά μέχρι και 30 m, άρχισαν να κατασκευάζονται σταθερές πλατφόρμες στον κόλπο του Μεξικού, που συνδέονταν στον πυθμένα της θάλασσας με πασσάλους που εισχωρούσαν μέσα σε αυτόν. Οι εξέδρες αυτού του τύπου ονομάζονται “Jackets” και είναι χωροδικτυώματα. Μια τυπική μορφή “Jacket” φαίνεται στην Εικ. 1.3. Με το πέρασμα των χρόνων τέτοιου είδους πλατφόρμες άρχισαν να κατασκευάζονται σε μεγαλύτερα βάθη, ενώ στα μέσα της δεκαετίας του 1960 κατασκευάστηκαν οι πρώτες σταθερές “Jacket” πλατφόρμες στη Βόρεια θάλασσα.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ένας νέος τύπος σταθερών εξεδρών έκανε την εμφάνισή του, οι πλατφόρμες βαρύτητας. Αρχικά, κατασκευάστηκε μια εξέδρα μικτού τύπου στη Βόρεια θάλασσα, σε βάθος 95 m. Η “Tecnomare”, όπως ονομάστηκε, ήταν μια πλατφόρμα βαρύτητας με έδραση από τσιμέντο και μεταλλικό σκελετό. Η πρώτη όμως κατ’ εξοχήν εξέδρα βαρύτητας κατασκευάστηκε στο Ekofisk στη Βόρεια θάλασσα το 1973 (Εικ. 1.5). Οι κύριες διαφορές των εξεδρών βαρύτητας σε σχέση με τις “Jacket” ήταν το ότι οι πρώτες μπορούσαν να ρυμουλκηθούν και να εγκατασταθούν στον τόπο λειτουργίας τους μαζί με τον εξοπλισμό τους. Επίσης, λόγω μεγέθους, είχαν μεγαλύτερες αποθηκευτικές ικανότητες. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν κ άλλες πλατφόρμες βαρύτητας ιδιαίτερα στη Βόρειο θάλασσα. Εμφανίστηκαν σταδιακά διάφοροι τύποι, όπως Condeep (Εικ. 1.4), ANDOC, Sea Tank, Doris, Tripod, κ.τ.λ..

Εικ. 1.3 Τυπική μορφή εξέδρας “Jacket” [6].



Εικ. 1.4 Εξέδρα βαρύτητας τύπου Condeep [6].

Εικ. 1.5 Η πρώτη εξέδρα βαρύτητας που εγκαταστήθηκε στο πεδίο του Ekofisk στη Βόρεια θάλασσα το 1973 [6].

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της απαίτησης εγκατάστασης σταθερών μεταλλικών εξεδρών σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος και μεγαλύτερα βάθη νερού, εμφανίστηκαν προβλήματα που μπόρεσαν να λυθούν μετά από αλλαγές στην αρχική μορφή της Jacket πλατφόρμας. Έτσι σε ηπιότερες θαλάσσιες περιοχές, όπως για παράδειγμα οι νότιες περιοχές της Βόρειας θάλασσας, εγκαταστάθηκαν πλατφόρμες Jacket που είναι παραλλαγές των αρχικών μορφών που χρησιμοποιήθηκαν στον κόλπο του Μεξικού. Τα κοίλα κυλινδρικά στοιχεία ενός προκατασκευασμένου χωροδικτυώματος, που μεταφέρεται στον τόπο εγκατάστασης πάνω σε ποντόνια και τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση πάνω στον πυθμένα της θάλασσας, χρησιμεύουν σαν οδηγοί των πασσάλων που διέρχονται μέσω αυτών και εισέρχονται στο έδαφος. Στη συνέχεια κατασκευάζεται επί τόπου το κατάστρωμα. Λόγω της διαδικασίας εγκατάστασης που ακολουθείται, ο τύπος αυτός της πλατφόρμας φέρει διεθνώς το όνομα “Launch Type Jacket”.

Με τη μετάθεση των δραστηριοτήτων σε περιοχές με μεγαλύτερο βάθος νερού και δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες το βάρος της κατασκευής αυξάνει, οπότε η διαδικασία εγκατάστασης στη θαλάσσια περιοχή λειτουργίας της πλατφόρμας, που περιγράφηκε προηγουμένως, δεν είναι δυνατόν πλέον να εφαρμοστεί. Κατά συνέπεια σχεδιάστηκαν χωροδικτυώματα, που με τη βοήθεια ανωστικών σωμάτων, είχαν τη δυνατότητα πλεύσης. Τις κατασκευές αυτές τις ονομάζουμε Self Floating Jackets. Οι πλατφόρμες που εγκαταστάθηκαν στο πεδίο Brent της Βόρειας θάλασσας σχεδιάστηκαν σύμφωνα με αυτήν την αρχή (Εικ.1.6).

Η απαίτηση για εγκατάσταση σταθερών εξεδρών σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη νερού δημιούργησε μια σειρά από προβλήματα συναρμολόγησής τους, που αντιμετωπίσθηκαν με τη βοήθεια της τμηματικής κατασκευής (Multi-Part-Concept), σύμφωνα με την οποία τα επί μέρους προκατασκευασμένα τμήματα μεταφέρονται στον τόπο εγκατάστασης και συναρμολογούνται μεταξύ τους υποθαλάσσια. Η κατασκευή πλατφόρμας με τον τρόπο αυτό πραγματοποιήθηκε στη Santa Barbara για βάθος νερού 265 m [7].

Εικ. 1.6 Η εξέδρα Brent A στο πεδίο του Brent της Βόρειας θάλασσας, σχεδιασμένη με δυνατότητα πλέυσης (Self floating Jacket) [4].

<u>Η εμφάνιση των πρώτων γεωτρητικών σκαφών (drilling ships)</u>

Επειδή στην Καλιφόρνια το βάθος αυξάνει γρήγορα πολύ κοντά στην ακτή, η αντιμετώπιση ήταν εντελώς διαφορετική από εκείνη στον κόλπο του Μεξικού. Εξέδρες τοποθετήθηκαν πάνω σε γάστρες πλοίων του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου, τροποποιημένες για γεώτρηση σε κατάσταση επίπλευσης, σε σύγκριση με τις φορτηγίδες καθισμένες στον πυθμένα του ωκεανού, όπως γινόταν στον κόλπο του Μεξικού. Οι πετρελαϊκές εταιρείες σχημάτιζαν συνεργασίες ή προχωρούσαν ανεξάρτητα, αλλά οι εξέδρες τύπου MODU δεν είχαν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από εταιρείες με σύμβαση γεώτρησης στην Καλιφόρνια. Όλος ο σχεδιασμός και η κατασκευή γινόταν με ιδιαίτερα μυστικοπαθή τρόπο με περιορισμένη ανταλλαγή γνώσεων, επειδή θεωρήθηκε ότι η τεχνολογία έδινε πλεονέκτημα στην υποβολή προσφορών για κρατικές μισθώσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πριν από την εκχώρηση των δικαιωμάτων του πετρελαίου και του φυσικού αερίου το 1955, οι εταιρείες πετρελαίου επικεντρώθηκαν κυρίως σε μικρές εξέδρες που προεξείχαν στη μία πλευρά πάνω από το μισό της γάστρας πλοίων του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου. Αυτές οι φορτηγίδες δεν διέθεταν εξοπλισμό ελέγχου πηγαδιού ή τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν διαδικασίες τοποθέτησης περιβλήματος πηγαδιού. Μπορούσαν μόνο να τρυπήσουν σε ένα καθορισμένο βάθος με την προϋπόθεση ότι αν έβρισκαν πετρέλαιο ή / και φυσικό αέριο σε στρώμα άμμου, θα έπρεπε να σταματήσουν, να σφραγίσουν με τσιμέντο και να αποσυρθούν από το πηγάδι αυτό. Αυτού του είδους τα σκάφη ήταν εξαιρετικά ευαίσθητα στην δράση των κυμάτων, με αποτέλεσμα να προκαλείται σημαντικός διατοιχισμός, κατακόρυφη ταλάντωση και προνευτασμός, καθιστώντας δύσκολη τη λειτουργία τους.

Με την άδεια από την πολιτεία της Καλιφόρνια για την εξερεύνηση και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, ο έλεγχος του πηγαδιού και η ικανότητα χρήσης πολλαπλών σειρών περιβλημάτων έγινε υποχρεωτική και απαιτούσε εντελώς νέες, μη δοκιμασμένες τεχνολογίες. Η πρώτη πλωτή εξέδρα που χρησιμοποιούσε υποθαλάσσιο έλεγχο της πηγής ήταν το γεωτρητικό σκάφος (drilling ship) Western Explorer (Εικ. 1.7) που άνηκε στην εταιρία Chevron, το οποίο έσκαψε το πρώτο πηγάδι το 1955 στο κανάλι της Santa Barbara. Γρήγορα ακολούθησαν κι άλλοι, οι οποίοι ήταν ευαισθητοποιημένοι όσον αφορά το θαλάσσιο περιβάλλον και είχαν την τεχνολογία που τους επέτρεπε να σκάψουν ακόμα και σε κακοκαιρία. Το 1956, το γεωτρητικό σκάφος CUSS 1 κατασκευάστηκε από μια άλλη φορτηγίδα του Β 'Παγκοσμίου Πολέμου. Η μονάδα αυτή, που χτίστηκε από την CUSS group (Continental, Union, Shell, and Superior Oil), είχε μήκος 86 m και πλάτος 16 m. Η CUSS group τελικά εξελίχθηκε στη σημερινή Global Santa Fe.

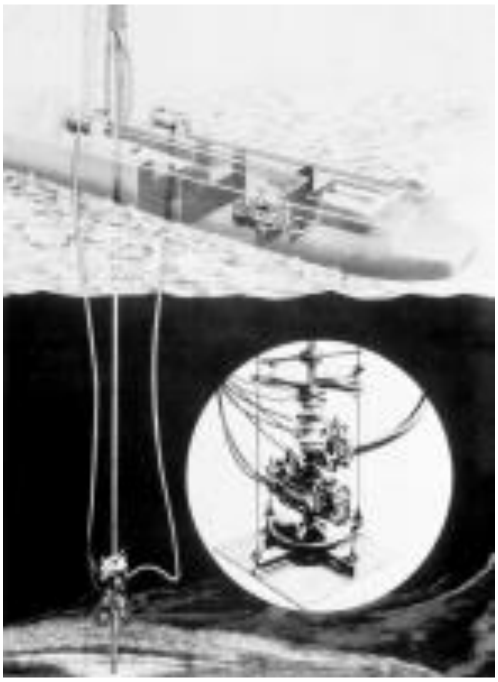
Εικ. 1.7 Western Explorer, η πρώτη (1955) πλεούμενη εξέδρα γεώτρησης τύπου MODU που χρησιμοποιούσε υποθαλάσσιο έλεγχο του πηγαδιού. Αποσύρθηκε το 1972 [6].

Οι αρχικοί σχεδιαστές δεν είχαν παραδείγματα ή εμπειρίες να τους καθοδηγήσουν οπότε υπήρχε μεγάλη ευχέρεια στη χρήση καινοτομιών και νέων τεχνολογιών:

- Μετατροπείς ροπής στα ανυψωτικά βαρούλκα χρησιμοποιήθηκαν ως αντισταθμιστές της κατακόρυφης κινησης-ταλάντωσης
- Περιστροφικοί μηχανισμοί χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστάθμιση του διατοιχισμού και του προνευτασμού
- Ο πύργος γεώτρησης τοποθετήθηκε στο μέσο του πλοίου πάνω από ένα κατάλληλο άνοιγμα
- Συσκευές πρόληψης των εκρήξεων (blowout preventers) τοποθετήθηκαν σε περίβλημα στον πυθμένα της θάλασσας
- Επανείσοδος στο πηγάδι γινόταν μέσω μιας χοάνης πάνω από μια περιστρεφόμενη κεφαλή
- Φρεάτια λάσπης τοποθετήθηκαν στη γάστρα με αντλίες λάσπης
- Προστέθηκαν κοιτώνες προσωπικού

Ήταν μια συναρπαστική εποχή με αξιοσημείωτα αποτελέσματα, αν αναλογιστεί κανείς ότι ο καθένας είχε αρχίσει με μια λευκή κόλλα χαρτιού.

Εικ. 1.8 Humble SM-1, εξέδρα τύπου MODU σχεδιασμένη από την εταιρεία Humble Oil & Refining Co. το 1957. Μία από τις πολλές «μυστικές» μονάδες εξόρυξης στα μέσα του 1950 [8].



Εικ. 1.9 Υποθαλάσσιο σύστημα εξόρυξης που χρησιμοποιούνταν στην υπεράκτια περιοχή της Καλιφόρνια [8].

Η ιδέα της jack-up πλατφόρμας

Μετά τις εξέδρες Mr. Charlie (με κατασκευή στον πυθμένα) και Western Explorer (πλεούμενη χωρίς κατασκευή στον πυθμένα) ως τις πρώτες κινητές υπεράκτιες μονάδες εξόρυξης (MODUs), μια νέα ιδέα για τέτοιου είδους εξέδρα έκανε την εμφάνισή της, με τη μορφή μιας «jack-up» πλατφόρμας. Αυτό το είδος της εξέδρας επιπλέει στη θέση εργασίας πάνω σε μια γάστρα με πολλαπλά πόδια που προεξέχουν κάτω από το σώμα της γάστρας. Όταν βρίσκεται στο σημείο εγκατάστασης, τα πόδια βυθίζονται ηλεκτρικά ή υδραυλικά μέχρι τον πυθμένα και στη συνέχεια η γάστρα της εξέδρας ανυψώνεται έξω από το νερό. Με την προσέγγιση αυτή, είναι διαθέσιμη μια σταθερή πλατφόρμα από την οποία πραγματοποιείται η γεώτρηση. Στο Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η De Long τοποθετούσε κωνικά πέλματα (spudcan jacks) σε φορτηγίδες προς κατασκευή και σε αποβάθρες. Οι εξέδρες τύπου De Long ήταν οι πρώτες jack-up πλατφόρμες που κατασκευάστηκαν το 1954 (Η Εικ. 1.10 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα, την εξέδρα Gus I) [9]. Παρόλο που οι jack-up πλατφόρμες αρχικά σχεδιάστηκαν με 6 έως 8 πόδια και στη συνέχεια μερικές με 4, η συντριπτική πλειοψηφία των μονάδων αυτών σήμερα έχουν 3 πόδια. Η εξέδρα Gus I κατασκευάστηκε με ανεξάρτητα πόδια. Η εταιρεία Le Tourneau Co. κατασκεύασε για την Zapata Corp. την πρώτη jack-up πλατφόρμα με πόδια-δικτυώματα, την Scorpion (Εικ. 1.11), η οποία είχε ανεξάρτητα πόδια με κωνικά πέλματα στήριξης στο βυθό. Μέχρι και σήμερα, η εταιρεία Le Tourneau συνεχίζει να ειδικεύεται σε jack-up πλατφόρμες τύπου MODU με πόδια δικτυώματα.

Εικ. 1.10 Η εξέδρα Gus I, με σύστημα στήριξης τύπου De Long, κατασκευάστηκε το 1954 σε βάθος νερού περίπου 33 m, και αποτελεί τον πρόδρομο των σύγχρονων jack-up εξεδρών. Καταστράφηκε τελικά σε μία καταιγίδα [9].

Εικ. 1.11 Εξέδρα Scorpion της Le Tourneau, κατασκευάστηκε για την τότε Zapata (τώρα Diamond Offshore Drilling Inc.) το 1956 σε βάθος νερού περίπου 26 m. Ήταν jack-up πλατφόρμα με ανεξάρτητα πόδια με δικτυώματα. Αποσύρθηκε το 1969 [9].

Μια σημαντική εξέλιξη για τον σχεδιασμό jack-up εξεδρών ήταν η εισαγωγή μιας επιπλέον υποκατασκευής-προβόλου για τη στήριξη του πύργου γεώτρησης (cantilevered drill-floor substructure) (Εικ. 1.12) στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Καθώς οι σταθερές εξέδρες έγιναν μεγαλύτερες, οι μηχανισμοί ανύψωσης (slot jackups) δεν μπορούσαν να ενσωματώσουν την πλατφόρμα ή να την περιβάλλουν μαζί με τον εξοπλισμό γεώτρησης. Ωστόσο, η μονάδα στήριξης του πύργου γεώτρησης μπορούσε να ολισθαίνει έξω από την πλατφόρμα αφού υπήρχε η κατάλληλη στήριξη δίπλα της. Πριν την εμφάνιση των προβόλων αυτών, όλοι οι μηχανισμοί ανύψωσης (jackups) είχαν οδηγούς (slots), διατομής συνήθως 5,5 m^2. που βρίσκονταν στο πρυμναίο άκρο της γάστρας. Κατά τη διάρκεια ρυμούλκησης, η υποκατασκευή ολίσθαινε προς το μετάκεντρο του κύτους, αλλά κατά τη διάρκεια της γεώτρησης, η υποκατασκευή ολίσθαινε προς το πρυμναίο τμήμα. Ο μηχανισμός γεώτρησης μπορούσε να ολισθαίνει προς κάθε πλευρά για να φθάνει το πηγάδι έκκεντρα, ακριβώς όπως κάνουν οι σημερινές μονάδες.

Εικ. 1.12 Jack-up εξέδρα 116C της Le Tourneau με πρόβολο στήριξης του μηχανισμού γεώτρησης πάνω από σταθερή πλατφόρμα. Αντίστοιχος σχεδιασμός με τις σημερινές jack-up εξέδρες [9].

Η εμφάνιση και η εξέλιξη της ημιβυθισμένης εξέδρας (semi-submersible platform)

Τα πράγματα είχαν αρχίσει να πηγαίνουν καλά την δεκαετία το 1950, με πολλές επιχειρήσεις να μπαίνουν στο παιχνίδι ιδιοκτησίας και λειτουργίας εξεδρών και νέες εταιρείες να εμφανίζονται κάθε χρόνο και να αναλαμβάνουν έργα γεώτρησης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, η Shell Oil διέκρινε την ανάγκη να έχει μια πλατφόρμα εξόρυξης με μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων στα πιο βαθιά και πολυτάραχα νερά του κόλπου του Μεξικού. Παρατήρησε ότι οι βυθισμένες εξέδρες, όπως η Mr. Charlie, είχαν μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων σε σύγκριση με μονόγαστρες εξέδρες. Η ιδέα ήταν να τοποθετηθούν άγκυρες σε μια βυθισμένη εξέδρα, να χρησιμοποιηθεί ένα μέρος από την τεχνολογία της Καλιφόρνια για υποθαλάσσιο εξοπλισμό και να μετατραπεί μια βυθισμένη πλατφόρμα σε μια μονάδα που είναι σήμερα γνωστή ως ημιβυθισμένη πλατφόρμα. Έτσι, το 1961, η βυθισμένη εξέδρα Bluewater I (Εικ. 1.13) μετατράπηκε σε μια ημιβυθισμένη εξέδρα με άκρα τεχνολογική μυστικότητα. Στην πραγματικότητα, στα μέσα της δεκαετίας του 1960, η Shell Oil προσέφερε την τεχνολογία της στη βιομηχανία, σε ένα σχολείο στην τιμή των 100.000 δολαρίων ανά συμμετέχοντα και είχε πολλούς ενδιαφερόμενους.

Στη συνέχεια ήρθε η Ocean Driller (Εικ. 1.14), η πρώτη ημιβυθισμένη πλατφόρμα που κατασκευάστηκε από την αρχή (χωρίς μετατροπή από κάποια άλλη). Η Ocean Driller, σχεδιάστηκε και άνηκε στην ODECO, χρησιμοποιήθηκε προς όφελος της Texaco το 1963, με τον υποθαλάσσιο εξοπλισμό και τον εξοπλισμό αγκύρωσης να ανήκουν στην εταιρεία που την λειτουργεί, όπως ήταν σύνηθες στη δεκαετία του 1960. Η μονάδα σχεδιάστηκε για βάθος περίπου 100 m, με τις δοκιμές του μοντέλου της γάστρας να γίνονται στην πισίνα του Doc Laborde. Η εξέδρα Ocean Driller μπορούσε επίσης να καθίσει στον πυθμένα και να λειτουργήσει ως βυθισμένη πλατφόρμα, όπως και έγινε μέσα στη δεκαετία του 1980.

Εικ. 1.13 Εξέδρα Bluewater No.1, η πρώτη ημιβιθσμένη MODU στον κόσμο, μετατράπηκε το 1961/1962 από την Shell Oil από μια βυθισμένη εξέδρα. Καταστράφηκε το 1964 [10].

Εικ. 1.14 Πρώτη σκόπιμα κατασκευασμένη ημιβυθισμένη MODU, Η εξέδρα Ocean Driller ανεγέρθη το 1963. Μπορούσε να λειτουργήσει και σαν βυθισμένη πλατφόρμα. Αποσύρθηκε το 1992 [10].

Οι περισσότερες από τις ημιβυθισμένες εξέδρες πρώτης γενιάς μπορούσαν να καθίσουν στο βυθό ή να κάνουν εξόρυξη πλέοντας χωρίς να έρχονται σε επαφή με τον πυθμένα. Το σχήμα και το μέγεθος των πρώτων ημιβυθισμένων εξεδρών ποίκιλαν ευρέως, καθώς οι σχεδιαστές προσπαθούσαν να βελτιστοποιήσουν τα χαρακτηριστικά κίνησης των μονάδων, τη διάταξη της εξέδρας, δομικά χαρακτηριστικά και άλλους παράγοντες. Η "γενιά" αυτή των ημιβυθισμένων εξεδρών χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμό του πότε κατασκευάστηκε ή αναβαθμίστηκε σημαντικά η μονάδα, του βάθους του νερού, καθώς και της γενικής συνολικής ικανότητας διάτρησης.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μια νέα, δεύτερης γενιάς ημιβυθισμένη εξέδρα σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με νεότερο, πιο εξελιγμένο σύστημα αγκύρωσης και υποβρύχιο εξοπλισμό. Το μοντέλο αυτό γενικά σχεδιάστηκε για βάθος νερού 200 m, με κάποιες μονάδες όμως να ξεπερνούν ακόμα και τα 350 m. Η κατηγορία των εξεδρών Ocean Victory (Εικ. 1.15) ήταν χαρακτηριστική των κατασκευών αυτής της εποχής, η οποία επικεντρώθηκε σε μεγάλο βαθμό στη μείωση των κινήσεων της πλατφόρμας έναντι της αύξησης της ικανότητας να φέρει υψηλότερο μεταβλητό φορτίο στο ανώτατο κατάστρωμα (Variable Deck Load). Γενικά κατασκευάστηκαν πολλές εξέδρες και προς τα τέλη της δεκαετίας του 1980, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν μια σειρά από ημιβυθισμένες πλατφόρμες τρίτης γενιάς, που μπορούσαν να αγκυρωθούν και να λειτουργήσουν σε βάθος μεγαλύτερο των 1000 m και σε πιο αντίξοες συνθήκες. Πολλές από τις μονάδες τρίτης γενιάς αναβαθμίστηκαν τη δεκαετία του 1990 και μπορούσαν να λειτουργήσουν σε ακόμα βαθύτερα νερά, ενώ είχαν περισσότερες δυνατότητες και έγιναν έτσι μονάδες τέταρτης γενιάς. Με λίγες εξαιρέσεις, το εκτόπισμα λειτουργίας αυτών των εξεδρών κυμάνθηκε από περίπου 18,000 τόνους το 1970 σε περισσότερους από 40.000 τόνους τη δεκαετία του 1980.

Εικ. 1.15 Ημιβυθισμένη εξέδρα δεύτερης γενιάς της κατηγορίας Ocean Victory. Η εν προκειμένω είναι η Ocean Voyager, εγκατεστημένη στη Βόρεια θάλασσα στις αρχές του 1970. Αυτός ο σχεδιασμός αποδείχτηκε πολύ ελκυστικός για αναβάθμιση σε εξέδρα τέταρτης και πέμπτης γενιάς [10].

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, οι μονάδες πέμπτης γενιάς, όπως η Deepwater Nautilus που φαίνεται στην Εικ. 1.16, έγιναν ακόμη μεγαλύτερες (> 50.000 tons εκτόπισμα) και πιο αποδοτικές. Οι εξέδρες αυτές μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά αντίξοες συνθήκες και σε βάθος νερού μεγαλύτερο από 1500 m. Σε ορισμένες ημιβυθισμένες εξέδρες δεύτερης και τρίτης γενιάς έχουν γίνει συντηρήσεις στη γάστρα για να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής, καθώς και αναβαθμίσεις του εξοπλισμού γεώτρησης, έτσι ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν ως μονάδες τέταρτης γενιάς. Η Εικ. 1.17 δείχνει μία μονάδα δεύτερης γενιάς της κατηγορίας Ocean Victory (βλέπε Εικ. 1.11), η οποία αναβαθμίστηκε ολοκληρωτικά σε μονάδα πέμπτης γενιάς, ικανή να αγκυρωθεί και να λειτουργεί σε βάθος νερού 2100 m. Να σημειωθεί επίσης, η προσθήκη εξωτερικών στύλων άνωσης (blisters) για αυξημένο μεταβλητό φορτίο καταστρώματος (VDL), η αύξηση 50% περίπου του χώρου του καταστρώματος, καθώς και η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα για σωλήνες γεώτρησης και χειρισμού αυτών. Ένας περιορισμένος αριθμός τρίτης, τέταρτης, και πέμπτης γενιάς ημιβυθισμένων εξεδρών διαθέτουν συστήματα υποβοήθησης δυναμικής διατήρησης της θέσης τους (Dynamic Positioning, DP) ή πλήρη συστήματα δυναμικής διατήρησης της θέσης τους (full-DP station keeping), έναντι διαδεδομένων συστημάτων αγκύρωσης.

Εικ. 1.16 Deepwater Nautilus, μια από τις πιο νέες ημιβυθισμένες εξέδρες πέμπτης γενιάς που έχει σύστημα υποβοήθησης για την διατήρηση της θέσης της. Παρατηρήστε τις φαρδιές κολόνες για αυξημένο μεταβλητό φορτίο και ευστάθεια [10].

Εικ. 1.17 Ocean Baroness, μια από τις ημιβυθισμένες εξέδρες κατηγορίας Ocean Victory δεύτερης γενιάς που αναβαθμίστηκε σε πέμπτης γενιάς. Παρατηρήστε τις επιπλέον στήλες άνωσης (blisters), την επέκταση του καταστρώματος και τους πολύ μεγαλύτερους πύργους γεώτρησης. Σε αυτήν την εξέδρα στη Μαλαισία το 2003 έγιναν έργα προστασίας από έκρηξη (BOP work). Επίσης κατέριψε το παγκόσμιο ρεκόρ βάθος νερού (2030 m) με κατανεμημένο σύστημα αυτόνομης αγκύρωσης (self-contained spread-mooring) [10].

Tender Assist Drilling (TAD) Units

Η ιδέα της “TAD” εξέδρας χρησιμοποιήθηκε για τη διάνοιξη του πρώτου πηγαδιού στον κόσμο “πέρα από τη θέα της στεριάς”. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος εξερεύνησης και έχει εξελιχθεί πλέον σε ένα εργαλείο ανάπτυξης. Οι πρώτες εξέδρες διαμορφώθηκαν σε μορφή φορτηγίδων, αλλά μερικές είναι τώρα σε σχήμα πλοίων για καλύτερη δυνατότητα μετακίνησης.

Βασικά, το σύνολο του γεωτρητικού εξοπλισμού αποτελείται μόνο από τον πύργο γεώτρησης, ένα ανυψωτικό μηχάνημα, συσκευές πρόληψης εκρήξεων και εξοπλισμό καθαρισμού της λάσπης, μειώνοντας τον απαιτούμενο χώρο και το βάρος που τοποθετείται επί της σταθερής πλατφόρμας. Το υπόλοιπο της εξέδρας βρίσκεται σε βοηθητική πλατφόρμα (tender hull) που είναι αγκυρωμένη δίπλα στη σταθερή πλατφόρμα και περιλαμβάνει τις αντλίες, τις γεννήτριες, αποθήκες σωληνώσεων και περιβλημάτων, καύσιμα, εξοπλισμό ενδιαίτησης κ.τ.λ.

Ο σχεδιασμός αυτός αποδείχθηκε ότι ήταν πολύ αποδοτικός για εξόρυξη σε μικρές σταθερές πλατφόρμες. Δυστυχώς, σε αντίξοες, αλλά ακόμα και σε ήπιες, καιρικές συνθήκες, υπάρχει πιθανότητα οι γραμμές αγκύρωσης να αστοχήσουν και να σπάσουν, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του κινητού μέρους της εξέδρας, όπως έχει συμβεί επανειλημμένα σε τέτοιες κατασκευές στον Κόλπο του Μεξικού. Σήμερα, οι περισσότερες “TAD” μονάδες λειτουργούν σε περιβάλλοντα με εύκρατες καιρικές συνθήκες στην Άπω Ανατολή και τη Δυτική Αφρική.

Το 1992, η πρώτη ημιβυθισμένη “TAD” μονάδα, η Seahawk (Εικ. 1.18) μετατράπηκε από μια παλιά ημιβυθισμένη εξέδρα τύπου MODU. Η ημιβυθισμένη γάστρα προσέφερε καλύτερη διατήρηση της θέσης και καλύτερες κινήσεις της εξέδρας, σε σχέση με εξέδρες σε μορφή φορτηγίδων ή σε σχήμα πλοίων. Σε μια ημιβυθισμένη γάστρα τα κύματα περνούν διαμέσου της “διαφανούς” γάστρας χωρίς να προκαλούν διεγερτικές δυνάμεις σε αντίθεση με μονές γάστρες, ενώ οι πυλώνες προσφέρουν μειωμένη εκτεθειμένη επιφάνεια στους κυματισμούς. Επίσης, το κατώτερο επίπεδο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας σε μεγαλύτερο βύθισμα και το ανώτατο κατάστρωμα (χώρος εργασίας) είναι πάνω από την επήρεια των κυματισμών.

Οι εξέδρες "TAD" είναι κατάλληλες για παραγωγή σε μεγάλα βάθη, αλλά παρόλα αυτά δε βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις μέρες μας. Ως εκ τούτου, δεν αναμένεται να συναντήσουμε στο μέλλον νέες σχεδιάσεις και νέες κατασκευές τέτοιου τύπου. Όμως, μπορεί να εμφανιστούν σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι κανείς εξοικειωμένος και με αυτές, προκειμένου να μπορεί να εκτιμά επιτυχώς μια υπάρχουσα πλατφόρμα γεώτρησης [10].

Εικ. 1.18 Η εξέδρα Seahawk, η πρώτη ημιβυθισμένη εξέδρα TAD παγκοσμίως. Μετατράπηκε από μία κινητή μονάδα υπεράκτιας εξόρυξης (MODU) το 1992 [10].

<u>Νέοι τύποι πλωτών κατασκευών</u>

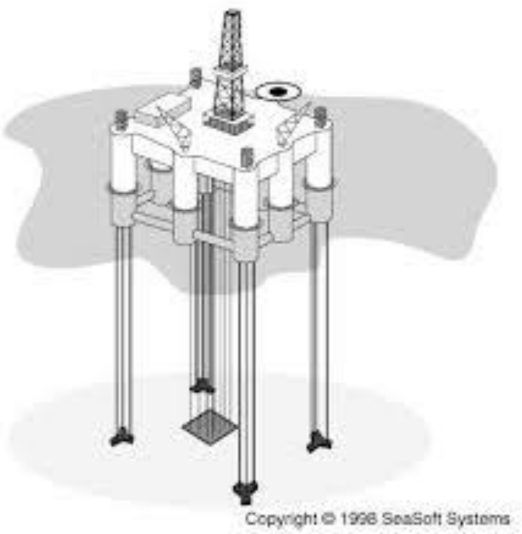
Η τάση για εκμετάλλευση θαλάσσιων περιοχών με πολύ μεγάλο βάθος νερού οδήγησε τα τελευταία χρόνια στη σχεδίαση και ανάπτυξη των λεγόμενων "ενδιδουσών" κατασκευών (compliant structures) [7]. Τα σημαντικότερα είδη στην κατηγορία αυτή είναι:

- Πλωτές κατασκευές που παραμένουν στη μέση θέση ισορροπίας τους με τη βοήθεια προεντεταμένων συρματόσχοινων (Tension-Leg-Platforms-TLP, Εικ. 1.19). Οι κατασκευές αυτές είναι κατάλληλες για ένα εύρος βάθους νερού περίπου 300-1500 m, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν πλωτές ανεμογεννήτριες. Η πρώτη πλατφόρμα με προεντεταμένα συρματόσχοινα κατασκευάστηκε στη Βόρεια θάλασσα στο πεδίο Hutton στις αρχές της δεκαετίας του 1980.

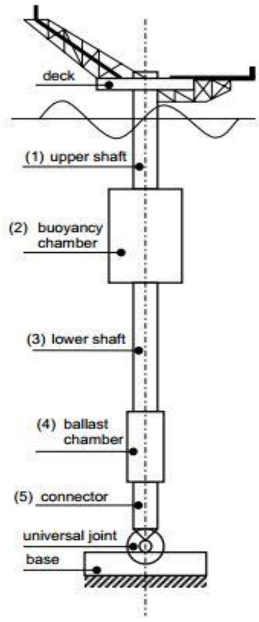
- Κατασκευές αρθρωτά συνδεδεμένες στο κατώτερο άκρο τους με θεμελίωση που βρίσκεται στον πυθμένα της θάλασσας (articulated towers, Εικ. 1.20). Η τεχνολογία των κατασκευών αυτών αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και η πρώτη αρθρωτά συνδεδεμένη πλωτή κατασκευή, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πεδίο Argyll της Βόρειας θάλασσας το 1975.

- Guyed-tower platforms. Κατά βάση είναι της ίδιας κατασκευαστικής αρχής με την προηγούμενη κατηγορία, οι δυνάμεις επαναφοράς όμως που απαιτούνται για τη συγκράτηση της κατασκευής στη μέση θέση ισορροπίας της δημιουργείται από σύστημα αγκυρώσεων. Η πλατφόρμα της ExxonMobil Lena (Εικ. 1.22) ήταν η πρώτη εξέδρα τέτοιου τύπου και κατασκευάστηκε στον κόλπο του Μεξικού σε βάθος 330 m το 1984.

- Spar platforms (Εικ. 1.21). Η πλατφόρμα Spar αποτελείται από έναν μεγάλης διαμέτρου ενιαίο κατακόρυφο κύλινδρο που υποστηρίζει το κατάστρωμα, ενώ συγκρατείται στη θέση ισορροπίας της με ένα σύστημα αγκύρωσης, που αποτελείται από 6-20 τεταμένες αλυσίδες αγκυροβολημένων στον πυθμένα της θάλασσας. Η πρώτη πλατφόρμα Spar κατασκευάστηκε από την Oryx Energy στον κόλπο του Μεξικού σε βάθος νερού 640 m το Σεπτέμβριο του 1996 [11].



Εικ. 1.19 Τυπική μορφή μιας πλατφόρμας με προεντεταμένα συρματόσχοινα (Tension Leg Platform-TLP) [11].



Εικ. 1.20 Βασική διάταξη ενός πύργου αρθρωτά συνδεδεμένου με τον πυθμένα (Articulated Tower) [11].

Εικ. 1.21 Η εξέδρα Devil's Tower στον κόλπο του Μεξικού. Αποτελεί εξέδρα τύπου Spar και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε στο τέλος του 2003. Είναι φανερή η στήριξη του καταστρώματος στον κατακόρυφο κύλινδρο [11].

Εικ. 1.22 Η πλατφόμα Lena της ExxonMobil. Είναι η πρώτη πλατφόρμα Guyed Tower και κατασκευάστηκε το 1984 στον κόλπο του Μεξικού [11].

Από το 1950 και μετά, έχουν κατασκευαστεί και εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο περίπου 7.000 πλατφόρμες. Σήμερα ο αριθμός των εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου σε όλο τον κόσμο ανέρχεται περίπου στις 1500, από τις οποίες μόνο οι 850 βρίσκονται σε λειτουργία. Οι υπόλοιπες είτε δε χρησιμοποιούνται για ορισμένους λόγους είτε είναι υπό κατασκευή. Οι περισσότερες πλατφόρμες βρίσκονται κατά μήκος της αμερικανικής ακτής στον Κόλπο του Μεξικού και αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 65% του συνόλου. Οι υπόλοιπες είναι συγκεντρωμένες στη Βόρεια Θάλασσα, τη Μέση Ανατολή, την Αφρική, την Αυστραλία, την Ασία και τη Νότια Αμερική (Wilson III και Heath, 2008).

Μία από τις πιο εντυπωσιακές εξέδρες σήμερα είναι η Perdido (Εικ. 1.23), όπου είναι η βαθύτερη πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου στον κόσμο, εγκατεστημένη σε βάθος νερού 2450 m. Βρίσκεται στον κόλπο του Μεξικού, είναι πλατφόρμα τύπου Spar και ανήκει στην Shell Oil company. Η εξέδρα έχει ύψος 267 m, σχεδόν το ύψος του πύργου του Eiffel. Μια ακόμη πιο εντυπωσιακή εξέδρα εξόρυξης είναι η Berkut (Εικ. 1.24), η οποία βρίσκεται στην ρωσική ακτή του ειρηνικού ωκεανού κοντά στο νησί Sakhalin βόρεια της Ιαπωνίας. Είναι η μεγαλύτερη εξέδρα πετρελαίου στον κόσμο και μπορεί να λειτουργεί ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες (μέχρι 20 m κύμα). Τέθηκε σε λειτουργία μόλις το Δεκέμβριο του 2014.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το 0,4% των παγκόσμιων αποθεμάτων του πετρελαίου και φυσικού αερίου βρίσκονται στη λεκάνη της Μεσογείου και ως εκ τούτου, αυτή η περιοχή αντιπροσωπεύει μία από τις περιοχές που θα έχουν μεγαλύτερη επέκταση σε υπεράκτιες δραστηριότητες στα επόμενα χρόνια [12].

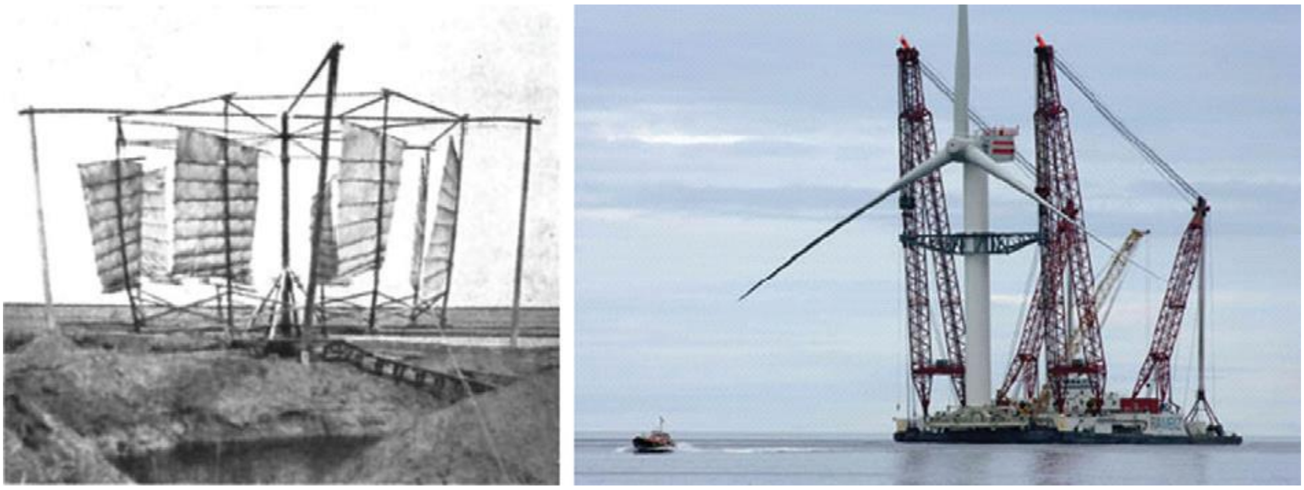
Εικ. 1.23 Η εξέδρα Perdido στον κόλπο του Μεξικού. Ολοκληρώθηκε το 2009 και αποτελεί τη βαθύτερη πλατφόρμα εξόρυξης (2450 m) [11].

Εικ. 1.24 Η εξέδρα Berkut στη ρωσική ακτή του ειρηνικού ωκεανού. Αποτελεί τη μεγαλύτερη πλωτή κατασκευή στον κόσμο και ζυγίζει πάνω από 200.000 tn χωρίς τη βάση της [11].

1.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η ανάπτυξη και η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μετρά χιλιάδες χρόνια, από την αφετηρία των πρώτων μηχανών κατακόρυφου άξονα που λειτουργούσαν βάσει της οπισθέλκουσας δύναμης, μέχρι την τρέχουσα χρονική στιγμή, κατά την οποία οι ανεμογεννήτριες έχουν φθάσει την κλίμακα δεκάδων MW (Εικ. 1.25).

Η συνεχής εξέλιξη της έννοιας της αιολικής ενέργειας όλη αυτή την περίοδο, ίσως να μαρτυρείται με τον πιο απλό τρόπο από το γεγονός ότι βρισκόμαστε τώρα αναμφισβήτητα στην εποχή της τέταρτης γενιάς μηχανών αιολικής ενέργειας [13]. Από τα πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, όταν οι πρώτοι ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιήθηκαν για το άλεσμα, μέχρι και την εποχή όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με την περιστροφή τεράστιων πτερυγίων σε εποξική βάση ενισχυμένα με ανθρακονήματα, και την εποχή της εκμετάλλευσης της υπεράκτιας δυναμικής, η ανθρωπότητα συνάντησε πολλούς τύπους και διάφορους σχεδιασμούς ανεμογεννητριών, που πάντα κατείχαν μια σημαντική θέση στο βωμό της τεχνολογικής ανάπτυξης.



Εικ. 1.25 Εξέλιξη της αιολικής ενέργειας: από τις πρώτες μηχανές κατακόρυφου άξονα (αριστερά) στις σημερινές εντυπωσιακές εγκαταστάσεις μερικών MW (δεξιά) [13].

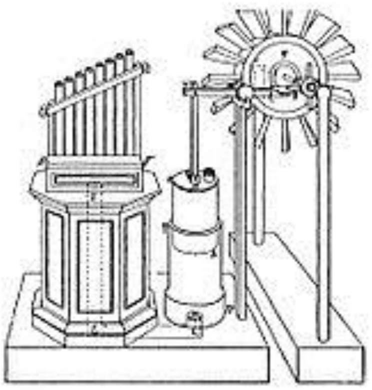
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η ιστορία της αιολικής ενέργειας δείχνει μια γενική εξέλιξη από τη χρήση απλών, ελαφριών συσκευών έως συσκευές με μεγαλύτερο βάρος και μεγάλες ποσότητες υλικού που όλες καθοδηγούνταν από αεροδυναμικές δυνάμεις τριβής (οπισθέλκουσας- ένα πανί κάθετα στη ροή του αέρα έχει μηδενική άνωση και μη μηδενική οπισθέλκουσα) και έως την αυξημένη χρήση ελαφριών, με αποδοτική χρήση υλικών, συσκευών αεροδυναμικής άνωσης στη σύγχρονη εποχή. Αλλά δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ότι η αεροδυναμική άνωση είναι μια σύγχρονη έννοια που ήταν άγνωστη για τους αρχαίους. Η παλαιότερη γνωστή χρήση της αιολικής ενέργειας, φυσικά, είναι η βάρκα με πανί και αυτή η τεχνολογία είχε σημαντικό αντίκτυπο στην μετέπειτα ανάπτυξη των ανεμόμυλων με χρήση πανιών. Οι αρχαίοι ναύτες κατανοούσαν την άνωση και τη χρησιμοποιούσαν κάθε μέρα, ακόμα κι αν δεν ήξεραν την φυσική εξήγηση του πώς και γιατί λειτουργούσε.

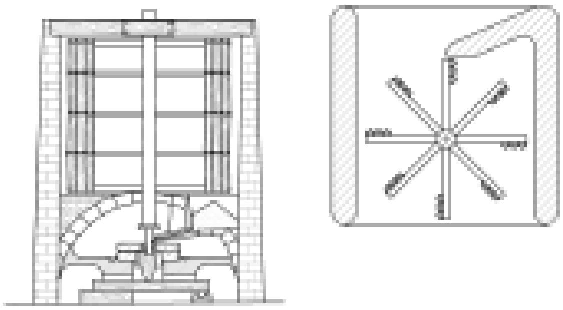
Οι πρώτες χρήσεις της αιολικής ενέργειας

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται στα ιστιοφόρα πλοία πάνω από 5.500 χρόνια, ενώ αρχαίοι αρχιτέκτονες χρησιμοποιούσαν τη δύναμη του ανέμου για να λειτουργήσουν φυσικό εξαερισμό σε κτίρια. Ακόμη, ο αυτοκράτορας της Βαβυλώνας Χαμουραμπί σχεδίαζε να χρησιμοποιήσει την αιολική ενέργεια για το φιλόδοξό του σχέδιο άρδευσης τον 17ο αι. π.Χ. [14]. Η χρήση όμως του ανέμου για παροχή μηχανικής ενέργειας ήρθε λίγο αργότερα κατά την αρχαιότητα. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν στην Περσία (σημερινό Ιράν) περίπου το 200 π.Χ., ωστόσο αυτός που θεωρείται ότι σηματοδότησε τα πρώτα ίχνη μηχανής (όχι μύλος) η οποία χρησιμοποιούσε την ενέργεια του ανέμου ήταν ο Ήρωνας ο Αλεξανδρεύς, τον 1ο αι. μ.Χ., ο οποίος χρησιμοποίησε μια διάταξη όπως αυτή στην Εικ. 1.26, για να λειτουργήσει ένα μουσικό όργανο [15,16].

Οι πρώτοι πρακτικοί ανεμόμυλοι χτίστηκαν στο Σιστάν της Περσίας, μια ανατολική επαρχία του σημερινού Ιράν, τουλάχιστον τον 9ο αι. μ.Χ. και πιθανόν ήδη από τον 7ο αιώνα μ.Χ.. Ήταν οριζόντιοι ανεμόμυλοι (Εικ. 1.27), οι οποίοι είχαν μεγάλους κάθετους άξονες με έξι έως δώδεκα ορθογώνια πανιά καλυμμένα με ψάθα η ύφασμα. Οι ανεμόμυλοι αυτοί κατασκευάστηκαν για να αυτοματοποιήσουν τις εργασίες της άλεσης των σιτηρών και της άντλησης νερού [17]. Η πρώτη χρήση ήταν προφανώς η άντληση νερού, αλλά η ακριβής μέθοδος μεταφοράς του νερού δεν είναι γνωστή, γιατί δεν υπάρχουν σχέδια διαθέσιμα, παρά μόνο προφορικές μαρτυρίες. Η πρώτη γνωστή τεκμηριωμένη σχεδίαση είναι επίσης ένας περσικός ανεμόμυλος με κάθετα πανιά φτιαγμένα από δέσμες καλαμιών ή ξύλου, τα οποία συνδέονται με τον κεντρικό κατακόρυφο άξονα με οριζόντιες δοκούς.



Εικ. 1.26 Η διάταξη του Ήρωνα του Αλεξανδρέως που χρησιμοποιούσε την αιολική ενέργεια για να παράξει μηχανική ενέργεια και να λειτουργήσει το μουσικό όργανο [15].

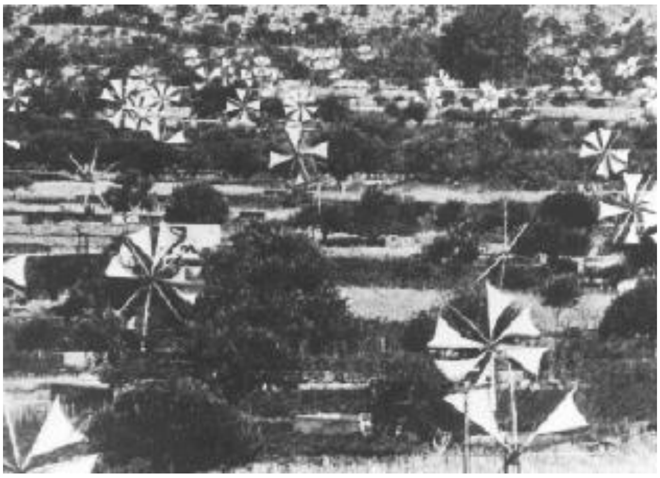


Εικ. 1.27 Τυπική διάταξη του περσικού οριζόντιου ανεμόμυλου [17].

Το άλεσμα των σιτηρών ήταν η πρώτη τεκμηριωμένη εφαρμογή ανεμόμυλου και ήταν πολύ απλή. Η πέτρα άλεσης ήταν σφηνωμένη στον ίδιο κατακόρυφο άξονα. Ο μηχανισμός του μύλου συνήθως περικλείονταν σε ένα κτίριο, το οποίο είχε επίσης έναν τοίχο ή ασπίδα για να εμποδίζει τον εισερχόμενο άνεμο από το να επιβραδύνει την πλευρά του ρότορα που κατευθυνόταν κόντρα στον άνεμο.

Ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιήθηκαν επίσης στην Κίνα, η οποία συχνά θεωρείται ότι είναι και η γενέτειρα τους. Ενώ η πεποίθηση ότι ο ανεμόμυλος εφευρέθηκε στην Κίνα περισσότερο από 2000 χρόνια πριν, είναι πολύ διαδεδομένη και μπορεί να είναι ακριβής, η πρώτη πραγματική τεκμηριωμένη εγκατάσταση κινεζικού ανεμόμυλου ήταν το 1219 μ.Χ. από τον Κινέζο πολιτικό Yehlu Chhu-Tshai. Και εδώ προφανώς, οι κύριες εφαρμογές ήταν επίσης το άλεσμα των σιτηρών και η άντληση νερού.

Μια από τις πιο κομψές και επιτυχημένες εφαρμογές αιολικής ενέργειας (και που εξακολουθεί να υπάρχει μέχρι και σήμερα), είναι η εκτεταμένη χρήση των μηχανών άντλησης νερού στο νησί της Κρήτης. Εκεί, κυριολεκτικά εκατοντάδες ανεμόμυλοι με περιστρεφόμενα πανιά αντλούν νερό για τις καλλιέργειες και την κτηνοτροφία (Εικ. 1.28).



Εικ. 1.28 Ανεμόμυλοι άντλησης νερού στο νησί της Κρήτης [18].

Εικ. 1.29 Ένας από τους πρώτους ανεμόμυλους οριζόντιου άξονα στις ακττές της Μεσογείου [19].

Ανεμόμυλοι στον δυτικό κόσμο

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που εμφανίστηκαν στη Δυτική Ευρώπη ήταν με διαμόρφωση οριζόντιου άξονα. Ο λόγος για την ξαφνική αλλαγή από την περσική διάταξη με κατακόρυφο άξονα είναι άγνωστη, αλλά το γεγονός ότι οι ευρωπαϊκοί υδρόμυλοι είχαν επίσης μια διαμόρφωση οριζόντιου άξονα (και προφανώς λειτούργησε ως το τεχνολογικό πρότυπο για τους πρώτους ανεμόμυλους) ίσως είναι η απάντηση. Ένας άλλος λόγος μπορεί να ήταν η υψηλότερη κατασκευαστική απόδοση που είχαν οι μηχανές, που λειτουργούσαν με δυνάμεις τριβής, οριζόντιου τύπου από τις αντίστοιχες κατακόρυφου τύπου, οι οποίες έχαναν έως και το μισό της περιοχής συλλογής του ρότορα λόγω των απαιτήσεων θωράκισης. Η πρώτη αναφορά σε ανεμόμυλο χρονολογείται το 1185, στο Weedly του Yorkshire και οι πρώτες μαρτυρίες δείχνουν έναν μύλο τεσσάρων πτερυγίων τοποθετημένα σε έναν κεντρικό στύλο, κατασκευή η οποία ήταν αρκετά προηγμένη τεχνολογικά σε σχέση με τους περσικούς μύλους [18]. Οι μύλοι αυτοί χρησιμοποιούσαν ξύλινους οδοντωτούς τροχούς για να μεταδώσουν την κίνηση του οριζόντιου άξονα σε κατακόρυφη κίνηση για να στραφεί η πέτρα άλεσης. Το γρανάζι αυτό προφανώς υιοθετήθηκε από τον υδρόμυλο οριζόντιου άξονα που είχε σχεδιαστεί από τον Βιτρούβιο.

Ήδη από το 1390, οι Ολλανδοί ξεκίνησαν να βελτιώνουν το σχεδιασμό του μύλου (Εικ. 1.30), που είχε εμφανιστεί νωρίτερα στη Μεσόγειο και κυρίως στην Ελλάδα (Εικ. 1.29). Ουσιαστικά τοποθέτησαν τον ανεμόμυλο στην κορυφή ενός πολυόροφου πύργου, με ξεχωριστούς ορόφους που κάθε ένας ήταν αποκλειστικά για το άλεσμα σιτηρών, την απομάκρυνση του άχυρου, την αποθήκευση των σιτηρών και στο κάτω μέρος υπήρχε κατοικήσιμος χώρος για το χειριστή του μύλου και την οικογένειά του. Τόσο ο πρώτος τύπος μύλου, όσο και ο μεταγενέστερος, έπρεπε να προσανατολιστούν προς τη μεριά του ανέμου χειροκίνητα, σπρώχνοντας ένα μεγάλο μοχλό στο πίσω μέρος του μύλου. Η βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος και η προστασία του μύλου από βλάβες, που είχαν να κάνουν με το τύλιγμα των πανιών κατά τη διάρκεια καταιγίδων, ήταν μεταξύ των κύριων ασχολιών του χειριστή του μύλου [19-21].


Εικ. 1.30 Περσικές μηχανές άλεσης με κατακόρυφο άξονα (αριστερά) και οι ανεμόμυλοι με οριζόντιο άξονα των Ολλανδών (δεξιά) [20].

Μία βασική βελτίωση των ευρωπαϊκών ανεμόμυλων ήταν η χρήση πανιών-πτερυγίων που παρήγαγαν αεροδυναμική άνωση. Αυτό το χαρακτηριστικό παρείχε βελτιωμένη απόδοση του ρότορα σε σχέση με τους περσικούς μύλους, επιτρέποντας την αύξηση της ταχύτητας του ρότορα, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα καλύτερη άλεση και άντληση του νερού.

Η διαδικασία τελειοποίησης των πτερυγίων του ανεμόμυλου, κάνοντας σταδιακές βελτιώσεις στην απόδοση, κράτησε περίπου 500 χρόνια. Όταν η διαδικασία τελειοποίησης είχε ολοκληρωθεί, τα πτερύγια των μύλων είχαν όλα τα βασικά χαρακτηριστικά που κρίνονται απαραίτητα από τους σύγχρονους σχεδιαστές και είναι ζωτικής σημασίας για την καλή απόδοση των πτερυγίων των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Συμπεριλάμβανε επομένως τα εξής: α) καμπυλότητα στο χείλος πρόσπτωσης, β) τοποθέτηση του ιστού του πτερυγίου (blade spar) στο ¼ του μήκους της χορδής (25% της διαδρομής προς τα πίσω από το χείλος πρόσπτωσης προς το χείλος εκφυγής), γ) κέντρο βάρους στην ίδια θέση, στο ¼ της χορδής και δ) μη γραμμική στρέβλωση του πτερυγίου από τη ρίζα ως την άκρη. Ορισμένα μοντέλα είχαν επίσης αεροδυναμικά φρένα, αεροτομές (spoilers) και flaps.

Οι μύλοι αυτοί ήταν οι «ηλεκτρικοί κινητήρες" της προ-βιομηχανικής Ευρώπης. Οι εφαρμογές ήταν ποικίλες, που κυμαίνονταν από την κοινή ύδρευση από πηγάδι, άρδευση και αποστραγγιστική άντληση χρησιμοποιώντας έναν τροχό με σκαφίδια (scoop wheel) μονά ή ανά ζεύγη, άλεση σιτηρών (και πάλι χρησιμοποιώντας μία ή πολλαπλές πέτρες άλεσης), επεξεργασία του ξύλου, καθώς και την επεξεργασία άλλων εμπορευμάτων όπως καρυκεύματα, κακάο, χρώματα και χρωστικές ουσίες και τον καπνό.

Κατά το 19ο αιώνα, η χρήση μεγάλων μύλων μειώθηκε με την αυξημένη χρήση των ατμομηχανών. Η περαιτέρω τόνωση της ανάπτυξης και της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας σημειώθηκαν πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα προς τα δυτικά. Τα συστήματα τελειοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τη διάρκεια του ίδιου αιώνα, αρχίζοντας με τον ανεμόμυλο Halladay το 1854, και συνεχίζοντας με τους σχεδιασμούς των Aermotor και Dempster, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα.

Οι πρώτοι μύλοι είχαν τέσσερα ξύλινα πτερύγια σε σχήμα κουτιού. Ακολούθησαν οι μύλοι με λεπτές ξύλινες σανίδες καρφωμένες σε ξύλινη στεφάνη (rim). Οι περισσότεροι από αυτούς τους μύλους είχαν ουρές για τον ορθό προσανατολισμό προς τον άνεμο, ενώ μερικοί είχαν και πτερύγια προστασίας από τον ισχυρό άνεμο που λειτουργούσαν κατάντη του πύργου στήριξης. Ο έλεγχος της ταχύτητας ορισμένων μοντέλων γινόταν μέσω αρθρωτών τμημάτων των πτερυγίων, έτσι ώστε να μπορούν να διπλώνονται προς τα πίσω σαν ομπρέλα σε περίπτωση ισχυρών ανέμων, μια δράση η οποία μείωνε την επιφάνεια σύλληψης του ρότορα για μείωση της ώσης. Η σημαντικότερη βελτίωση του αμερικάνικου ανεμόμυλου τύπου βεντάλιας (πολλαπλά πτερύγια) ήταν η κατασκευή χαλύβδινων πτερυγίων το 1870 (Εικ. 1.31). Τα χαλύβδινα πτερύγια μπορούσαν να γίνουν ελαφρύτερα και είχαν πιο αποδοτικά σχήματα. Δούλεψαν τόσο καλά, που η υψηλή ταχύτητα τους απαιτούσε μειωτήρα, ώστε να προσαρμόζεται στην απαιτούμενη ταχύτητα τυπικών παλινδρομικών αντλιών.

Μεταξύ 1850 και 1970, πάνω από έξι εκατομμύρια ανεμομηχανές ως επί το πλείστον μικρής μηχανικής απόδοσης (1 ίππος ή λιγότερο) είχαν εγκατασταθεί στις Η.Π.Α. και μόνο. Η κύρια χρήση ήταν άντληση νερού και οι κυριότερες εφαρμογές ήταν αποθήκευση νερού για πότισμα και κάλυψη των αναγκών νερού σε αγροκτήματα. Πολύ μεγάλοι ανεμόμυλοι, με ρότορες έως και 18 μέτρα σε διάμετρο, χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση νερού για τις ατμομηχανές των σιδηρόδρομων που αποτελούσαν το κύριο μέσον εμπορικών μεταφορών σε περιοχές όπου δεν υπήρχαν πλωτοί ποταμοί.

Εικ. 1.31 Ένας ανεμόμυλος με χαλύβδινα πτερύγια που χρησιμοποιείτο για άντληση στις Η.Π.Α. προς το τέλος του 19^{ου} αι [21].

Η εμφάνιση της ανεμογεννήτριας

Η πρώτη «μεγάλη» μηχανή που εκμεταλλευόταν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (χαμηλής ταχύτητας και υψηλής σταθερότητας ανεμογεννήτρια των 12 kW) εγκαταστάθηκε στο Κλίβελαντ του Οχάιο, το 1888, ενώ κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων του Α 'Παγκοσμίου Πολέμου, η χρήση μηχανών των 25 kW ήταν ευρέως διαδεδομένη σε όλη τη Δανία. Πολύ αργότερα, η πρώτη ανεμογεννήτρια, που τροφοδοτούσε ένα τοπικό δίκτυο, εγκαταστάθηκε το 1931 στην ΕΣΣΔ στην Balaklava, με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεταιι σε ένα μικρό δίκτυο που ήδη ετροφοδοτείτο από ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας με ατμογεννήτρια 20 MW. Έναυσμα για περαιτέρω ανάπτυξη των ανεμογεννητριών στις Ηνωμένες Πολιτείες έδωσε ο σχεδιασμός των ελίκων και των φτερών των αεροπλάνων, ενώ οι επόμενες προσπάθειες σε Δανία, Γαλλία, Γερμανία και Ηνωμένο Βασίλειο κατά την περίοδο μεταξύ 1935 και 1970 έδειξαν ότι μπορούσαν να λειτουργήσουν ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δόθηκε έμφαση κυρίως στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα (δηλαδή, ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με το έδαφος) που λειτουργούσαν στην κορυφή ενός επαρκώς υψηλού πύργου, χρησιμοποιώντας έναν μικρό αριθμό πτερυγίων (συνήθως δύο ή τρία) [22].

Εν τω μεταξύ, ήταν το 1931 όταν ο Georges Darrieus εφηύρε την ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα γνωστή ως ανεμογεννήτρια «eggbeater» (Εικ. 1.32), εισάγοντας μια νέα ιδέα για ανεμογεννήτριες. Οι ευρωπαϊκές εξελίξεις συνεχίστηκαν και μετά τον Β’ Παγκόσμιο Πόλεμο. Στη Δανία, η ανεμογεννήτρια Gedser 200 kW τριών πτερυγίων με ρότορα ανάντη του ανέμου, λειτούργησε με επιτυχία μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1960 [23], ενώ στη Γερμανία αναπτύχθηκε μια σειρά από προηγμένα σχέδια οριζόντιου άξονα. Και οι δύο προαναφερθείσες ιδέες υπαγόρευσαν τις μελλοντικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις οριζόντιου άξονα που εμφανίστηκαν αργότερα στη δεκαετία του 1970.

Εικ. 1.32 Μορφές των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (γνωστοί ως ανεμογεννήτριες “eggbeater”-εξάρτημα που χτυπάει αυγα) που εφήυρε ο Darrieus το 1931 [23].

Ένα από τα πιο σημαντικά ορόσημα της ιστορίας της αιολικής ενέργειας συμπίπτει με τη συμμετοχή της κυβέρνησης των ΗΠΑ στον τομέα έρευνας και ανάπτυξης (R&D) της αιολικής ενέργειας, μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973 [24-26]. Μετά από αυτό, κατά τα έτη μεταξύ 1973 και 1986, η αγορά εμπορικών ανεμογεννητριών εξελίχθηκε από οικιακή και αγροτική (1-25 kW) σε εφαρμογές συνδεδεμένων (σε κοινόχρηστο δίκτυο) αιολικών πάρκων (50-600 kW). Σε αυτό το πλαίσιο, το πρώτο ξέσπασμα μεγάλης κλίμακας εφαρμογών αιολικής ενέργειας εμφανίστηκε στην Καλιφόρνια [27], όπου πάνω από 16.000 μηχανές από 20-350 kW (συνολικά 1,7 GW), είχαν εγκατασταθεί μεταξύ του 1981 και του 1990, ως αποτέλεσμα ομοσπονδιακών επιδοτήσεων που δίνονταν από την κυβέρνηση των Η.Π.Α. (Εικ. 1.33). Στη βόρεια Ευρώπη, οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας αυξήθηκαν σταθερά μεταξύ του 1980 και 1990, με το υψηλότερο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και τις εξαιρετικού δυναμικού πηγές αιολικής ενέργειας να οδηγούν στη δημιουργία μιας μικρής αλλά σταθερής αγοράς.

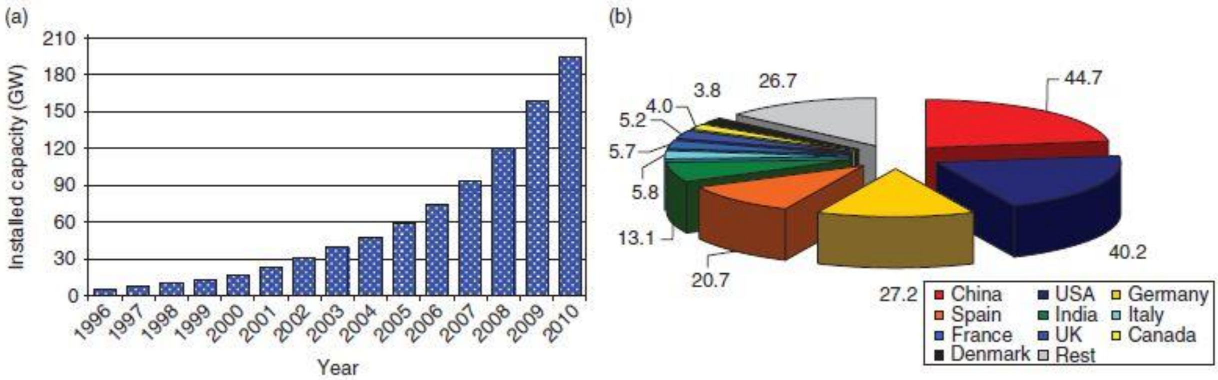
Εικ. 1.33 Από ανεμόμυλους άντλησης νερού (αριστερά) στο ξέσπασμα ανεμογεννητριών στην Καλιφόρνια (δεξιά) [27].

Μετά το 1990, οι περισσότερες δραστηριότητες της αγοράς μετατοπίζονται προς την Ευρώπη [28], με τα τελευταία 20 χρόνια να φέρνουν την αιολική ενέργεια στο παγκόσμιο προσκήνιο, με σημαντικούς παράγοντες από όλες τις περιοχές του κόσμου. Παρ 'όλα αυτά, τόσο η αναβίωση του ενδιαφέροντος στις Ηνωμένες Πολιτείες, όσο και η πρόσφατη δυναμική είσοδος των Κινέζων στον τομέα της αιολικής ενέργειας έχουν αλλάξει πολύ την μέχρι σήμερα κατάσταση της αγοράς.

Συνοψίζοντας, κατά τη διάρκεια αυτών των τελευταίων 20 ετών, ο τομέας της αιολικής ενέργειας έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη, όχι μόνο όσον αφορά το μερίδιο της αγοράς, αλλά και από την άποψη των τεχνολογικών εξελίξεων, με τα τελευταία επιτεύγματα να οδηγούν στην εποχή της υπεράκτιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικ. 1.34) [29]. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικές εξελίξεις που σημειώθηκαν στο πεδίο της αιολικής ενέργειας, συμπεριλαμβάνουν το αποτέλεσμα της συνεχούς και αδιάκοπης ερευνητικής προσπάθειας, με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών καθαρής ενέργειας.

Εικ. 1.34 Δανέζικο γραμματόσημο του 1989 (αριστερά) και σύγχρονο υπεράκτιο αιολικό πάρκο (δεξιά) [29].

Πράγματι, σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία, συστηματικές προσπάθειες που καταγράφονται σε όλη αυτή την περίοδο της ανάπτυξης αντιστοιχούν σε καλπάζουσα αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών συστημάτων, όπου πρόσφατα κατάφερε να ξεπεράσει τα 200 GW (2012) και αναμένεται, σύμφωνα με τους ειδικούς της αγοράς, να ανέλθει σε 450 GW μέχρι το τέλος του 2015 [30]. Επισημαίνεται ότι, το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας επικεντρώνεται σήμερα κυρίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Κίνα και την Ινδία, ενώ αυτό που θα πρέπει επίσης να σημειωθεί είναι ότι υπάρχει αξιοσημείωτη δραστηριότητα που καταγράφηκε πρόσφατα σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις, με σύγχρονα μηχανήματα που φθάνουν ή και ξεπερνούν ακόμα και τα 5 MW το καθένα.



Εικ. 1.35 Χρονική εξέλιξη της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος μέχρι και το 2010 (αριστερά) και κατανομή της σωρευμένης εγκατεστημένης αιολικής ισύος παγκοσμίως (δεξιά) [30].

1.3 ΠΛΩΤΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί μια θεαματική αύξηση των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας γενικά θεωρείται ένα ώριμο και οικονομικά αποδοτικό μέσο για την επίτευξη μελλοντικών μειώσεων του άνθρακα και την στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά θέματα όπως η έλλειψη κατάλληλων χερσαίων θέσεων εγκατάστασης και οι περιορισμοί λόγω θορύβου και όψης, συχνά περιορίζουν την ανάπτυξή της. Ως αποτέλεσμα, έχει προκύψει μια σημαντική μετατόπιση του ενδιαφέροντος προς τους τεράστιους υπεράκτιους αιολικούς πόρους, ενώ έχει κάνει την εμφάνισή της και μια δυναμική αγορά υπεράκτιων αιολικών κατασκευών.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, όπως υπονοείται από το όνομα, αφορά την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες που τοποθετούνται υπεράκτια και πρακτικά στη θάλασσα. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτελεί μια σχετικά νέα πρόκληση για τη διεθνή βιομηχανία αιολικής ενέργειας με ιστορικό περίπου 25 ετών, αλλά μόλις 10 ετών εμπορική ιστορία για έργα μεγάλης κλίμακας. Σήμερα, έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο περίπου 7 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος, με την πλειοψηφία των κατασκευών να βρίσκονται στα ευρωπαϊκά ύδατα (παραπάνω από το 90%). Ωστόσο, παρά τη μεγάλη άνθιση του τομέα τα τελευταία χρόνια, οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις αντιπροσωπεύουν αυτή τη στιγμή μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής παγκόσμιας αιολικής ισχύος, περίπου το 2,2%. Παρ 'όλα αυτά, αναμένεται ότι ένα σημαντικό μέρος της μελλοντικής επέκτασης της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, τουλάχιστον στην Ευρώπη, θα προέλθει από υπεράκτιους πόρους.

Σε σύγκριση με τις χερσαίες εγκαταστάσεις, η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει μεγαλύτερες δυνατότητες πόρων (οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται σημαντικά σε μεγάλη απόσταση από την ξηρά) και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όμως οι θαλάσσιες συνθήκες (ο καιρός, οι άνεμοι, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα) θέτουν σημαντικές προκλήσεις για κατασκευές, που απαιτούν μια νέα προσέγγιση όσον αφορά την τεχνολογία των ανεμογεννητριών, τις δομές στήριξης, τις ηλεκτρικές υποδομές και την υλικοτεχνική υποστήριξη για την εγκατάσταση και τη συντήρηση. Προς το παρόν, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα απαιτούν ισχυρά θεμέλια, που τοποθετούνται με στιβαρό τρόπο στον πυθμένα της θάλασσας. Επίσης, απαιτούνται πολλά χιλιόμετρα καλωδίων για να μεταφερθεί η παραγόμενη ισχύς πίσω στην ακτή, ενώ οι εργασίες κατασκευής και συντήρησης πρέπει να πραγματοποιούνται σε λογικές καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας ειδικά σκάφη και εξοπλισμό. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα χερσαία έργα αιολικής ενέργειας, η κατασκευή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί προηγμένη τεχνολογία και τη χρήση υλικών που να αντιστέκονται στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον.

Το κόστος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι σήμερα σημαντικά υψηλότερο από ό, τι στην ξηρά και αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ειδικές συνθήκες της εκάστοτε τοποθεσίας, όπως το βάθος του νερού, την απόσταση από την ακτή και τις ιδιότητες του πυθμένα της θάλασσας. Σε γενικές γραμμές, η υπεράκτια αιολική ενέργεια ακολουθεί την εξής απλή αρχή: όσο μεγαλύτερη η απόσταση από την ακτή, τόσο μεγαλύτερη και η παροχή ανέμου, με αποτέλεσμα την υψηλότερη παραγωγή ενέργειας. Όμως, περαιτέρω απόσταση από την ακτή συνεπάγεται μεγαλύτερα βάθη νερού, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας των εν λόγω κατασκευών.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ανάπτυξη των υπεράκτιων κατασκευών αιολικής ενέργειας έχει βασιστεί σημαντικά στην εμπειρία και την τεχνολογία από τη βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, ενώ οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα φτάνουν ισχείς έως 5MW, περιλαμβάνοντας προσαρμογές από αντίστοιχες χερσαίες κατασκευές. Σε αυτό το πλαίσιο, αν και η υπεράκτια τεχνολογία των ανεμογεννητριών έχει εξελιχθεί με ταχείς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια, είναι σαφές ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο περεταίρω ανάπτυξης. Στο μέλλον, προβλέπεται ότι πολύ μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, ειδικά κατασκευασμένες για υπεράκτια χρήση, θα επωφεληθούν κατά πάσα πιθανότητα από οικονομίες κλίμακας και θα οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους [31].

1.3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι πρώτες σκέψεις για εφαρμογή υπεράκτιων ανεμογεννητριών αναπτύχθηκαν από τον Hermann Honnef στη Γερμανία το 1932 [32], ενώ η πρώτη ιδέα υπεράκτιου αιολικού πάρκου μεγάλης κλίμακας αναπτύχθηκε από τον καθηγητή William E. Heronemus στα ανοικτά των ακτών της Μασαχουσέτης το 1972 [33], αλλά η εγκατάσταση δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Τελικά, η πρώτη υπεράκτια εγκατάσταση δοκιμών αιολικής ενέργειας ιδρύθηκε στη Σουηδία το 1990. Ήταν μία μονή ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 220kW, σε απόσταση 250 μέτρα από την ακτή, που στηριζόταν σε μια τρίποδη κατασκευή στερεωμένη στο βυθό σε περίπου 7 μέτρα βάθος.

Τα πρώτα έργα υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας προήλθαν σε μεγάλο βαθμό από τις εμπορικές φιλοδοξίες της ευρωπαϊκής βιομηχανίας αιολικής ενέργειας, θεωρώντας τους ωκεανούς ως μια εφικτή λύση στο πρόβλημα της έλλειψης χερσαίων τοποθεσιών. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο ανατέθηκε το 1991 στη Δανία και κατασκευάστηκε από την εταιρεία SEAS. Αυτό το μικρό αιολικό πάρκο, που βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία, αποτελείται από 11 ανεμογεννήτριες με σύστημα ελέγχου απώλειας στήριξης (stall-controlled), συνολικής ονομαστικής ισχύος 4.95MW (450kW η κάθε μία). Βρίσκεται 1.5-3 km βόρεια από την ακτή του νησιού Lolland, κοντά στο χωριό Vindeby (Εικ. 1.36). Η συνολική έκταση του αιολικού πάρκου είναι 3 km^2 και οι δομές στήριξης των ανεμογεννητριών είναι τύπου βαρύτητας. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετήθηκαν σε ρηχά νερά, 3-5m βάθος, σε δύο παράλληλες σειρές, με την απόσταση μεταξύ κάθε γεννήτριας να είναι περίπου 500 μ. Το κόστος της κατασκευής ανήλθε περίπου στα € 10.000.000 [34].

Εικ. 1.36 Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο του Vindeby στη Δανία [34].

Εικ. 1.37 Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο Lely στην Ολλανδία [34].

Το δεύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο (Εικ. 1.37), κατασκευάστηκε το 1994 στην Ολλανδία, σε βάθος 5-10 m, με μέση απόσταση 800μ από την ακτή. Αποτελείται από τέσσερις ανεμογεννήτριες των 500 kW η κάθε μία και η στήριξή τους πραγματοποιείται μέσω ενός σταθερού πυλώνα που στηρίζεται στον πυθμένα της θάλασσας (monopile). Μόλις ένα χρόνο αργότερα, το 1995, το τρίτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο (Εικ. 1.38) οικοδομήθηκε μεταξύ της χερσονήσου Jutland και του μικρού νησιού Tunø Knob στη Δανία. Αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες των 500 kW η κάθε μία, οι οποίες βρίσκονται 6 χιλιόμετρα μακριά από την ακτή και σε βάθος 3-6 μ. Οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες σε δύο σειρές, με τις ανεμογεννήτριες της ίδιας σειράς να απέχουν 200 m και την απόσταση μεταξύ των δύο σειρών να είναι 400 m. Η δομές στήριξης του αιολικού πάρκου είναι τύπου βαρύτητας. Η κάθε ανεμογεννήτρια είναι οριζόντιου άξονα με δυνατότητα μεταβολής του βήματος, προσανατολισμένη ανάντη (upwind) του ανέμου και με και έναν ρότορα τριών πτερυγίων συνολικής διαμέτρου 39 m, στηριζόμενο σε έναν σωληνωτό πύργο.

Στα επόμενα 5 χρόνια, εγκαταστάθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ολλανδία και τη Σουηδία σχετικά μικρά έργα (projects) πλωτών ανεμογεννητριών με μονάδες ισχύος των 450-600 kW, σε αποστάσεις έως και 3 km από την ακτή και σε βάθος μέχρι 8 m. Λίγο αργότερα εμφανίστηκαν ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος, που σε συνδυασμό με τη δυνατότητα προσέγγισης υδάτων μεγαλύτερου βάθους, οδήγησαν σε πλωτά ναυπηγήματα μεγαλύτερης κλίμακας. Το 2001, η κατασκευή του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου μεγάλης κλίμακας (Εικ. 1.39), του Middelgrunden, με συνολική ονομαστική ισχύ 40 MW (20 ανεμογεννήτριες των 2 MW έκαστη), ολοκληρώθηκε στα 2 χιλιόμετρα έξω από το λιμάνι της Κοπεγχάγης, στη Δανία, όπου το βάθος του νερού κυμαίνεται μεταξύ 2,5 και 5 μέτρων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

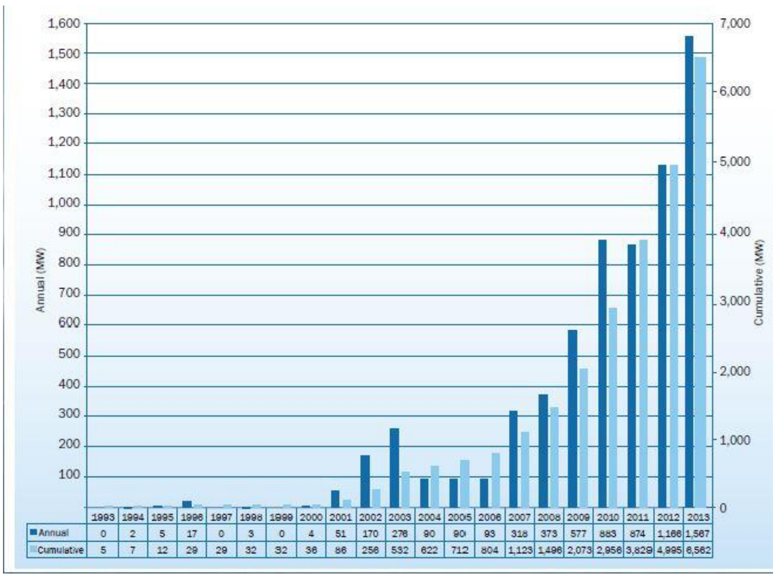
Εικ. 1.38 Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Tunø Knob της Δανίας [35].

Εικ. 1.39 Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο έξω από το λιμάνι της Κοπεγχάγης [35].

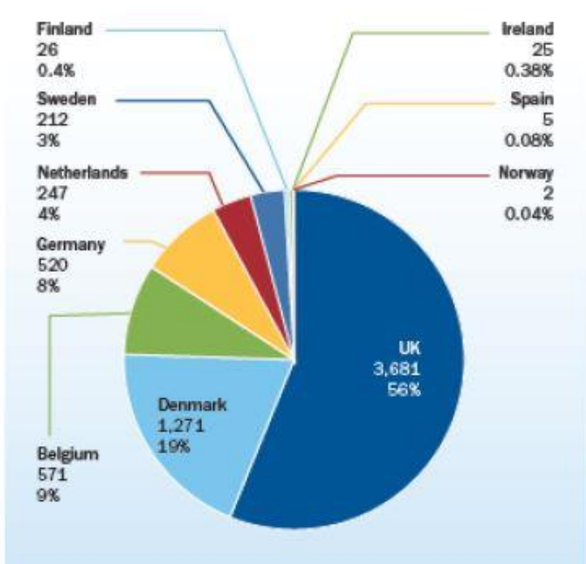
Η κατασκευή του Middelgrunden στη Δανία άνοιξε το δρόμο για δύο μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα, του Horns Rev I (160 MW) το 2002 και του Nysted (165.2 MW) το 2003. Ωστόσο, το κόστος κατασκευής αυτών των έργων ήταν υψηλότερο από ό, τι αναμενόταν, ενώ σημειώθηκαν και κάποιες απρόβλεπτες βλάβες, κυρίως ως αποτέλεσμα της έκθεσης των ανεμογεννητριών σε δυνατούς ανέμους και αντίξοες καταστάσεις θάλασσας. Τα προβλήματα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση του αρχικού ενθουσιασμού για την επέκταση της υπεράκτιας αγοράς αιολικής ενέργειας, και έτσι μέχρι και το 2005 μία μόνο νέα κατασκευή είχε εγκατασταθεί. Παρ 'όλα αυτά, οι μεγάλες προσπάθειες που έγιναν από τους κατασκευαστές και τους σχεδιαστές, προκειμένου να εντοπιστούν και να βελτιωθούν τα προβλήματα που συνδέονται με αυτήν την πρώτη φάση των κατασκευών [35], οδήγησε τελικά σε 13 νέες εμπορικές υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας το 2008 και το 2009.

Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια που δεν είχε σταθερή σύνδεση με τον πυθμένα της θάλασσας (floating wind turbine), κατασκευάστηκε νοτιοανατολικά της Ιταλίας το 2008, σε βάθος 113 m και σε απόσταση 21 km από την ακτή, από την ολλανδική εταιρεία Blue H Technologies [36]. Ήταν μια πρότυπη κατασκευή μεγάλου βάθους ισχύος 80 kW, η οποία ανεγέρθη για να συλλέγει δεδομένα για τις συνθήκες ανέμου και θάλασσας. Η πρώτη, όμως, πλωτή ανεμογεννήτρια χωρίς σύνδεση με τον πυθμένα, μεγάλης ισχύος, εγκαταστάθηκε ένα χρόνο αργότερα, τον Ιούνιο του 2009, από τις Statoil-Hydro και Siemens στην ακτή του Karmøy, κοντά στο λιμάνι του Bergen στη Νορβηγία [37]. Η ανεμογγενήτρια Hywind παράγει ισχύ 2,3 MW και είναι τοποθετημένη σε έναν πλωτό πύργο ύψους 120 m, σε βάθος νερού 220 m και 10 km από την ακτή του Karmøy.

Όσον αφορά την Ευρώπη, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association, EWEA) [38], μέχρι και το Δεκέμβριο του 2011, είχαν εγκατασταθεί 1.371 πλωτές ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ 3.813 MW σε 53 αιολικά πάρκα διασκορπισμένα σε 10 ευρωπαϊκές χώρες, από τις οποίες το Ηνωμένο Βασίλειο, η Δανία, η Ολλανδία και το Βέλγιο είναι αυτές με τα μεγαλύτερα αποθέματα ισχύος. Το επόμενο έτος, 2012, κατασκευάστηκαν 2 νέα αιολικά πάρκα και τέθηκαν σε λειτουργία 293 επιπλέον πλωτές ανεμογεννήτριες, φτάνοντας συνολική εγκατεστημένη ισχύ 4.995 MW, ενώ το 2013 (Εικ. 1.40, 1.41), υπήρξε μια αύξηση του 34% σε σχέση με το 2012, με συνέπεια να λειτουργούν συνολικά 2.080 ανεμογεννήτριες σε 69 αιολικά πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ που φτάνει τα 6.562 MW, για να φτάσουμε στα σημερινά δεδομένα, όπου έχουμε ξεπεράσει τα 7 GW εγκατεστημένης ισχύος.



Εικ. 1.40 Αύξηση της υπεράκτιας αιολικής εγκατεστημένης ισχύος ανά έτος στην Ευρώπη, καθώς και η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο τέλος κάθε έτους [38].



Εικ. 1.41 Κατανομή της υπεράκτιας αιολικής εγκατεστημένης ισχύος στις ευρωπαϊκές χώρες (2013) [38].

Αν και τα αποθέματα αιολικής ισχύος στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτελούν σήμερα πάνω από το 20% της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας περιορίζεται αρκετά σε χερσαίες κατασκευές και επομένως οι Ηνωμένες Πολιτείες υστερούν πολύ της Ευρώπης σε παραγωγή αιολικής ενέργειας σε υπεράκτιες περιοχές. Μέχρι και σήμερα, εξακολουθούν να μην υπάρχουν υπεράκτια αιολικά πάρκα στα ύδατα των Η.Π.Α., παρά την αφθονία πόρων έξω από τις ακτές της [39].

Ένας χάρτης των πόρων αιολικής ενέργειας συντάχθηκε για να αξιολογήσει τοποθεσίες ικανές για να κατασκευαστούν αιολικά πάρκα και εντόπισε ορισμένες περιοχές με υψηλή δυναμική για υπεράκτιες αιολικές κατασκευές, όπως η Ανατολική Ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών και η περιοχή Great Lakes. Ωστόσο, δεδομένου ότι μεγάλο μέρος των εν λόγω πιθανών θέσεων βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, το σχετικά υψηλό κόστος, η έλλειψη εμπειρίας και ιδιόκτητης τεχνολογίας, καθώς και οι πολύπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες αδειοδότησης, είναι οι κύριες αιτίες που εμποδίζουν την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής τεχνολογίας στην Αμερική [40].

Σήμερα, υπάρχουν πολλά και σημαντικά έργα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας υπό εξέταση και υπό κατασκευή [41], που περιλαμβάνουν το Cape Wind project στα ανοικτά των ακτών του Cape Cod, το Bluewater Wind project στα ανοικτά των ακτών του Delaware, το αιολικό πάρκο LIPA στο Long Island και ένα project που αναπτύχθηκε από την Wind Energy Systems Technologies LLC στον Κόλπο του Μεξικού στα ανοικτά των ακτών του Τέξας. Από αυτά το έργο του Cape Wind έχει εγκριθεί από την κυβέρνηση των ΗΠΑ από τον Απρίλιο του 2010 και αναφέρεται ως το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην Αμερική. Αυτά τα προγραμματισμένα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση αξιοποίησης των ανανεώσιμων και φυσικών πηγών ενέργειας στην Αμερική.

Στην Κίνα, πέρα από τους ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης της χερσαίας τεχνολογίας αιολικής ενέργειας, ήδη από το 2010 εστίασαν την προσοχή τους στην ανάπτυξη και κατασκευή υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών. Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε στην Ανατολική Ακτή της Κίνας, κοντά στη Σαγκάη, και αποτελεί το πρώτο έργο υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε όλη την Ασία. Το αιολικό πάρκο Donghai Bridge (Εικ. 1.42) συνολικής ισχύος 102 MW, αποτελείται από 34 ανεμογεννήτριες των 3 MW, οι οποίες μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν από την κινέζικη εταιρεία Sinovel Wind και τροφοδοτεί περισσότερα από 200.000 νοικοκυριά πόλης. Η εγκατάσταση όλων των ανεμογεννητριών ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2010, ενώ άρχισαν να τροφοδοτούν το εθνικό δίκτυο, τον Ιούλιο του ίδιου έτους [39].

Μετά από το πρώτο αυτό επιχείρημα εκμετάλλευσης της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, η υπεράκτια αιολική βιομηχανία της Κίνας εισήλθε σε μια περίοδο ταχείας ανάπτυξης. Το 2011, άλλα δύο υπεράκτια αιολικά πάρκα εγκρίθηκαν για να κατασκευαστούν στη Σανγκάη, τα οποία είναι η δεύτερη φάση του πάρκου Donghai Bridge και το υπεράκτιο αιολικό πάρκο Lingang κοντά στο Donghai Bridge. Αυτά τα δύο υπεράκτια αιολικά πάρκα αναμένεται να ολοκληρωθούν μέσα στο 2015. Επιπλέον, βρίσκονται υπο κατασκευή και άλλα υπεράκτια αιολικά πάρκα στις περιοχές του Jiangsu και του Zhejiang. Μέχρι και το τέλος του 2013, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Κίνα έφτανε τα 430 MW, ενώ εκτιμάται ότι μέσα στο 2015 θα ξεπεράσει τα 5 GW με την ολοκλήρωση κάποιων έργων. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την Κίνα και άλλες χώρες της Ασίας έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην υπεράκτια αιολική βιομηχανία (Ιαπωνία, Κορέα, Ταϊβάν, Ινδία) με σκοπό να υποστηρίξουν δυναμικά την ανάπτυξη της εν λόγω βιομηχανίας [42].

Εικ. 1.42 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Donghai Bridge στη Shanghai της Κίνας [42].

1.3.3 ΤΥΠΟΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΛΩΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Το κόστος των στηρίξεων ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, αντιστοιχεί περίπου στο 15% με 40% του συνολικού κόστους της όλης εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό να επιλέγονται ή να σχεδιάζονται οι πιο αποδοτικοί τρόποι στήριξης ανεμογεννητριών σύμφωνα πάντα με τις συνθήκες της εκάστοτε τοποθεσίας. Ο τύπος και ο σχεδιασμός της θεμελίωσης επηρεάζεται σημαντικά από τις ιδιότητες του πυθμένα της θάλασσας, το βάθος του νερού, τα ύψη των κυμάτων και τα ρεύματα.

Σήμερα, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα κατασκευάζονται κυρίως σε ρηχά νερά λιγότερο από 30 μέτρα και κοντά στην ακτή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ευρέως σχετικά απλοί τύποι στήριξης. Οι πιο διαδεδομένοι είναι η στήριξη μονού πυλώνα, η βάση βαρύτητας, η τρίποδη στήριξη και η τύπου Jacket (χωροδικτύωμα).

- Στήριξη Μονού Πυλώνα (monopile)

Η ανεμογεννήτρια στηρίζεται σε ένα χαλύβδινο σωλήνα μεγάλης διαμέτρου (4-8m), που οδηγείται μέσα στον πυθμένα της θάλασσας, με τη βοήθεια ενός μεγάλου υδραυλικού σφυριού (Εικ. 1.43). Είναι σε θέση να σταθεί όρθιος, λόγω της τριβής του πυθμένα της θάλασσας στις πλευρές, ενώ δεν υπάρχει καμία κάθετη πίεση από το εδάφους στον πυλώνα. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε σκληρά και ημίσκληρα εδάφη και σε χαμηλά βάθη νερού (5-20m).

- Βάση Βαρύτητας (gravity base)

Κατασκευή που είναι μεγάλου εκτοπίσματος και που συνήθως αποτελείται από τσιμέντο (Εικ. 1.44). Εφαρμόζει κάθετη πίεση στην περιοχή από κάτω της και στέκεται πάνω στον πυθμένα. Η βάση έχει συνήθως διάμετρο 15-25 m και όλες οι δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές “απορροφώνται” από αυτήν. Λόγω του μεγέθους και του βάρους της θεμελίωσης (1500-4500 tons) η μεταφορά και η εγκατάσταση καθίσταται αισθητά δύσκολη. Χρησιμοποιείται σε ημίσκληρα και ομοιόμορφα εδάφη και σε μικρά βάθη νερού.

* Τρίποδη Στήριξη (tripod)

Αποτελείται από ένα χαλύβδινο σωλήνα που προεξέχει έξω από την επιφάνεια του νερού και από τρία πόδια στήριξης κάτω από το νερό, όπου κάθε "πόδι" καταλήγει σε διάταξη αγκύρωσης που στηρίζεται σε έναν μεταλλικό αγκυρωμένο πάσσαλο, που οδηγείται μέσα στον πυθμένα για να κρατήσει τη στήριξη (Εικ. 1.45). Παρέχει πολύ μεγάλη ευστάθεια και σταθερότητα απέναντι σε ροπές κάμψης. Χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου σε μεγαλύτερα βάθη (25-50). Η παραγωγή και κατασκευή του είναι πολύ ακριβή, παρουσιάζει δυσκολίες στο χειρισμό και τέλος απαιτεί περισσότερο χρόνο στην εγκατάσταση.

* Στήριξη τύπου Jacket

Είναι μια χαλύβδινη κατασκευή τύπου χωροδικτυώματος, η οποία έχει τετραγωνική βάση και αποτελείται από λεπτούς σωλήνες (Εικ. 1.46). Είναι χαμηλού βάρους συγκριτικά με το μέγεθός της και το βάθος του νερού, ενώ δημιουργεί μεγάλη αντίσταση σε δυνάμεις και καμπτικές ροπές αυξάνοντας την έκταση της επιφάνειας στην οποία “πατάει”. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για μεγάλα βάθη νερού. Η απαίτηση για κατασκευή πολλών κόμβων κάνει τη στήριξη αυτή πολύ ακριβή (όσο κοστίζει και μια τρίποδη στήριξη περίπου) και για το λόγο αυτό τα σημερινά μεγέθη ανεμογεννητριών δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τη χρήση τέτοιων στηρίξεων.

Εικ. 1.43 Στήριξη μονού πυλώνα (monopile) [43.]

Εικ. 1.44 Βάση βαρύτητας (gravity base) [43].

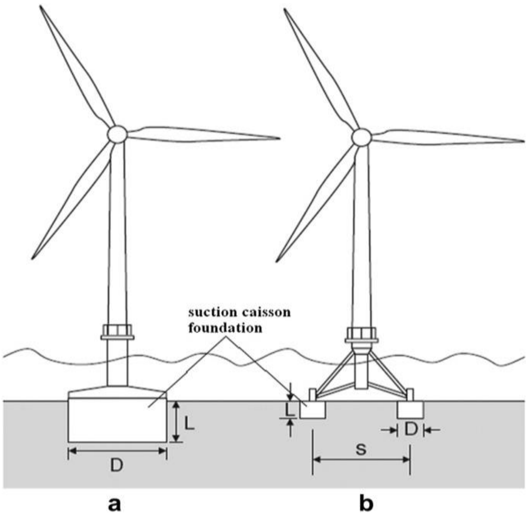
Εικ. 1.45 Τρίποδη στήριξη (tripod) [43].

Εικ. 1.46 Στήριξη τύπου Jacket [43].

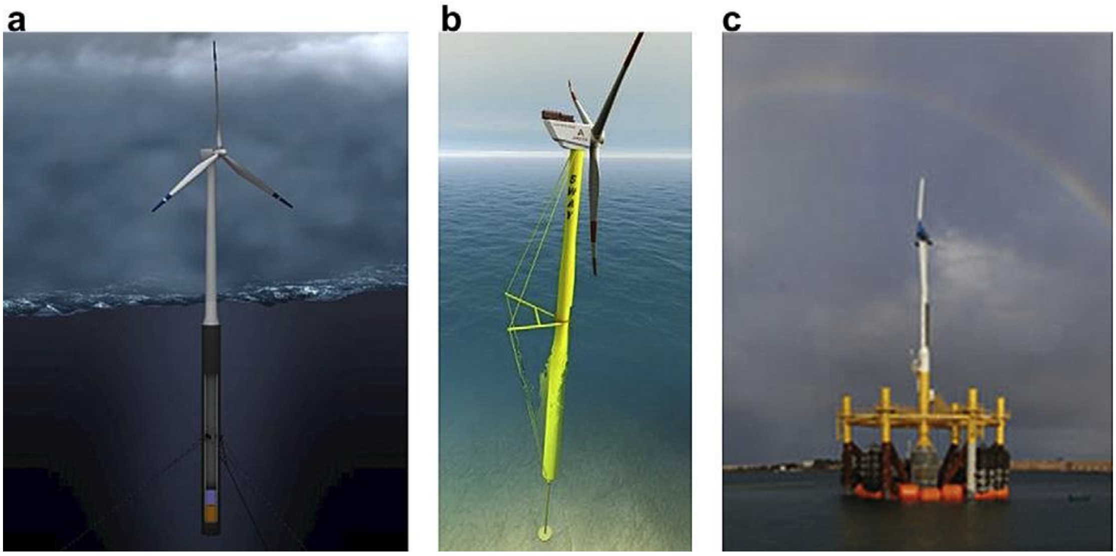
Η αύξηση του αριθμού των προγραμματισμένων έργων σε μακρινές και βαθύτερες περιοχές, έχει δώσει κίνητρο για έρευνα και εφαρμογή πιο περίπλοκων και οικονομικά αποδοτικών στηρίξεων ανεμογεννητριών. Τα κιβώτια αναρρόφησης (suction caissons) είναι μια νέα μορφή θεμελίωσης και θεωρείται ότι είναι μια οικονομικά ελκυστική εναλλακτική λύση. Μοιάζουν με μεγάλους ανάποδους κάδους, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.47, και εγκαθίστανται εντός του πυθμένα είτε με ώθηση είτε χρησιμοποιώντας «αναρρόφηση» προκειμένου να αντλήσει νερό έξω από το κιβώτιο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί διαφορά πίεσης κατά μήκος της κορυφής του κιβωτίου. Αυτό το είδος θεμελίωσης έχει τα πλεονεκτήματα του να είναι πιο γρήγορο στην εγκατάσταση και επίσης πιο εύκολο να μετακινηθεί κατά τον παροπλισμό. Ωστόσο, μέχρι τώρα η τεχνολογία αυτή δε χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα εμπορικών εφαρμογών.

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει η σχεδίαση και ανάπτυξη πλωτών στηρίξεων για ανεμογεννήτριες, που προορίζονται για περιοχές με μεγαλύτερα βάθη νερού. Σημαντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης έχουν ξεκινήσει ήδη από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα [43] και μέχρι και σήμερα, πολλές διαφορετικές ιδέες έχουν προταθεί για πλωτά θεμέλια, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: πλατφόρμες τύπου spar, πλατφόρμες με στηρίξεις προέντασης (Tension Leg Platforms) και ημιβυθισμένα/υβριδικά συστήματα (semisubmersible/hybrid systems). Προς το παρόν, μερικοί σχεδιασμοί (designs) έχουν περάσει σε αναπτυξιακό επίπεδο και στην κατασκευή πλήρως λειτουργικών πρωτοτύπων. Η νορβηγική εταιρεία Statoil Hydro ανέπτυξε ένα πρωτότυπο ενός πλωτού αιολικού πάρκου που χρησιμοποιεί τεχνολογία spar, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.48 (a) και αυτό μπορεί να συνδράμει στη χρήση ανεμογεννητριών σε βάθη νερού μέχρι και 700 m.

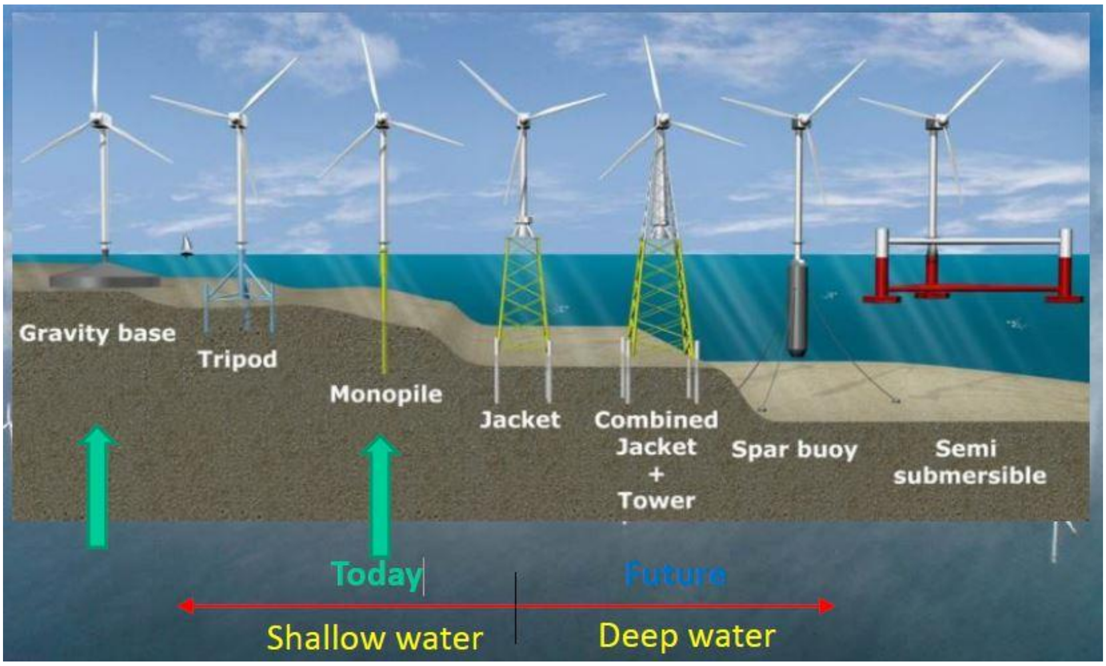
Η πρώτη μεγάλης κλίμακας πλωτή ανεμογεννήτρια στον κόσμο είναι η ανεμογεννήτρια Hywind των 2,3 MW σε βάθος νερού 220 m στα ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας και έχει δοκιμαστεί για πάνω από πέντε χρόνια παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο από τον Σεπτέμβριο του 2009. Μια άλλη νορβηγική εταιρεία, η Sway, έχει αφοσιωθεί σε μια προσπάθεια να κατασκευάσει τη μεγαλύτερη πλωτή ανεμογεννήτρια στον κόσμο, ισχύος 10 MW, χρησιμοποιώντας ένα πλωτό πύργο που γεμίζει με έρμα κάτω από το νερό, χαμηλώνοντας έτσι το κέντρο βάρους του. Ο πλωτός πύργος πρέπει να ισορροπεί με μια γωνία κλίσης γύρω στις 5-10^{o} και να μπορεί να περιστρέφεται με τον άνεμο, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.48 (b). H Blue H Group Technologies Ltd (Blue H), που ιδρύθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, έχει αναπτύξει ένα σύστημα με TLP και το πρωτότυπο εγκαταστάθηκε και δοκιμάστηκε στη νότια Ιταλία το 2007, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.48 (c). Και άλλες εταιρείες ανά τον κόσμο έχουν αφιερωθεί στη μελέτη και σχεδίαση πλωτών στηρίξεων, είτε αυτών που προαναφέρθηκαν είτε συνδυασμό τους, ενώ το πρώτο αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτριες που θα στηρίζονται αποκλειστικά σε πλωτές στηρίξεις, είναι σχεδιασμένο να εγκατασταθεί στην Σκωτία.



Εικ.1. 47 Στήριξη με κιβώτια αναρρόφησης (suction caissons) για πλωτή ανεμογεννήτρια με μονό κιβώτιο και με τρία ή τέσσερα κιβώτια [43].



Εικ. 1.48 Πρωτότυπα πλωτών ανεμογεννητριών με πλωτές στηρίξεις [39]. (a) HyWind (spar), (b) Sway (Tension leg), (c) Blue H (TLP) [43].



Εικ. 1.49 Σημερινοί τύποι στηρίξεων και νέοι τύποι που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον [43].

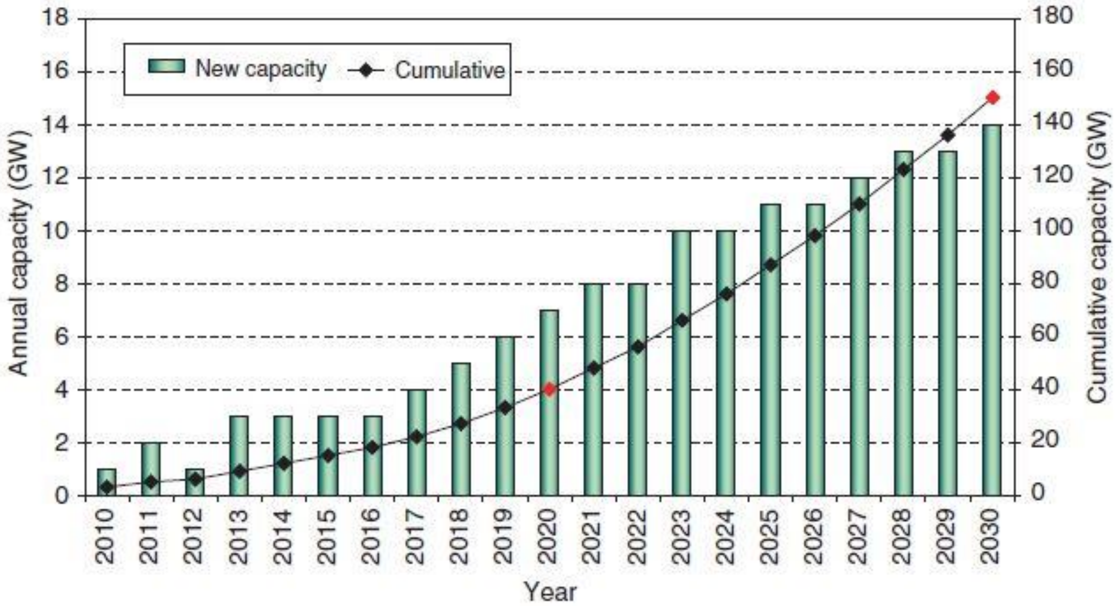
1.3.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ

Τα Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα, ΥΑΠ (Offshore Wind Farms, OWF) αναμένεται να γίνουν μια σημαντική πηγή ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας των αρκετών πλεονεκτημάτων τους. Η αξιοποίηση των ΥΑΠ είναι εξαιρετικά ορατή σε ευρωπαϊκές χώρες και ορισμένα σημεία των Ηνωμένων Πολιτειών. Ο σχεδιασμός για την τρέχουσα δεκαετία, δηλαδή μέχρι το 2020, βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη, ενώ πλαισιώνεται από πολλά στατιστικά δεδομένα που διατίθενται από διάφορους οργανισμούς στατιστικών στοιχείων. Οι προκλήσεις στην εγκατάσταση των ΥΑΠ και η αξιόπιστη λειτουργία είναι δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες. Τα ρηχά νερά αποτελούν ένα σημαντικό εμπόδιο, καθώς επηρεάζουν τις δομές στήριξης. Επειδή το νερό δεν είναι αρκετά βαθύ, η υπόγεια δομή του μπορεί να μην είναι αρκετά στιβαρή και στερεή, γεγονός το οποίο μπορεί να βάλει φράγμα στην αρχική εγκατάσταση, κλπ.

Όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο (1.3.1.) η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε υπεράκτιες κατασκευές αιολικής ενέργειας ξεπερνάει σήμερα (2014) τα 7 GW, ενώ προβλέπεται να ξεπεράσει τα 12 GW μέχρι τα τέλη του 2015. Όσον αφορά την Ευρώπη, η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association, EWEA) έχει αναπτύξει σενάρια που προβλέπουν ότι η υπεράκτια τεχνολογία αιολικής ενέργειας θα ξεπεράσει τα 40 GW το 2020 και θα φτάσει τα 150 GW μέχρι το 2030 (Εικ. 1.50). Μάλιστα, η EWEA έχει αναγνωρίσει 141 GW από πρότζεκτ τα οποία είτε είναι εν ενεργεία, είτε υπό κατασκευή, είτε προορίζονται για το μέλλον. Από αυτά τα 16 GW αφορούν τη Μεσόγειο (11%) όπου το βάθος των νερών είναι σχετικά μεγάλο.

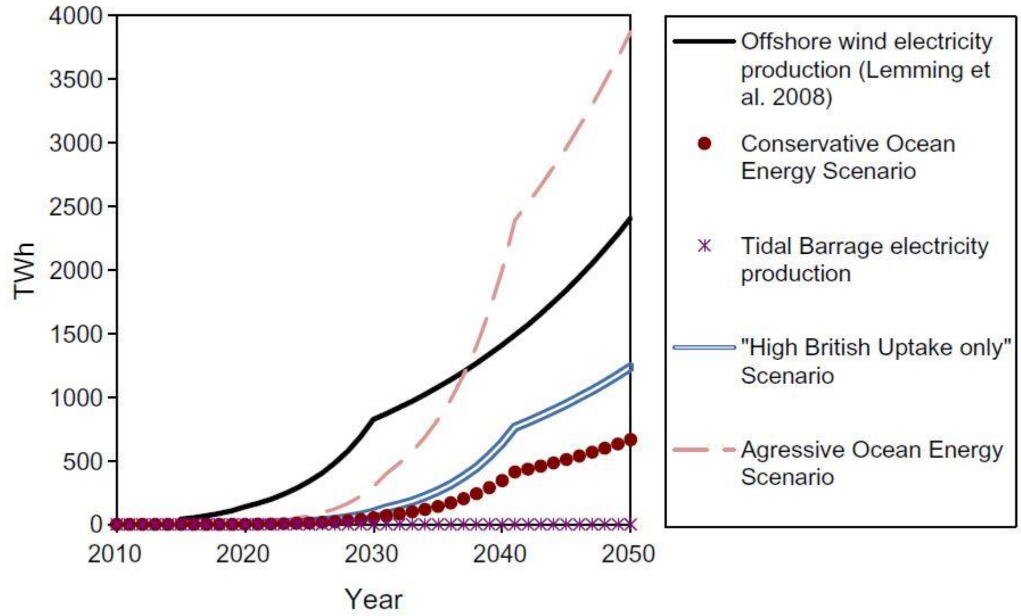
Σε αυτό το πλαίσιο, προκειμένου η Ευρώπη να επιτύχει 40 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος μέχρι το 2020, απαιτείται κατά μέσο όρο περίπου 30% αύξηση σε ετήσιες εγκαταστάσεις, ποσοστό που έχει ήδη αποδειχθεί εφικτό στο παρελθόν σε χερσαίες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας (μεταξύ των ετών 1992 και 2004 η αγορά των χερσαίων δομών αιολικής ισχύος αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 32% σε ετήσια βάση). Ο καθοριστικός παράγοντας για αυτό το επίτευγμα θα είναι η τεράστια δυναμική υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, που έχει παρατηρηθεί σε ευρωπαϊκά ύδατα, κυρίως στη

Βόρεια Θάλασσα, τη Βαλτική Θάλασσα, τον Ατλαντικό Ωκεανό, τη Μεσόγειο και τη Μαύρη Θάλασσα [31].



Εικ. 1.50 Ευρωπαϊκοί στόχοι που αφορούν εγκαταστάσεις υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέχρι και το 2030 [31]

Σε παγκόσμια κλίμακα, υπάρχουν σενάρια που προβλέπουν την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής τεχνολογίας μέχρι και το 2050. Για να εκτιμηθεί, λοιπόν, αυτή η ανάπτυξη, έχουν επιλεγεί δύο σενάρια: Ένα συντηρητικό σενάριο, όπου η εξέλιξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μεταξύ του 2009 και του 2025 είναι ακριβώς η ίδια με την αντίστοιχη της περιόδου 1991-2008 (55.5%) και από το 2025 μέχρι το 2050 χρησιμοποιούνται οι υποθέσεις ενός μοντέλου αναφοράς (Wind Reference Model [44]), και ένα πιο ενθαρρυντικό σενάριο, που προβλέπει μια πρώτη ραγδαία εξέλιξη, η οποία ακολουθείται από ρυθμούς ανάπτυξης επίσης παρόμοιους με το μοντέλο αναφοράς. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αναφοράς φαίνονται στην Εικ. 1.51.



Εικ. 1.51 Εκτίμηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας και της αντίστοιχης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [44].

Το μοντέλο αναφοράς (μαύρη γραμμή στην Εικ. 1.51) δείχνει πώς μέχρι το 2050, περίπου 5,5% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να προέλθει από την υπεράκτια αιολική ενέργεια. Για κάθε ένα από τα δύο προαναφερθέντα σενάρια το μοντέλο παράγει εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα, πράγμα που σημαίνει ότι η θαλάσσια ενέργεια θα μπορούσε να αποδώσει τελικά 1,7% (σύμφωνα με το συντηρητικό σενάριο) και 9,84% (με το ενθαρρυντικό σενάριο) της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκρίνοντας αυτά τα δύο σενάρια με το μοντέλο αναφοράς, φαίνεται ότι το ενθαρρυντικό σενάριο ίσως είναι υπερβολικά αισιόδοξο. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το Ηνωμένο Βασίλειο, μόνο του, σχεδιάζει μια μεγάλη επέκταση στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής τεχνολογίας, με μεγάλες περιοχές γύρω από το Pentland Firth και τα νησιά Orkney να ανατίθενται σε εταιρείες και να προβλέπεται ότι μπορούν να φτάσουν να παράγουν 1.2 GW ισχύος μέχρι και το 2020. Είναι πιθανό, επίσης ότι τα επόμενα 10 χρόνια θα προταθούν και θα κατασκευαστούν και άλλα έργα, αν και είναι δύσκολο να προβλεφθεί αυτό προς το παρόν. Παρ 'όλα αυτά, η προοπτική αυτή της τεράστιας ανάπτυξης της Βρετανίας μετά το 2020 (και αν υποτεθεί ότι πράγματι 1,2 GW ενέργειας θα έχουν εγκατασταθεί μέχρι τότε) μας ανοίγει ένα νέο σενάριο (High British Uptake only Scenario) που δείχνει ότι το ενθαρρυντικό σενάριο δεν είναι τελικά και τόσο δύσκολο να πραγματοποιηθεί, όπως φαινόταν εκ πρώτης όψεως.

Τέλος, διεθνής στόχος είναι να επιτευχθεί παγκόσμια μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050 στο 50% των σημερινών επιπέδων και η αιολική τεχνολογία είναι η πιο προηγμένη από τις νέες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ως εκ τούτου, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η εξέλιξη των ΥΑΠ είναι ανερχόμενη και με λαμπρό μέλλον με αποτέλεσμα, η εφαρμογή της ως μια σημαντική πηγή παραγωγής ενέργειας να έχει μεγάλες πιθανότητες να κυριαρχήσει στο μέλλον σε παγκόσμιο επίπεδο.

2. ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στην αντίστοιχη θεωρία, που είναι απαραίτητη για να μπορέσει ο αναγώνστης να κατανοήσει πληρέστερα το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τα προγράμματα Η/Υ HAMVAB και SEMISUB που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της πλωτής Α/Γ που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Για την αξιόπιστη σχεδίαση και κατασκευή μιας πλωτής κατασκευής είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα μια λεπτομερής και αναλυτική μελέτη των περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της. Τα περιβαλλοντικά φορτία που ασκούνται στην κατασκευή και μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος και κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της υπό εξέταση περιόδου και τα οποία σχετίζονται με τις λειτουργίες και την κανονική χρήση της κατασκευής είναι:

- Φορτία ανέμου
- Υδροδυναμικά φορτία που παράγονται από κύματα και ρεύματα, συμπεριλαμβανομένων των δυνάμεων αντίστασης και αδράνειας
- Σεισμικά φορτία
- Φορτία παραγόμενα από ρεύματα
- Παλιρροιακά φαινόμενα
- Θαλάσσια ανάπτυξη
- Φορτία λόγω χιονιού και πάγου

Η πιο βασική κατηγορία περιβαλλοντολογικών φορτίων είναι αυτή των θαλάσσσιων κυματισμών. 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 τη μεγάλη κινητικότητα των σωματιδίων, προκαλεί κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία ταλαντωτικών κινήσεων 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 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).

2.1.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ – ΑΠΛΑ ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σα λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις [7]:

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} = 0 \qquad \gamma\iota\alpha\ z = 0 \qquad (\text{κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας}) \qquad (2.1.1)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g\zeta^{(1)} = 0 \qquad \gamma\iota\alpha\ z = 0 \qquad (\text{δυναμική συνθήκη ελέυθερη επιφάνειας}) \qquad (2.1.2)$$

$$\Delta\Phi^{(n)} = 0 \qquad \text{στο πεδίο ροής} \qquad (\text{εξ. Laplace}) \qquad (2.1.3)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial \vec{n}} = \vec{\nabla}\Phi^{(n)} \cdot \vec{n} = 0 \qquad (\text{οριακή συνθήκη στον πυθμένα}) \qquad (2.1.4)$$

Τα σχετικά αποτελέσματα [45,46,47], από τη λύση του προβλήματος, για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και του δυναμικό του πεδίου ροής για πεπερασμένο βάθος νερού είναι:

$$\zeta^{(1)}(x,y,z;t) = \frac{H}{2}\cos[k(xcos\theta + ysin\theta) - \omega t)] \qquad (2.1.5)$$

$$\Phi^{(1)}(x,y,z;t) = \frac{H}{2}\frac{g}{\omega}\frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)}\sin[k(xcos\theta + ysin\theta) - \omega t)] \qquad (2.1.6)$$

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

$$\omega^2 = kgtanh(kd)$$

d : το βάθος του νερού

θ : η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση προχώρησης του μετώπου του κυματισμού με τον άξονα των x. Σε περίπτωση σύμπτωσης των δύο διευθύνσεων οι εξ. (2.1.5) και (2.1.6) που θα περιγράφουν απλό αρμονικό κυματισμό κινούμενο κατά τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα των x, γίνονται:

$$\zeta^{(1)}(x;t) = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) \qquad (2.1.7)$$

και

$$\Phi^{(1)}(x,z;t) = \frac{H}{2}\frac{g}{\omega}\frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)}\sin(kx - \omega t) \qquad (2.1.8)$$

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

2.2 ΦΟΡΤΙΑ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

Η κυριότερη κατηγορία φορτίων που επάγονται στην κατασκευή από τη δράση των στοιχείων του περιβάλλοντος πάνω της (environmental loads) είναι εκείνη που προκαλείται από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Ο αξιόπιστος προσδιορισμός τους και η εύρεση στη συνέχεια της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής θεωρούμενης σε πρώτη προσέγγιση ως άκαμπτο σώμα αποτελούν αντικείμενο της υδροδυναμικής ανάλυσης των πλωτών ή σταθερών θαλάσσιων εγκαταστάσεων [7].

Κύριο όμως πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην προσπάθεια αυτή είναι κατ' αρχάς η ποικιλία των γεωμετρικών μορφών, διαστάσεων και συνθηκών της περιοχής εγκατάστασης των κατασκευών που δεν επιτρέπουν ενιαία μεθοδολογική θεώρησή τους για την υδροδυναμική τους ανάλυση. Εκείνο που στην προκειμένη περίπτωση θα διευκόλυνε τα πράγματα θα ήταν τουλάχιστον η δυνατότητα υποδιαίρεσης των κατασκευών αυτών σε κατηγορίες και η ενιαία αντιμετώπιση κάθε μίας από αυτές.

Όπως θα εξηγηθεί λεπτομερειακά στα επόμενα, μία τέτοια κατάταξη μπορεί να γίνει με βάση το μέγεθος της κατασκευής σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του κύματος, πράγμα που και από φυσική σκοπιά φαίνεται λογικό. Μια «λεπτή» υδροδυναμικά κατασκευή δεν παραμορφώνει σημαντικά το πεδίο ροής γύρω της., σε αντίθεση με μια «ογκώδη», και έτσι για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται πάνω της η σχετική σημασία παραμόρφωσης αυτής ως προς άλλους παράγοντες που επιδρούν στο μηχανισμό δημιουργίας των φορτίων (θεώρηση της συνεκτικής ροής κλπ.) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Το υδροδυναμικό πρόβλημα διατυπώνεται απλούστερα στην περίπτωση που η συμπεριφορά της κατασκευής (κινήσεις της, παραμορφώσεις της, τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτή) σε θαλάσσιους κυματισμούς μπορεί να θεωρηθεί γραμμική. Η υπόθεση αυτή δεν είναι πάντα επιτρεπτή, δεδομένου ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν μπορούν να παραληφθούν καθαρά μη γραμμικά φαινόμενα, όπως π.χ. δυνάμεις αντίστασης λόγω συνεκτικότητας, μη γραμμικός συνδυασμός συνιστωσών της κίνησης, δυνάμεις κυματισμού ανώτερης τάξης, μη γραμμικές δυνάμεις επαναφοράς κ.α.

Η γραμμική ή αντίστοιχα η γραμμικοποιημένη λύση του προβλήματος όμως επιτρέπει μια παραδεκτή προσέγγιση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως βάση για το μη γραμμικό υπολογισμό. Υποθέτοντας γραμμική ή γραμμικοποιημένη συμπεριφορά της κατασκευής μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόκρισής της σε φυσικούς θαλάσσιους κυματισμούς σαν υπέρθεση αποκρίσεών της στις μεμονωμένες τους συνιστώσες (αρμονικά κύματα). Η απόκριση ενός γραμμικού συστήματος σε αρμονική διέγερση είναι επίσης αρμονική της ίδιας συχνότητας με τη διέγερση, πλάτος ανάλογο με εκείνο της διέγερσης και με διαφορά φάσης ως προς αυτή. Για τον υπολογισμό στο πεδίο των συχνοτήτων ξεκινάει κανείς από το γεγονός, ότι μια στοχαστική διαδικασία κατά Gauss περιγράφεται μονοσήμαντα από το φάσμα της. Αυτό δε ισχύει τόσο για τη στοχαστική διαδικασία των φυσικών θαλάσσιων κυματισμών, όσο και για εκείνη των αποκρίσεων. Μεταξύ των φασμάτων της διέγερσης (θαλάσσιοι κυματισμοί) και της απόκρισης ισχύει η απλή σχέση:

$$S_i(\omega) = |Y_i(\omega)|^2 S_\zeta(\omega) \tag{2.2.1}$$

όπου $S_i(\omega)$ το φάσμα της απόκρισης (συνιστώσα i), $S_\zeta(\omega)$ το φάσμα των θαλάσσιων κυματισμών και $Y_i(\omega)$ η συνάρτηση μεταφοράς της I συνιστώσας της απόκρισης, που ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους της απόκρισης προς εκείνο της διέγερσης.

Απ' όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα διαπιστώνουμε ότι βάση για την επίλυση του γραμμικού προβλήματος αποτελεί η έρευνα της συμπεριφοράς της κατασκευής υπό την επίδραση ενός απλού αρμονικού κύματος. Η έρευνα αυτή θα αποτελέσει αντικείμενο του παρόντος εδαφίου.

2.2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΔΥΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ – ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Μια κατασκευή που εκτίθεται στην επίδραση θαλάσσιων κυματισμών υπόκειται σε δυνάμεις που προκαλούνται από διάφορους μηχανισμούς. Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους:

a) Δυνάμεις Froude-Kryloff. Είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Η βασική παραδοχή για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία του σώματος δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής, το σώμα δηλαδή είναι σα να μην υπάρχει. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται εύκολα με απευθείας ολοκλήρωση της πίεσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κυματισμού στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος.

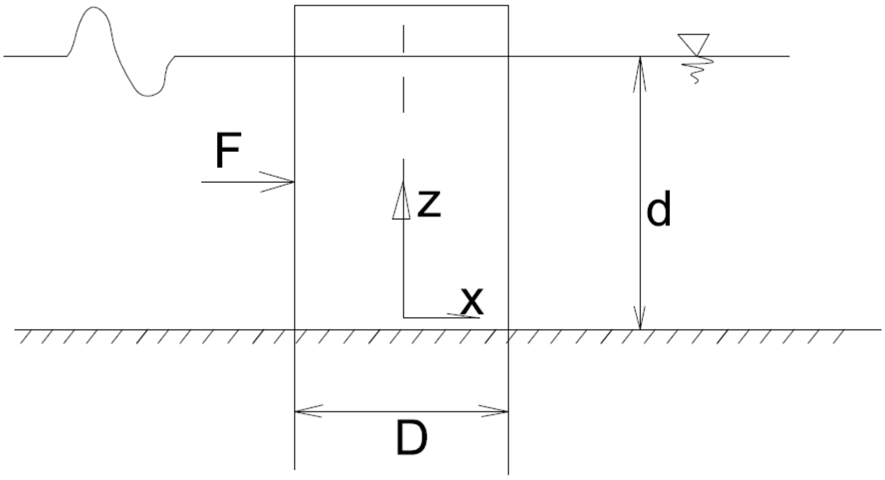
b) Δυνάμεις Diffraction (περίθλασης). Εάν λάβουμε υπόψη μας την παρουσία του σώματος και την παραμόρφωση (diffraction) που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής, θεωρήσουμε όμως το σώμα ακίνητο, τότε θα πρέπει στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού να προστεθεί και ένα επιπλέον δυναμικό που οφείλεται ακριβώς στην παραμόρφωση, και ονομάζεται δυναμικό περίθλασης (diffraction). Οι δυνάμεις που βρίσκονται συνυπολογίζοντας τα δύο δυναμικά ονομάζονται δυνάμεις περίθλασης (diffraction forces). Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας η υπέρθεση σημαίνει άθροιση των δύο δυναμικών.

c) Δυνάμεις radiation (ακτινοβολίας). Εάν επιπλέον θεωρήσουμε την κατασκευή κινούμενη, τότε δημιουργούνται κυματισμοί και κατ΄επέκταση ένα δυναμικό ροής που με τη σειρά του επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στα δύο προηγούμενα.

d) Δυνάμεις αντίδρασης: Οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας

e) Άλλες δυνάμεις: Οι δυνάμεις λόγω των θαλάσσιων κυματισμών είναι μη γραμμικές από τη φύση τους. Έτσι μπορούμε να τις υποδιαιρέσουμε στις δυνάμεις πρώτης τάξης, που προκύπτουν από τη λύση του γραμμικού προβλήματος, στην κατηγορία δε αυτή υπάγονται οι γραμμικές δυνάμεις που αναφέρθηκαν στα a,b και c, καθώς και στις δυνάμεις δεύτερης και ανώτερης τάξης που σ' ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη και έχουν καθοριστική σημασία (υπολογισμός αγκυρώσεων για παράδειγμα).

Από την άποψη της υδροδυναμικής ανάλυσης των εγκαταστάσεων offshore είναι πρωταρχικής σημασίας η εύρεση κριτηρίων για τη σχετική σημασία κάθε ενός τύπου δυνάμεων που αναφέρθηκε πριν, έτσι ώστε να μπορούν να υπολογισθούν με σχετικά απλές τεχνικές. Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε τέλος ότι οι δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation forces) και Froude-Kryloff αναφέρονται συνήθως στη διεθνή βιβλιογραφία ως αδρανειακές δυνάμεις ρευστού (fluid inertia forces). Σαν μια πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τη σχετική βαρύτητα των δυνάμεων που αναφέρθηκαν πριν και εύρεσης των περιοχών καθοριστικής σημασίας εκάστης, θα εξετάσουμε με τη βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης την περίπτωση κατακόρυφου κυλίνδρου, εδραζόμενου στον πυθμένα, σχήμα 2.1.



Σχ. 2.1 Κατακόρυφος κύλινδρος που εδράζεται στον πυθμένα [7].

Η δύναμη που ασκείται στον κύλινδρο λόγω προσπίπτοντος αρμονικού κυματισμού μπορεί γενικά να εκφραστεί με μια συναρτησιακή σχέση. Το αρμονικό κύμα περιγράφεται πλήρως με μια τριάδα τιμών π.χ. Η,λ,d ή $\bar{u}(z)$, T,d, όπου Η,λ,Τ το ύψος, το μήκος και η περίοδος του κύματος, d το βάθος του νερού και $\bar{u}(z)$ η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας των σωματιδίων του ρευστού σε απόσταση z από τον πυθμένα.

Αν υποθέσουμε ότι το κύμα περιγράφεται με την τριάδα (Η,λ,d) τότε η δύναμη που ασκείται στο κυλινδρικό σώμα θα δίνεται από τη συναρτησιακή σχέση:

$$F = f(D, d, \rho, g, H, \lambda, \mu) \tag{2.2.2}$$

Στην εξ.(2.2.2) λαμβάνονται υπόψη αδρανειακά φαινόμενα, καθώς και φαινόμενα τριβής και βαρύτητας μέσω των ρ,μ και g όπου μ η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού. Με τη βοήθεια του θεωρήματος π της μηχανικής ομοιότητας μπορούμε να διατυπώσουμε την εξ.(2.2.2) σε αδιάστατη μορφή ως εξής:

$$\frac{F}{\rho g \frac{\pi D^2}{4} \frac{H}{2}} = f\left(\frac{2\pi D}{\lambda}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho\sqrt{gD^3}}\right) \tag{2.2.3}$$

Η παράσταση $\frac{\mu}{\rho\sqrt{gD^3}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}}$ (ν: κινηματική συνεκτικότητα) ισούται με το λόγο του αριθμού Froude προς τον αριθμό Reynolds. Πράγματι ισχύουν οι σχέσεις:

$$F_r = \frac{Αδρανειακες\ δυνάμεις}{Δυνάμεις\ Βαρύτητας} = \frac{c}{\sqrt{gD}} \tag{2.2.3}$$

όπου c: η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος

$$Re = \frac{Αδρανειακες\ δυνάμεις}{Δυνάμεις\ τριβής} = \frac{cD}{\nu} \tag{2.2.4}$$

Από τις (2.2.3) και (2.2.4) προκύπτει:

$$\frac{F_r}{Re} = \frac{\Delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ \tau\rho\iota\beta\acute{\eta}\varsigma}{\Delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ B\alpha\rho\acute{\upsilon}\tau\eta\tau\alpha\varsigma} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}} \tag{2.2.5}$$

Με τη βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης καθίσταται φανερό ότι εμφανίζεται συνδυασμένη επίδραση δυνάμεων βαρύτητας, τριβής και αδρανειακών. Από την εξ. (2.2.5) προκύπτει ότι αυξανόμενης της διαμέτρου του κυλίνδρου η σχετική σημασία των δυνάμεων βαρύτητας έναντι εκείνων τριβής αυξάνει.

Αντικαθιστώντας την τιμή της ταχύτητας c του απλού αρμονικού κύματος, $c = \sqrt{\frac{g}{k}\tanh(kd)}$, στην εξ.(2.2.3) προκύπτει:

$$Fr = \left[\frac{\frac{g}{k}\tanh(kd)}{Dg}\right]^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{kD}}\sqrt{\tanh(kd)} \tag{2.2.6}$$

Για την περίπτωση ρευστού απείρου βάθους, όπου tanh(kd)=1, προκύπτει από την (2.2.6):

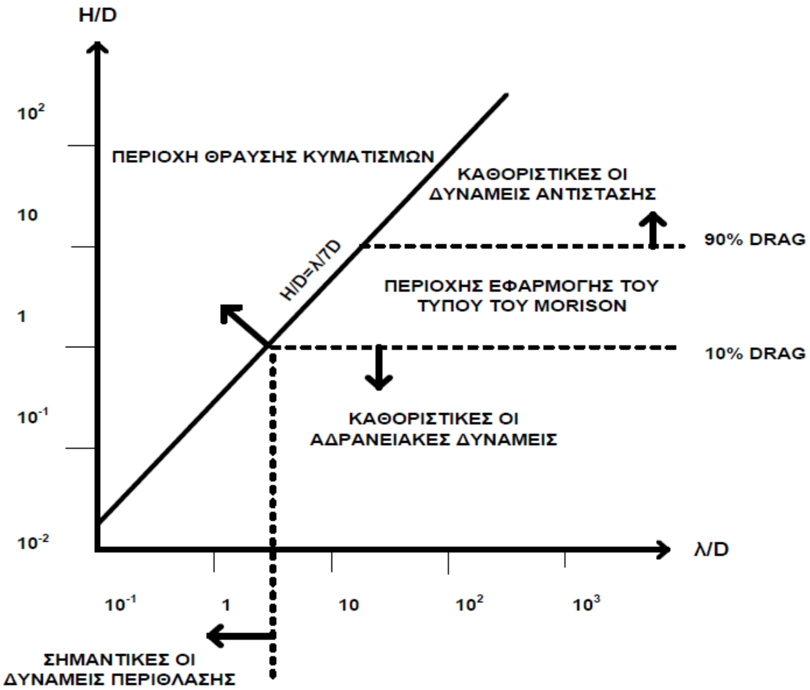
$$F_r = \frac{A\delta\rho\alpha\nu\varepsilon\iota\alpha\kappa\varepsilon\varsigma\ \delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma}{\Delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ B\alpha\rho\acute{\upsilon}\tau\eta\tau\alpha\varsigma} = \frac{1}{\sqrt{\kappa D}} \tag{2.2.7}$$

Παρατηρούμε κατά συνέπεια ότι για μικρές τιμές του kD=2πD/λ, όσο δηλαδή η διάμετρος του σώματος είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος λ, τα αδρανειακά φαινόμενα κερδίζουν σε σημασία έναντι των εκείνων της βαρύτητας. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για μικρές τιμές μπορούμε να παραβλέψουμε την παραμόρφωση του πεδίου ροής λόγω της παρουσίας του σώματος, να παραβλέψουμε δηλαδή τις δυνάμεις περίθλασης (diffraction forces) κατά τον υπολογισμό των φορτίων στην κατασκευή, πράγμα που δεν μπορεί να συμβεί στην περιοχή μεγάλων τιμών kD, όπου αντίθετα τα φαινόμενα βαρύτητας γίνονται καθοριστικά.

Στην περίπτωση ρηχού νερού, δηλ, για tanh(kd)≅kd, προκύπτει από την εξ.(2.2.7)

$$F_r = \frac{A\delta\rho\alpha\nu\varepsilon\iota\alpha\kappa\varepsilon\varsigma\ \delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma}{\Delta\upsilon\nu\acute{\alpha}\mu\varepsilon\iota\varsigma\ B\alpha\rho\acute{\upsilon}\tau\eta\tau\alpha\varsigma} = \sqrt{\frac{d}{D}} \tag{2.2.8}$$

πράγμα που σημαίνει ότι στην περίπτωση αυτή τα φαινόμενα βαρύτητας αποκτούν ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ ιδιαίτερη σημασία για μεγάλες τιμές της διαμέτρου ή μικρές τιμές του βάθους νερού d. Οριακές τιμές των παραμέτρων kd ή αντίστοιχα d/D, πάνω από τις οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα παραμόρφωσης της ροής (diffraction effects) θα αναφερθούν στη συνέχεια. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται κατά περιοχές η σχετική σημασία των διαφόρων τύπων δυνάμεων (αδρανειακών, βαρύτητας και αντίστασης) για την περίπτωση του κατακόρυφου κυλίνδρου. Από το σχήμα αυτό διαπιστώνουμε ότι ο κύλινδρος μπορεί να κοιταχτεί στις «ογκώδεις» κατασκευές όταν ο λόγος λ/D<5. Το όριο αυτό προκύπτει από την υδροδυναμική ανάλυση του σώματος σύμφωνα με τη θεωρία δυναμικού. Είναι πολύ δυσκολότερο να πούμε πότε για την κατασκευή αυτή οι δυνάμεις αντίστασης (drag forces) γίνονται καθοριστικές σε σχέση με τις αντίστοιχες αδρανειακές (inertia forces). Γενικά για τιμές του H/D>10 το φορτίο που επάγεται στην κατασκευή συνίσταται κατά 90% τουλάχιστον από δυνάμεις αντίστασης και κατά 10% το πολύ από δυνάμεις αδρανειακές.



Σχήμα 2.2 Περιοχές σχετικής σημασίας των διαφόρων τύπων δυνάμεων για την περίπτωση κατακόρυφου κυλίνδρου, σε άπειρο βάθος νερού [59].

Στο σχήμα 2.2, έχει σχεδιαστεί και το όριο του Michell – Havelock $\frac{H}{D} = \frac{1}{7}\frac{\lambda}{D}$ πέρα από το οποίο εμφανίζεται θραύση των κυματισμών για βαθύ νερό. Για ρηχό νερό το όριο θραύσης $\frac{H}{\lambda}$ έχει μικρότερη τιμή.

Τα συμπεράσματα αυτά μπορούμε να τα μεταφέρουμε και στις εγκαταστάσεις offshore. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τη χρήση των προγραμμάτων Η/Υ HAMVAB και SEMISUB, επικεντρονώμαστε στις περιοχές όπου ισχύει H/D<1, γεγονός που σημαίνει ότι βρισκόμαστε στηις περιοχές όπου είναι καθοριστικές οι δυνάμεις περίθλασης, για λ/d<5, και οι αδρανειακές δυνάμεις, για λ/d>5.

2.2.2 ΜΕΣΕΣ ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ (DRIFT FORCES)

Με τη χρήση της μεθόδου μεθόδου της απ' ευθείας ολοκλήρωσης όλων των όρων της πίεσης πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής, που συνεισφέρουν σε δυνάμεις δεύτερης τάξης, παρουσιάζεται από τους Pinkster και Van Oortmerssen [57], η χρονικά μέση δύναμη έκπτωσης και η ορμή, που δρούν σε μια διάταξη q της συστοιχίας, μπορεί να ληφθούν ως εξής:

$$F^{(2),q} = -\int_{WL} \frac{1}{2}\rho \cdot g \cdot \overline{\left(\zeta_r^q\right)^2} ndl + \overline{M \cdot R} \cdot \overline{X_g^{q''}} + \iint_{S_0^q} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \overline{|\nabla\Phi^q|^2} nds + \iint_{S_0^q} \rho \cdot \overline{X^q \cdot \nabla\Phi_t^q}\, nds \quad (2.2.9)$$

Εδώ οι μπάρες υποδηλώνουν τη μέση τιμή στο χρόνο, S_0^q είναι η μέση βρεγμένη επιφάνεια του σώματος, ρ είναι η πυκνότητα του νερού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, n είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στραμμένο προς τα έξω (προς το εσωτερικό του ρευστού) ως προς τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος, M είναι ο πίνακας της γενικευμένης μάζας, $\overline{X^q}$ είναι το διάνυσμα των μεταφορών πρώτης τάξης σε ένα σημείο της διαβρεχόμενης επιφάνειας του σώματος, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως υπέρθεση των κινήσεων μεταφοράς του κέντρου βάρους του σώματος και των περιστροφών γύρω από αυτό. Ο όρος $\overline{X_g^{q''}}$, είναι οι πρώτης τάξης μεταφορικές επιταχύνσεις του κέντρου βάρους του σώματος και ζ_r^q είναι η πρώτης τάξης σχετική ανύψωση κύματος σε σχέση με τη μετατοπισμένη στατική ίσαλο γραμμή WL στο σώμα. Στην Εξ. (2.2.9), οι γενικευμένες κάθετες συνιστώσες του διανύσματος και οι ροπές αδρανείας της μάζας πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση των μέσων ροπών των δυνάμεων έκπτωσης (mean drift moments).

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, οι εκφράσεις τόσο για την οριζόντια όσο και την κατακόρυφη μέση δύναμη δεύτερης τάξης και οι αντίστοιχες ροπές δίνονται από [58]:

$$F^{(2),q} = \rho \iint_{S_R} \left\{\left[\Phi_t^q + \frac{1}{2}\nabla\Phi^q \cdot \nabla\Phi^q + gz\right] n - \frac{\partial\Phi^q}{\partial n}\nabla\Phi^q\right\} ds - k\rho \iint_{S_B} \left[\Phi_t^q + \frac{1}{2}\nabla\Phi^q \cdot \nabla\Phi^q\right] dS$$
$$- k\rho g \iint_{S_{FS} \cup S_0^q} zN_z dS \quad (2.2.10)$$

$$M^{(2),q} = \rho \iint_{S_R} \left\{\left[\Phi_t^q + \frac{1}{2}\nabla\Phi^q \cdot \nabla\Phi^q + gz\right](x \times n) - (x \times \nabla\Phi^q)\frac{\partial\Phi^q}{\partial n}\right\} ds$$

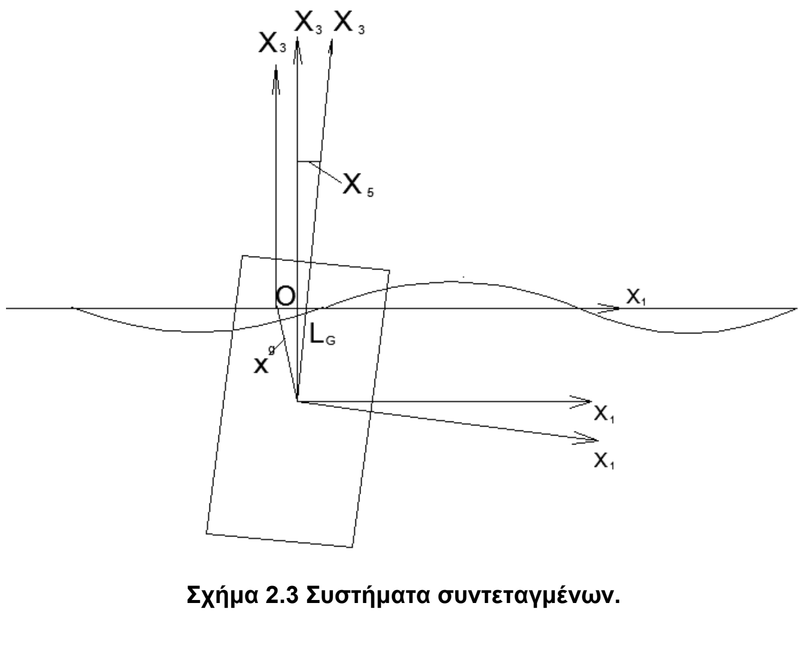
$$-\rho \iint_{S_R} \left[\Phi_t^q + \frac{1}{2}\nabla\Phi^q \cdot \nabla\Phi^q\right](yi - xj) ds - \rho g \iint_{S_{FS} \cup S_0^q} z\left[(yn_z - zn_y)i + (zn_x - xn_z)j\right] dS$$

Στις παραπάνω εξισώσεις θεωρούνται οι μέσες τιμές ως προς το χρόνο των ανωτέρω εξισώσεων, k, i και j είναι τα μοναδιαία διανύσματα στους z-, x- και y- άξονες αντίστοιχα, n είναι η το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα προσανατολισμένο προς τα έξω από τον όγκο ελέγχου του ρευστού, x είναι το διάνυσμα θέσης ενός σημείου επί των επιφανειών ελέγχου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της εξεταζόμενης διάταξης και έγινε η υπόθεση ότι ο πυθμένας της θάλασσας είναι οριζόντιος. Επιπλέον, S_B είναι ο πυθμένας της θάλασσας, S_{FS} το τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας που περικλείεται μεταξύ S_0^q και της σταθερής κατακόρυφης κυλινδρικής επιφάνειας ελέγχου S_R που περιβάλλει το σώμα. Στην περίπτωση μεμονωμένου σώματος στο πεδίο ροής, η κατακόρυφη επιφάνεια ελέγχου τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από το σώμα, σε τρόπο ώστε να γίνει χρήση των ασυμπτωτικών αναπαραστάσεων του δυναμικού που ισχύουν εκεί και να απλοποιηθούν σημαντικά οι προκύπτουσες μαθηματικές εκφράσεις. Στην περίπτωση πολλαπλά αλληλεπιδρώντων σωμάτων, η επιφάνεια αναφοράς περιβάλλει κάθε ένα από τα αλληλεπιδρώντα σώματα. Συνήθως και για την απλοποίηση των μαθηματικών εκφράσεων, η επιφάνεια αναφοράς στην περίπτωση πολλών σωμάτων συμπίπτει, κατά την ακτινική διεύθυνση, με τη μέση διαβρεχόμενη επιφάνεια της κάθε κατασκευής. Η πλήρης αναπαράσταση του δυναμικού ταχύτητας γύρω από το κάθε σώμα της διάταξης πρέπει να ληφθεί υπόψη με το να συμπεριληφθούν τόσο ο προσπίπτων κυματισμός, ο αποσβενύμενος κυματισμός όσο και οι τοπικές διαταραχές που παρουσιάζονται γύρω από το σώμα [58]. Τα φορτία των δυνάμεων έκπτωσης που προκύπτουν για κάθε μία από τα μεμονωμένα σώματα της διάταξης, υπερτίθενται στη συνέχεια ως προς ενιαίο αδρανειακό σύστημα αναφοράς για να προκύψουν τα μέσα δευτεροτάξια φορτία έκπτωσης σε ολόκληρο το συγκρότημα των πολλαπλών σωμάτων.

2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ – ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε περιοχές της ροής όπου οι δυνάμεις αντίστασης που ασκούνται στο σώμα μπορούν να παραληφθούν (όταν γίνονται κάτω του 10% της συνολικής δύναμης) τότε, η χρήση της θεωρίας δυναμικού, στα πλαίσια της οποίας η ροή θεωρείται ασυμπίεστη, αστρόβιλη και μη συνεκτική οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Μια τέτοια θεώρηση για την περίπτωση του υπολογισμού των φορτίων και των κινήσεων των «ογκωδών» κατασκευών που εμφανίζονται στην περιοχή των εγκαταστάσεων “offshore” είναι τις περισσότερες φορές ρεαλιστική με την προϋπόθεση βέβαια ότι θα ληφθούν υπ’όψη τα σημαντικά φαινόμενα παραμόρφωσης της ροής λόγω παρουσίας του σώματος. Για την ανάπτυξη του κεφαλαίου αυτού θα χρησιμοποιηθούν διατυπώσεις που παρουσιάζονται στο βιβλίο των πανεπιστημιακών σημειώσεων του μαθήματος «Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών» [7].

Στα πλαίσια της παραγράφου αυτής θα περιοριστούμε στη διατύπωση του γραμμικού υδροδυναμικού προβλήματος ελεύθερα πλέοντος σώματος (δηλ. χωρίς αγκυρώσεις) παρουσία απλού αρμονικού κυματισμού, στάδιο το οποίο είναι απαραίτητο για την εξέταση άλλων επί μέρους προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών. Το πεδίο ροής περιορίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια, τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος και τον πυθμένα. Κατά την ανάπτυξη της παραγράφου αυτής θα χρησιμοποιήσουμε τρία συστήματα συντεταγμένων που φαίνονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Συστήματα συντεταγμένων.

Το πρώτο G-x_1,x_2,x_3 είναι σωματοπαγές καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το κέντρο βάρους της κατασκευής και με θετικό άξονα G-x_3 κατακόρυφα προς τα πάνω στη μέση θέση ισορροπίας του σώματος. Η γάστρα του σκάφους ορίζεται μονοσήμαντα ως προς το σύστημα αυτό, ένα σημείο της δε έχει διάνυσμα θέσης $\vec{x}$. Ο προσανατολισμός ενός στοιχείου της επιφάνειας του σώματος ορίζεται στο σύστημα αυτό με το κάθετο διάνυσμα $\vec{n}$ που έχει φορά προς τα έξω (δηλ. προς το ρευστό).

Το δεύτερο σύστημα συντεταγμένων 0-X_1,X_2,X_3 είναι σταθερό στο χώρο με άξονες παράλληλους προς εκείνους του G-x_1,x_2,x_3 όταν το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία. Η αρχή των συντεταγμένων του 0-

X_1,X_2,X_3 είναι στην ήρεμη επιφάνεια του ρευστού. Τέλος το τρίτο σύστημα συντεταγμένων G-X_1,X_2,X_3 έχει αρχή στο κέντρο βάρους του σκάφους και εκτελεί σε σχέση με το 0-X_1,X_2,X_3 μόνο μεταφορικές κινήσεις με συνέπεια οι άξονές του να είναι καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης παράλληλοι προς εκείνους του 0-X_1,X_2,X_3.

Με την υπόθεση που αναφέρθηκε εισαγωγικά για το ασυμπίεστο, αστρόβιλο και ατριβές της ροής, η κίνηση του ρευστού μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του δυναμικού ταχύτητας $\Phi(x_1,x_2,x_3;t)$, το οποίο αναλύεται γενικά στη μορφή:

$$\Phi(x_1,x_2,x_3;t) = \Phi_0(x_1,x_2,x_3;t) + \Phi_s(x_1,x_2,x_3;t) \tag{2.3.1}$$

όπου Φ_0 το δυναμικό της αδιατάρακτης ροής επερχόμενου κυματισμού και Φ_s το δυναμικό παραμόρφωσης του αδιατάρακτου πεδίου ροής λόγω της παρουσίας του σώματος και των κινήσεών του. Το δυναμικό Φ προσδιορίζεται σα λύση της εξίσωσης Laplace

$$\Delta\Phi = 0 \text{ σ' ολόκληρο το πεδίο ροής} \tag{2.3.2}$$

με τις εξής οριακές συνθήκες:

a) στον πυθμένα

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{n}} = 0 \qquad x_3 = -d \tag{2.3.3}$$

b) στη βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\vec{N}} = V_N \quad \sigma\tau\eta\nu \quad S(x_1,x_2,x_3;t) = 0 \tag{2.3.4}$$

όπου V_N η ταχύτητα κατά τη φορά της καθέτου, $\vec{N}$ όπως αυτή εκφράζεται στο ακίνητο σύστημα συντεταγμένων 0-X_1,X_2,X_3 και $S(x_1,x_2,x_3;t)$ η στιγμιαία βρεχόμενη επιφάνεια

c) κινηματική και δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial x_1}\frac{\partial\zeta}{\partial x_1} + \frac{\partial\zeta}{\partial x_2}\frac{\partial\Phi}{\partial x_2} - \frac{\partial\Phi}{\partial x_3} = 0 \;\; \gamma\iota\alpha \;\; x_3 = \zeta(x_1,x_2;t) \tag{2.3.5}$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_3}\right)^2\right] + gx_3 = 0 \qquad x_3 = \zeta(x_1,x_2;t) \tag{2.3.6}$$

d) Τέλος θα πρέπει να τεθεί και μία κατάλληλη συνθήκη ακτινοβολίας στο άπειρο που να διατυπώνει μαθηματικά το γεγονός ότι το δυναμικό Φ_s πρέπει να περιγράφει μόνο απομακρυσμένους κυματισμούς, διαφορετικά θα εμφανιζόταν η περίπτωση ύπαρξης λύσεων για κύματα που θα δημιουργούντο στο άπειρο, πράγμα που δεν έχει φυσική έννοια. Είναι προφανές ότι το μη γραμμικό οριακό πρόβλημα όπως διατυπώνεται με τις εξισώσεις (2.3.2-2.3.6) δεν επιδέχεται κλειστή λύση.

Με βάση την εξίσωση (2.3.1), το δυναμικό πρώτης τάξης του πεδίου ροής γύρω από σώμα που πλέει ελεύθερα στην επιφάνεια ρευστού παρουσία απλού αρμονικού κύματος γράφεται στη μορφή:

$$\Phi(x_1,x_2,x_3;t)=\Phi_0(x_1,x_2,x_3;t)+\Phi_7(x_1,x_2,x_3;t)+\sum_{j=1}^{6}\dot{x_j}_0\Phi_j(x_1,x_2,x_3;t) \qquad (2.3.7)$$

Στη σχέση (2.3.7) καθώς και σε όλες τις επόμενες, όταν αναφερόμαστε σε μεγέθη πρώτης τάξης, θα παραλείπουμε τον χαρακτηριστικό δείκτη (1) χωρίς κίνδυνο παρανόησης.

Τα δυναμικά Φ, Φ_0, Φ_1,…..Φ_7 μεταβάλλονται αρμονικά με τη συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος (ω), με συνέπεια να μπορούμε να γράψουμε, χρησιμοποιώντας τη μιγαδική γραφή:

$$\Phi_j(x_1,x_2,x_3;t)=Re\{\varphi_j(x_1,x_2,x_3;t)e^{-i\omega t}\} \quad j=0,1,2,\dots 7 \qquad (2.3.8)$$

όπου $\Phi_j(x_1,x_2,x_3)$ μιγαδική συνάρτηση μόνο των χωρικών μεταβλητών. Για τις ταλαντωτικές μικροκινήσεις του σώματος ισχύει εξ άλλου

$$x_j(t)=Re\{x_{j_0}e^{-i\omega t}\}\ , \qquad j=1,2,\dots 6 \qquad (2.3.9)$$

$$\dot{x}_j(t)=Re\{-i\omega x_{j_0}e^{-i\omega t}\}=Re\{\dot{x}_{j_0}e^{-i\omega t}\} \qquad (2.3.10)$$

Μόλις έχουν ευρεθεί τα δυναμικά Φ_1, Φ_2,…..Φ_7 ως λύσεις των αντίστοιχων προβλημάτων οριακών τιμών που διατυπώθηκαν προηγούμενα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στην κατασκευή, ολοκληρώνοντας τις χρονικά μεταβαλλόμενες πιέσεις, όπως υπολογίζονται με τη βοήθεια της εξ.Bernoulli, στη στιγμιαία βρεχόμενη επιφάνεια της κατασκευής.

Σύμφωνα με την εξ. Bernoulli η πίεση σε τυχαίο σημείο του ρευστού δίνεται από τη σχέση:

$$P(x_1,x_2,x_3;t)=-\rho g x_3-\rho\Phi_t-\frac{1}{2}\rho\left|\vec{\nabla}\Phi\right|^2 \qquad (2.3.11)$$

Δεχόμενοι ότι το εξεταζόμενο σημείο εκτελεί μικρές, πρώτης τάξης, ταλαντωτικές μικροκινήσεις $\vec{x}^{(1)}$, γύρω από τη μέση θέση ισορροπίας του $\vec{x}^{(0)}$, και αναπτύσσοντας την πίεση P $(x_1,x_2,x_3;t)$ σε σειρά κατά Taylor ως προς το $\vec{x}^{(0)}$ μπορούμε να βρούμε ότι η πίεση εκφράζεται σε σειρά διαταραχών της μορφής

$$P(\vec{x};t)=p^{(0)}(\vec{x}^{(0)},t)+\varepsilon^2 p^{(1)}(\vec{x}^{(0)},t)+\varepsilon^2 p^{(2)}(\vec{x}^{(0)},t) \qquad (2.3.12)$$

όπου

$$p^{(0)}=-\rho g x_3^{(0)} \qquad (2.3.13)$$

η υδροστατική πίεση

$$p^{(1)}=-\rho g x_3^{(1)}-\rho\Phi_t^{(1)} \qquad (2.3.14)$$

η πίεση πρώτης τάξης και

$$p^{(2)}=-\frac{1}{2}\rho\left|\vec{\nabla}\Phi^{(1)}\right|^2-\rho\Phi_t^{(2)}-\rho\left(\vec{x}^{(1)}\cdot\vec{\nabla}\Phi_t^{(1)}\right) \qquad (2.3.15)$$

η αντίστοιχη πίεση δεύτερης τάξης. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα ως προς το σύστημα συντεταγμένων G-X_1,X_2,X_3 δίνονται από τη σχέση:

$$F = -\iint_S p \cdot \vec{N} dS \tag{2.3.16}$$

όπου

S η στιγμιαία βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος

$\vec{N}$ το στιγμιαίο κάθετο διάνυσμα στο στοιχείο της επιφάνειας dS ως προς το σύστημα συντεταγμένων G-X_1,X_2,X_3.

p η πίεση που δίνεται από τη σχέση (2.3.12)

Για περαιτέρω ανάλυση, ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στις πανεπιστημιακές σημειώσεις του μαθήματος «Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών» [7].

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με το καθαρά υδροδυναμικό τμήμα της συνολικής δύναμης που ασκείται στο σώμα. Το τμήμα αυτό διασπάται:

a) στις δυνάμεις διέγερσης

$$F_{k,\delta\iota\varepsilon\gamma}(t) = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} (\varphi_0 + \varphi_7) n_k dS_0 \tag{2.3.17}$$

που προκύπτουν λόγω του ορισμού των φ_0 και φ_7 από την ολοκλήρωση του δυναμικού του απλού αρμονικού κυματισμού φ_0 και του δυναμικού περίθλασης φ_7 στη μέση βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος, θεωρώντας το σώμα ακίνητο και

b) στις υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης του ρευστού στην επιταχυνόμενη κίνηση του σώματος

$$F_{k,\upsilon\delta\rho.\alpha\nu\tau\iota\delta.}((t) = -i\omega\rho e^{-i\omega t} \iint_{S_0} \left(\sum_{j=1}^{6} \dot{x_{j_0}} \varphi_j \right) n_k dS_0 \tag{2.3.18}$$

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι από τις δυνάμεις διέγερσης το τμήμα που προκύπτει από την ολοκλήρωση του δυναμικού του απλού κυματισμού φ_0 εκφράζει τις δυνάμεις Froude-Kryloff, ενώ με το δεύτερο τμήμα φ_7 λαμβάνεται υπ' όψη η παραμόρφωση του αδιατάρακτου πεδίου ροής φ_0 λόγω της παρουσίας του σώματος.

Εισάγοντας τον ορισμό

$$-\rho \iint_{S_0} \varphi_j n_k dS_0 = a_{kj} + \frac{i}{\omega} bk_j \tag{2.3.19}$$

προκύπτει ότι:

$$\alpha_{kj} = -\rho Re\left[\iint_{S_0} \varphi_j n_k dS_0\right] \tag{2.3.20}$$

και

$$b_{kj} = -\rho\omega Im\left[\iint_{S_0} \varphi_j n_k dS_0\right] \tag{2.3,21}$$

επομένως μπορούμε να διαπιστώσουμε, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.3.9) και (2.3.10) την υδροδυναμική δύναμη αντίδρασης του ρευστού στη διεύθυνση k, λόγω της κίνησης του σώματος στη διεύθυνση, στη μορφή:

$$F_{kj,\upsilon\delta\rho.\alpha\nu\tau\iota\delta.} = -\alpha_{kj}\ddot{x}_j - b_{kj}\dot{x}_j \tag{2.3.22}$$

οπότε και η $F_{k,\upsilon\delta\rho.\alpha\nu\tau\iota\delta.}$ βάσει της εξ.(2.3.22) γίνεται:

$$F_{k,\upsilon\delta\rho.\alpha\nu\tau\iota\delta.} = -\sum_{j=1}^{6}(\alpha_{kj}\ddot{x}_j + b_{kj}\dot{x}_j) \tag{2.3.23}$$

Στις σχέσεις αυτές τα μεγέθη α_{kj} και b_{kj} εκφράζουν την υδροδυναμική μάζα και απόσβεση αντίστοιχα στη διεύθυνση k λόγω της κίνησης του σώματος στη διεύθυνση j. Με βάση τη σχέση (2.3.23) παρατηρούμε ότι ορίζονται ανά 36 για την υδροδυναμική μάζα και απόσβεση αντίστοιχα, που σε μορφή μητρώου έχουν τη μορφή:

$$\alpha_{kj}(\text{ή } b_{kj}) = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & \alpha_{13} & 0 & \alpha_{15} & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 & \alpha_{24} & 0 & \alpha_{26} \\ \alpha_{31} & 0 & \alpha_{33} & 0 & \alpha_{35} & 0 \\ 0 & \alpha_{42} & 0 & \alpha_{44} & 0 & \alpha_{46} \\ \alpha_{51} & 0 & \alpha_{53} & 0 & \alpha_{55} & 0 \\ 0 & \alpha_{62} & 0 & \alpha_{64} & 0 & \alpha_{66} \end{bmatrix} \tag{2.3.24}$$

Οι συντελεστές $\alpha_{23} = \alpha_{43} = \alpha_{63} = b_{23} = b_{43} = b_{63} = 0$ λόγω της συμμετρίας του σώματος ως προς το επίπεδο $x_1 - x_3$. Επίσης θα πρέπει να σημειώσουμε ότι επειδή τα δυναμικά φ_j (j=1,2,….,6) του προβλήματος ακτινοβολίας που εμφανίζονται στη σχέση ορισμού των a_{kj} και b_{kj} (εξ. 2.3.18) είναι συναρτήσεις της κυκλικής συχνότητας ω, λόγω της οριακής συνθήκης στην ελεύθερη επιφάνεια (βλ. εξ. 2.3.8 και εξ. 2.3.18) που πρέπει να ικανοποιούν, το ανάλογο θα πρέπει να ισχύει και για τους υδροδυναμικούς συντελεστές. Τα μητρώα $[\alpha_{kj}]\ \kappa\alpha\iota\ [b_{kj}]$ είναι συμμετρικά [50] πράγμα που σημαίνει ότι:

$$\alpha_{kj} = \alpha_{jk} \quad \kappa\alpha\iota \quad b_{kj} = b_{jk} \tag{2.3.25}$$

Η διατύπωση των υδροδυναμικών δυνάμεων αντίδρασης στη μορφή της εξ.(2.3.23) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαμόρφωση των εξισώσεων κίνησης ενός ελεύθερα πλέοντος σώματος, που διεγείρεται υπό την επίδραση απλών αρμονικών κυματισμών. Οι εξισώσεις που προκύπτουν με εφαρμογή του νόμου του Νεύτωνα [50], εκφράζουν τη δυναμική ισορροπία μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων, υδροδυναμικών αντιδράσεων, δυνάμεων επαναφοράς και διέγερσης, και διατυπώνονται στη γενική τους μορφή με ένα σύστημα έξι συνδεδεμένων διαφορικών εξισώσεων

$$\sum_{j=1}^{6}(m_{kj}+a_{kj})\ddot{x}_j+b_{kj}\dot{x}_j+c_{kj}x_j=F_{k,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) \tag{2.3.26}$$

όπου m_{kj} $(=m_{jk})$ στοιχείο του γενικευμένου αδρανειακού μητρώου, η πλήρωση των μη διαγώνιων στοιχείων του οποίου εξαρτάται από τη γεωμετρία του σώματος και την εκλογή του συστήματος συντεταγμένων (αυτό ισχύει και για το μητρώο c_{kj}). Στην περίπτωση που εξετάσαμε αποδεχθήκαμε αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων ($0\text{-}X_1X_2X_3$) με αρχή την ήρεμη επιφάνεια του ρευστού και συμμετρική κατανομή της μάζας ως προς το πεδίο x_1 – x_3, οπότε το αδρανειακό μητρώο έχει τη μορφή:

$$|m_{kj}|=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mX_{g_3}^{(0)} & 0 \\ 0 & m & 0 & -mX_{g_3}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -mX_{g_3}^{(0)} & 0 & J_{44} & 0 & -J_{46} \\ mX_{g_3}^{(0)} & 0 & 0 & 0 & J_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_{64} & 0 & J_{66} \end{bmatrix} \tag{2.3.27}$$

όπου m η μάζα της κατασκευής, J_{ii} οι ροπές αδρανείας, J_{46}=J_{64} γινόμενο αδρανείας αντίστοιχα και $(0,0,X_{g_3}^{(0)})$ η θέση του κέντρου βάρους της κατασκευής ως προς το $0\text{-}X_1X_2X_3$. Στην περίπτωση ύπαρξης πλευρικής συμμετρίας, δηλ. ως προς το επίπεδο X_1 – X_3, του εξεταζόμενου σώματος, οι έξι συνδυασμένες διαφορικές εξισώσεις κίνησης ανάγονται σε δύο ομάδες εξισώσεων, η μία από τις οποίες περιέχει τις τρεις συνδυασμένες εξισώσεις κίνησης για το surge, heave και pitch, και η άλλη τις συνδυασμένες εξισώσεις για το sway, roll και yaw. Για το λόγο αυτό σε κατασκευή που εμφανίζει πλευρική συμμετρία (όπως για παράδειγμα σκάφος επιφάνειας) οι κινήσεις surge, heave και pitch είναι αποσυνδεδεμένες από τις αντίστοιχες sway, roll και yaw.

Ειδικότερα για την περίπτωση εκ περιστροφής συμμετρικού σώματος με κατακόρυφο άξονα (π.χ. σημαντήρας) και συμμετρική κατανομή της μάζας του περί αυτόν, κινήσεις εμφανίζονται μόνο στο επίπεδο προχώρησης του προσπίπτοντος κυματισμού. Έτσι για την περίπτωση κυματισμού κινούμενου κατά μήκος του άξονα $O\text{-}x_1$ οι τρεις κινήσεις της κατασκευής θα είναι x_1(surge), x_3(heave) και x_5(pitch) εκ των οποίων μόνο οι δύο (surge και pitch) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Έτσι το γενικό σύστημα των εξισώσεων κίνησης, εξ.(2.3.26) ανάγεται στην περίπτωση αυτή στις εξής σχέσεις:

$$(m+a_{33})\ddot{x}_3+b_{33}\dot{x}_3+gA_{wp}x_3=F_{3,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) \tag{2.3.28}$$

$$(m+a_{11})\ddot{x}_1+b_{11}\dot{x}_1+\left(mX_{g_3}^{(0)}+a_{15}\right)\ddot{x}_5+b_{15}\dot{x}_5=F_{1,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) \tag{2.3.29}$$

$$(I_{55}+a_{55})\ddot{x}_5+b_{55}\dot{x}_5+\left(mX_{g_3}^{(0)}+a_{51}\right)\ddot{x}_1+b_{51}\dot{x}_1+g\nabla\overline{GM}x_5=F_{5,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) \tag{2.3.30}$$

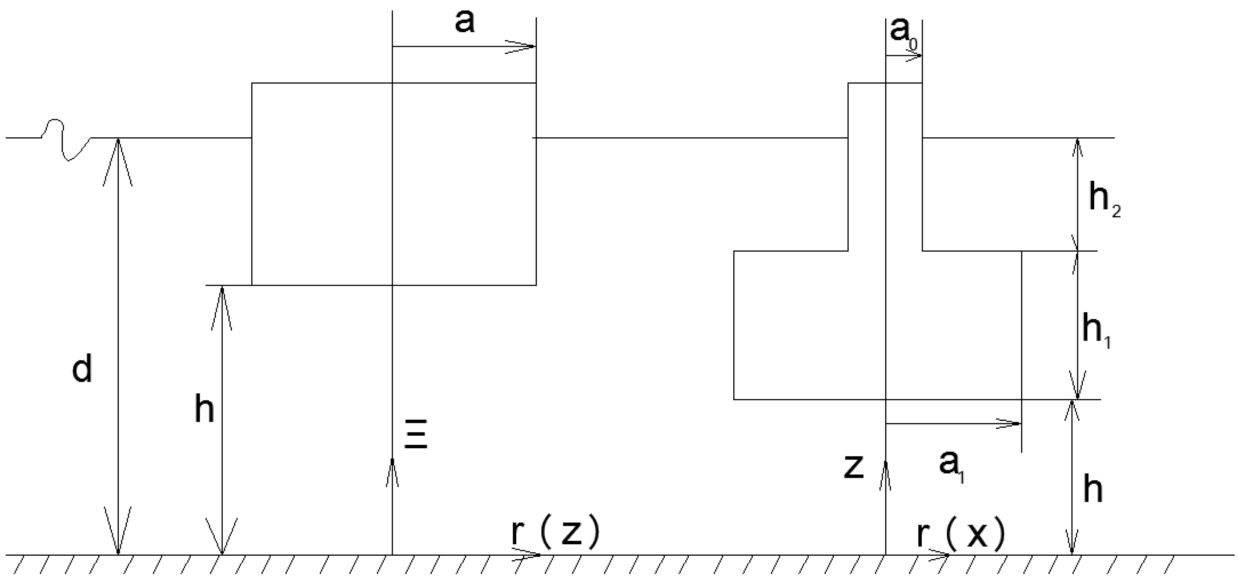
Από την ανάπτυξη που προηγήθηκε συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο πυρήνας της υδροδυναμικής ανάλυσης «ογκωδών» κατασκευών με τη βοήθεια της θεωρίας δυναμικού συνίσταται στην επίλυση των οριακών προβλημάτων περίθλασης και ακτινοβολίας και τον προσδιορισμό των αντίστοιχων δυναμικών ταχύτητας φ_7 και φ_j (j=1,2,….,6).

2.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΩΤΩΝ ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ (SEMISUBMERSIBLES)

Μερικά σημαντικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των πλωτών ημιβυθισμένων εξεδρών μπορούν να εξηγηθούν αρχικά εξετάζοντας την κατακόρυφη κίνηση ενός κυλινδρικού σώματος (σημαντήρα). Σύμφωνα με την εξ. (2.3.28) που περιγράφει την κίνηση στην κατεύθυνση αυτή εκ περιστροφής συμμετρικών σωμάτων η ιδιοσυχνότητα της καθ' ύψος κίνησης δίνεται από την σχέση:

$$\omega_3 = \left(\frac{\rho g A_{WL}}{m + a_{33}}\right)^{1/2} \tag{2.4.1}$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι, για σταθερό εκτόπισμα (∇=m/ρ), μπορεί να επιτευχθεί μείωση της ιδιοσυχνότητας ή αντίστοιχα αύξηση της ιδιοπεριόδου της καθ' ύψος κίνησης, γεγονός που επηρεάζει θετικά την όλη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής, με αντίστοιχη μείωση της ισάλου επιφάνειας A_{WL} ή αύξηση της υδροδυναμικής μάζας $α_{33}$ ή τέλος σε συνδυασμό των δύο. Στην περίπτωση σύνθετων κατακόρυφων κυλινδρικών στοιχείων (βλ. σχ. 2.4) εκμεταλλευόμαστε ταυτόχρονα και τους δύο παράγοντες. Βέβαια θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι γενικά δεν είναι επιτρεπτή μία απεριόριστη μείωση της ισάλου επιφάνειας. Λόγοι ευστάθειας, αντοχής καθώς και λειτουργικοί επιβάλλουν ορισμένα ελάχιστα όρια στην A_{WL}. Είναι προτιμότερο κατά συνέπεια να προσπαθήσουμε να πετύχουμε αύξηση του συντελεστή υδροδυναμικής μάζας διαμορφώνοντας κατάλληλα τον ανωστικό όγκο του σώματος. Είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς, πως κρατώντας το εκτόπισμα και το βύθισμα σταθερό επιτυγχάνουμε αύξηση της υδροδυναμικής μάζας μεταθέτοντας μεγάλο μέρος του ανωστικού όγκου σε μεγαλύτερο βάθος [7].



Σχήμα 2.4 Απλό και σύνθετο κυλινδρικό σώμα – Ορισμοί [7].

Η δύναμη διέγερσης στην κατακόρυφη διεύθυνση που προκαλείται από τον απλό αρμονικό κυματισμό δίνεται για την περίπτωση λεπτών σωμάτων από τη σχέση:

$$F_{3,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) = F_{2,Fk}(t) + a_{33}\dot{u}_3 + b_{33}u_3 \tag{2.4.2}$$

όπου $F_{3,Fk}(t)$ η δύναμη Froude-Kryloff. Η δύναμη διέγερσης μπορεί να γραφεί μετά από προφανείς μετασχηματισμούς στη μορφή [7]:

$$F_{3,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) = A\ddot{\zeta}|_{x=0} + B\dot{\zeta}|_{x=0} + C\zeta|_{x=0} \tag{2.4.3}$$

όπου ζ η ανύψωση του απλού αρμονικού κυματισμού.

$$\zeta = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t)\,, \qquad A, B, C \quad \text{συντελεστές αναλογίας της μορφής}$$

$$A = x_a a_{33}, \qquad B = x_b b_{33} \quad \kappa\alpha\iota \quad C = x_c c_{33} \tag{2.4..4}$$

Με τους x_α, x_b και x_c λαμβάνονται υπ' όψη το πεπερασμένο βάθος του νερού καθώς και οι διαστάσεις του σώματος σε σχέση με το μήκος κύματος. Να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι ο τρίτος όρος της εξίσωσης (2.4.3), στο δεξί της μέλος, δίνει τη δύναμη Froude-Kryloff, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής x_c δίνεται από τη σχέση:

$$x_c = x_D \cdot x_B \tag{2.4.5}$$

όπου x_D και x_B συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του πεπερασμένου βάθους και των διαστάσεων αντίστοιχα και εκφράζονται ως εξής:

$$x_D = \frac{\cosh(kh)}{\cosh(kd)} \tag{2.4.6}$$

και

$$x_B = \frac{2}{ka} J_1(ka) \tag{2.4.7}$$

με τα μεγέθη h, d, α όπως ορίζονται στο σχήμα 2.4.

Η (2.4.3) γράφεται ισοδύναμα:

$$F_{3,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t) = (-A\omega^2 + C)\zeta|_{x=0} + B\dot{\zeta}|_{x=0} \tag{2.4.8}$$

Η δύναμη Froude-Kryloff $C\zeta|_{x=0}$ και το τμήμα της δύναμης διέγερσης που είναι ανάλογο με την επιτάχυνση $A\ddot{\zeta}|_{x=0}(= -\omega^2 A\zeta)|_{x=0}$ εμφανίζουν διαφορά φάσης κατά 180°.

Η αύξηση της υδροδυναμικής μάζας που εμφανίζεται στον σύνθετο κύλινδρο προκαλεί συνακόλουθη αύξηση του πλάτους της δύναμης $A\ddot{\zeta}|_{x=0}$ ενώ παράλληλα η μείωση της ισάλου επιφάνειας σε σχέση με τον απλό κατακόρυφο κύλινδρο προκαλεί μείωση της δύναμης Froude-Kryloff. Έτσι για συχνότητα διέγερσης

$$\omega_e = \left(\frac{C}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.4.9}$$

που ονομάζεται συνήθως συχνότητα μηδενισμού (cancellation frequency), η δύναμη διέγερσης θα ισούται με:

$$F_{3,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(t, \omega = \omega_e) = B\dot{\zeta}|_{x=0} = x_b b_{33}\dot{\zeta}|_{x=0} \tag{2.4.10}$$

Δεδομένου όμως ότι ο συντελεστής b_{33} θα πρέπει να είναι ταυτόχρονα ανάλογος του τετραγώνου του πλάτους της δύναμης διέγερσης, σύμφωνα με τη σχέση [69]:

$$\left|F_{10,\delta\iota\varepsilon\gamma.}(0)\right| = \frac{H}{2}\left(\frac{2\rho g^3}{\omega^3} b_{33}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.4.11}$$

συνάγεται ότι η τελευταία για $\omega=\omega_e$ θα ισούται με μηδέν. Στην ίδια συχνότητα εμφανίζεται σημείο μηδενισμού του συντελεστή υδροδυναμικής απόσβεσης.

Ο υπολογισμός της δυναμικής συμπεριφοράς πλωτών ημιβυθισμένων εξεδρών μπορεί να να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος μπορεί να γίνει με χρήση εκτενών προγραμμάτων Η/Υ που μπορεί να αναλύσουν την υδροδυναμική συμπεριφορά τυχαίας μορφής 3D σωμάτων στο νερό. Με την χρήση των εκτενών αυτών μεθοδολογιών λαμβάνονται απ' ευθείας υπόψη οι ενδεχόμενες υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κατασκευαστικών στοιχείων της πλωτής ημιβυθισμένης κατασκευής.

Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται στην υποδιαίρεσή τους στα επί μέρους κατασκευαστικά στοιχεία, ή ομάδες στοιχείων, από τα οποία απαρτίζονται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των οποίων (δυνάμεις διέγερσης, υδροδυναμικοί συντελεστές, κινήσεις) είναι γνωστά ή μπορούν να υπολογισθούν. Τα ανωστικά σώματα υποδιαιρούνται είτε σ' ένα μεγάλο αριθμό απλών στοιχείων είτε θεωρούνται μεμονωμένα σαν ομάδες στοιχείων. Εφ' όσον τα κατασκευαστικά στοιχεία είναι μικρών διαστάσεων σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του κύματος, τότε οι δυνάμεις διέγερσης υπολογίζονται κατά κανόνα με τη βοήθεια του τύπου του Morison [7]. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η υδροδυναμική απόσβεση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, θα πρέπει όμως να ληφθεί υπ' όψη η απόσβεση λόγω συνεκτικής ροής που έχει ιδιαίτερη σημασία στην περιοχή του συντονισμού. Η απόσβεση αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό στο πεδίο των συχνοτήτων με τη βοήθεια της ισοδύναμης γραμμικοποίησής της. Εφ' όσον τα επί μέρους κατασκευαστικά στοιχεία δεν μπορούν να θεωρηθούν ως υδροδυναμικά «λεπτά» σώματα, θα πρέπει να υπολογισθούν με τη βοήθεια της θεωρίας δυναμικού. Σε πρώτη προσέγγιση η υδροδυναμική αλληλεπίδραση των στοιχείων αυτών θεωρείται αμελητέα. Σε μερικές βέβαια περιπτώσεις θα πρέπει αναγκαστικά να ληφθεί υπ' όψη (φαινόμενο εστιασμού των κυμάτων).

Οι γραμμικές εξισώσεις κίνησης μιας πλωτής ημιβυθισμένης πλατφόρμας, που έχει υποδιαιρεθεί σε επί μέρους κατασκευαστικά στοιχεία, ως προς αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων είναι:

$$\sum_{j=1}^{6}\left\{\sum_{n=1}^{N}\left(m_{kj}^{(n)} + a_{kj}^{(n)}\right)\ddot{x}_j + \sum_{n=1}^{N} b_{kj}^{(n)}\dot{x}_j + \sum_{n=1}^{N} c_{kj}^{(n)} x_j\right\} = \sum_{n=1}^{N} F_{k,\delta\iota\varepsilon\gamma}^{(n)}(t) \tag{2.4.12}$$

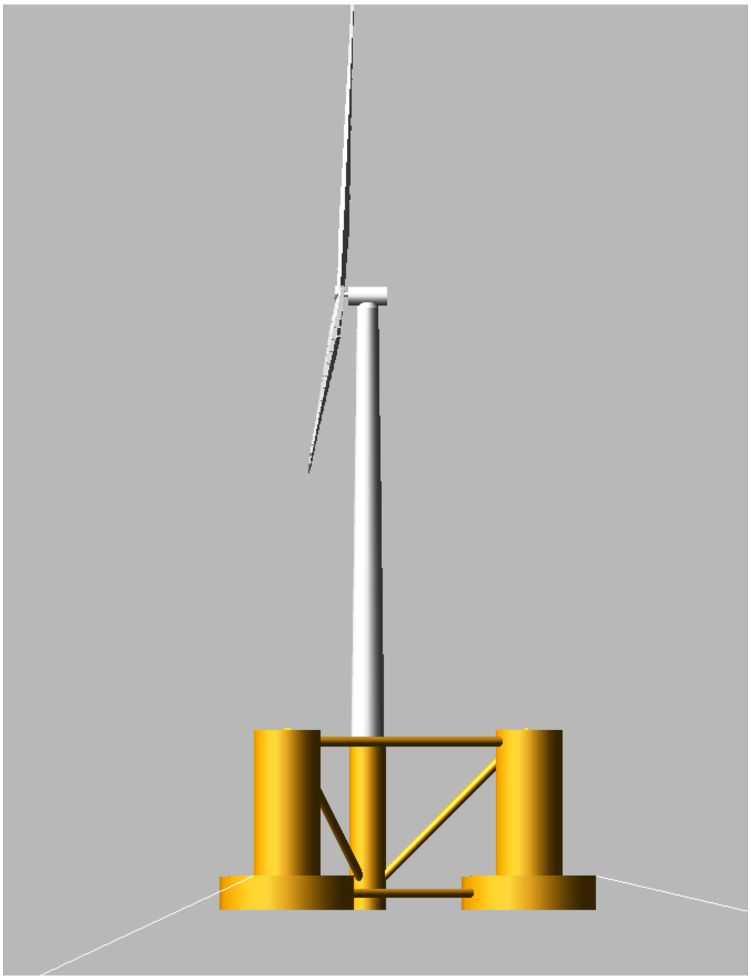
όπου ο εκθέτης (n) υποδηλώνει μεγέθη που αναφέρονται στο n-στό στοιχείο ή αντίστοιχα ομάδα στοιχείων.

Για τη μείωση της καθ' ύψος κίνησης των ημιβυθισμένων εξεδρών προτάθηκαν πολλές μέθοδοι που μπορούν να εξηγηθούν εξετάζοντας, όπως τονίσθηκε στην αρχή της παραγράφου, τη δυναμική συμπεριφορά για παράδειγμα σύνθετων κυλινδρικών στοιχείων. Σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές προτείνεται μετάθεση όσον το δυνατόν μεγαλύτερου ανωστικού όγκου σε μεγαλύτερα βάθη όπου η δράση των κυμάτων είναι μικρότερη, μείωση της ιδιοσυχνότητας στην καθ' ύψος κίνηση κάτω από την περιοχή συχνοτήτων των θαλάσσιων κυματισμών στον τόπο εγκατάστασης, διαμόρφωσης της συχνότητας μηδενισμού της δύναμης διέγερσης με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτει είτε με την ιδιοσυχνότητα της καθ' ύψος κίνησης είτε με τη συχνότητα μέγιστης ενέργειας των κυματισμών, και μεγιστοποίηση τέλος των δυνάμεων απόσβεσης λόγω συνεκτικότητας. Φυσικά είναι αδύνατον να σχεδιαστεί μια κατασκευή που να εμφανίζει ταυτόχρονα βέλτιστη συμπεριφορά ως προς όλα αυτά τα κριτήρια. Γίνεται προσπάθεια κάθε φορά να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερες από τις απαιτήσεις αυτές.

3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΛΩΤΟΥ ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OC4

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Φάση ΙΙ του OC4 (Offshore Code Comparison Collaboration Continuation) περιλαμβάνει την μοντελοποίηση ενός πλωτού ημι-βυθισμένου αιολικού συστήματος, όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικ. 3.1. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι προδιαγραφές του πλωτού συστήματος, οι οποίες είναι απαραίτητες για την οικοδόμηση αερο-υδρο-σερβο-ελαστικών μοντέλων [56].



Εικόνα 3.1 Διάταξη του πλωτού αιολικού συστήματος DeepCwind [56].

Το OC4 αποτελεί συνέχεια του project OC3 (Offshore Code Comparison Colaboration), η οποία εξέτασε τέσσερα διαφορετικά σταθερά και πλωτά υπεράκτια αιολικά συστήματα. Το πλωτό σύστημα που αναλύθηκε για το OC3 ήταν το σύστημα OC3-Hywind, ανεμογεννήτρια σε spar platform. Για το OC4, θα χρησιμοποιηθεί ένα σχέδιο ημιβυθισμένης κατασκευής (semisubmersible) που αναπτύχθηκε για το project DeepCwind. Το DeepCwind είναι ένα Αμερικάνικο project με στόχο την παραγωγή δεδομένων, σε πεδίο δοκιμών, για την επικύρωση εργαλείων μοντελοποίησης υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών. Στην πρώτη φάση του project αυτού, τρεις διαφορετικές διατάξεις πλωτής ανεμογεννήτριας δοκιμάστηκαν σε μια δεξαμενή υπό συνδυασμό φορτίσεων ανέμου/κύματος σε κλίμακα 1/ 50 [56]. Οι τρεις διατάξεις που δοκιμάστηκαν, θεωρείται ότι καλύπτουν το πεδίο σχεδιασμού των πλωτών ανεμογεννητριών και περιελάμβαναν μια spar πλατφόρμα παρόμοια με την OC3-Hywind, μια tension-leg πλατφόρμα και μια ημιβυθισμένη πλατφόρμα. Η ανάλυση της DeepCwind ημιβυθισμένης πλατφόρμας στο OC4 project (σε πλήρη κλίμακα) δίνει την ευκαιρία για περαιτέρω μελέτη, που σχετίζεται με την επαλήθευση της δυναμικής προσομοίωσης του συστήματος σε σύγκριση με τα δεδομένα της δεξαμενής. Η παρούσα εστίαση του OC4, ωστόσο, είναι η επαλήθευση των εργαλείων μοντελοποίησης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοιωμένης απόκρισης του συστήματος μεταξύ αυτών των εργαλείων.

Η ημιβυθισμένη υποκατασκευή που εξετάζεται στην παρούσα φάση βασίζεται στη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις DeepCwind δοκιμές. Ωστόσο, δε θα χρησιμοποιηθούν ο εν προκειμένω πύργος και η γεννήτρια από τις δοκιμές αυτές. Αντ' αυτού, η γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί για το OC4 Phase II θα είναι η υπεράκτια ανεμογεννήτρια ισχύος 5-MW του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΕΑΠΕ (National Renewable Energy Laboratory, NREL) [54], η οποία είναι μια αντιπροσωπευτική utility-scale, πολλών MW γεννήτρια. Αυτή η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε στο project OC3 και χρησιμοποιείται ομοίως σε όλες τις φάσεις του OC4.

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΥΡΓΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο πύργος που θα χρησιμοποιηθεί για την OC4 DeepCwind ημιβυθισμένη πλατφόρμα θα είναι σχεδόν ταυτόσημος με τον πύργο της OC3 Hywind spar πλατφόρμας. Η μόνη διαφορά θα είναι τα σχήματα λειτουργίας (mode shapes) του πύργου, τα οποία χρησιμοποιούνται από ορισμένα εργαλεία για να αναπαράγουν την ευκαμψία του πύργου. Τα σχήματα λειτουργίας διαφέρουν λόγω αλλαγών στις οριακές συνθήκες στην υποστήριξη του πύργου που προκύπτουν από τις αλλαγές στην πλατφόρμα στήριξης και στις αγκυρώσεις. Οι πληροφορίες που συνοψίζονται εδώ είναι οι γενικές ιδιότητες του πύργου, και είναι ταυτόσημες με τις πληροφορίες που παρέχονται στο κείμενο για τον ορισμό του πλωτού συστήματος του OC3 [55].

Η βάση του πύργου συμπίπτει με την κορυφή του βασικού πυλώνα (main column) της πλατφόρμας στήριξης και βρίσκεται σε ύψος 10 μέτρα πάνω από την Ελεύθερη Επιφάνεια (Still Water Level, SWL). Η κορυφή του πύργου συμπίπτει με το έδρανο περιστροφής ή εκτροπής (yaw bearing) και βρίσκεται σε υψόμετρο 87,6 m πάνω από την ΕΕ (SWL). Αυτός ο πύργος και η αντίστοιχη ανύψωση 90 μέτρων της πλήμνης (hub) του άξονά του πάνω από την επιφάνεια συνάδει με τη χερσαία έκδοση της ανεμογεννήτριας 5-MW του ΕΑΠΕ (NREL), όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφική αναφορά [54]. Αυτές οι ιδιότητες είναι όλες σε σχέση με την αμετάβλητη (undisplaced) θέση της πλατφόρμας.

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει διάμετρο βάσης 6,5 m, όση είναι και η διάμετρος του βασικού πυλώνα της πλατφόρμας (βλέπε ενότητα 3.3), ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, όπως το πάχος στη βάση (0,027 m), η διάμετρος (3,87 m) και το πάχος (0,019 m) στην κορυφή, και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα του πύργου, ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη DOWEC (όπως αναφέρεται στον πίνακα 9 στη σελίδα 31 του Jonkman 2010 [55]) . Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε ίσο με 210 GPa, το μέτρο διάτμησης λήφθηκε ίσο με 80,8 GPa και η πυκνότητα του χάλυβα ίση με 8500 kg/m^3. Η πυκνότητα των 8500 kg/m^3 προορίστηκε να είναι αυξημένη σε σχέση με την τυπική τιμή του χάλυβα των 7850 kg/m^3 για να ληφθούν υπόψη το χρώμα, οι κοχλίες, οι συγκολλήσεις και οι φλάντζες που δεν περιλαμβάνονται στα στοιχεία του πάχους του πύργου. Η ακτίνα και το πάχος του πύργου θεωρούνται ότι μειώνονται γραμμικά από τη βάση του πύργου προς κορυφή, σχηματίζοντας μια κωνική μορφή. Ο πίνακας 3.1 δίνει τις προκύπτουσες ιδιότητες του πύργου.

Πίνακας 3.1 Κατανεμημένες ιδιότητες του πύργου.

Elevation (m)	HtFraction (-)	TMassDen (kg/m)	TwFAStif ($N\cdot m^2$)	TwSSStif ($N\cdot m^2$)	TwGJStif ($N\cdot m^2$)	TwEAStif (N)	TwFAIner (kg·m)	TwSSIner (kg·m)	TwFAcgOf (m)	TwSScgOf (m)
10.00	0.00000	4667.00	603.903E+9	603.903E+9	464.718E+9	115.302E+9	24443.7	24443.7	0.0	0.0
17.76	0.10000	4345.28	517.644E+9	517.644E+9	398.339E+9	107.354E+9	20952.2	20952.2	0.0	0.0
25.52	0.20000	4034.76	440.925E+9	440.925E+9	339.303E+9	99.682E+9	17847.0	17847.0	0.0	0.0
33.28	0.30000	3735.44	373.022E+9	373.022E+9	287.049E+9	92.287E+9	15098.5	15098.5	0.0	0.0
41.04	0.40000	3447.32	313.236E+9	313.236E+9	241.043E+9	85.169E+9	12678.6	12678.6	0.0	0.0
48.80	0.50000	3170.40	260.897E+9	260.897E+9	200.767E+9	78.328E+9	10560.1	10560.1	0.0	0.0
56.56	0.60000	2904.69	215.365E+9	215.365E+9	165.729E+9	71.763E+9	8717.2	8717.2	0.0	0.0
64.32	0.70000	2650.18	176.028E+9	176.028E+9	135.458E+9	65.475E+9	7124.9	7124.9	0.0	0.0
72.08	0.80000	2406.88	142.301E+9	142.301E+9	109.504E+9	59.464E+9	5759.8	5759.8	0.0	0.0
79.84	0.90000	2174.77	113.630E+9	113.630E+9	87.441E+9	53.730E+9	4599.3	4599.3	0.0	0.0
87.60	1.00000	1953.87	89.488E+9	89.488E+9	68.863E+9	48.272E+9	3622.1	3622.1	0.0	0.0

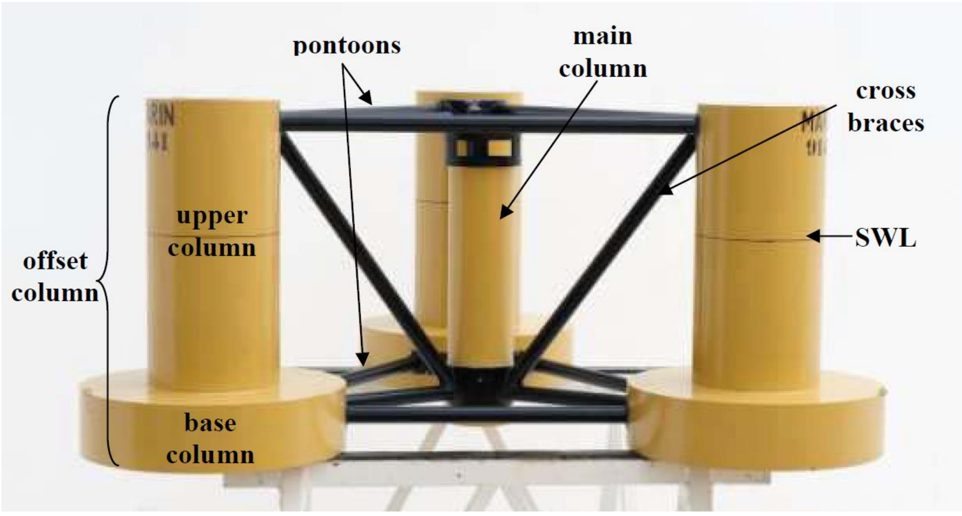
Τα δεδομένα στην πρώτη στήλη (Elevation), είναι οι κατακόρυφες θέσεις κατά μήκος του άξονα (centerline) του πύργου σε σχέση με την ΕΕ. "HtFraction" είναι το κλασματικό ύψος κατά μήκος του άξονα του πύργου από τη βάση του (0.0) μέχρι την κορυφή του (1.0). Οι υπόλοιπες στήλες είναι παρόμοιες με εκείνες που περιγράφουν τις ιδιότητες των πτερυγίων όπως παρουσιάζονται στην αναφορά [54].

Η προκύπτουσα συνολική μάζα του πύργου είναι 249,718 kg και θεωρείται συγκεντρωμένη (δηλαδή το κέντρο μάζας CM του πύργου, βρίσκεται) στα 43,4 m κατά μήκος του κεντρικού άξονα του πύργου πάνω από την ΕΕ. Αυτό προέρχεται από το ότι το συνολικό μήκος του πύργου είναι 77,6 m. Ο κατασκευαστικός λόγος απόσβεσης (structural-damping ratio) ορίστηκε 1% του κρίσιμου για κάθε είδος ταλάντωσης του απομονωμένου πύργου (πρόβολος επάνω σε άκαμπτη βάση χωρίς την παρουσία της μάζας του συγκροτήματος του ρότορα και της κατασκευής στέγασής του, rotor-nacelle assembly), ο οποίος αντιστοιχεί στις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη DOWEC (από τη σελίδα 21 της αναφοράς του Jonkman 2010 [55]). Ο πίνακας 3.2 συνοψίζει τις ιδιότητες του πύργου που συζητήθηκαν σε αυτήν την ενότητα.

Πίνακας 3.2 Μη κατανεμημένες ιδιότητες του πύργου.

Elevation to Tower Base (Platform Top) Above SWL	10 m
Elevation to Tower Top (Yaw Bearing) Above SWL	87.6 m
Overall (Integrated) Tower Mass	249.718 kg
CM Location of Tower Above SWL Along Tower Centerline	43.4 m
Tower Structural-Damping Ratio (All Modes)	1%

3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ



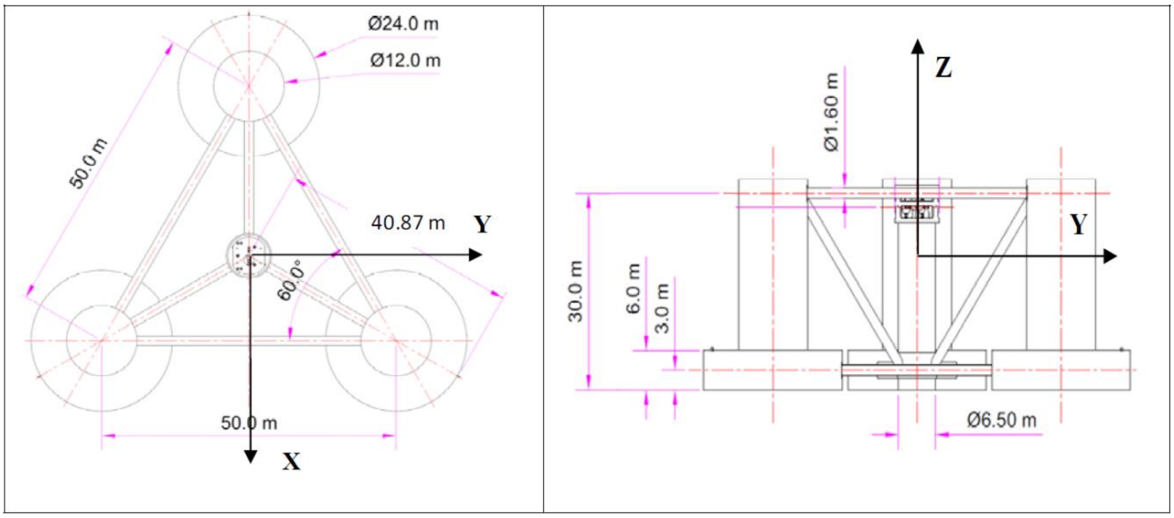
Εικόνα 3.2 Μοντέλο της ημιβυθισμένης DeepCwind πλατφόρμας για δοκιμές σε κλίμακα 1/50 [56].

3.3.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Ο πύργος είναι πακτωμένος σε ύψος 10 m πάνω από την ΕΕ (SWL), στην κορυφή του βασικού πυλώνα της πλωτής πλατφόρμας. Το βύθισμα (draft) της πλατφόρμας είναι 20 m. Μεταξύ του άνω και του κάτω μέρους της πλατφόρμας, η ημιβυθισμένη OC4 DeepCwind πλατφόρμα αποτελείται από έναν βασικό πυλώνα που συνδέεται με τον πύργο, και τρεις αντισταθμιστικούς εξωτερικούς πυλώνες (offset columns) που συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τον κύριο πυλώνα μέσω μιας σειράς στηρικτικών βραχιόνων (μπρακέτων), οριζόντιων (pontoons) και διαγώνιων (cross members) μικρότερης διαμέτρου. Υπάρχουν πέντε ομάδες από τα μικρότερα αυτά στοιχεία (σημειώνονται με μαύρο χρώμα στην Εικ. 3.2):

- Δύο ομάδες των τριών βραχιόνων-μπρακέτων (έξι στο σύνολο) που συνδέουν τους αντισταθμιστικούς εξωτερικούς πυλώνες μεταξύ τους (σχηματίζοντας ένα τρίγωνο, τόσο στο επάνω όσο και στο κάτω μέρος της πλατφόρμας)
- Δύο ομάδες των τριών βραχιόνων-μπρακέτων (έξι στο σύνολο) που συνδέουν τους αντισταθμιστικούς εξωτερικούς πυλώνες με τον βασικό πυλώνα (σχηματίζοντας μια διάταξη Y, τόσο στο επάνω όσο και στο κάτω μέρος της πλατφόρμας)
- Τρεις διαγώνιους βραχίονες-μπρακέτα που συνδέουν το κάτω μέρος του βασικού πυλώνα με την κορυφή των εξωτερικών πυλώνων.

Κάθε πυλώνας ξεκινά πάνω από την ΕΕ (SWL) και συνεχίζει μέχρι και κάτω από το νερό. Στη βάση των τριών εξωτερικών πυλώνων υπάρχει ένας κύλινδρος μεγαλύτερης διαμέτρου (base column), το οποίο βοηθά στην καταστολή (περιορισμό) της κίνησης (κυρίως στην κατακόρυφη κατεύθυνση, heave, αλλά και στις x-,y-κατευθύνσεις και στις αντίστοιχες περιστροφές ως προς αυτούς τους άξονες, surge, sway, roll, pitch αντίστοιχα). Μια περίληψη της γεωμετρίας, συμπεριλαμβανομένων των διαμέτρων καθενός από τα διάφορα μέλη παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3 και στον Πίνακα 3.4. Αυτές οι ιδιότητες είναι όλες σε σχέση με την αμετάβλητη (undisplaced) θέση της πλατφόρμας.



Σχήμα 3.1 Κάτοψη (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά) της ημιβυθισμένης πλατφόρμας DeepCwind [56].

Πίνακας 3.3 Γεωμετρία της πλωτής πλατφόρμας.

Depth of platform base below SWL (total draft)	20 m
Elevation of main column (tower base) above SWL	10 m
Elevation of offset columns above SWL	12 m
Spacing between columns	50 m
Height of upper columns	26 m
Height of base columns	6 m
Depth to top of base columns	24 m
Diameter of main column	6.5 m
Diameter of offset (upper) columns	12 m
Diameter of base columns	24 m
Diameter of pontoons and cross braces	1.6 m

Πίνακας 3.4 Γεωμετρία βραχιόνων-μπρακέτων.

	Start location (x,y,z)	**End location (x,y,z)**
Cross brace 1	(-3.25 , 0 , -16.2)	(-22.87 , 0 , 9.13)
Cross brace 2	(1.625 , -2.815 , -16.2)	(11.44 , -19.81 , 9.13)
Cross brace 3	(1.625 , 2.815 , -16.2)	(11.44 , 19.81 , 9.13)

Η μάζα, συμπεριλαμβανομένου του έρματος, της πλωτής πλατφόρμας είναι 1.3473E+7 kg. Η μάζα αυτή υπολογίστηκε έτσι ώστε το συνδυασμένο βάρος του συγκροτήματος ρότορα-ατράκτου, του πύργου και της πλατφόρμας, συν το βάρος του συστήματος πρόσδεσης (μη συμπεριλαμβανομένου του μικρού τμήματος που κείτεται στον πυθμένα) στο νερό, να ισορροπεί με την άνωση (δηλαδή το βάρος του εκτοπιζόμενου νερού) της πλατφόρμας στη θέση ισορροπίας. Το κέντρο μάζας, CM, της πλωτής πλατφόρμας, συμπεριλαμβανομένου του έρματος, βρίσκεται στα 13,46 m κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας της πλατφόρμας κάτω από την ΕΕ (SWL). Η τιμή αυτή καθορίστηκε έτσι, ώστε το συνολικό κέντρο μάζας του συστήματος να είναι ίσο με εκείνο του μοντέλου υπό κλίμακα του συστήματος DeepCwind. Η ροπή αδρανείας της πλατφόρμας ως προς τον x (roll inertia) και τον y (pitch inertia) άξονα είναι 6.772E+9 kg-m^2 και 6.772E+9 kg-m^2 αντίστοιχα, ενώ η ροπή αδρανείας της πλατφόρμας ως προς τον κατακόρυφο άξονά της (yaw inertia) είναι 1.188E+10 kg-m^2. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις ιδιότητες της πλατφόρμας που συζητήθηκαν σε αυτήν την ενότητα.

Πίνακας 3.5 Κατασκευαστικές ιδιότητες της πλατφόρμας.

Platform mass, including ballast	1.3473E+7 kg
CM location below SWL	13.46 m
Platform roll inertia about CM	6.772E+9 kg-m^2
Platform pitch inertia about CM	6.772E+9 kg-m^2
Platform yaw inertia about CM	1.188E+10 kg-m^2

3.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΥΚΑΜΨΙΑΣ

Οι ιδιότητες ευκαμψίας της OC4 DeepCwind ημιβυθισμένης πλατφόρμας προήλθαν από τους συγγραφείς για να επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο σύνολο τιμών για τη μάζα του μεταλλικού μέρους του συστήματος και του έρματος. Η συνολική μάζα της μεταλλικής δομής είναι 3.853E+6 kg, και η συνολική μάζα του νερού είναι 9.620E+6 kg. Για να ταιριάζουν αυτές οι προσδιορισμένες τιμές, χρησιμοποιήθηκε χάλυβας (πυκνότητας 7850 kg/m^3) για όλα τα μέρη του συστήματος με πάχος τοιχώματος, όπως ορίζεται στον πίνακα 3.6.

Η κατασκευή γεμίζεται με έρμα στους εξωτερικούς πυλώνες αντιστάθμισης. Οι τρεις άνω πυλώνες εφοδιάζονται με νερό από τη βάση μέχρι και 2,96 m κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια και οι πυλώνες βάσης τροφοδοτούνται με νερό από το βύθισμα μέχρι και 4,2902 m πάνω από το βύθισμα. Οι πυλώνες βάσης δεν είναι εντελώς γεμάτοι, προκειμένου να επιτευχθεί κέντρο μάζας της πλατφόρμας, CM, που να ταιριάζει με εκείνο του μοντέλου του DeepCwind συστήματος. Το έρμα εμφανίζεται στον ορισμό της μάζας ανά μονάδα μήκους για κάθε πυλώνα, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.6. Ως εκ τούτου, υπάρχει διαφορά στη μάζα ανά μονάδα μήκους μεταξύ των διάφορων τμημάτων-τομών (sections) των εξωτερικών πυλώνων με και χωρίς νερό μέσα.

Πίνακας 3.6 Ιδιότητες των διάφορων στοιχείων.

	Outer Diameter (m)	Thickness (m)	Bending Stiffness (N*m2)	Mass per unit length (kg/m)
Main column	6.5	0.03	6.701E+13	4.786E+03
Offset (upper) column	12.0	0.06	8.423E+14	1.767E+04
Offset (upper) column, water filled	12.0	0.06	8.423E+14	1.071E+05
Base column	24.0	0.06	6.789E+15	3.542E+04
Base column, water filled	24.0	0.06	6.789E+15	2.263E+05
Pontoons	1.6	0.0175	5.720E+11	6.830E+02
Cross members	1.6	0.0175	5.720E+11	6.830E+02
Base column cap	-	0.06	-	-
Offset column cap	-	0.06	-	-
Main column cap	-	0.03	-	-

3.3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Στις ενότητες που παραμένουν, αρκετές από τις προδιαγραφές της πλατφόρμας αναφέρονται ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς και στους βαθμούς ελευθερίας (degrees-of-freedom, DOFs) της πλατφόρμας. Σε αυτά τα τμήματα, τα X, Y, Z αντιπροσωπεύουν το σύνολο των ορθογωνίων αξόνων αυτού του συστήματος αναφοράς, με το XY-επίπεδο να εκτείνεται στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας (SWL) και τον Z-άξονα να έχει κατεύθυνση προς τα πάνω (αντίθετα της βαρύτητας) κατά μήκος του κατακόρυφου κεντρικού άξονα (centerline) της ακίνητης πλατφόρμας. Η διεύθυνση των αξόνων X και Y σε σχέση με κατασκευή φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Οι βαθμοί ελευθερίας (DOFs) της πλατφόρμας περιλαμβάνουν μεταφορική κίνηση σε κάθε άξονα (surge, sway, heave), καθώς και περιστροφή ως προς κάθε άξονα (roll, pitch, yaw). Θετική μεταφορική κίνηση ορίζεται κατά μήκος των θετικών τιμών των αξόνων X, Y, Z. Θετική περιστροφή γύρω από τον X-άξονα ορίζεται για τις θετικές τιμές του X-άξονα, θετική περιστροφή γύρω από τον Y-άξονα ορίζεται για τις θετικές τιμές του Y-άξονα και θετική περιστροφή γύρω από τον Z-άξονα ορίζεται για τις θετικές τιμές του Z-άξονα.

3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Η OC4 DeepCwind ημιβυθισμένη πλατφόρμα, προκειμένου να προστατευτεί, αγκυρώνεται με τρεις αλυσοειδείς γραμμές τοποθετημένες συμμετρικά γύρω από τον Z-άξονα. Η διάταξη του συστήματος αγκύρωσης φαίνεται στο σχήμα 3.2. Οι ιδιότητες των γραμμών αγκύρωσης φαίνονται στον πίνακα 3.7.

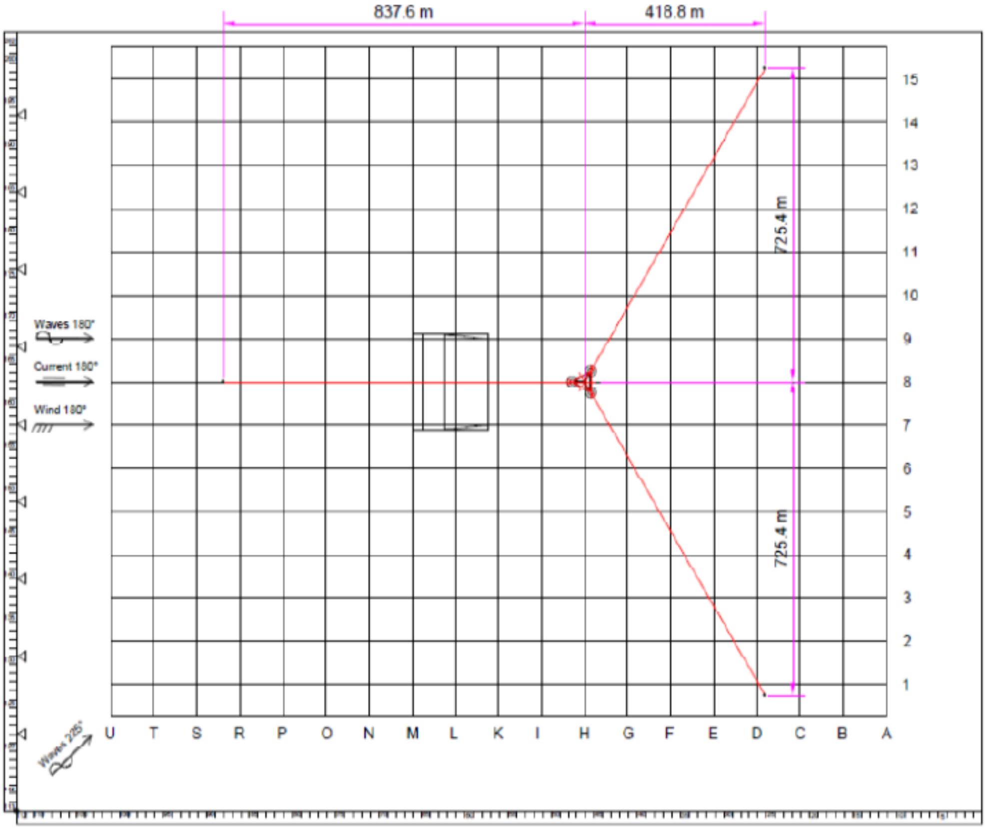
Οι κορυφές των γραμμών αγκύρωσης είναι προσδεδεμένες σε σταθερά σημεία της πλατφόρμας, που βρίσκονται στην κορυφή των στηλών βάσης, σε βάθος 14,0 m κάτω από την ΕΕ (SWL) και σε μια ακτίνα 40.868 μ από την κεντρική πλατφόρμα. Οι άγκυρες βρίσκονται σε βάθος νερού 200 m κάτω από την ΕΕ (SWL) και σε μια ακτίνα 837,6 m από τον κεντρικό άξονα της πλατφόρμας. Μία από τις γραμμές κατευθύνεται κατά μήκος του αρνητικού άξονα X (στο XZ-επίπεδο). Οι δύο υπόλοιπες γραμμές κατανέμονται ομοιόμορφα γύρω από την πλατφόρμα, έτσι ώστε κάθε γραμμή να είναι 120^{o} μακριά, όταν κοιτάμε από πάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Αυτές οι ιδιότητες είναι σε σχέση με την αδιατάρακτη θέση της πλατφόρμας. Κάθε μία από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης έχει ένα μήκος σχοινιού, χωρίς προένταση, 835,5 m, διάμετρο 0,0766 m, ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα μήκους του 113,35 kg / m, ισοδύναμη φαινομενική μάζα υγρού ανά μονάδα μήκους 108,63 kg / m, και μια ισοδύναμη ακαμψία σε έκταση 753,6 MN. Ο πίνακας 3.7 συνοψίζει αυτές τις ιδιότητες.

Πίνακας 3.7 Ιδιότητες Συστήματος Αγκύρωσης.

Αριθμός γραμμών αγκύρωσης	3
Γωνία μεταξύ γειτονικών Γραμμών	120^{o}
Βάθος μέχρι τις άγκυρες κάτω από την ΕΕ (Βάθος νερού)	200 m
Βάθος μέχρι το σημείο πρόσδεσης με την πλατφόρμα κάτω από την ΕΕ	14 m
Ακτίνα από τον κεντρικό άξονα της πλατφόρμας μέχρι τις άγκυρες.	837.6 m
Ακτίνα από τον κεντρικό άξονα της πλατφόρμας μέχρι τα σημεία πρόσδεσης	40.868 m
Μήκος γραμμής αγκύρωσης χωρίς προένταση	835.5 m
Διάμετρος γραμμών αγκύρωσης	0.0766 m
Ισοδύναμη πυκνότητα της γραμμής αγκύρωσης	113.35 kg/m
Ισοδύναμη πυκνότητα στο νερό	108.63 kg/m
Ισοδύναμη ακαμψία σε έκταση	7.536E+8 N

Το συνολικό φορτίο στην πλατφόρμα στήριξης της ανεμογεννήτριας από τη συνεισφορά όλων των γραμμών αγκύρωσης θα είναι:

$$F_i^{Lines}(q) = F_i^{Lines,0} - C_{ij}^{Lines} q_j \tag{3.4.1}$$



Σχήμα 3.2 Διάταξη των Γραμμών Αγκύρωσης.

όπου $F_i^{Lines,0}$ είναι το i-οστό στοιχείο του συνολικού φορτίου που ασκείται στην πλατφόρμα από το σύστημα αγκύρωσης στη θέση ισορροπίας, C_{ij}^{Lines} είναι το (i,j) στοιχείο του πίνακα των συντελεστών επαναφοράς από όλες τις γραμμές αγκύρωσης και q_j είναι ο j βαθμός ελευθερίας της πλατφόρμας. Για αλυσσοειδείς γραμμές αγκύρωσης, η $F_i^{Lines,0}$ αντιπροσωπεύει την προένταση στα σημεία πρόσδεσης των γραμμών με την πλατφόρμα. C_{ij}^{Lines} είναι το συνδυαστικό αποτέλεσμα της ελαστικής ακαμψίας των γραμμών αγκύρωσης και της γεωμετρικής ακαμψίας που οφείλεται στο βάρος των γραμμών στο νερό. Για την εν προκειμένω κατασκευή, η δύναμη προέντασης και ο πίνακας των συντελεστών επαναφοράς έχουν ως εξής:

$$F_i^{Lines,0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.839\ kN \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$C_{ij}^{Lines} = \begin{bmatrix} 70{,}8\ kN/m & 0 & 0 & 0 & -108\ \ kN/rad & 0 \\ 0 & 70{,}8\ kN/m & 0 & 108\ kN/rad & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 19{,}1\ kN/m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 107\ kNm/m & 0 & 87{,}3e3\ kN/rad & 0 & 0 \\ -107\ kNm/m & 0 & 0 & 0 & 87{,}3e3\ kN/rad & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 117e3\ kN/rad \end{bmatrix}$$

4. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ “OC4”

Η εν προκειμένω διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συγκριτική ανάλυση της συζευγμένης υδροδυναμικής συμπεριφοράς μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, που αποτελείται από υποστηρικτική δομή πολλαπλών κυλίνδρων, χρησιμοποιώντας, στο πεδίο συχνοτήτων, και προσεγγιστική και ακριβή μεθοδολογία για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φορτίων. Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο κώδικες ανεπτυγμένοι και οι δύο εντός του εργαστηρίου «Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης» του τομέα των «Θαλάσσιων Κατασκευών». Στη συνέχεια γίνεται η περιγραφή των δύο προγραμμάτων και αποτυπώνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ “HAMVAB”

4.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη ανάλυση της κατασκευής ονομάζεται “HAMVAB” (Hydrodynamic Analysis of Multiple Vertical Axisymmetric Bodies) και αποτελεί κώδικα που έχει αναπτυχθεί εντός του εργαστηρίου «Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης» του τομέα των «Θαλάσσιων Κατασκευών». Το πρόγραμμα υπολογίζει τις πρωτοτάξιες δυνάμεις διέγερσης (exciting forces), τους υδροδυναμικούς συντελεστές (πρόσθετη μάζα και απόσβεση), τις κινήσεις (motions), καθώς και τις μέσες δευτεροτάξιες δυνάμεις (drift forces) λόγω κυματισμού που επιδρούν πάνω σε πολλαπλώς αλληλεπιδρώντα κατακόρυφα αξονοσυμμετρικά σώματα. Λαμβάνονται υπ’ όψη φαινόμενα υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης προς επίλυση των προβλημάτων περίθλασης (diffraction)/ακτινοβολίας (radiation). Τα επιμέρους τμήματα-σώματα της διάταξης επιτρέπεται να κινούνται είτε ανεξάρτητα είτε σαν ενιαία μονάδα.

Δυνάμεις επαναφοράς, λόγω του συστήματος αγκύρωσης, εισάγονται μέσω ελατηρίων, συνδεδεμένων στους κυλίνδρους και μπορούν να ενσωματωθούν στη διαδικασία επίλυσης προσομοιάζοντας την αγκύρωση της κατασκευής. Υπολογίζονται επίσης δυνάμεις έκπτωσης (Drift forces) είτε σε ολόκληρη την κατασκευή είτε σε κάθε μεμονωμένο τμήμα της χρησιμοποιώντας πεπερασμένους όγκους πέριξ κάθε τμήματος της διάταξης.

Υπολογίζονται φαινόμενα υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων συνδυάζοντας χαρακτηριστικά ενιαίου σώματος (single body) μέσω της φυσικής διαδικασίας της πολλαπλής σκέδασης (multiple scattering). Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του ενιαίου σώματος εκτιμώνται με τη χρήση συζευγμένων αναπτυγμάτων αξονοσυμμετρικών ιδιοσυναρτήσεων. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο το πεδίο ροής γύρω από το σώμα χωρίζεται σε δακτυλιοειδείς περιοχές, σε κάθε μία από τις οποίες το δυναμικό της ταχύτητας γράφεται σε όρους αναπτυγμάτων Fourier-Bessel αξονοσυμμετρικών ιδιοσυναρτήσεων. Οι άγνωστοι συντελεστές προσδιορίζονται κατά συνέπεια εφαρμόζοντας τις απαιτήσεις συνέχειας του δυναμικού και του πεδίου ταχυτήτων, όπως επίσης και τις οριακές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος.

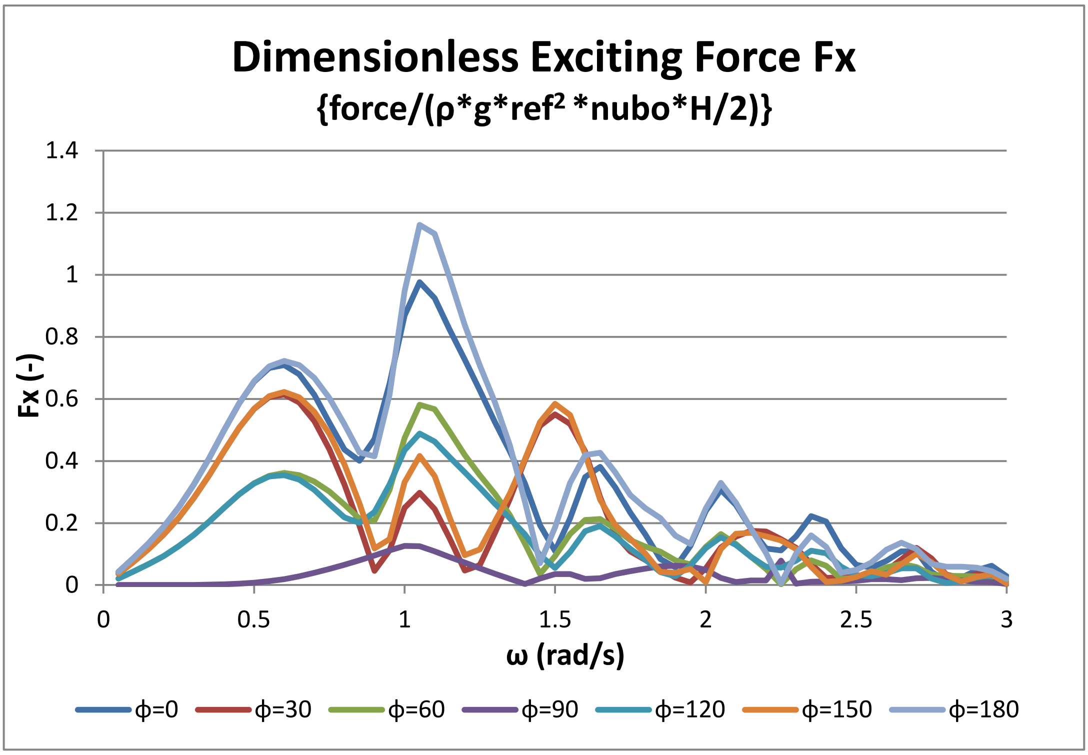
4.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΣΩ “HAMVAB”

Στο πρώτο μέρος της ανάλυσης, μελετάται η πλωτή κατασκευή χωρίς την ύπαρξη της Α/Γ, για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού (0^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o, 150^o και 180^o). Όλα τα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω είναι στο πεδίο συχνοτήτων και όλα τα μεγέθη αδιαστατοποιούνται κατάλληλα για καλύτερη παρουσίασή τους. Το βάθος εγκατάστασης είναι στα 200 m, ενώ τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την εκάστοτε αδιαστατοποίηση είναι τα εξής:

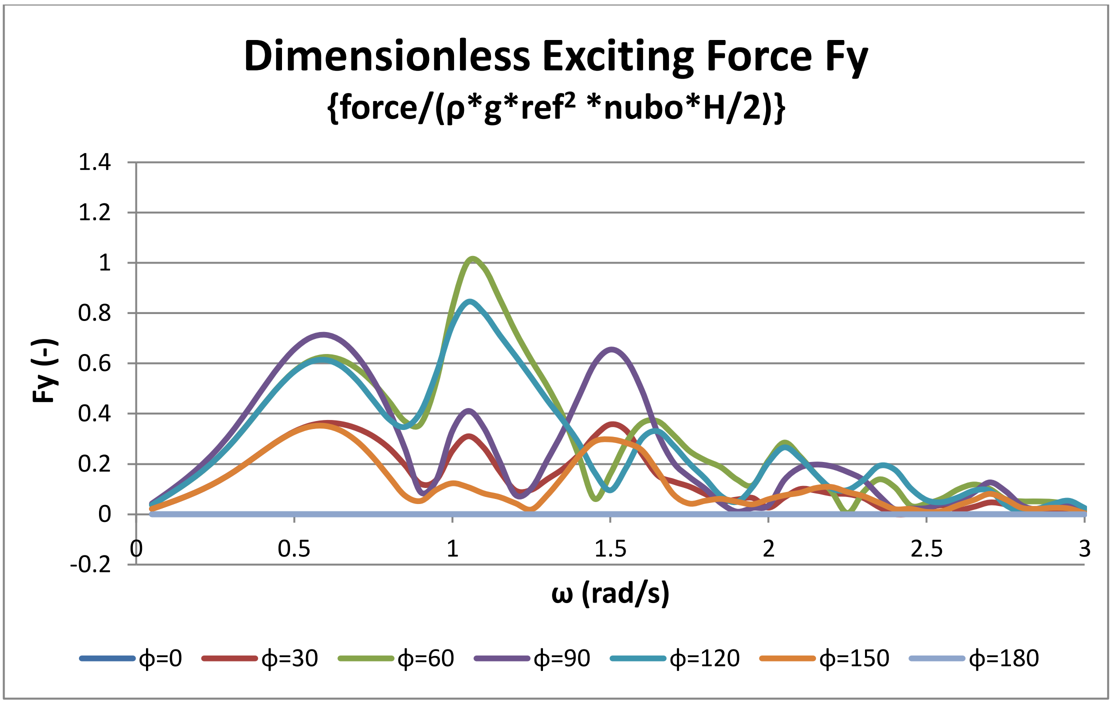
- πυκνότητα του νερού ρ=1.025 t/m^3
- επιτάχυνση της βαρύτητας g=9.81 m/s^2
- μέγιστη ακτίνα της κατασκευής ref=12 m
- αριθμός σωμάτων nubo=4
- ύψος κύματος H=2 m
- γωνιακή συχνότητα ω σε rad/s
- κυματαριθμός k σε m^{-1}

Στο παράρτημα Α παρατίθεται το αρχείο input που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα “HAMVAB”, για την ανάλυση της πλωτής κατασκευής χωρίς την ύπαρξη της Α/Γ.

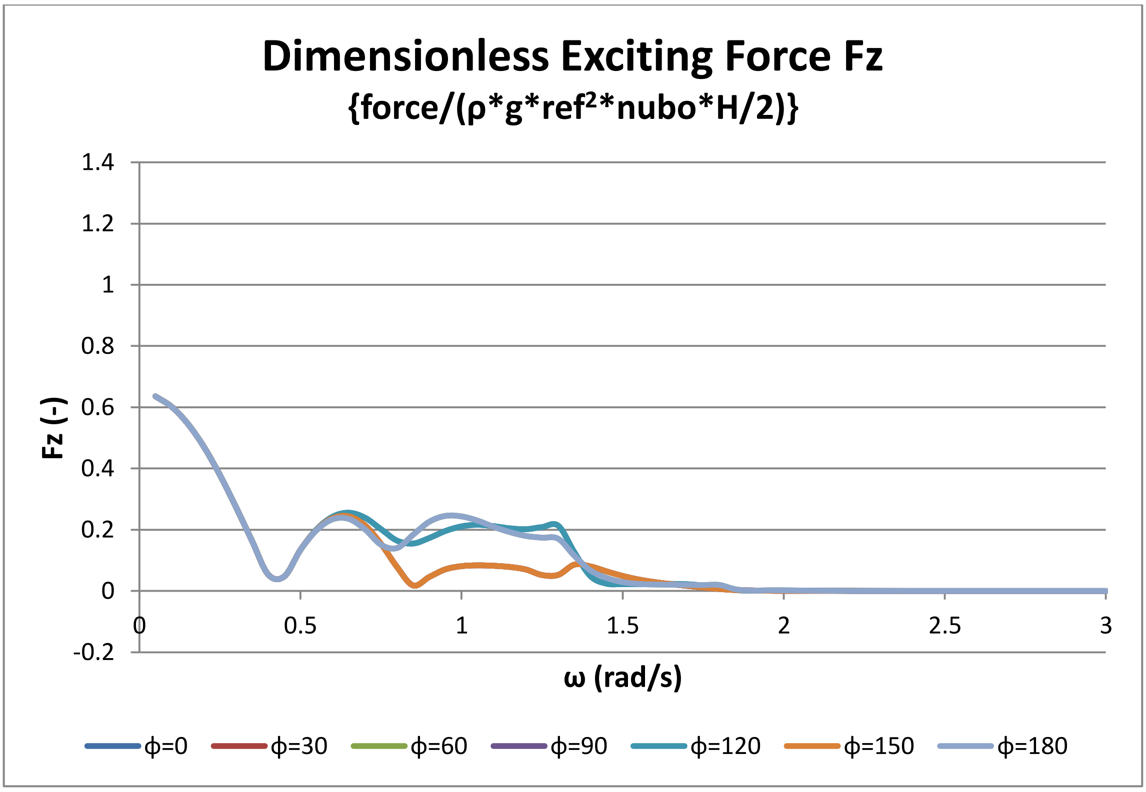
4.1.2.1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΚΑΙ ΡΟΠΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (EXCITING FORCES AND MOMENTS)



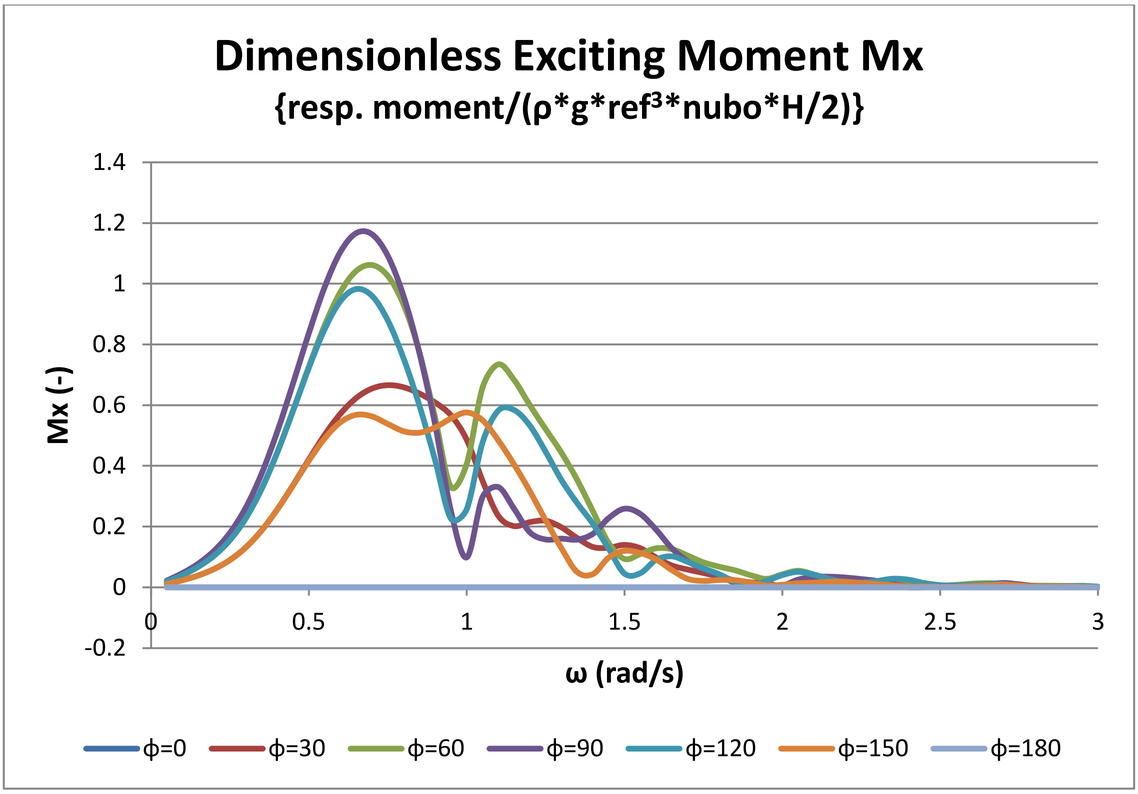
Σχήμα 4.1 Αδιαστατοποιημένη δύναμη διέγερσης στον άξονα x στο πεδίο συχνοτήτων.



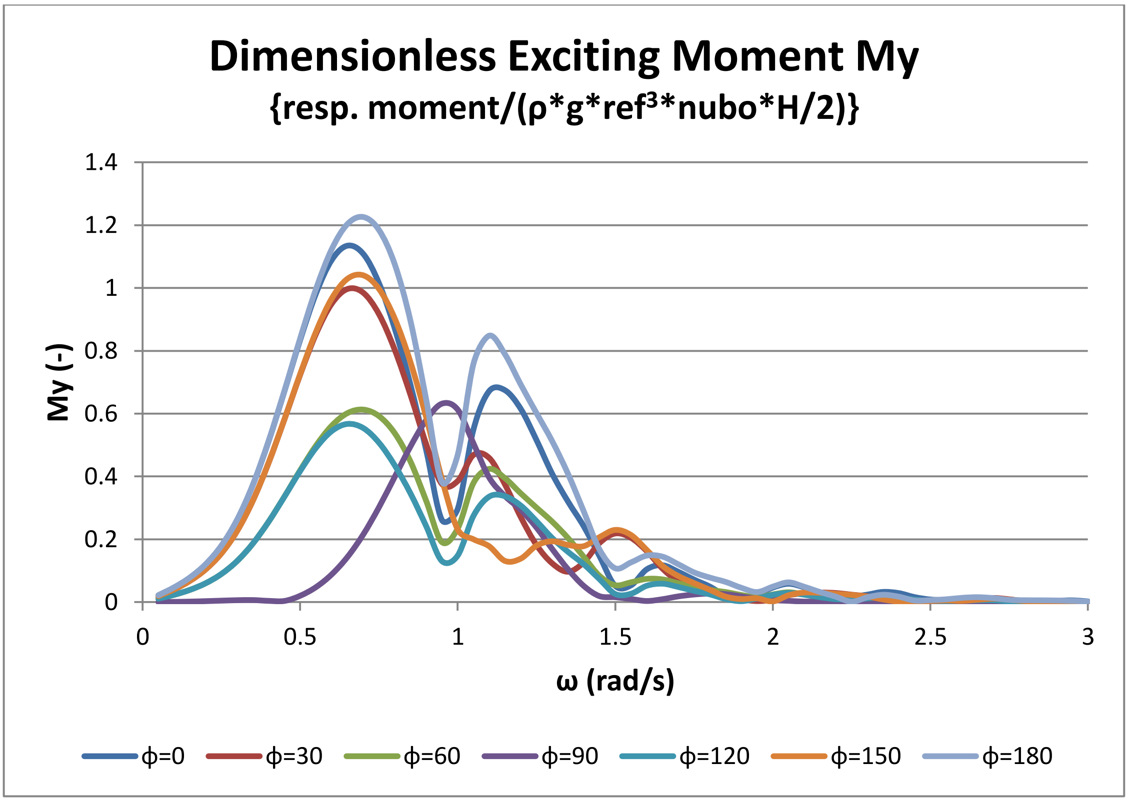
Σχήμα 4.2 Αδιαστατοποιημένη δύναμη διέγερσης στον άξονα y στο πεδίο συχνοτήτων.



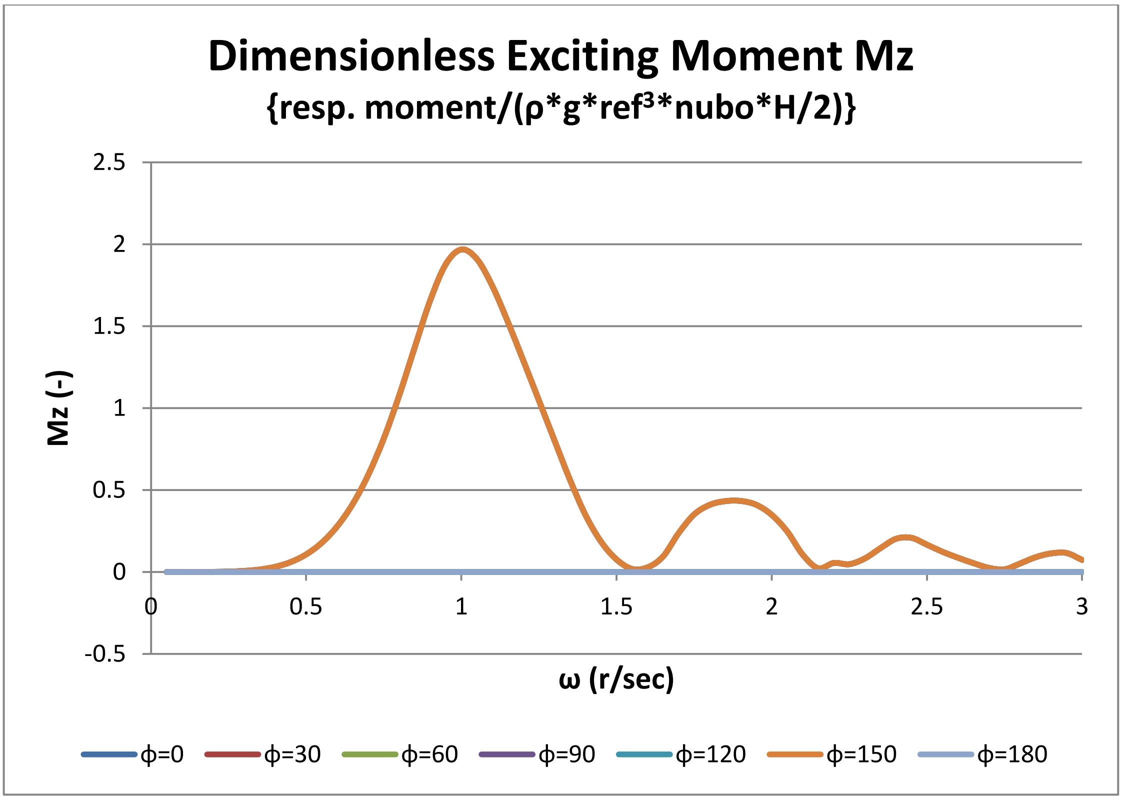
Σχήμα 4.3 Αδιαστατοποιημένη δύναμη διέγερσης στον άξονα z στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.4 Αδιαστατοποιημένη ροπή διέγερσης ως προς τον άξονα x στο πεδίο συχνοτήτων.

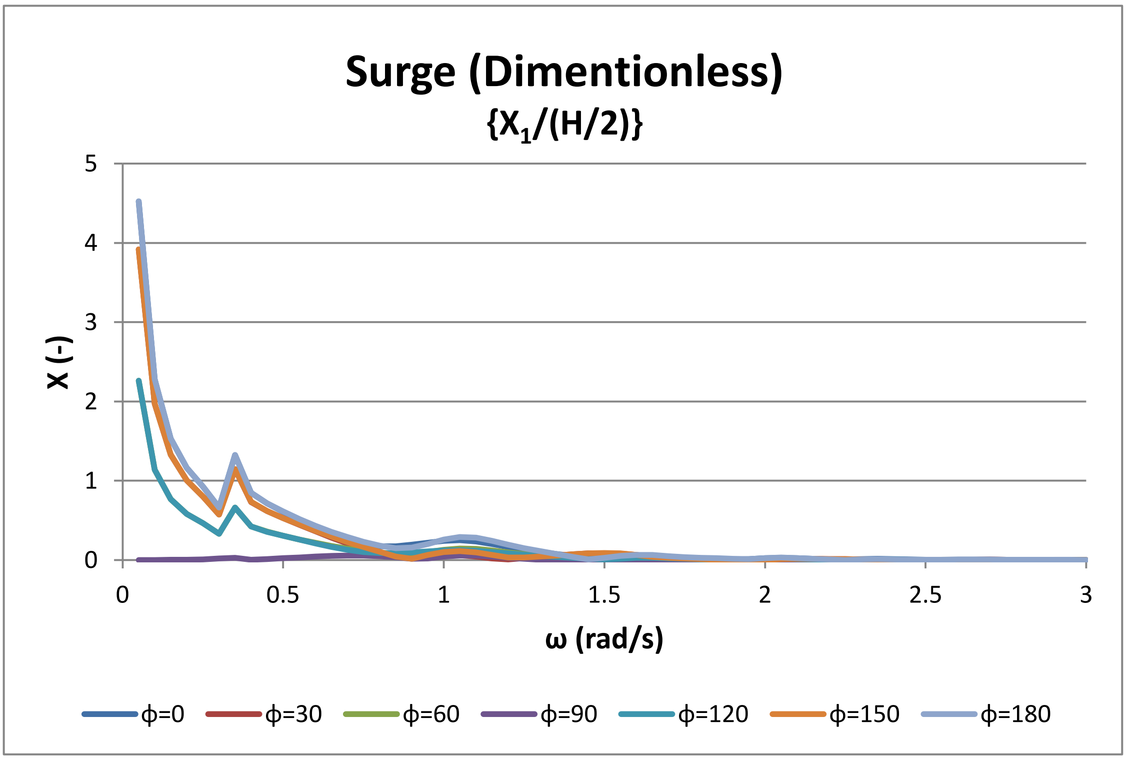


Σχήμα 4.5 Αδιαστατοποιημένη ροπή διέγερσης ως προς τον άξονα y στο πεδίο συχνοτήτων.

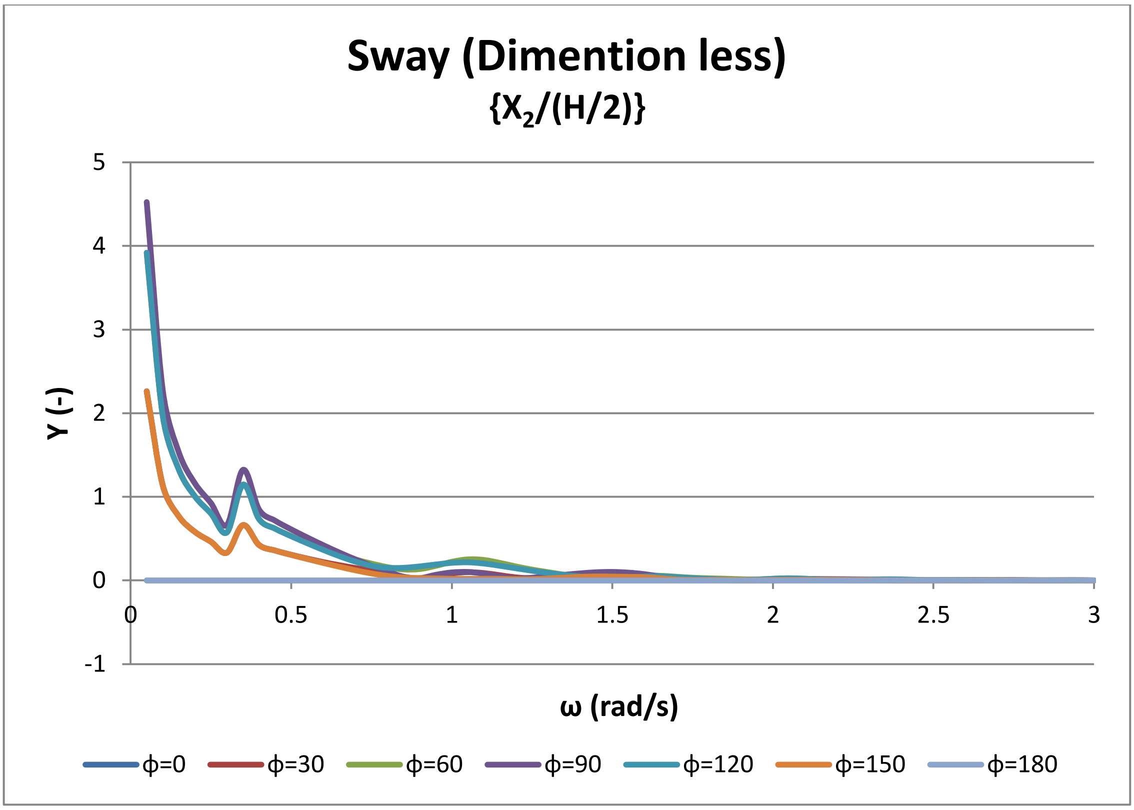


Σχήμα 4.6 Αδιαστατοποιημένη ροπή διέγερσης ως προς τον άξονα z στο πεδίο συχνοτήτων.

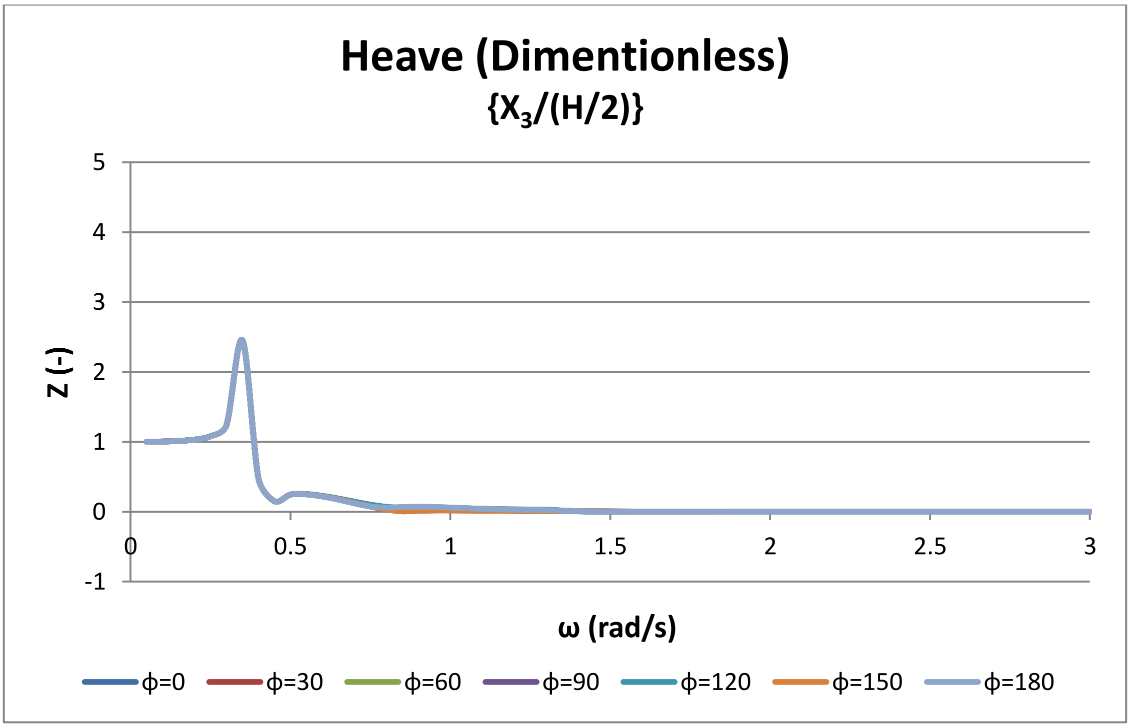
4.1.2.2 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ



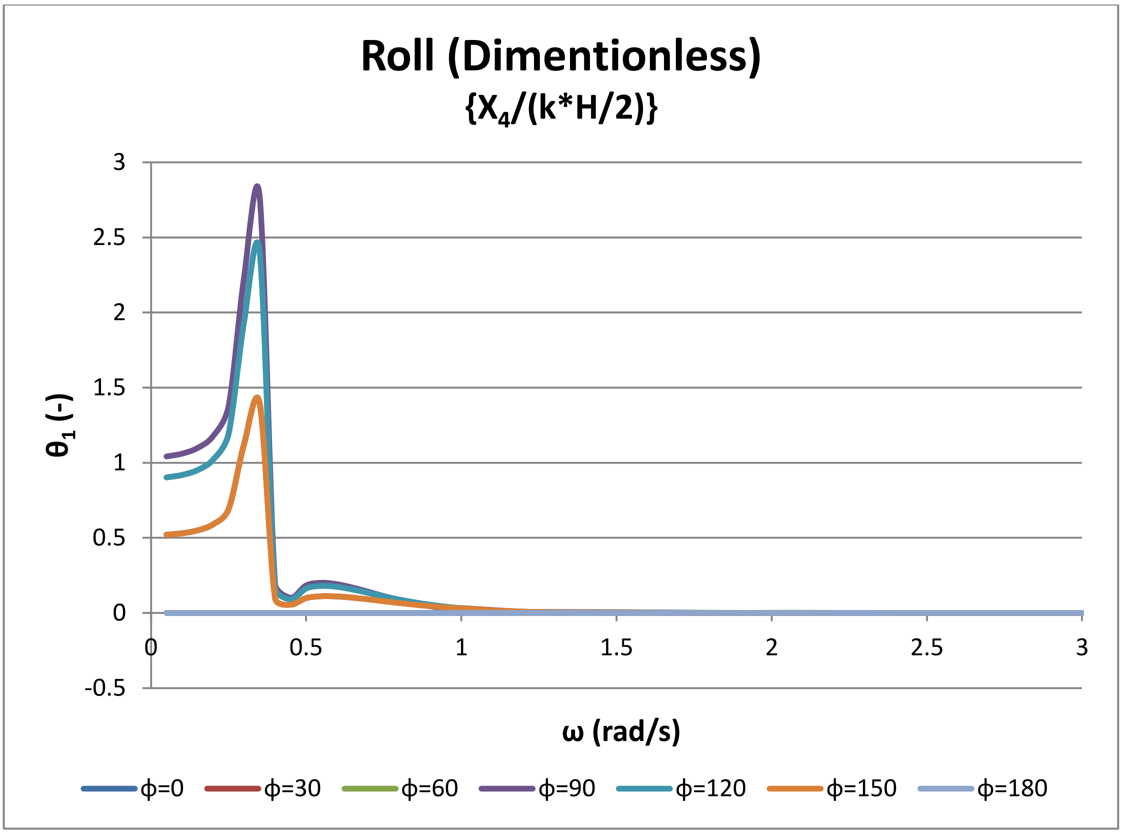
Σχήμα 4.7 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.



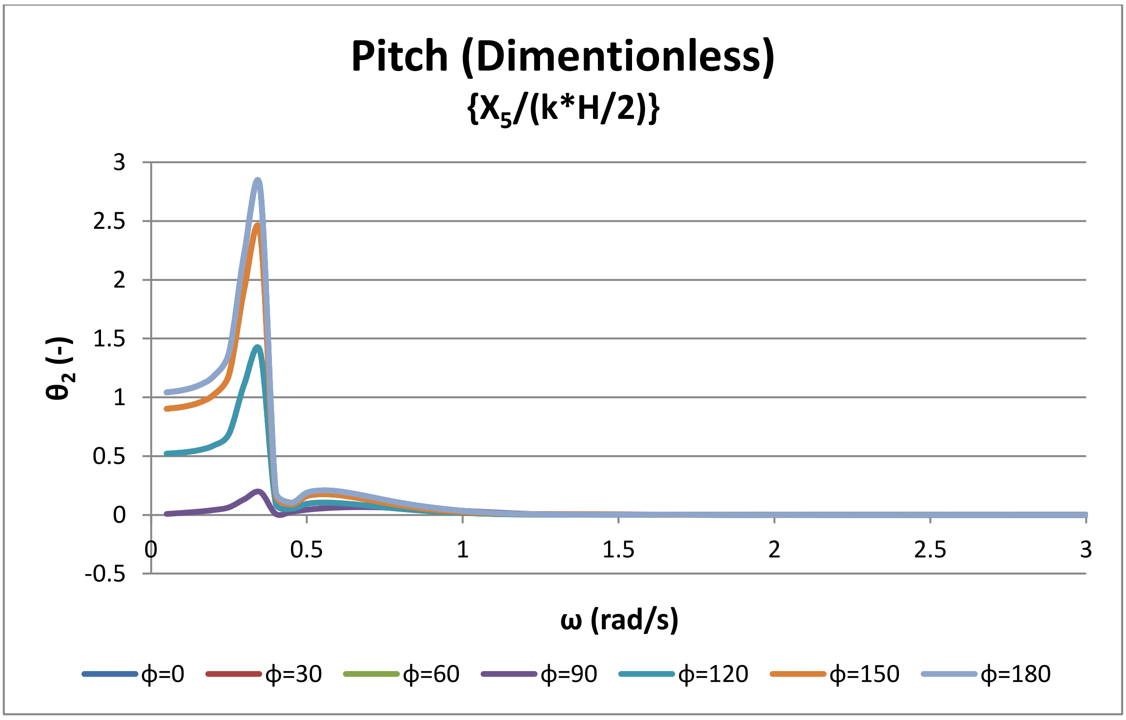
Σχήμα 4.8 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.



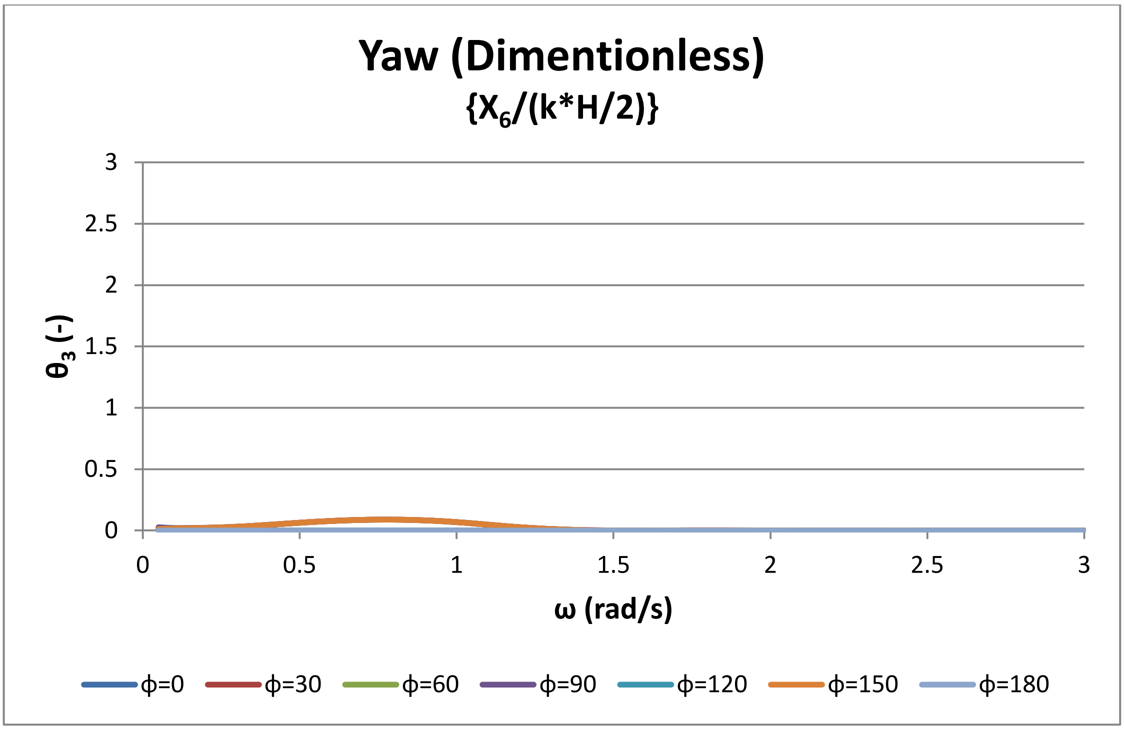
Σχήμα 4.9 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον z άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.10 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.

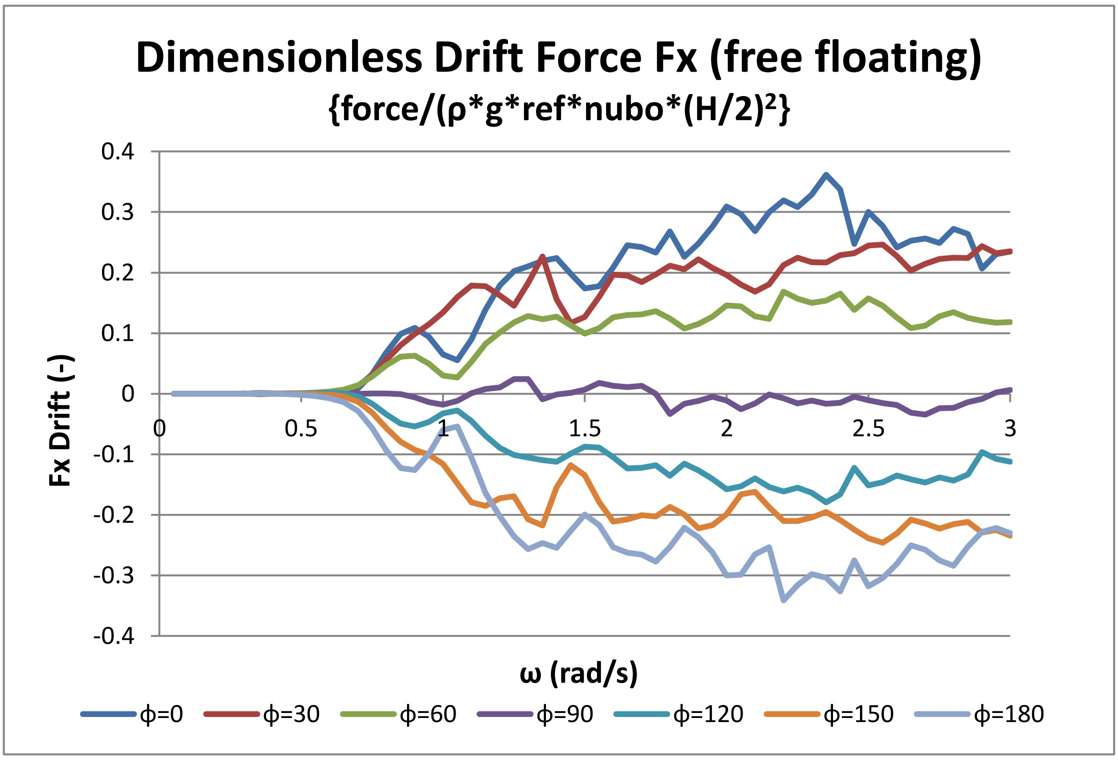


Σχήμα 4.11 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.

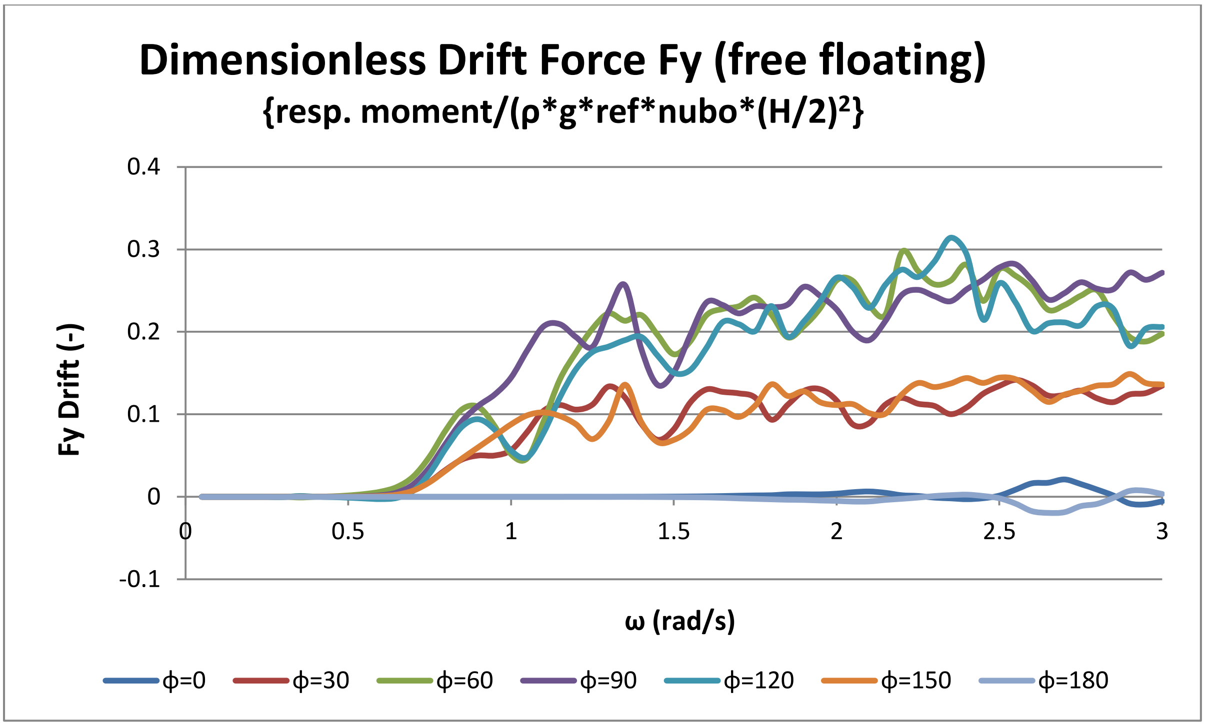


Σχήμα 4.12 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων.

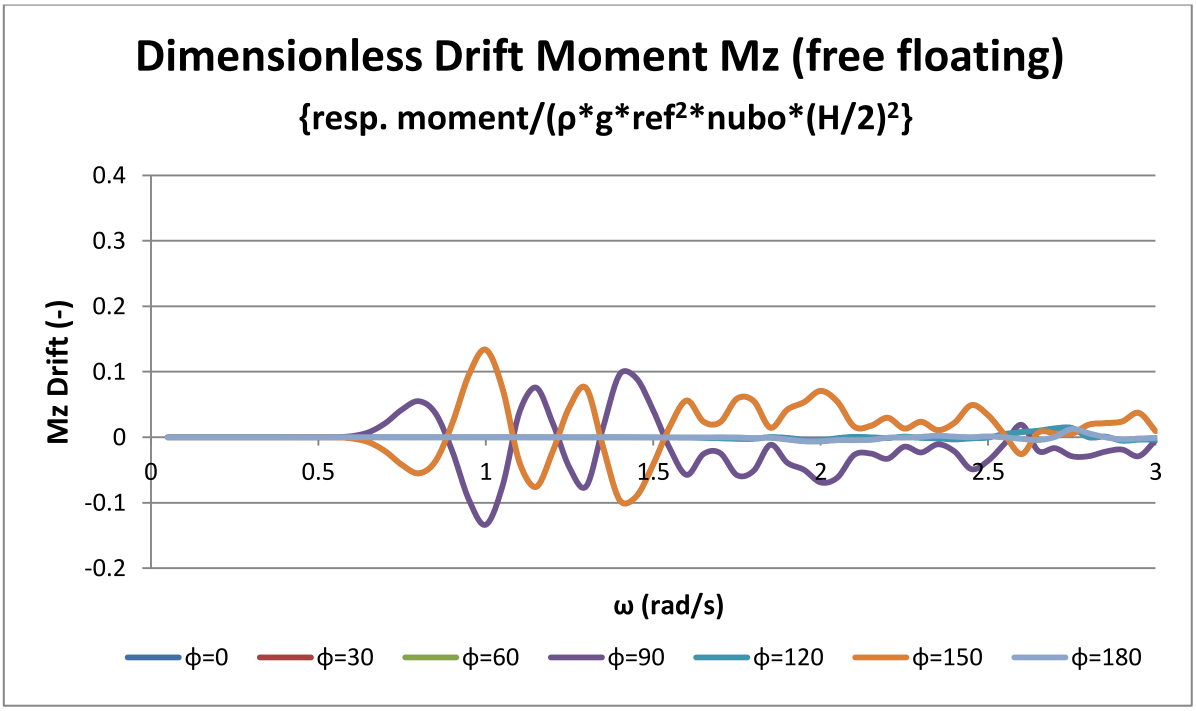
4.1.2.3 ΜΕΣΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ (DRIFT FORCES)



Σχήμα 4.13 Αδιαστατοποιημένη μέση δύναμη δεύτερης τάξης στον άξονα x στο πεδίο συχνοτήτων.



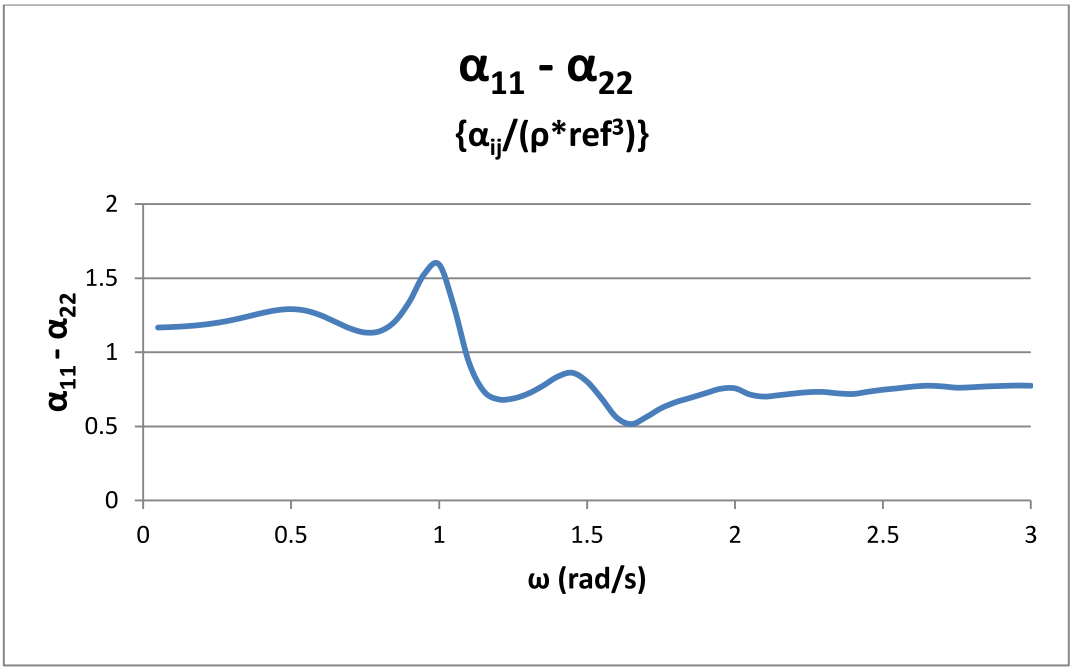
Σχήμα 4.14 Αδιαστατοποιημένη μέση δύναμη δεύτερης τάξης στον άξονα y στο πεδίο συχνοτήτων.



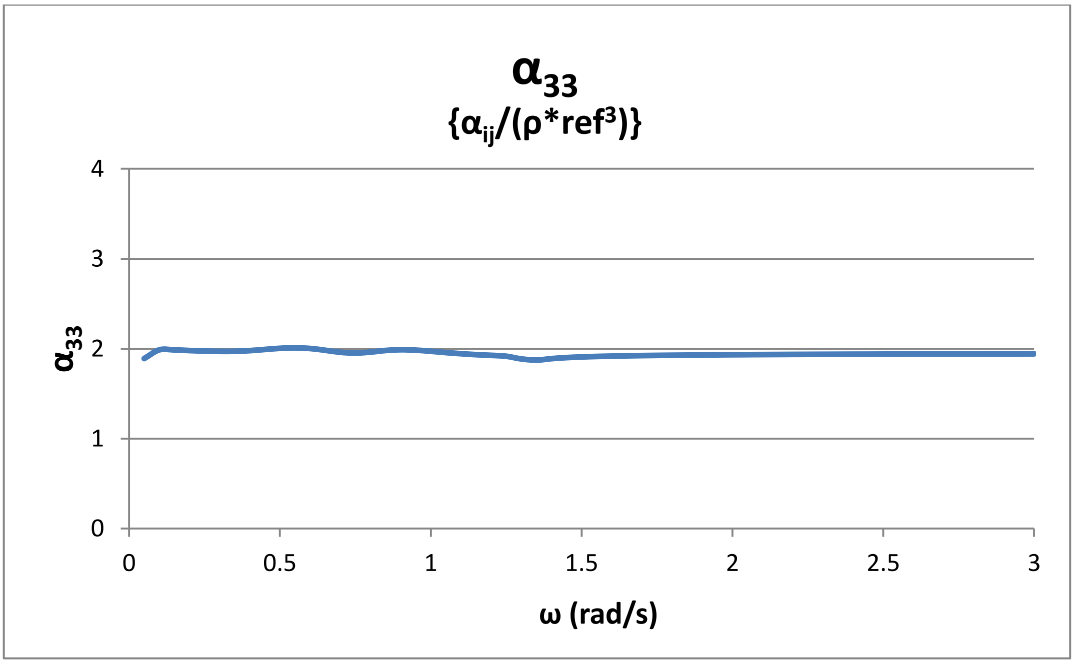
Σχήμα 4.15 Αδιαστατοποιημένη μέση ροπή δεύτερης τάξης ως προς τον άξονα z στο πεδίο συχνοτήτων.

Οι μέσες δυνάμεις δεύτερης τάξεις στον z άξονα και οι μέσες ροπές δεύτερης τάξης ως προς τους x και y άξονες είναι μηδενικές για όλες τις τιμές της συχνότητας ω, και για το λόγο αυτό δεν δίνονται σε διάγραμμα.

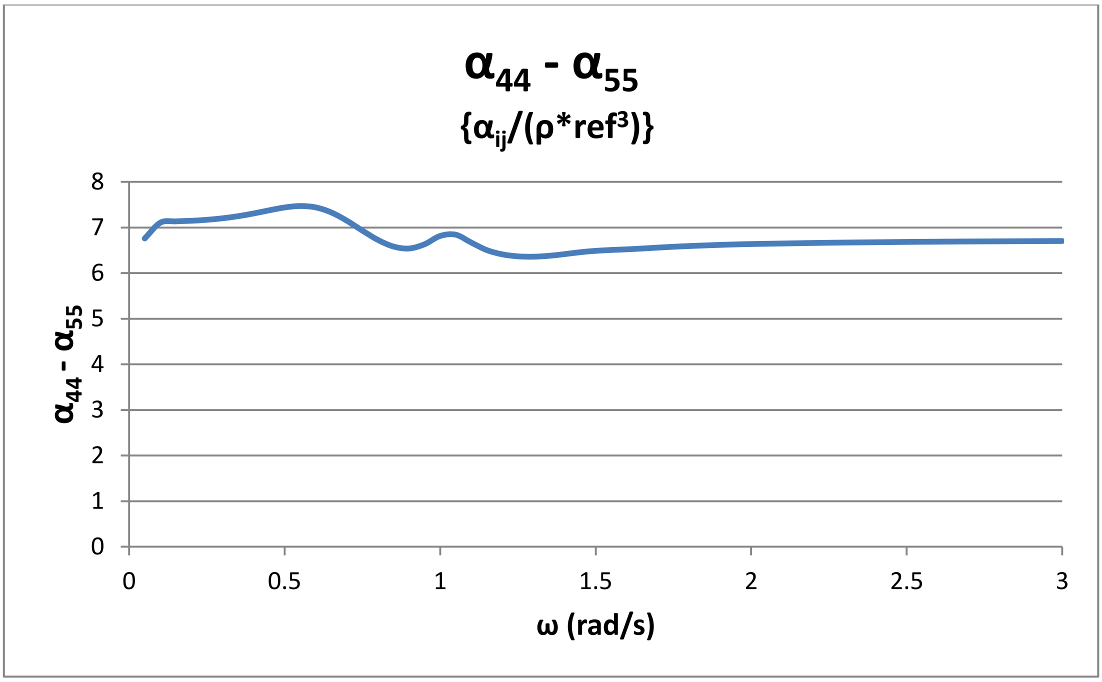
4.1.2.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ



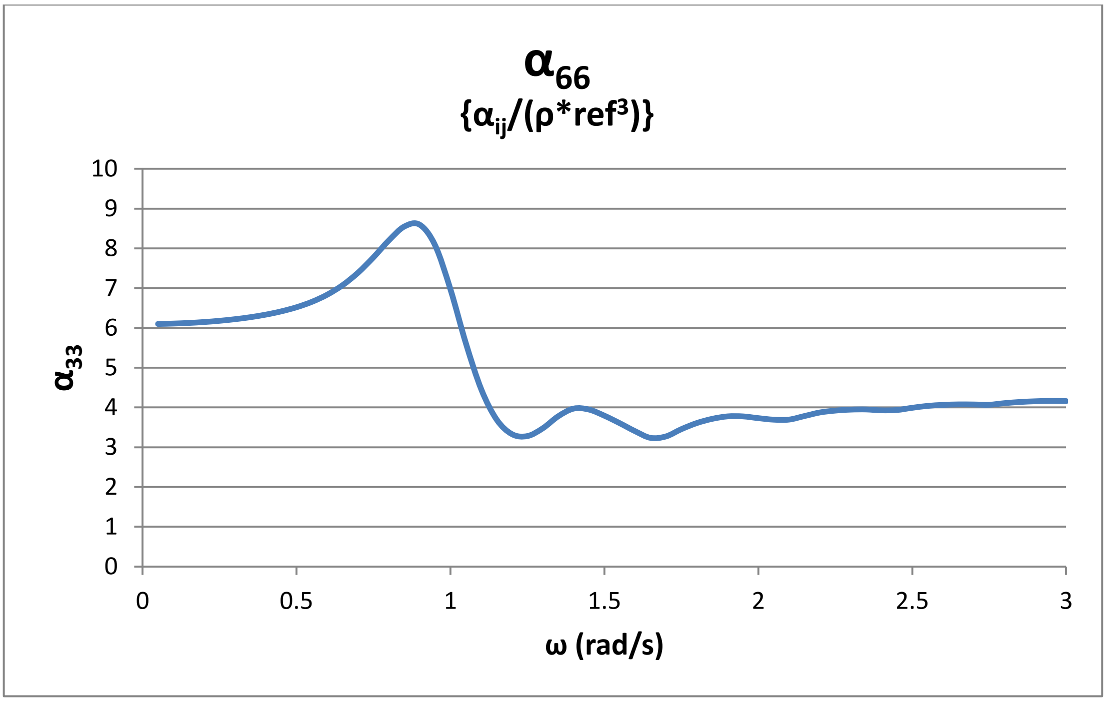
Σχήμα 4.16 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής μάζας α_{11} και α_{22} στο πεδίο συχνοτήτων.



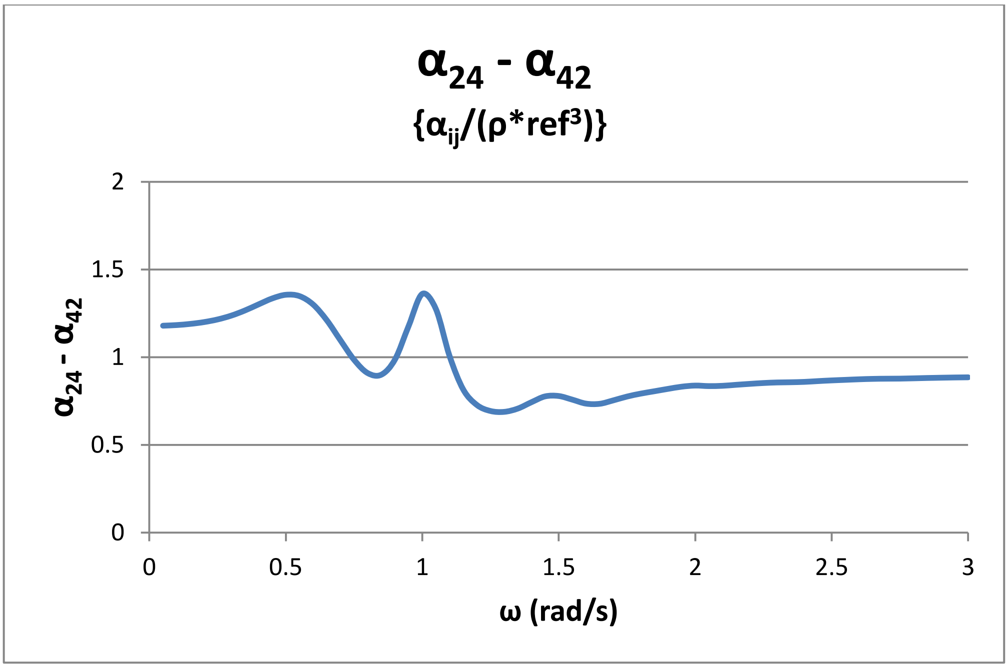
Σχήμα 4.17 Αδιαστατοποιημένος συντελεστής υδροδυναμικής μάζας α_{33} στο πεδίο συχνοτήτων.



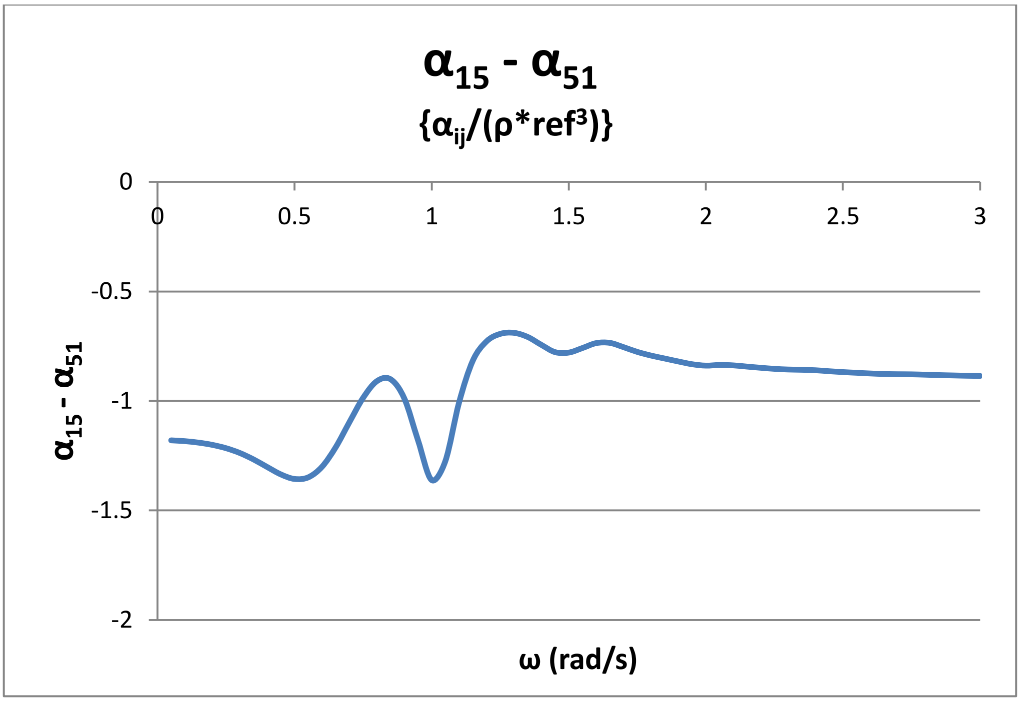
Σχήμα 4.18 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής μάζας $α_{44}$ και $α_{55}$ στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.19 Αδιαστατοποιημένος συντελεστής υδροδυναμικής μάζας $α_{33}$ στο πεδίο συχνοτήτων.

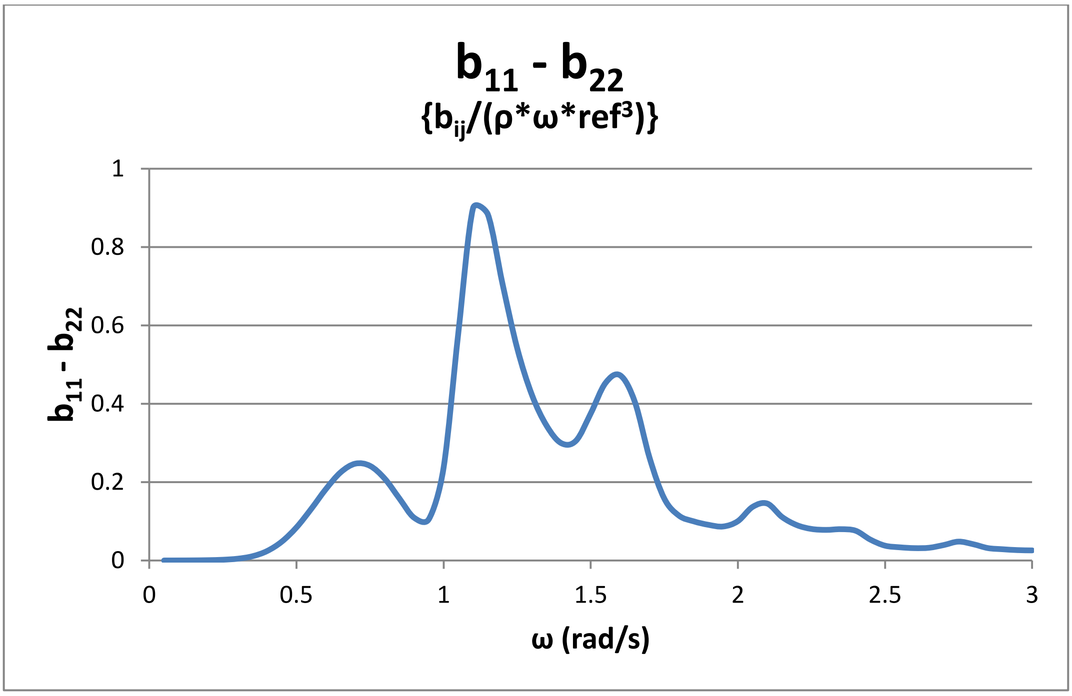


Σχήμα 4.20 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής μάζας $α_{24}$ και $α_{42}$ στο πεδίο συχνοτήτων.

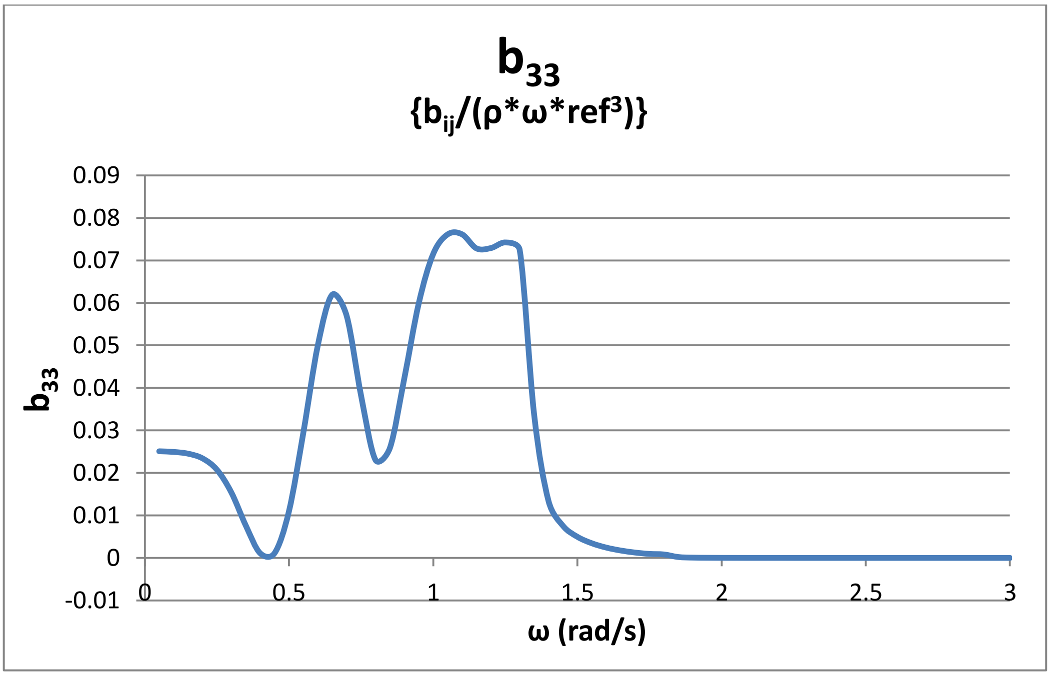


Σχήμα 4.21 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής μάζας $α_{15}$ και $α_{51}$ στο πεδίο συχνοτήτων.

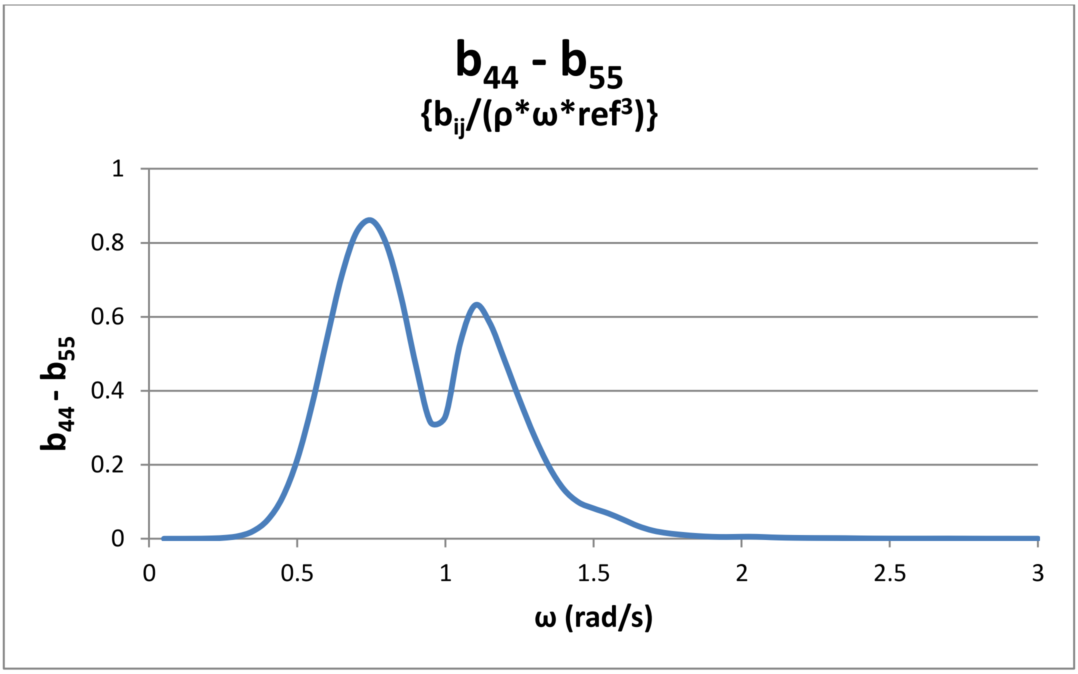
4.1.2.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ



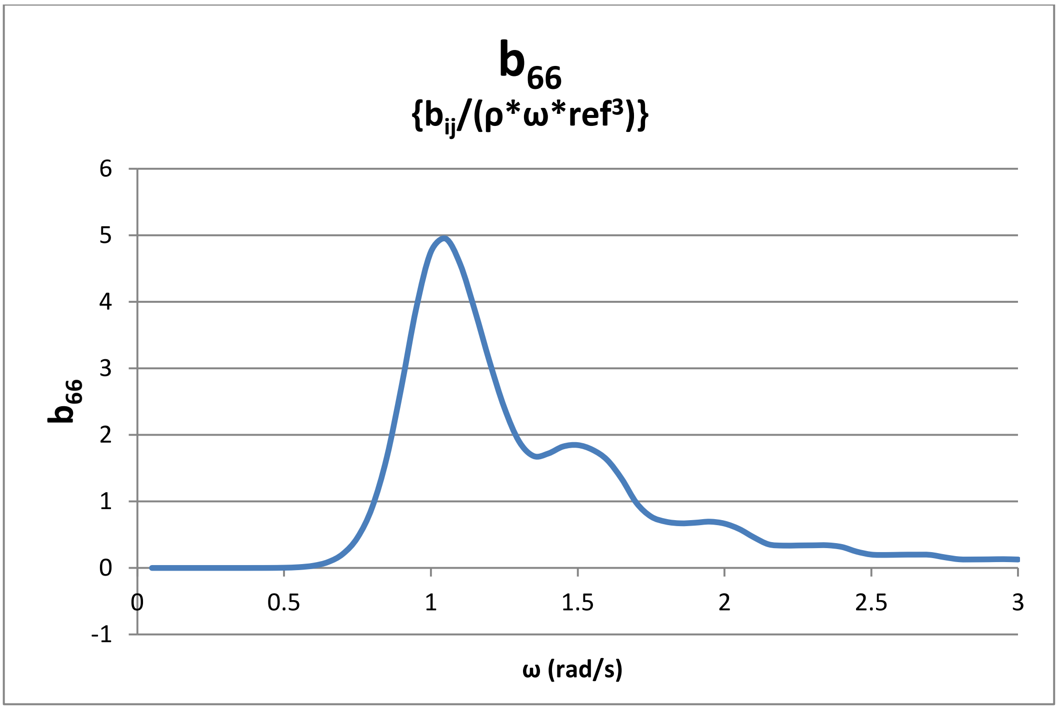
Σχήμα 4.22 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης b_{11} και b_{22} στο πεδίο συχνοτήτων.



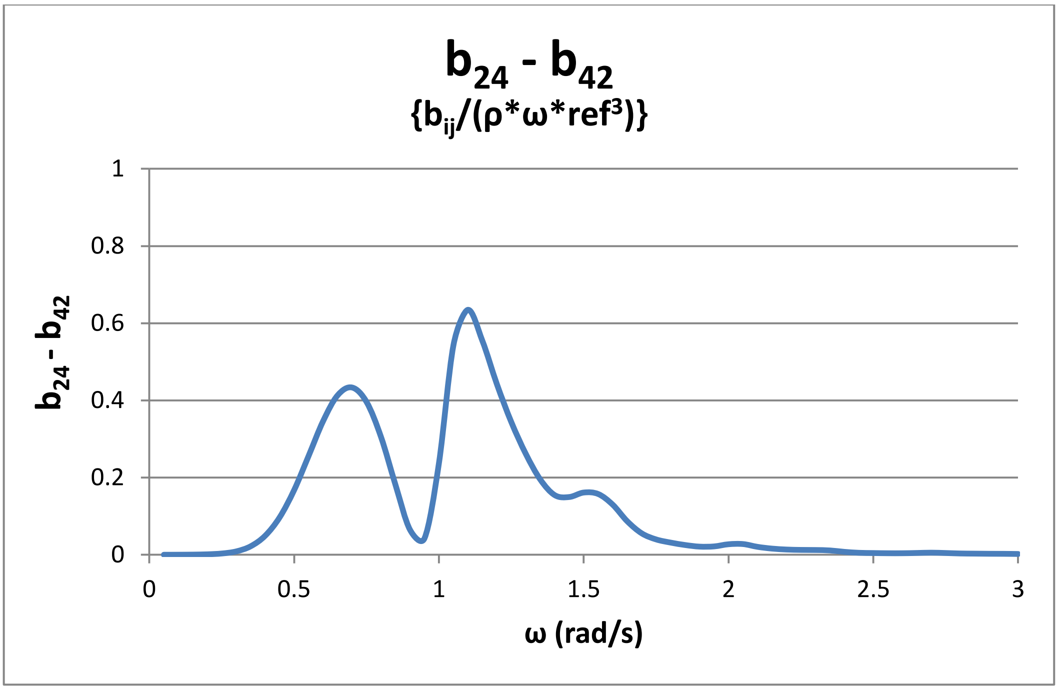
Σχήμα 4.23 Αδιαστατοποιημένος συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης b_{33} στο πεδίο συχνοτήτων.



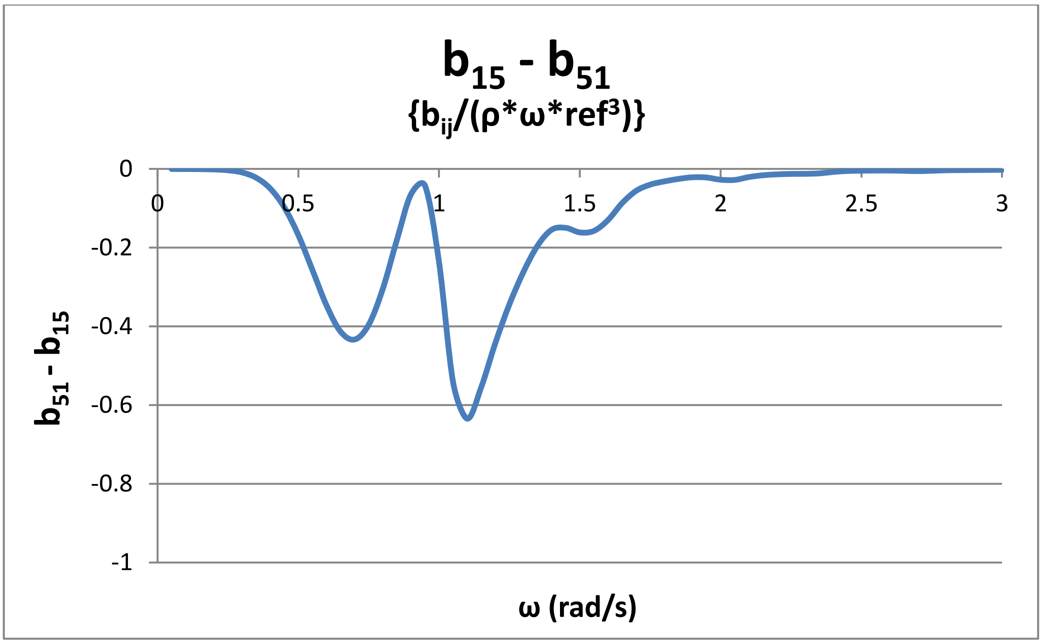
Σχήμα 4.24 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης b_{44} και b_{55} στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.25 Αδιαστατοποιημένος συντελεστής υδροδυναμικής απόσβεσης b_{66} στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.26 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης b_{24} και b_{42} στο πεδίο συχνοτήτων.



Σχήμα 4.27 Αδιαστατοποιημένοι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης b_{15} και b_{51} στο πεδίο συχνοτήτων.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΣΩ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SEMISUB

4.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την περεταίρω ανάλυση της κατασκευής ονομάζεται “SEMISUB” (Semi-Submersible) και αποτελεί επίσης κώδικα ανεπτυγμένο εντός του εργαστηρίου των «Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης» του τομέα των «Θαλάσσιων Κατασκευών». Σε σύγκριση με το προαναφερθέν πρόγραμμα “HAMVAB”, που προσδιορίζει την υδροδυναμική συμπεριφορά της πλωτής κατασκευής με τη χρήση ακριβούς μεθοδολογίας για την εκτίμηση των υδροδυναμικών φορτίων και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της πολλαπλής σκέδασης, ο κώδικας “SEMISUB” χρησιμοποιεί την προσεγγιστική μέθοδο της υδροδυναμικής σύνθεσης για την εκτίμηση των υδροδυναμικών φορτίων. Εδώ οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κατακόρυφων κυλινδρικών σωμάτων που συμμετέχουν στην κατασκευή δεν λαμβάνονται υπόψη. Μόνον η διαφορά φάσης του προσπίπτοντος κυματισμού σε σχέση με τη θέση κάθε ενός από τους κυλίνδρους της διάταξης λαμβάνεται υπόψη.

Οι συζευγμένες υδρο-αερο-ελαστικές εξισώσεις των κινήσεων του πλωτού σώματος λύνονται επίσης στο πεδίο συχνοτήτων μαζί με τη δυναμική μιας ανεμογεννήτριας 5MW, πακτωμένη στο πλωτό σώμα, ενώ παράλληλα αναλύονται δυναμικά στις 6 κινήσεις στερεού σώματος της πλωτής κατασκευής στήριξης.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να αναλύει τα προβλήματα περίθλασης δυναμικού και ακτινοβολίας γύρω από πολλαπλούς κυλίνδρους και να υπολογίζει τις κινήσεις της κατασκευής και τις διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην κατασκευή σε οποιοδήποτε σημείο της. Επίσης, σε περίπτωση αγκυρωμένης κατασκευής, υπολογίζεται και η αντίστοιχη αναπτυσσόμενη τάση σε κάθε κλάδο αγκύρωσης.

Ως προς τη διαδικασία που ακολουθήθηκε, ο υπάρχων κώδικας επεκτάθηκε κατάλληλα ώστε να συμπεριληφθεί η επιπρόσθετη δυναμική της ανεμογεννήτριας για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, στην εξίσωση της κίνησης προστέθηκαν οι πρόσθετες υδροδυναμικές μάζες, οι συντελεστές υδροδυναμικής απόσβεσης και οι συντελεστές επαναφοράς της ανεμογεννήτριας για ταχύτητες ανέμου 0m/s, 3m/s, 8m/s, 11.4m/s, 18m/s και 25m/s. Η ανάλυση της κατασκευής έγινε και για την περίπτωση που το ενιαίο σώμα πλέει ελεύθερο (free floating), αλλά και για αγκυρωμένο σώμα (with moorings) με κατάλληλο σύστημα αγκύρωσης, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 3.4 και σε βάθος εγκατάστασης 200m.

Η αδιαστατοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως κατά την πρώτη φάση της μελέτη της κατασκευής. Δηλαδή, οι κινήσεις αδιαστατοποιήθηκαν διαιρώντας με H/2, όπου H το ύψος κύματος και οι περιστροφές διαιρώντας με k*H/2, όπου k ο κυματαριθμός. Στο Παράρτημα Β παρατίθεται ένα ενδεικτικό αρχείο input για το πρόγραμμα “SEMISUB”, για την ανάλυση της συζευγμένης κατασκευής, όταν είναι αγκυρωμένη.

4.2.2 ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΩΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ Α/Γ

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να αναφέρουμε τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στην απόκριση της συζευγμένης κατασκευής, δηλαδή του συνδυαστικού μοντέλου της πλωτής κατασκευής στήριξης και της ανεμογεννήτριας.

Το λογισμικό στο πεδίου συχνοτήτων HYDRAEROFLOAT αναπτύχθηκε από τον Μαζαρακο κ.α. το 2014 [60] για τη συζευγμένη ανάλυση πλωτών κατασκευών. Χρησιμοποιεί το πρόγραμμα HAMVAB (Μαυράκος, 1996) και ROM (Παπαδάκης κ.ά., 2014) ως προεπεξεργαστές. Υπολογίζουν τα φαινόμενα των κυματικών αλληλεπιδράσεων και της συνεισφοράς της ανεμογεννήτριας (WT) (αεροδυναμικές, βαρυντικές και αδρανειακές-γυροσκοπικές φορτίσεις), όλες ανηγμένες στους έξι βαθμούς ελευθερίας του πλωτήρα (dofs). Μπορούν επίσης να υπολογίσουν την απόκριση στο πεδίο συχνοτήτων ενός ή περισσότερων πλωτήρων υπό την επίδραση κυματισμού, ανέμου, δυνάμεων αγκύρωσης, τενόντων, ή και οποιαδήποτε άλλης μηχανικής σύνδεσης. Δε λαμβάνεται υπ' όψιν η απόσβεση λόγω ιξώδους. Οι συντελεστές απόκρισης (RAO's) υπολογίζονται για το συζευγμένο σύστημα της ανεμογεννήτριας και πλωτής πλατφόρμας. Οι εξισώσεις της κίνησης που διέπουν τις γραμμικές δυναμικές κινήσεις του συστήματος συνοψίζονται σε μορφή πίνακα:

$$\left[M_{ij}+A_{ij}(\omega)+M_{ij}^{WT}\right]\ddot{x}+\left[B_{ij}(\omega)+B_{ij}^{WT}\right]\dot{x}+\left[C_{ij}+Cmoorings+C_{ij}^{WT}\right]x=F(\omega)e^{i\omega t} \qquad (4.2.1)$$

Ο εκθέτης WT αντιστοιχεί σε φυσικές ποσότητες που συνδέονται με την ανεμογεννήτρια. Επιπλέον, M_{ij} είναι η μάζα της πλωτής μονάδας στήριξης της ανεμογεννήτριας, A_{ij}, B_{ij}, και Cij αντιπροσωπεύουν τους 6x6 πίνακες πρόσθετης μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας αντίστοιχα, και $F(\omega)e^{i\omega t}$ είναι το 6x1 διάνυσμα που περιέχει τις υδροδυναμικές δυνάμεις διέγερσης επί της δομής στήριξης της πλωτής κατασκευής. Αυτοί οι πίνακες υπολογίζονται από το πρόγραμμα HAMVAB για πλωτές εξέδρες. Στην εξίσωση (4.2.1) προστίθενται στους πίνακες που υπολογίζονται από το πρόγραμμα ROM (εκθέτης WT) για την ανεμογεννήτρια. Οι πίνακες αποκατάστασης C, περιλαμβάνουν συνεισφορές από την υδροστατική συμπεριφορά, τις αγκυρώσεις και την ανεμογεννήτρια (WT).

Το σύμβολο x αντιπροσωπεύει το μέγεθος της απόκρισης του συστήματος σε κάθε είδος κίνησης σε κάθε συχνότητα. Λόγω της μη γραμμικής φύσεως της αεροδυναμικής και δυναμικής συμπεριφοράς, δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν τα M^{WT}, B^{WT} και C^{WT} για όλες τις ταχύτητες του ανέμου. Η ταχύτητα του ρότορα, η μέση γωνία αναφοράς ως προς την περιστροφή γύρω από τον άξονα y και οι παράγοντες διέγερσης αναφέρονται στην κατάσταση αναφοράς που ορίζεται για κάθε ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, οι συντελεστές RAO του συνδυασμένου συστήματος εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου.

Όσον αφορά την εν λόγω διπλωματική εργασία, η πρόσθεση των πινάκων της ανεμογεννήτριας δεν γίνεται μέσω του προγράμματος ROM, αλλά μέσω του προγράμματος SEMISUB. Ύστερα από τη προσθήκη της δυναμικής της ανεμογεννήτριας γίνεται η ανάλυση της συζευγμένης κατασκευής σε περίπτωση που πλέει ελεύθερη (free floating structure) και σε περίπτωση που είναι αγκυρωμένη (moored structure).

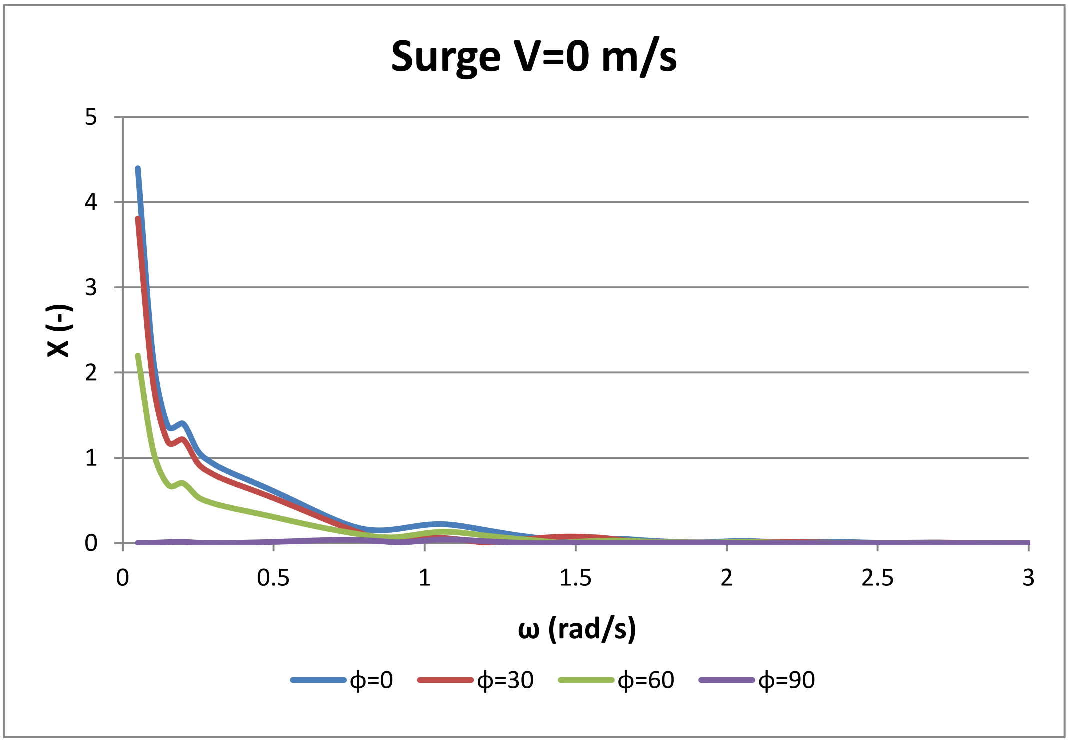
4.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΠΛΕΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (FREE FLOATING STRUCTURE)

Όπως παρατηρήθηκε από το πρώτο κομμάτι της ανάλυσης (παράγραφος 4.1.2.2), για συμμετρικές γωνίες έχουμε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα, όσον αφορά τις κινήσεις της πλωτής κατασκευής. Για το λόγο αυτό στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης όλοι οι υπολογισμοί γίνονται για τις μισές γωνίες, δηλαδή για φ=0, 30, 60, 90 μοίρες.

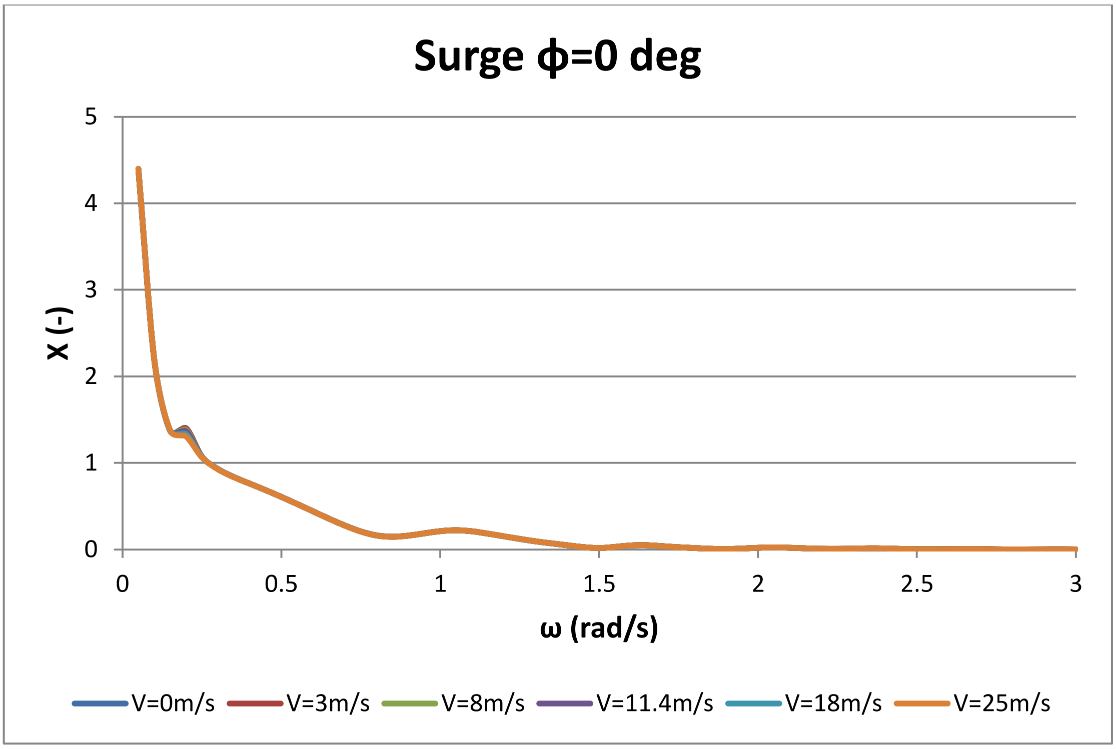
4.2.3.1 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Κάθε κίνηση παριστάνεται, αρχικά σε διάγραμμα στο πεδίο συχνοτήτων για μηδενική ταχύτητα ανέμου και για τις διάφορες γωνίες, και εν συνεχεία για κάθε γωνία, επίσης στο πεδίο συχνοτήτων, και για καθεμία από τις ταχύτητες ανέμου που αναφέρθηκαν παραπάνω (παρ. 4.2.1). Για καλύτερη σύγκριση και ανάγνωση των διαγραμμάτων χρησιμοποιούνται ίδιοι κατακόρυφοι άξονες και ανάλογα προσαρμοσμένοι οριζόντιοι άξονες αντίστοιχα. Έχουμε λοιπόν τα εξής αποτελέσματα:

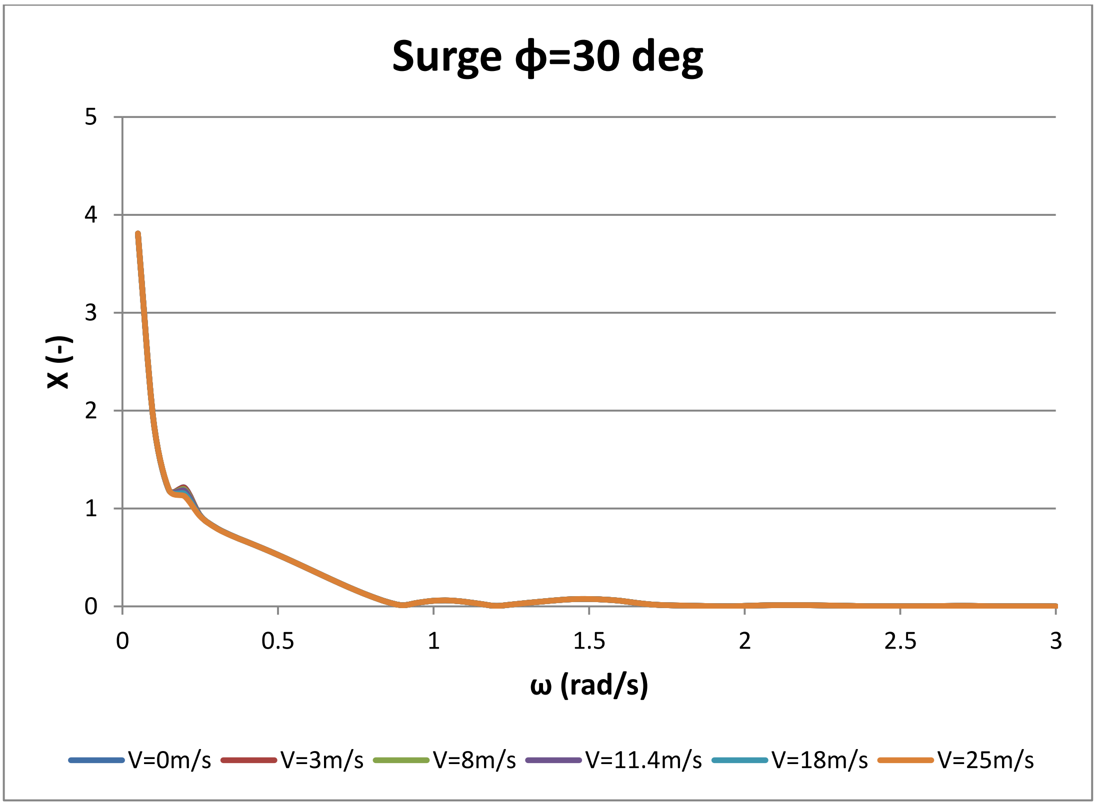
- **<u>Κίνηση στον x- άξονα (Surge)</u>**



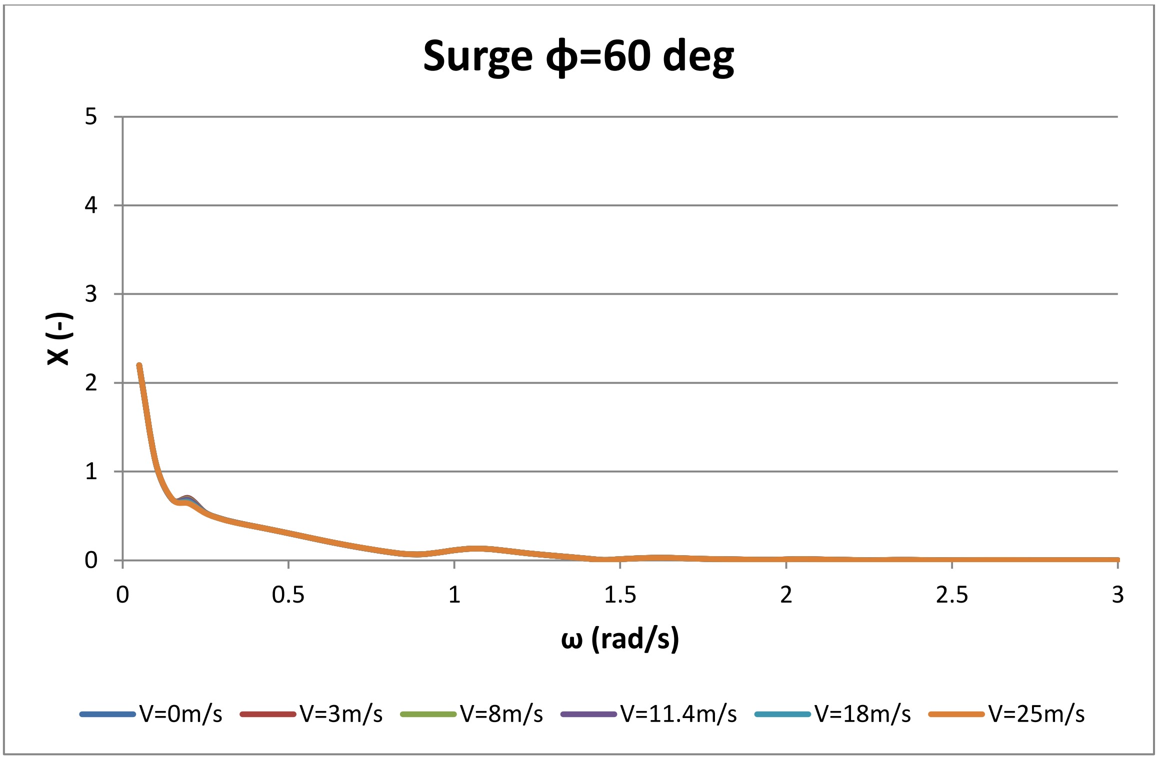
Σχήμα 4.28 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



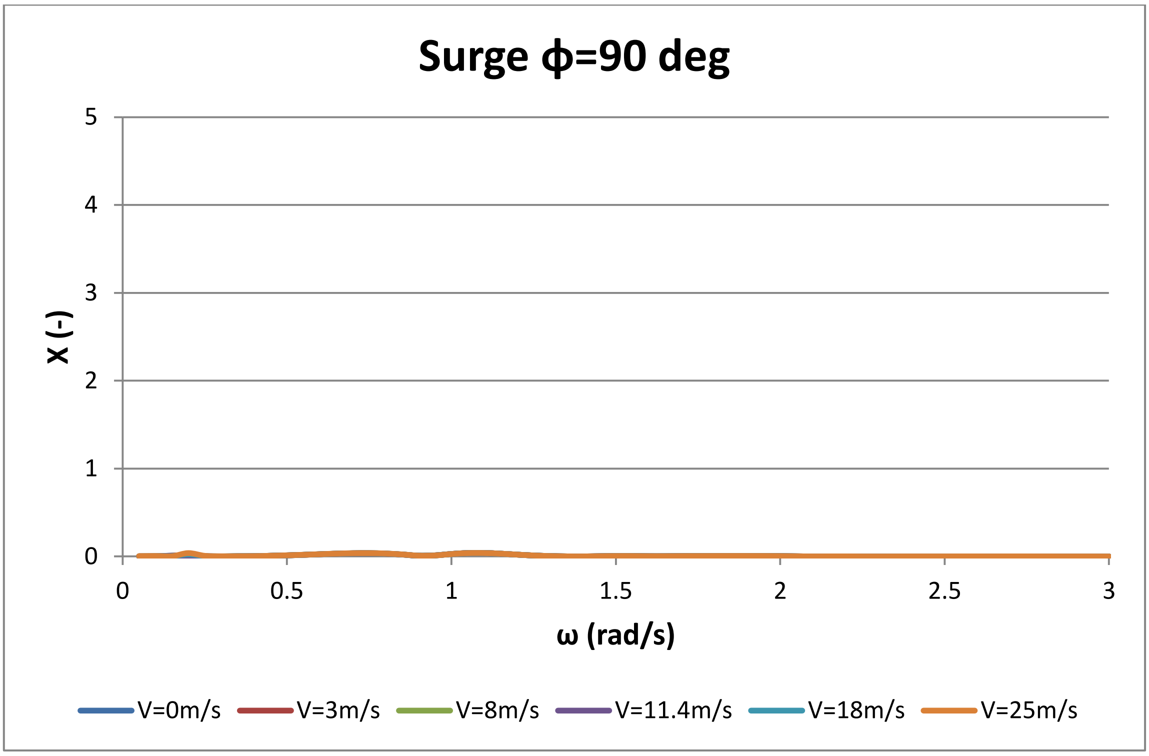
Σχήμα 4.29 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\varphi=0^{o}$ και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 4.30 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $\varphi=30^{o}$ και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

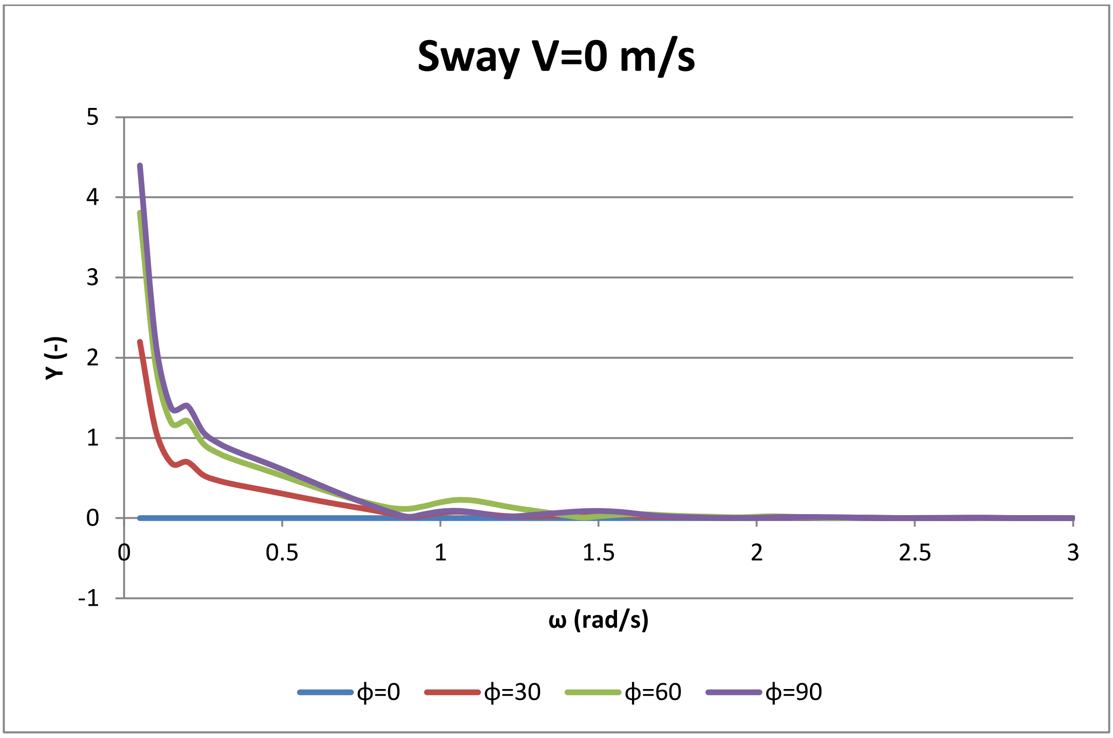


Σχήμα 4.31 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

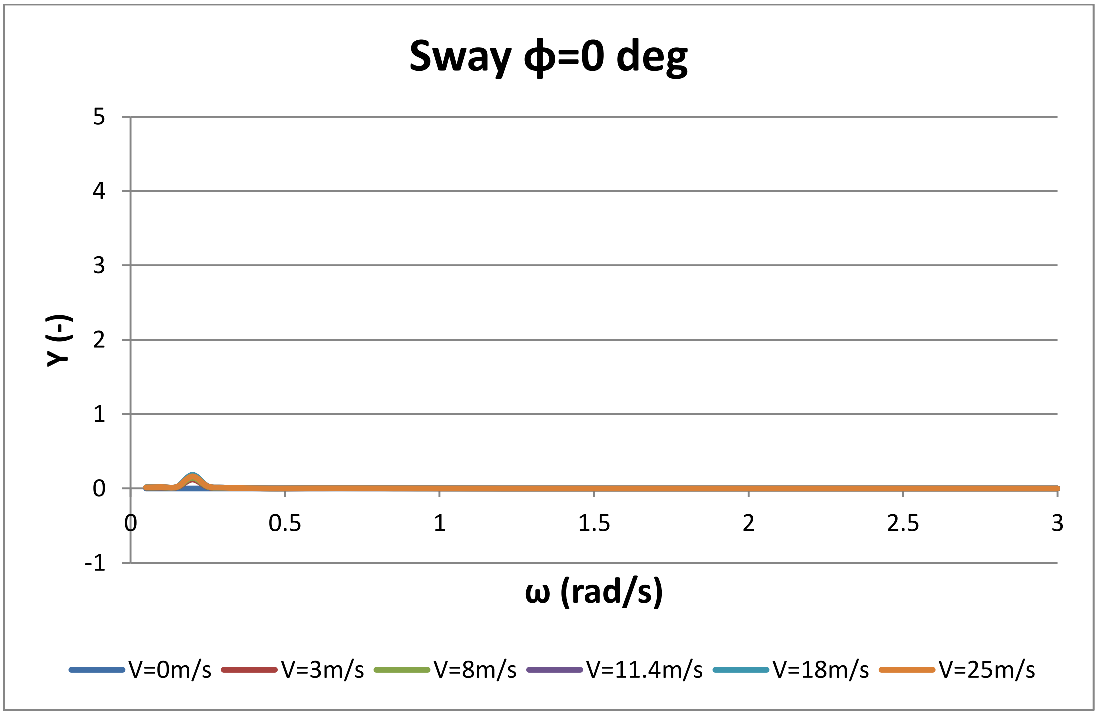


Σχήμα 4.32 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

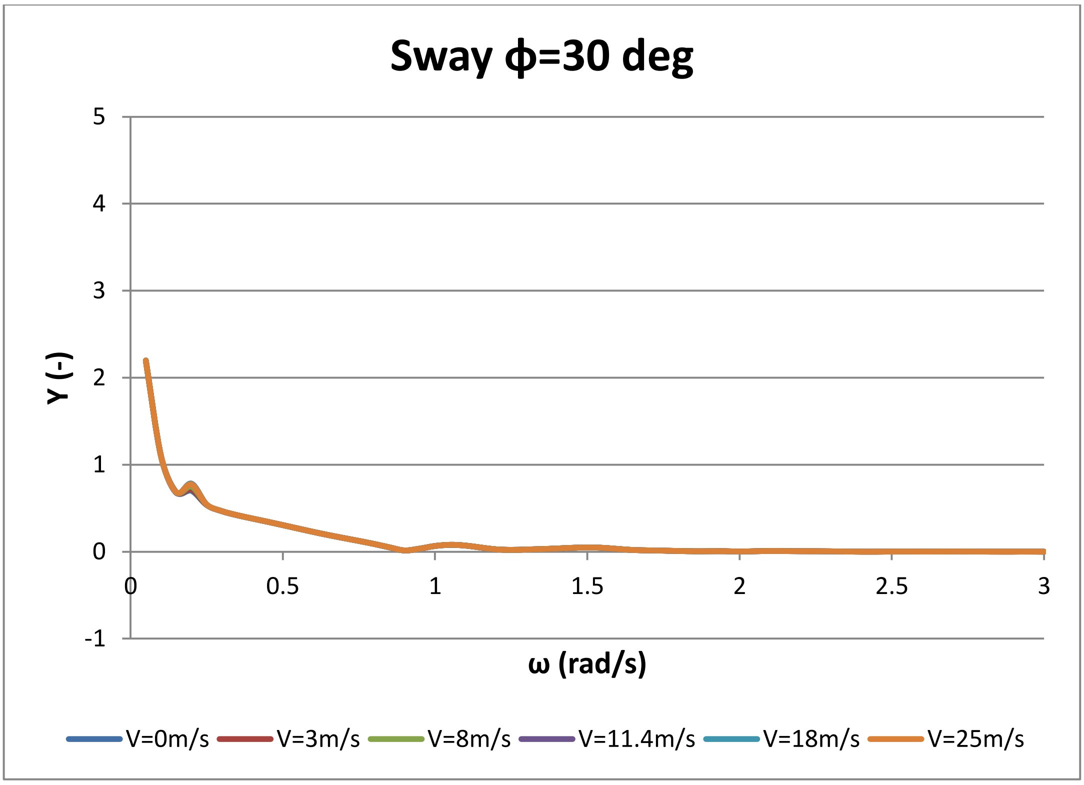
- **<u>Κίνηση στον y-άξονα (Sway)</u>**



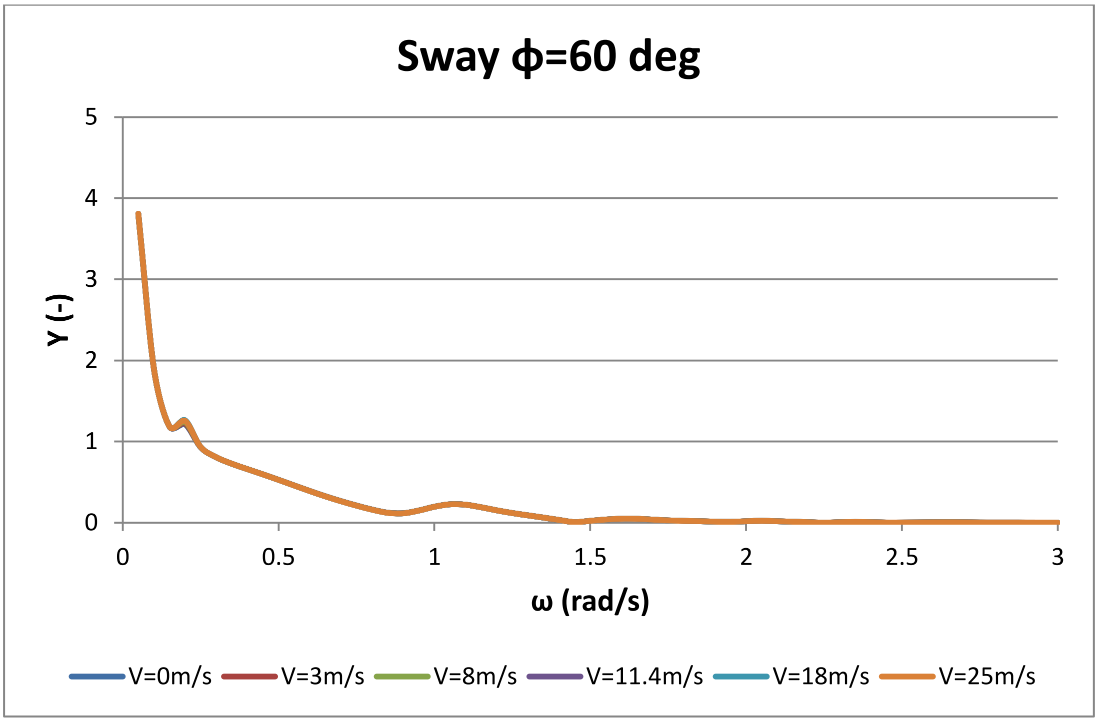
Σχήμα 4.33 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



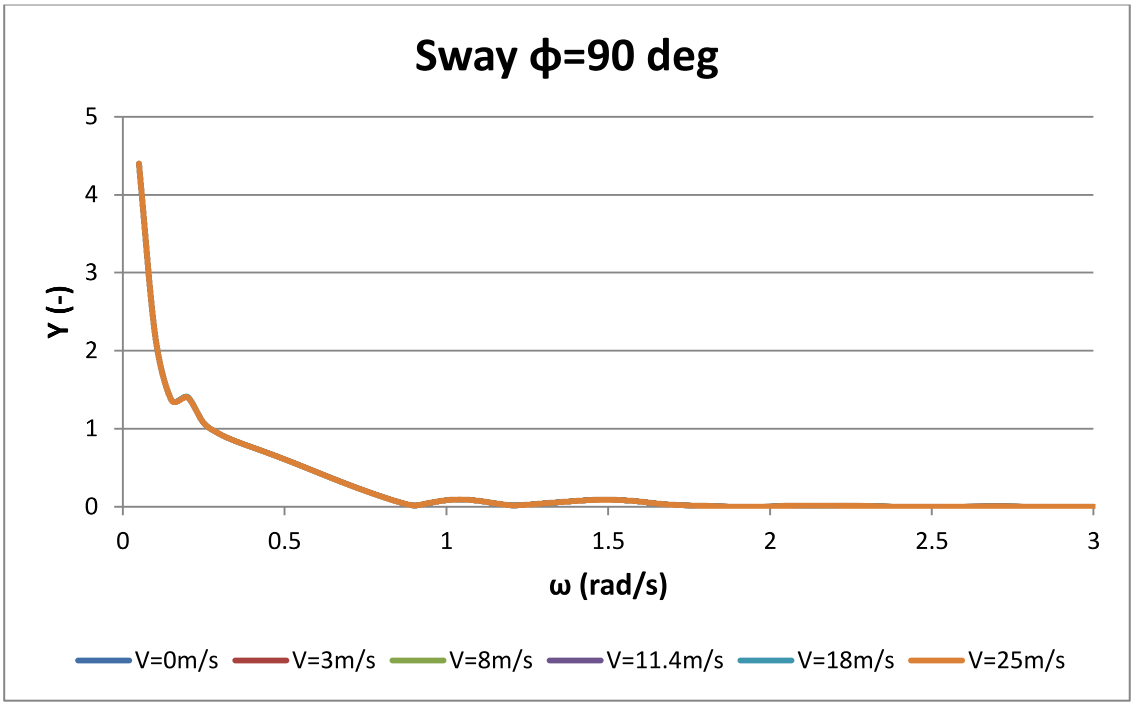
Σχήμα 4.34 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0^{o} και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 4.35 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



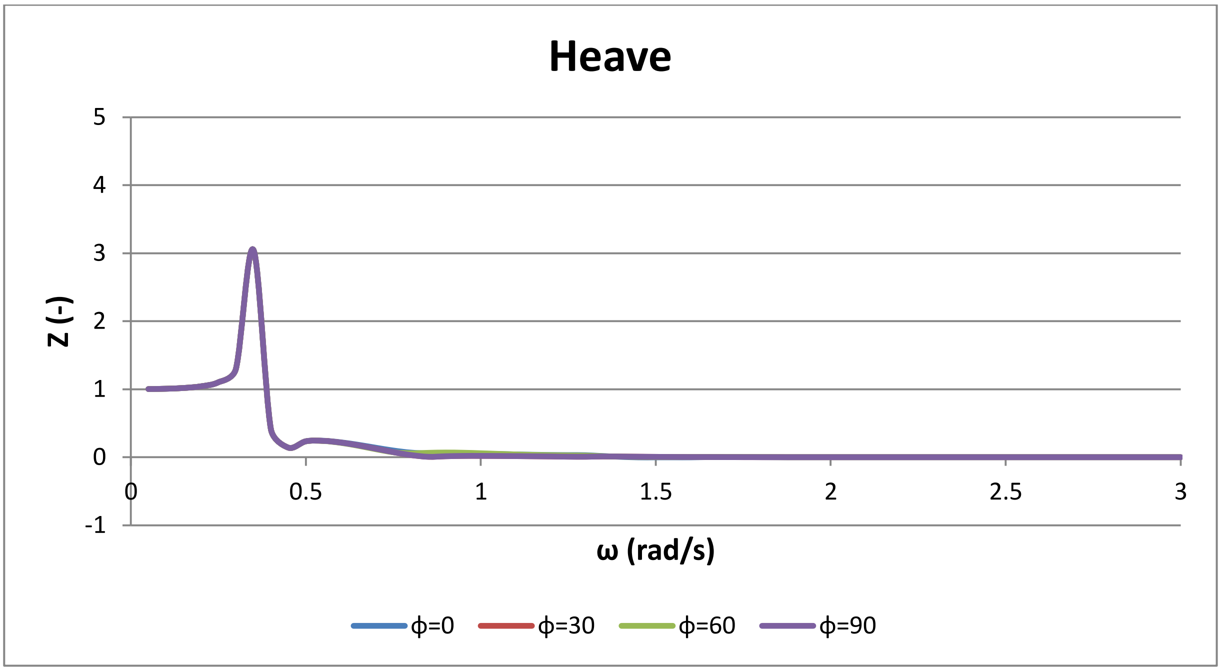
Σχήμα 4.36 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 4.37 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90^{o} και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

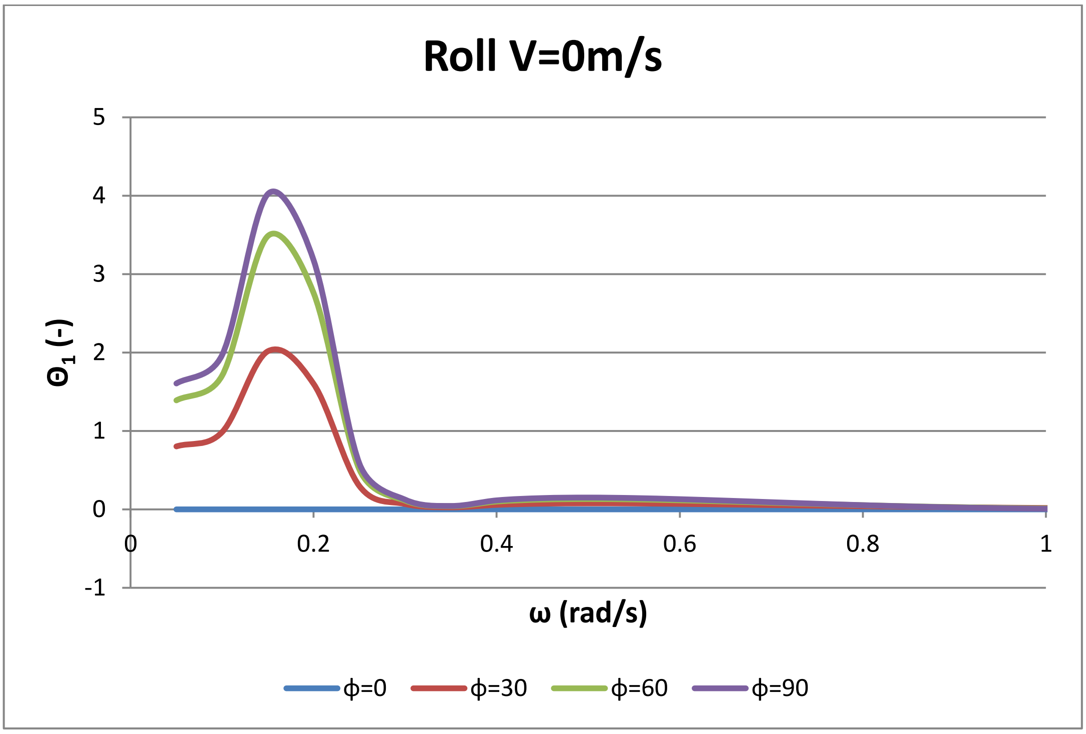
- **<u>Κίνηση στον z-άξονα (Heave)</u>**

Η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα (heave) είναι ίδια ανεξαρτήτως γωνίας και ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου επομένως δίνεται μόνο ένα διάγραμμα σε αυτήν την περίπτωση

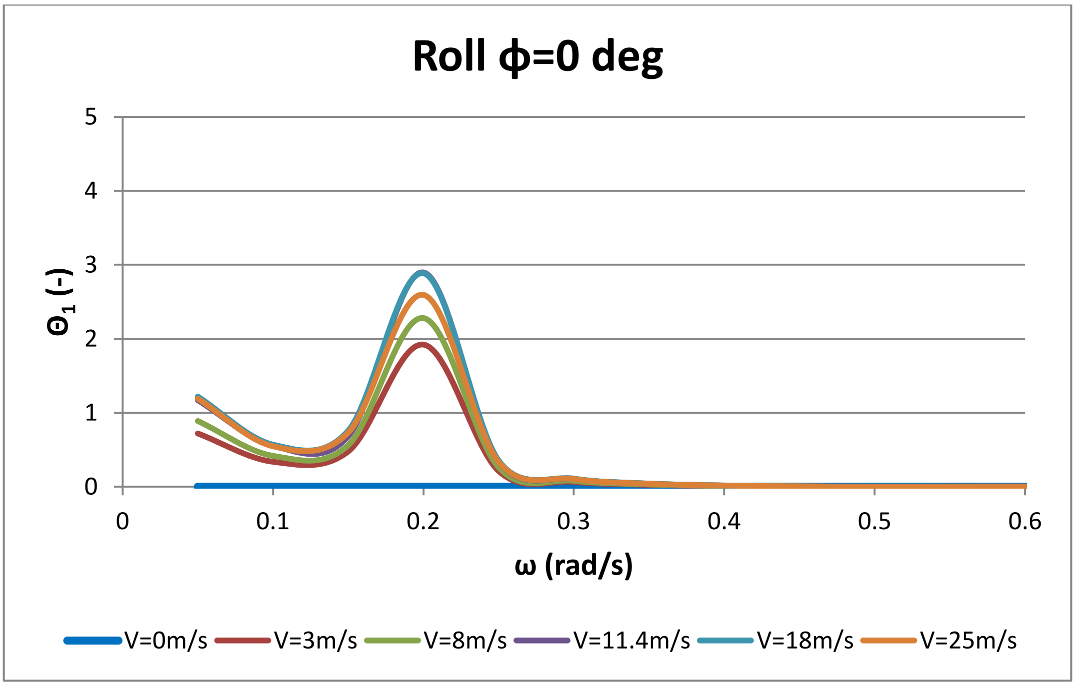


Σχήμα 4.38 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον z άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

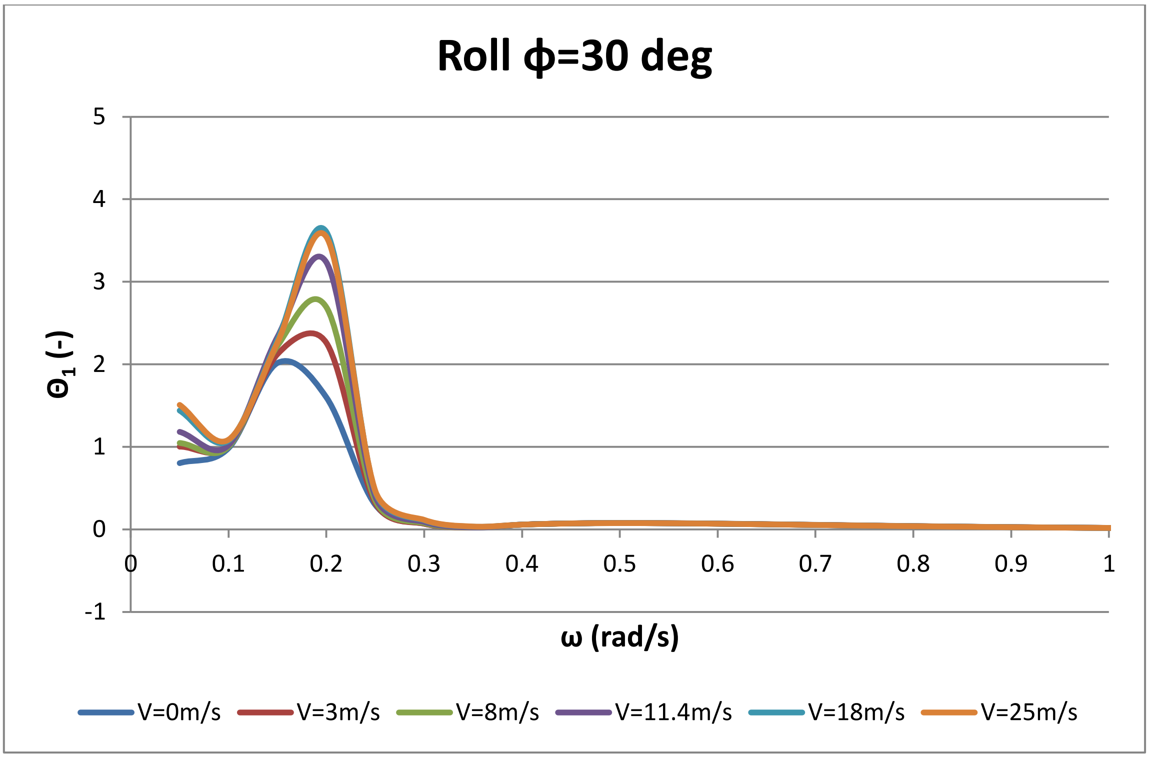
- <u>Περιστροφή ως προς τον x-άξονα (Roll)</u>



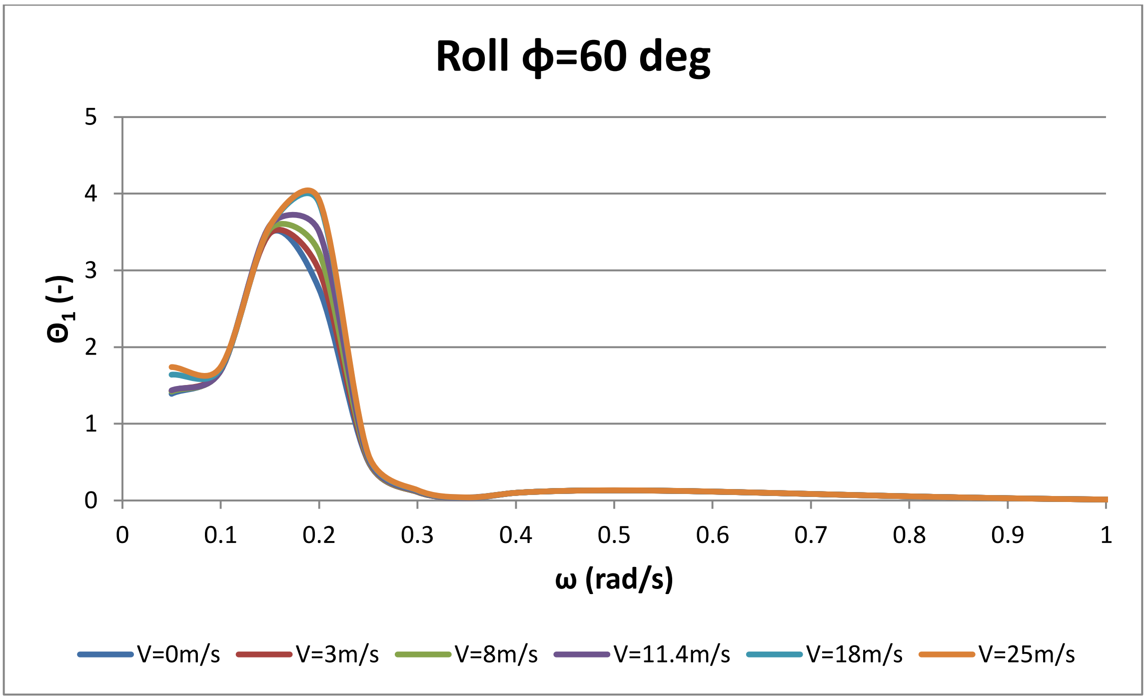
Σχήμα 4.39 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



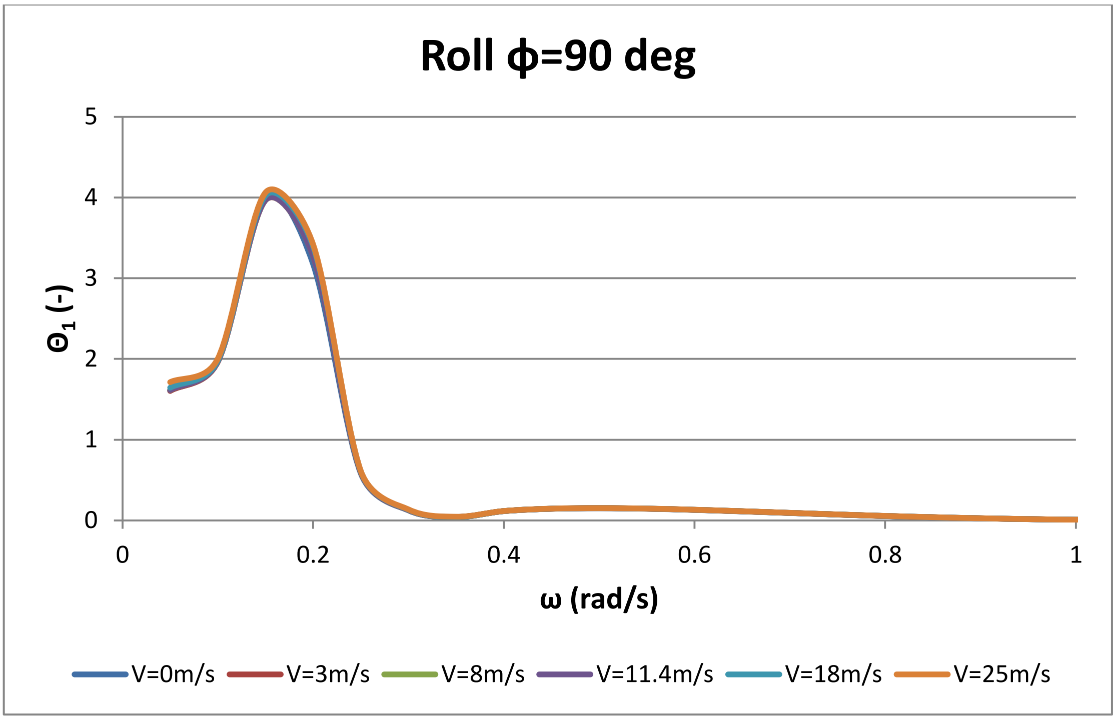
Σχήμα 4.40 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 4.41 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

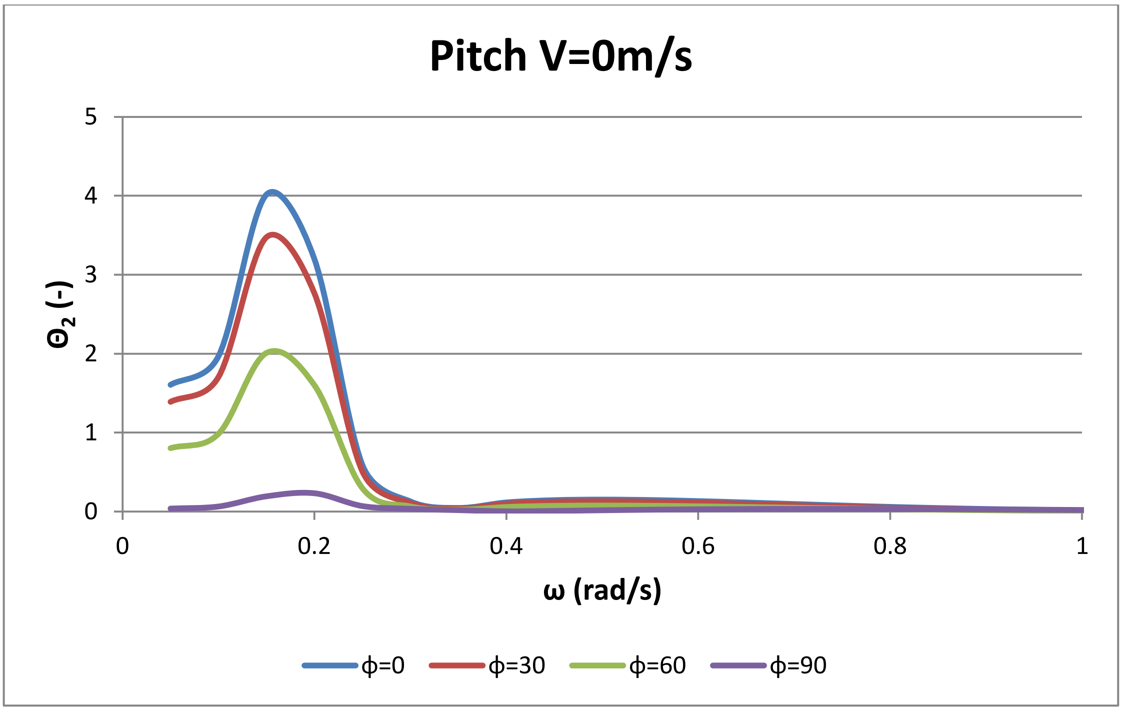


Σχήμα 4.42 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

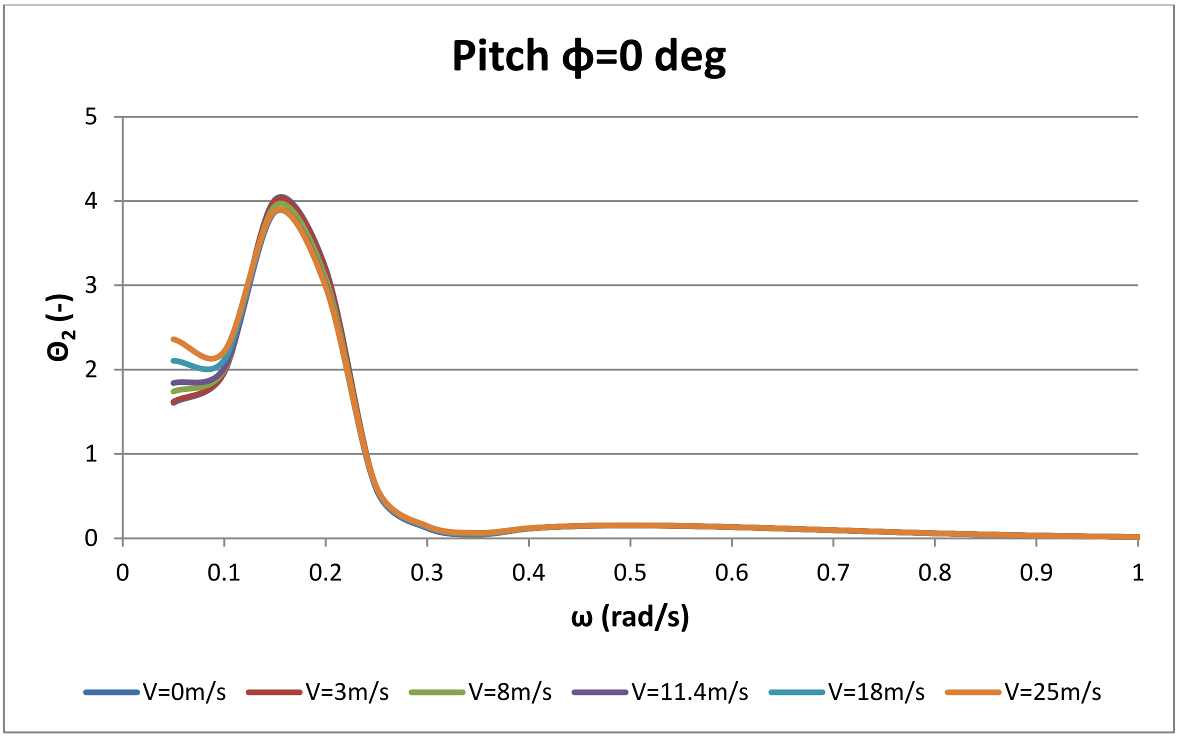


Σχήμα 4.43 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

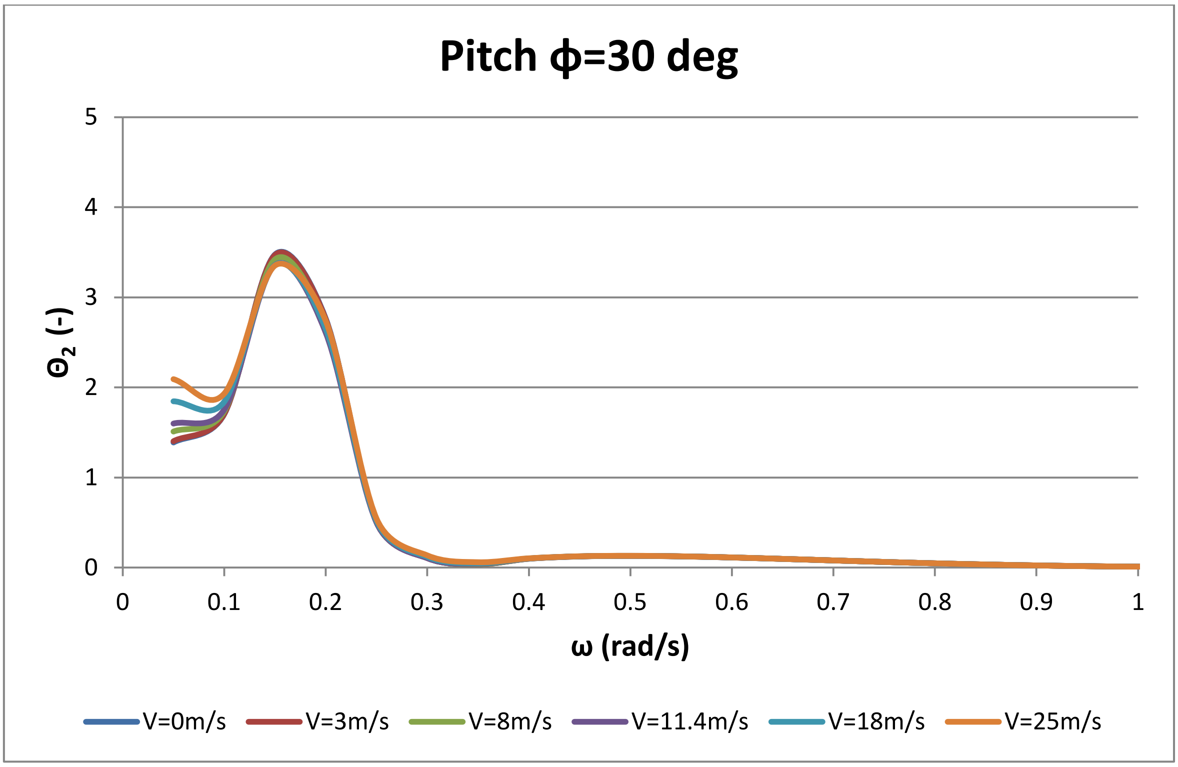
- **<u>Περιστροφή ως προς τον y-άξονα (Pitch)</u>**



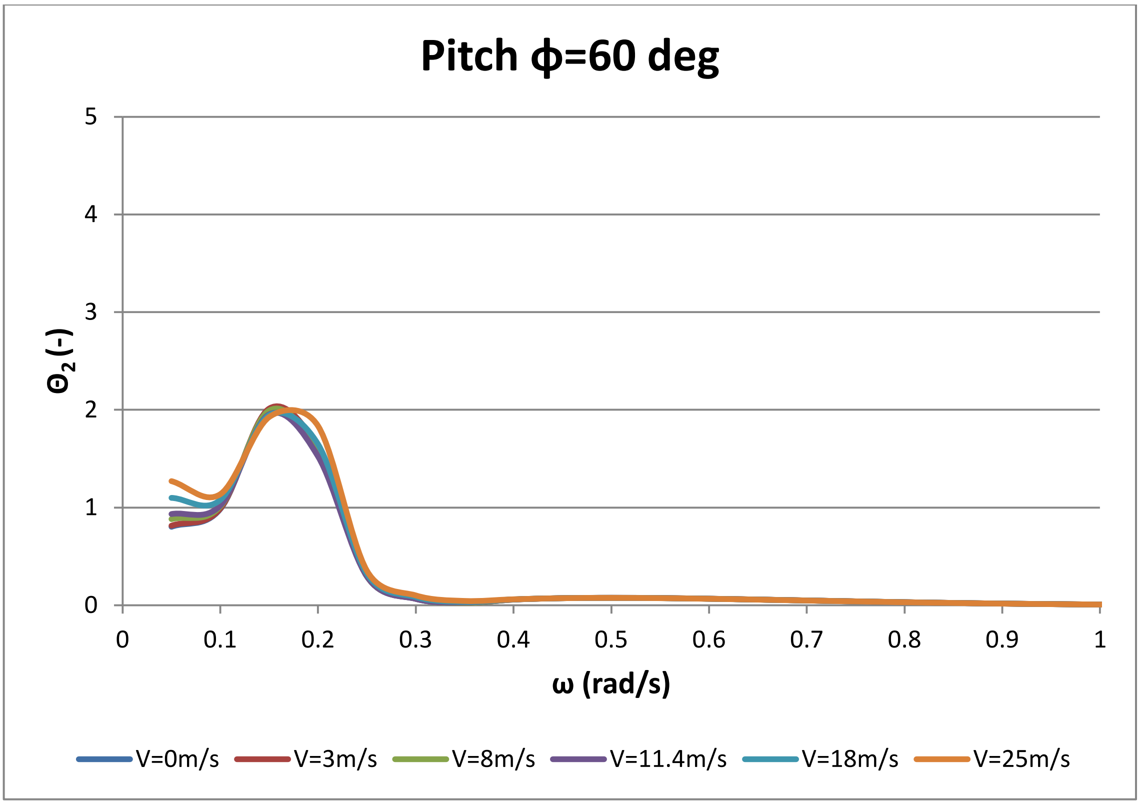
Σχήμα 4.44 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



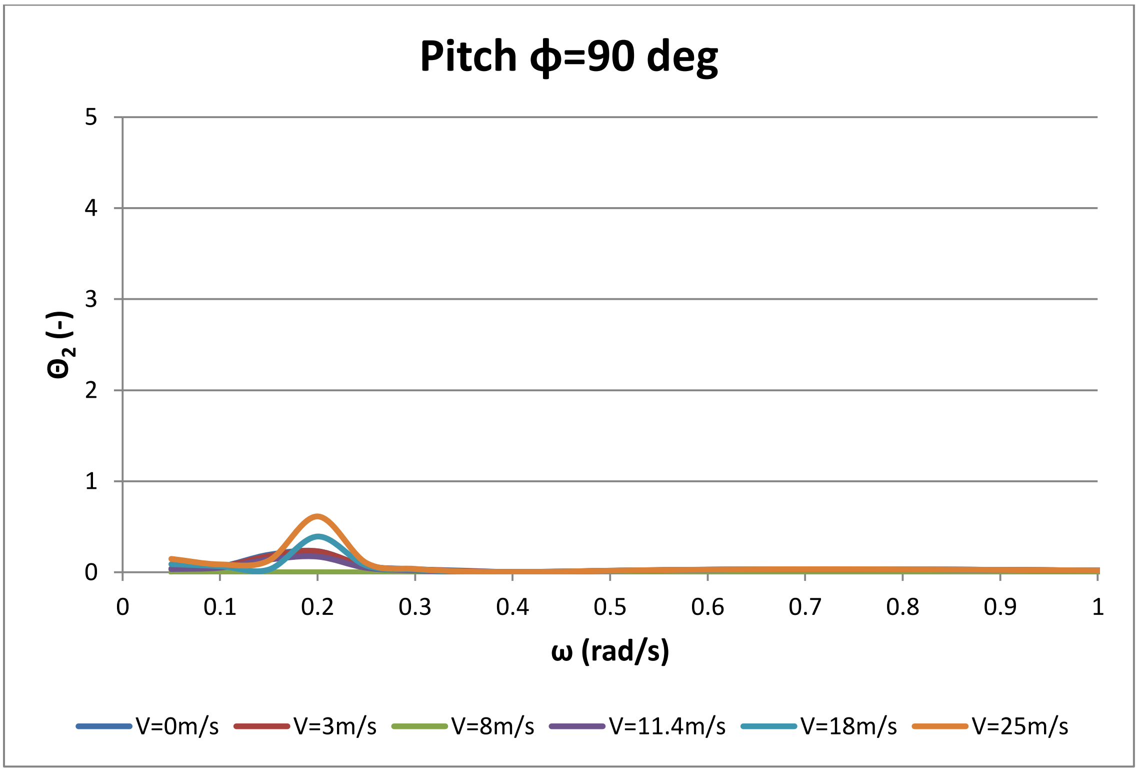
Σχήμα 4.45 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0^{o} και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 4.46 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30^{o} και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

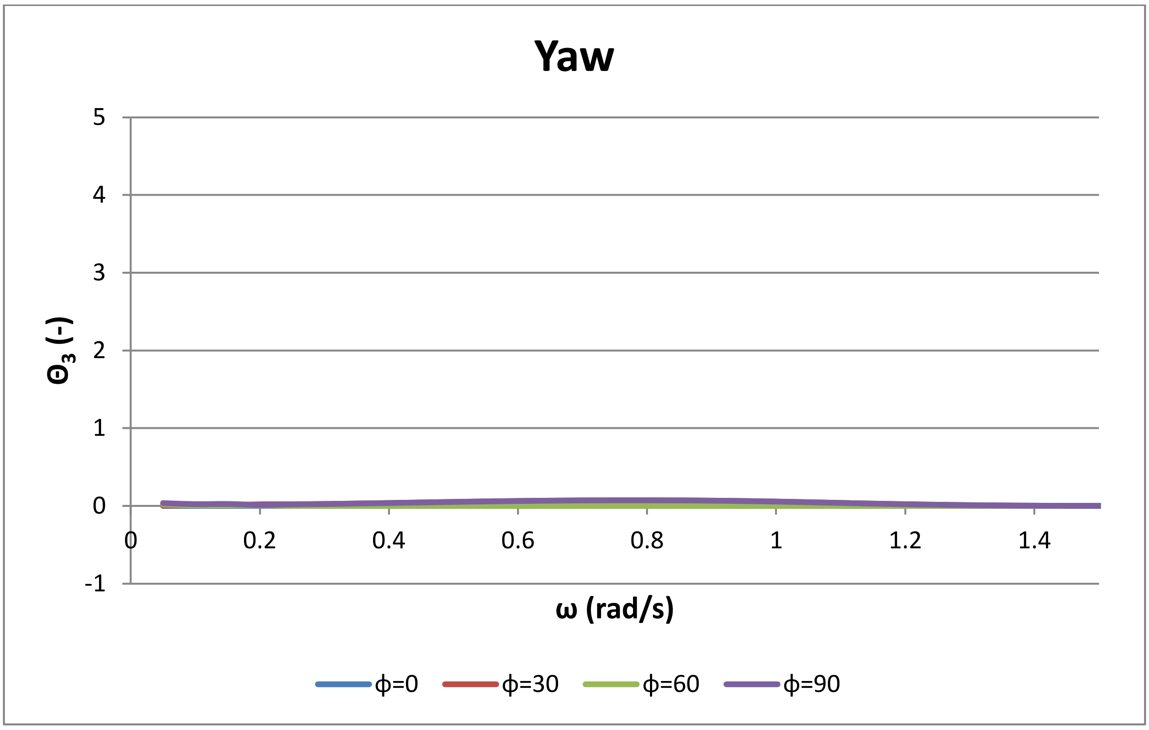


Σχήμα 4.47 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

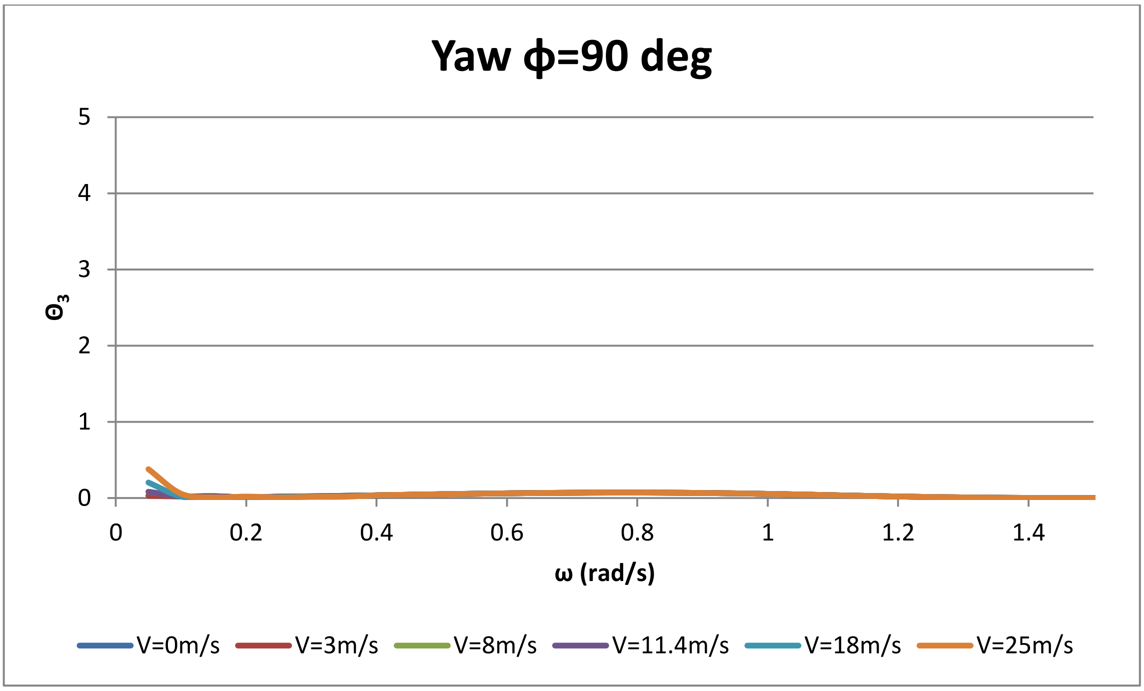


Σχήμα 4.48 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

- **<u>Περιστροφή ως προς τον z-άξονα (Yaw)</u>**



Σχήμα 4.49 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον z άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού.



Σχήμα 4.50 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον z άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου.

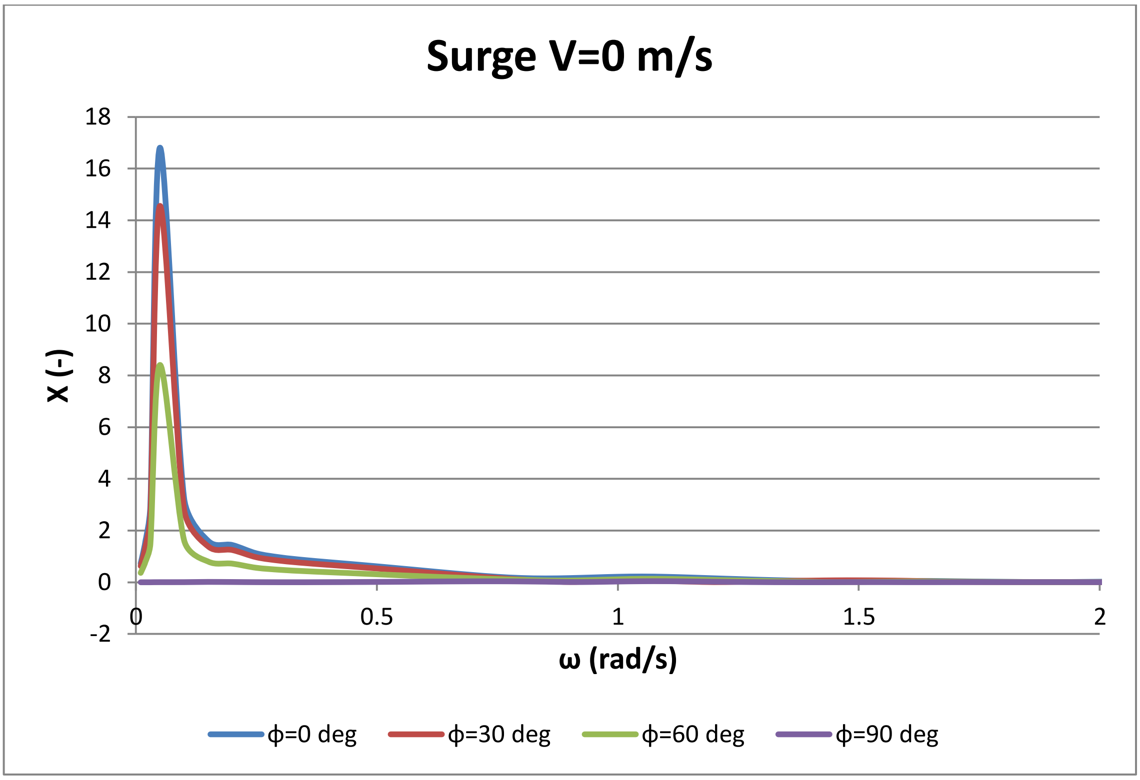
4.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (MOORED STRUCTURE)

Για την ανάλυση της αγκυρωμένης κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία αγκύρωσης που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.4.

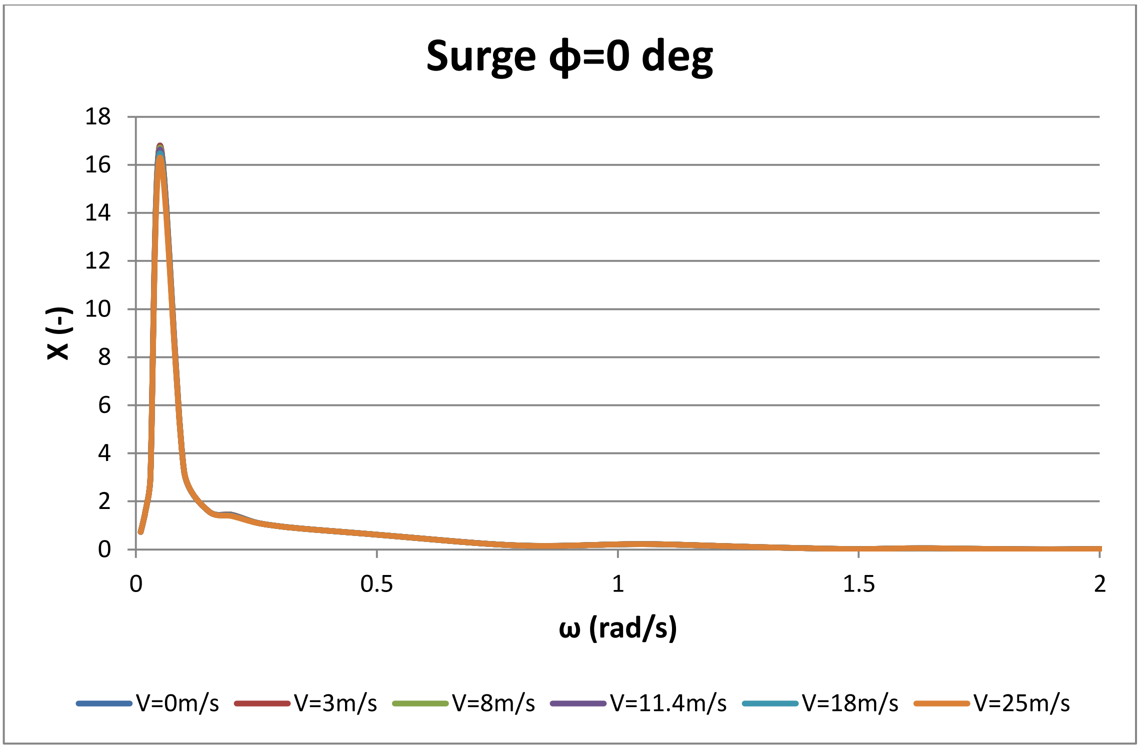
4.2.4.1 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Κάθε κίνηση παριστάνεται, αρχικά σε διάγραμμα στο πεδίο συχνοτήτων για μηδενική ταχύτητα ανέμου και για τις διάφορες γωνίες, και εν συνεχεία για κάθε γωνία, επίσης στο πεδίο συχνοτήτων, και για καθεμία από τις ταχύτητες ανέμου. Για καλύτερη σύγκριση και ανάγνωση των διαγραμμάτων χρησιμοποιούνται ίδιοι κατακόρυφοι άξονες για κάθε κίνηση και ανάλογα προσαρμοσμένοι οριζόντιοι άξονες αντίστοιχα. Έχουμε λοιπόν τα εξής αποτελέσματα:

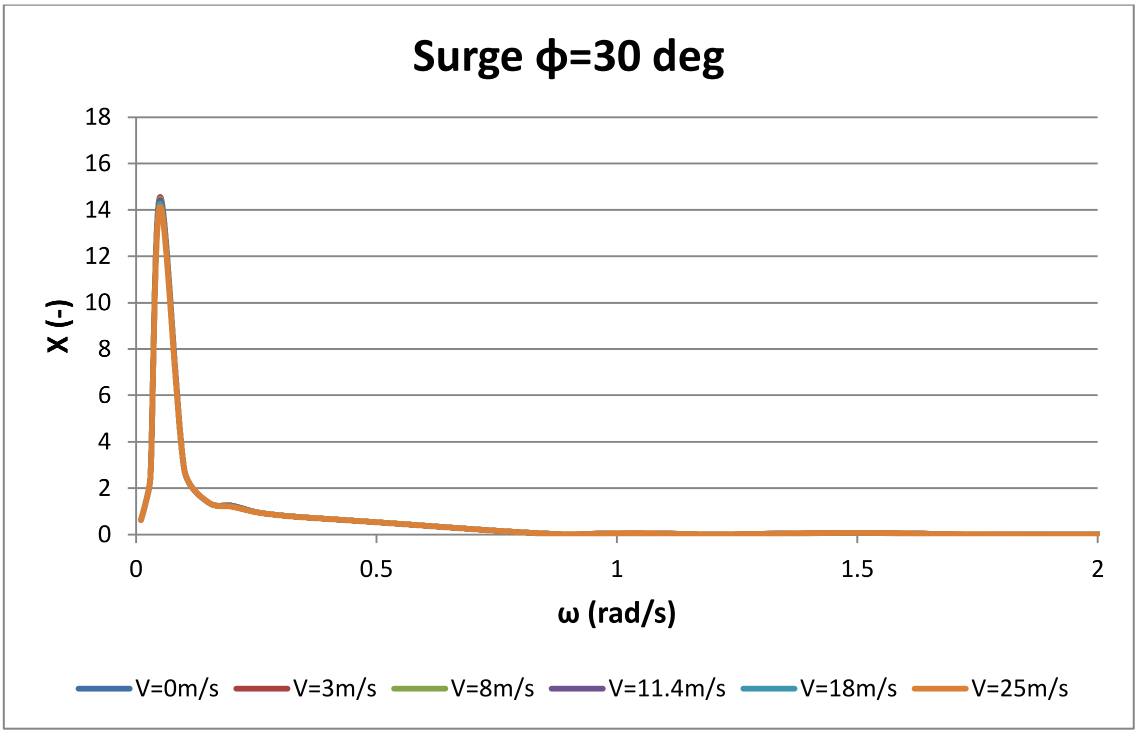
- **<u>Κίνηση στον x- άξονα (Surge)</u>**



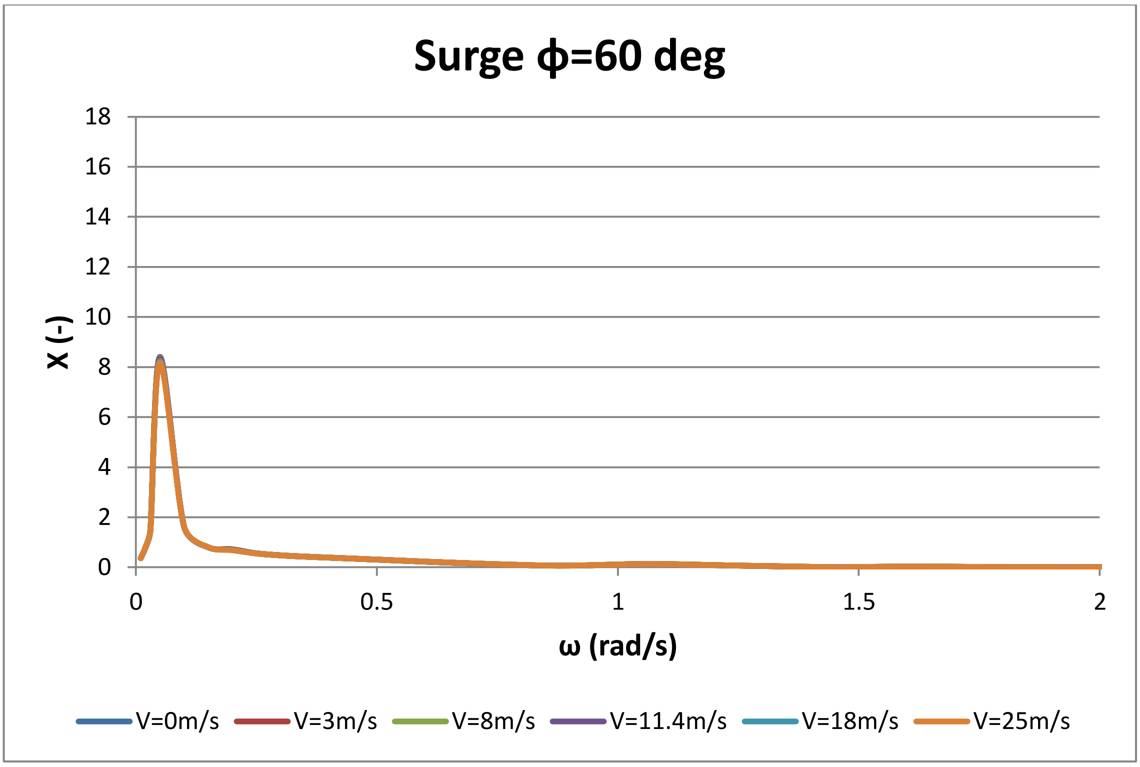
Σχήμα 4.51 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού για την αγκυρωμένη κατασκευή.



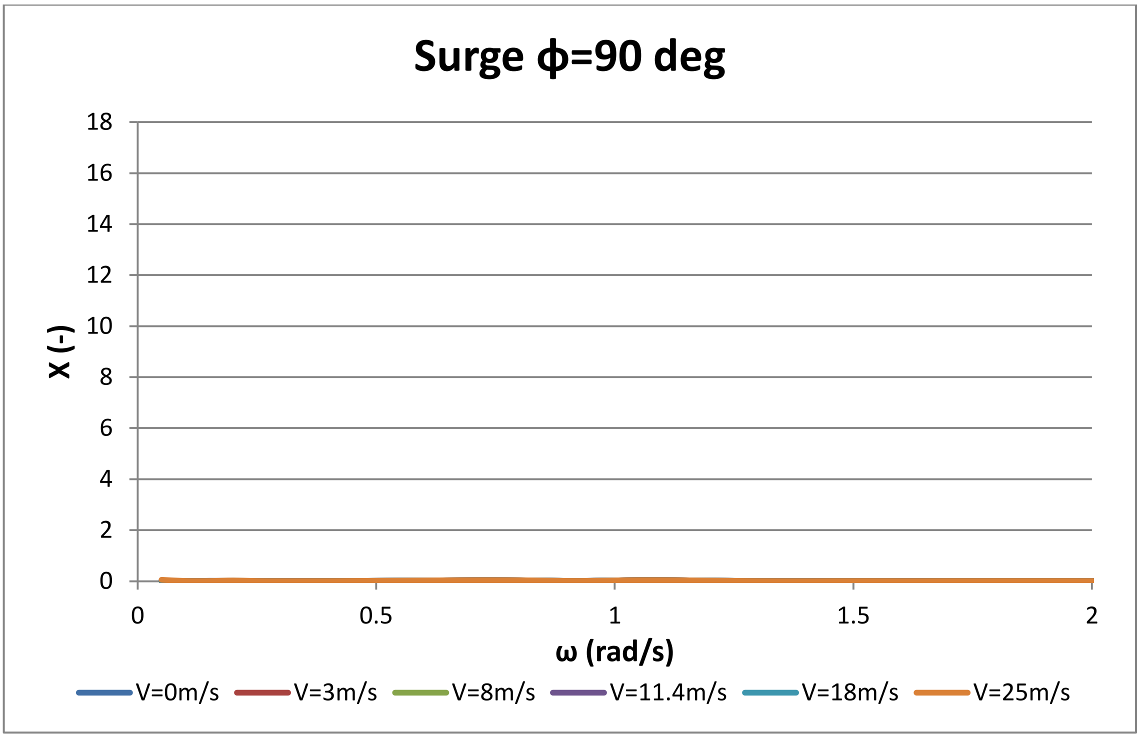
Σχήμα 4.52 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



Σχήμα 4.53 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

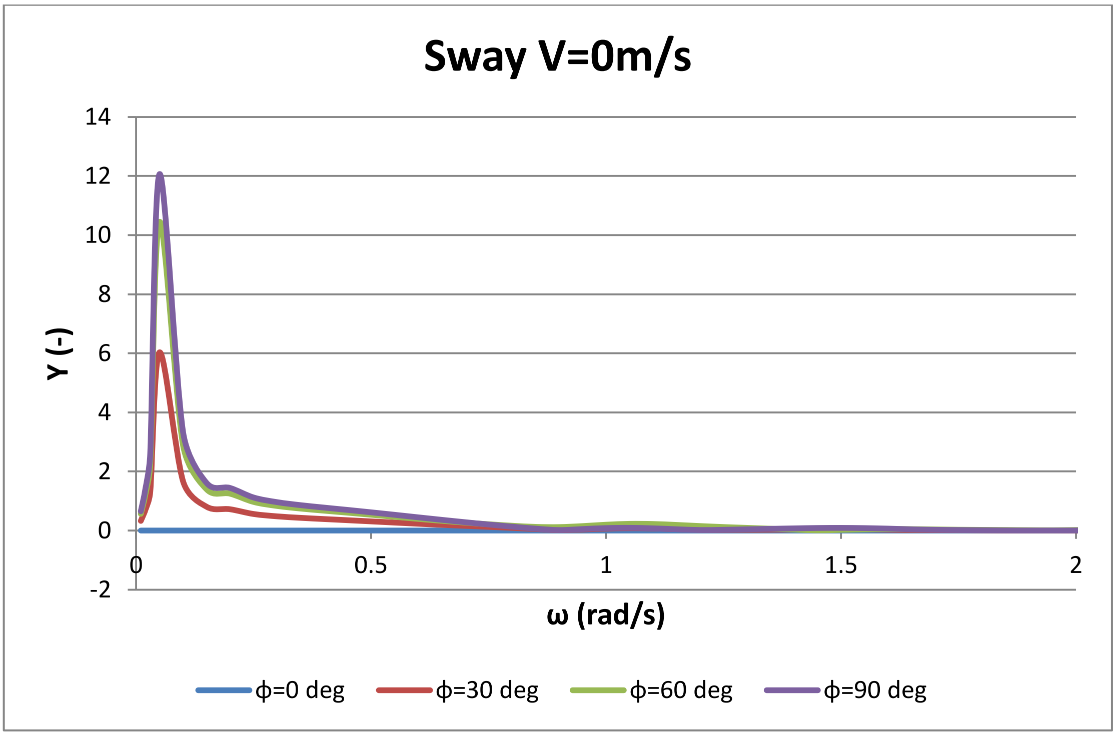


Σχήμα 4.54 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

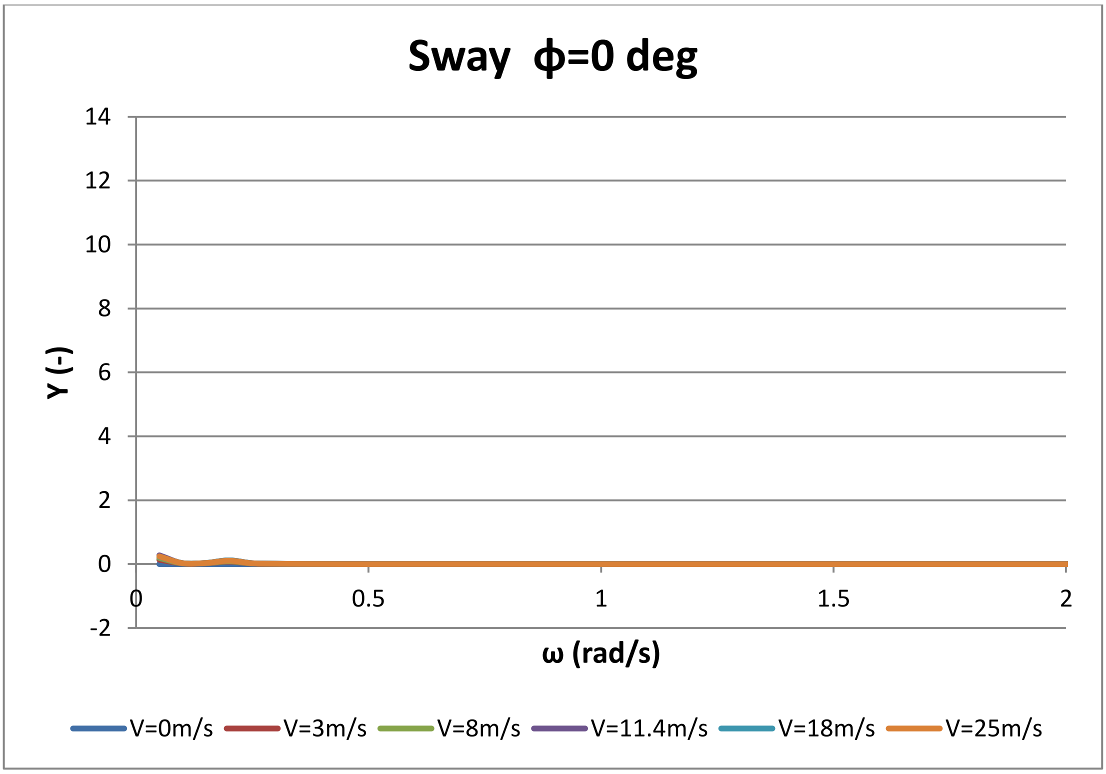


Σχήμα 4.55 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

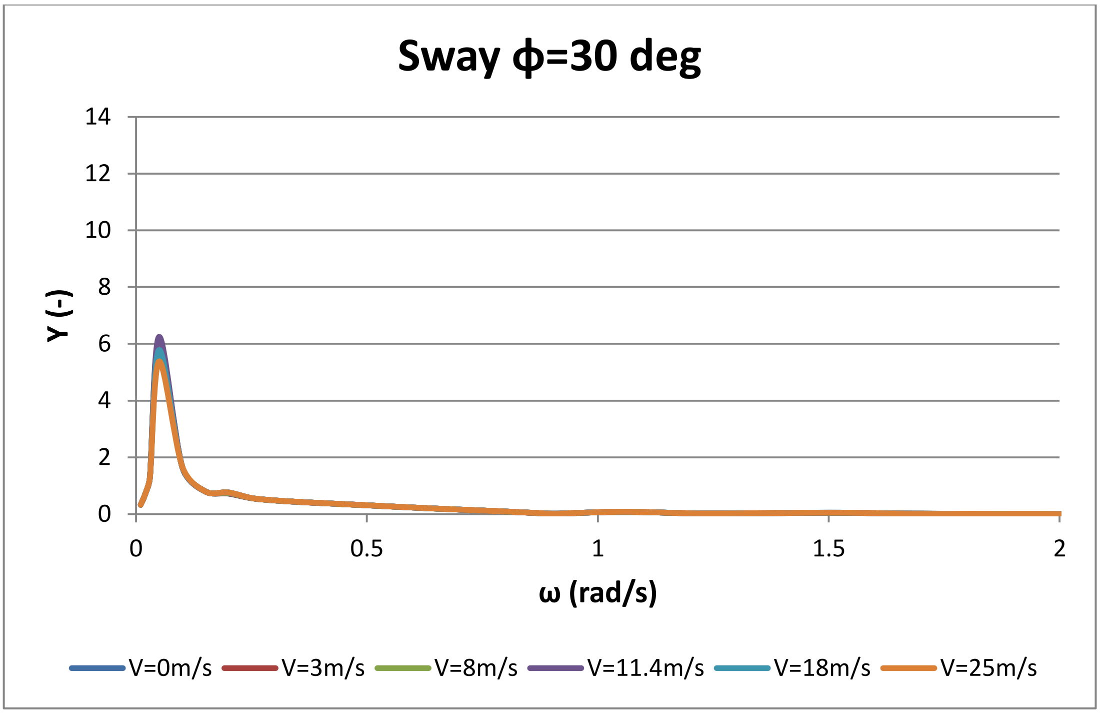
- **<u>Κίνηση στον y-άξονα (Sway)</u>**



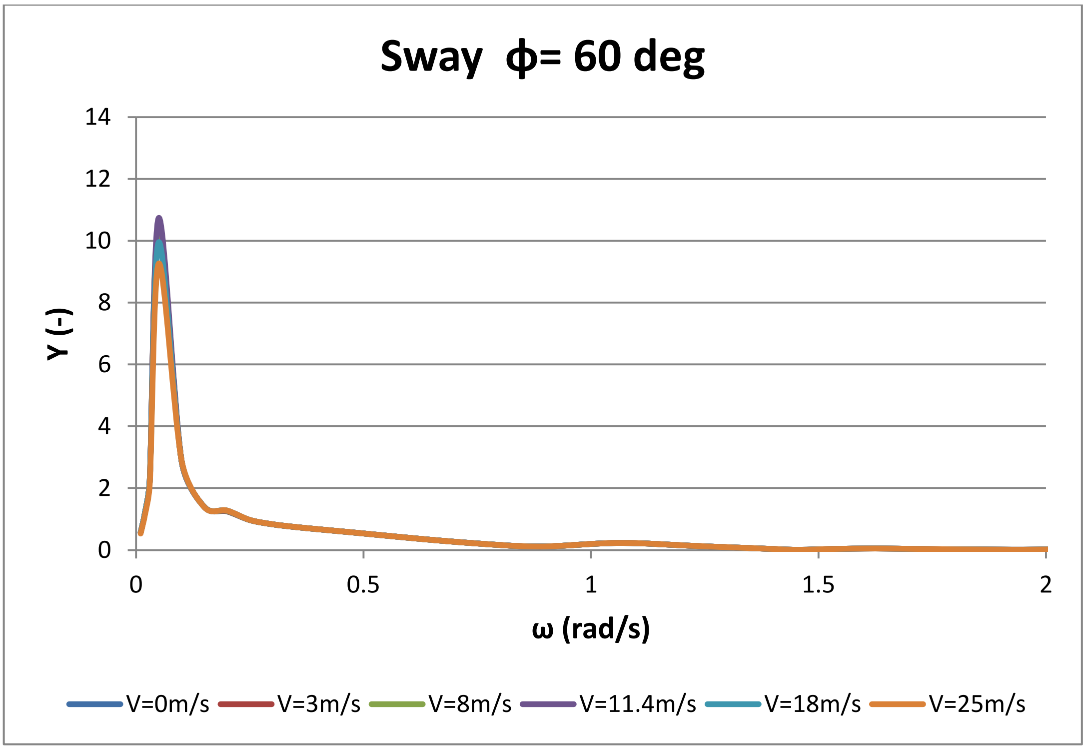
Σχήμα 4.56 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού για την αγκυρωμένη κατασκευή.



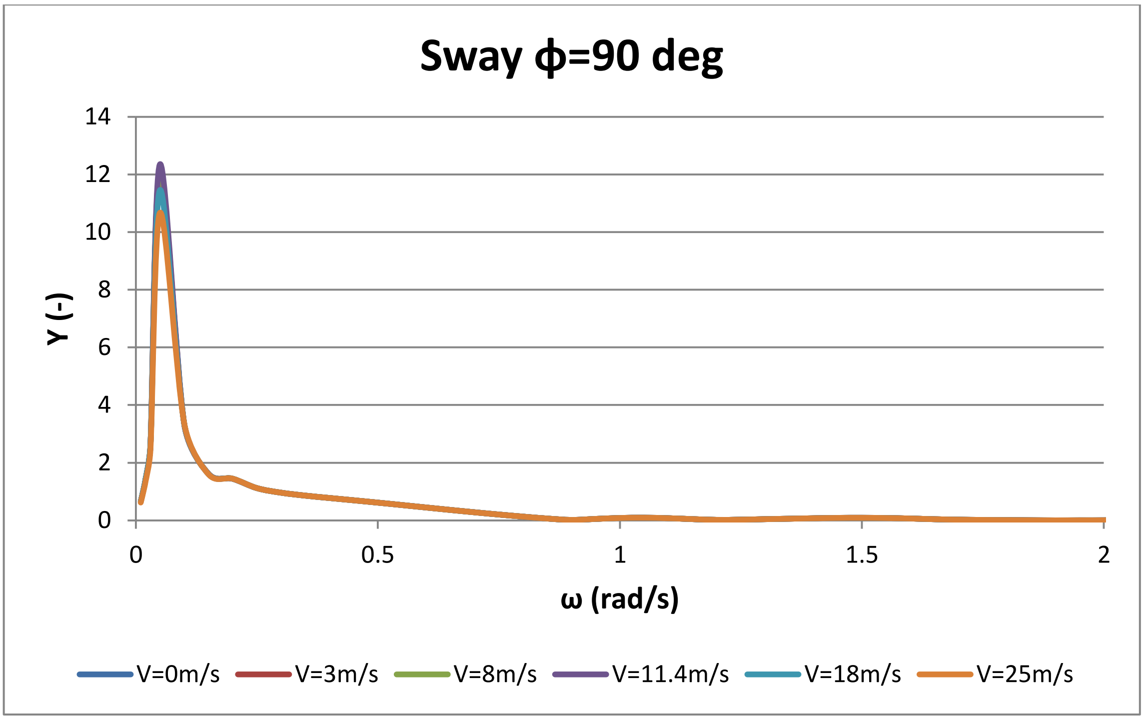
Σχήμα 4.57 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



Σχήμα 4.58 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



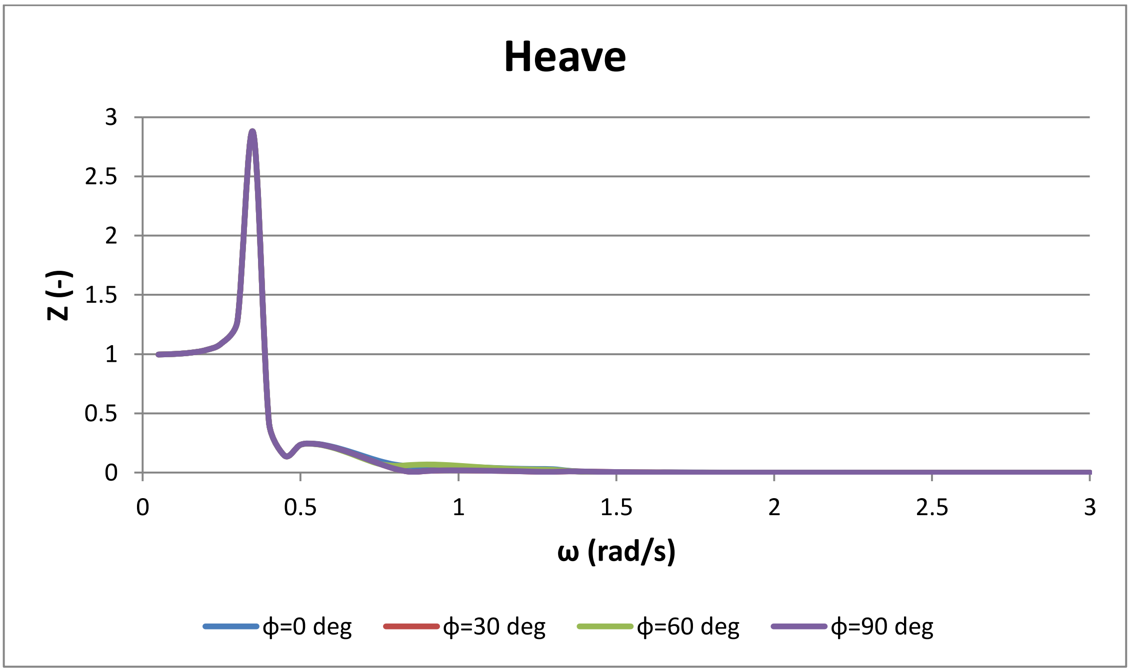
Σχήμα 4.59 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



Σχήμα 4.60 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

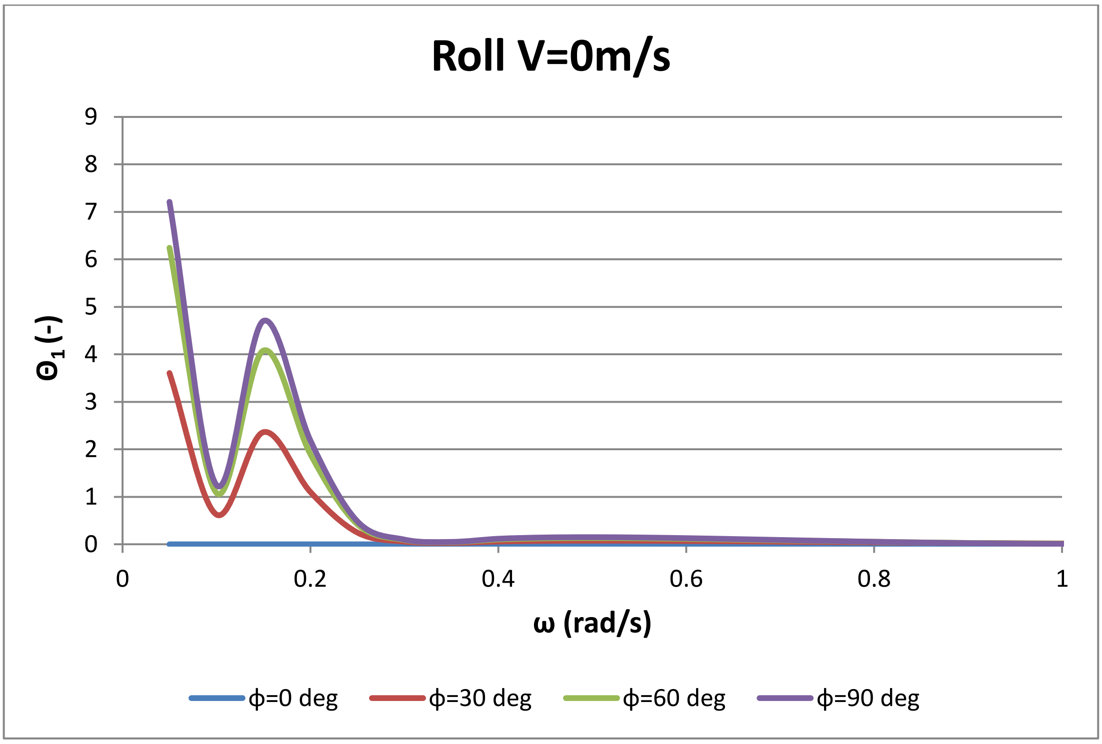
- **<u>Κίνηση στον z-άξονα (Heave)</u>**

Η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα (heave) είναι ίδια ανεξαρτήτως γωνίας και ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου επομένως δίνεται μόνο ένα διάγραμμα σε αυτήν την περίπτωση :

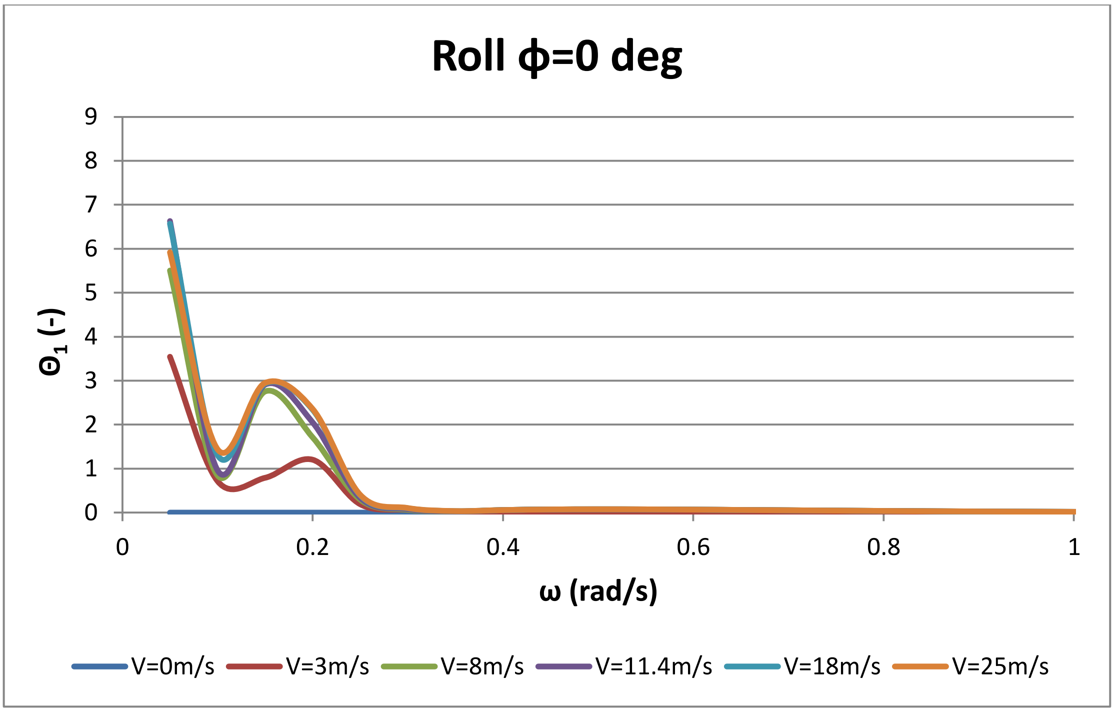


Σχήμα 4.61 Αδιαστατοποιημένη κίνηση στον z άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

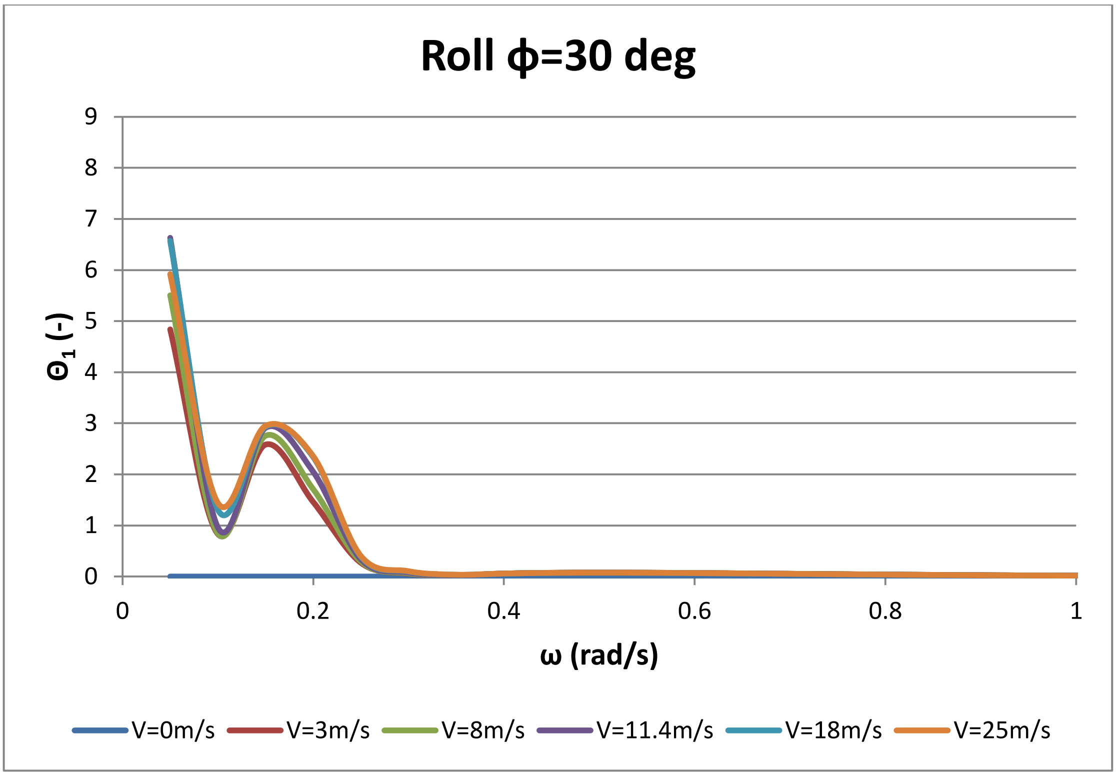
- **<u>Περιστροφή ως προς τον x-άξονα (Roll)</u>**



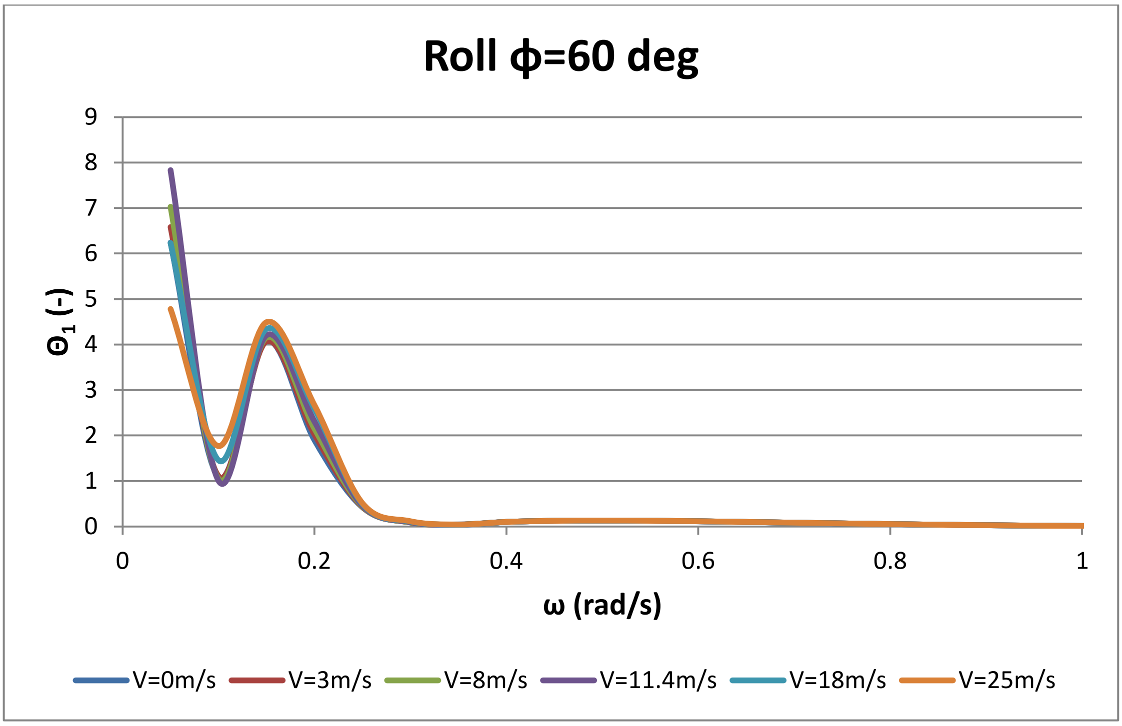
Σχήμα 4.62 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



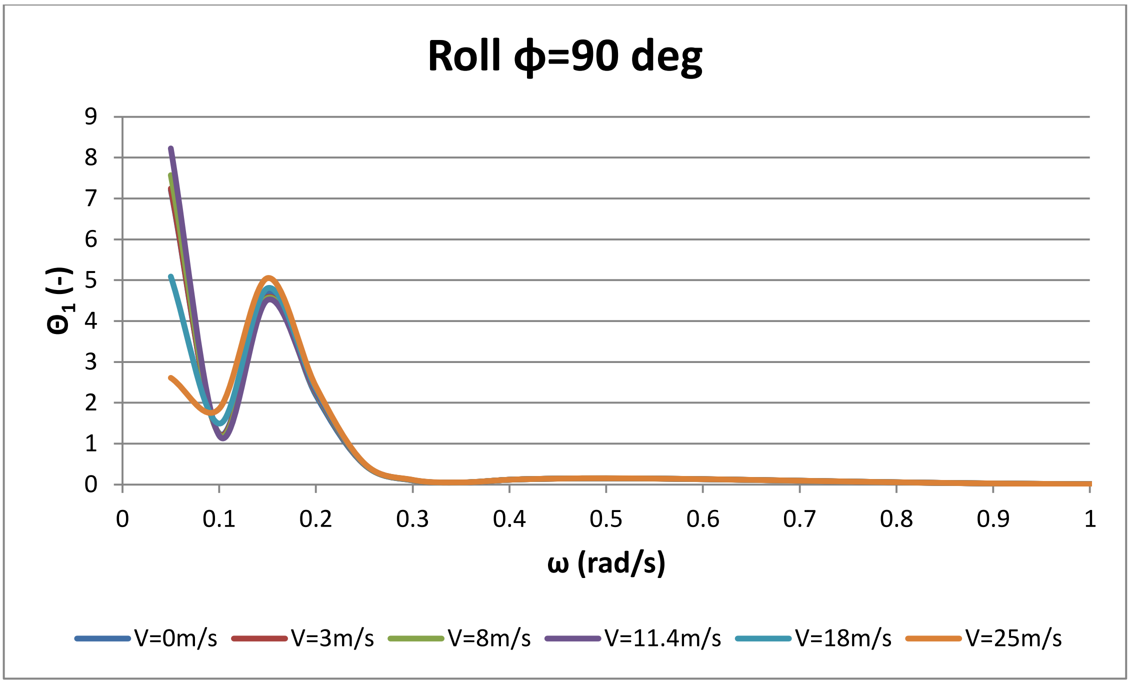
Σχήμα 4.63 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.



Σχήμα 4.64 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

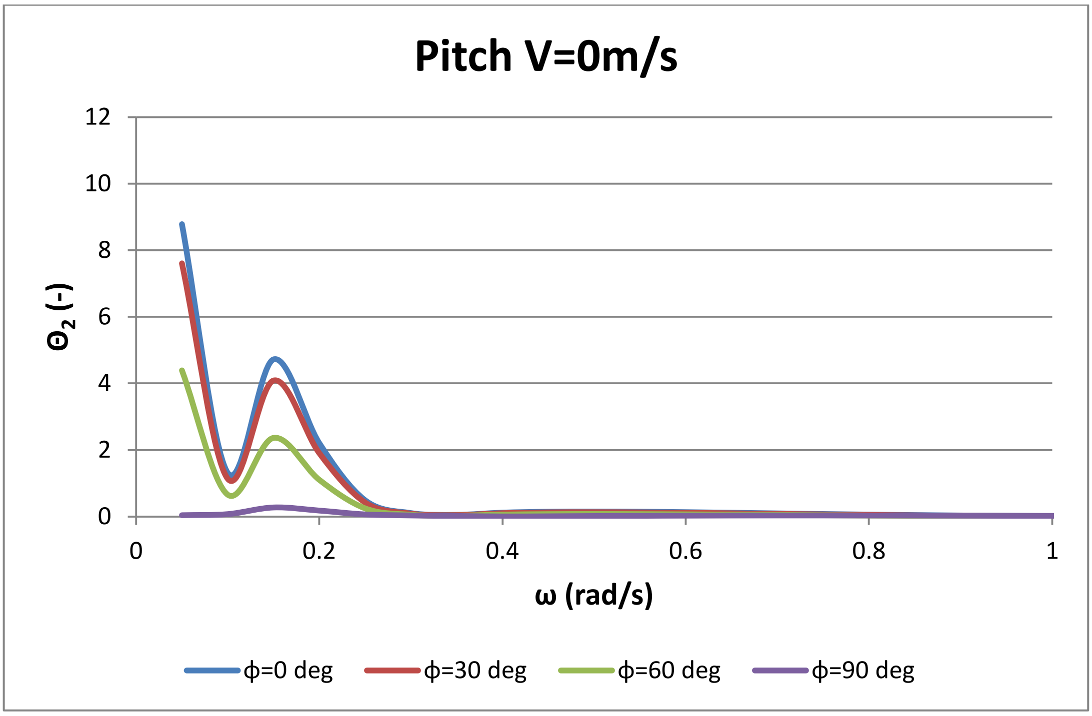


Σχήμα 4.65 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη κατασκευή.

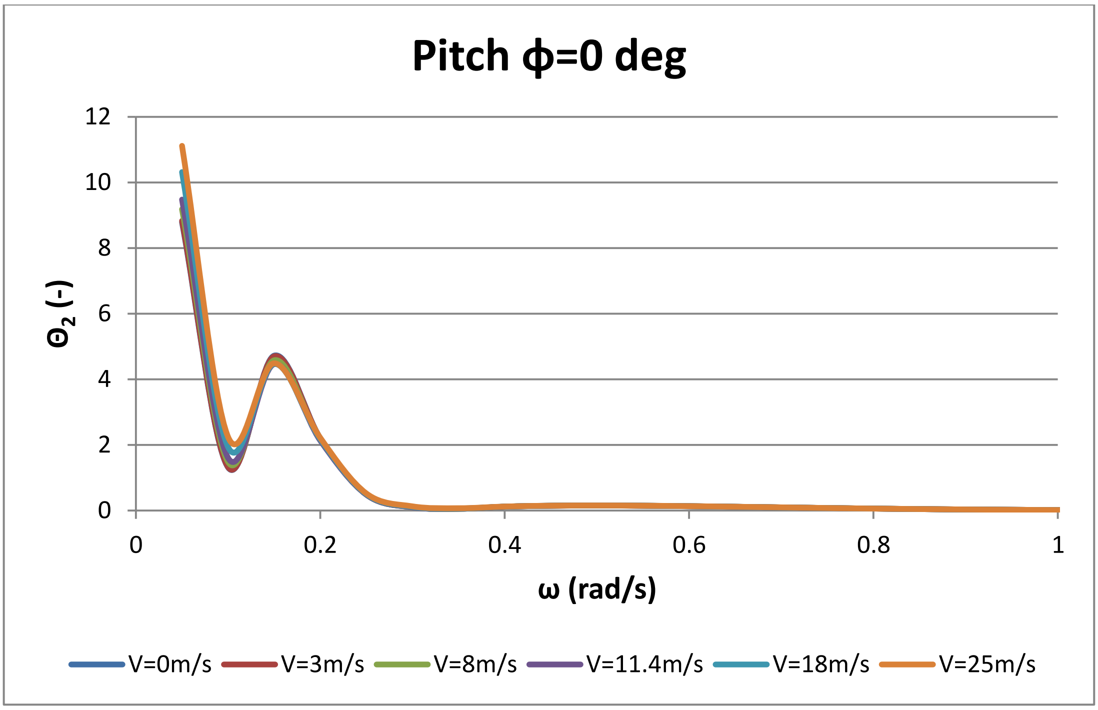


Σχήμα 4.66 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον x άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.

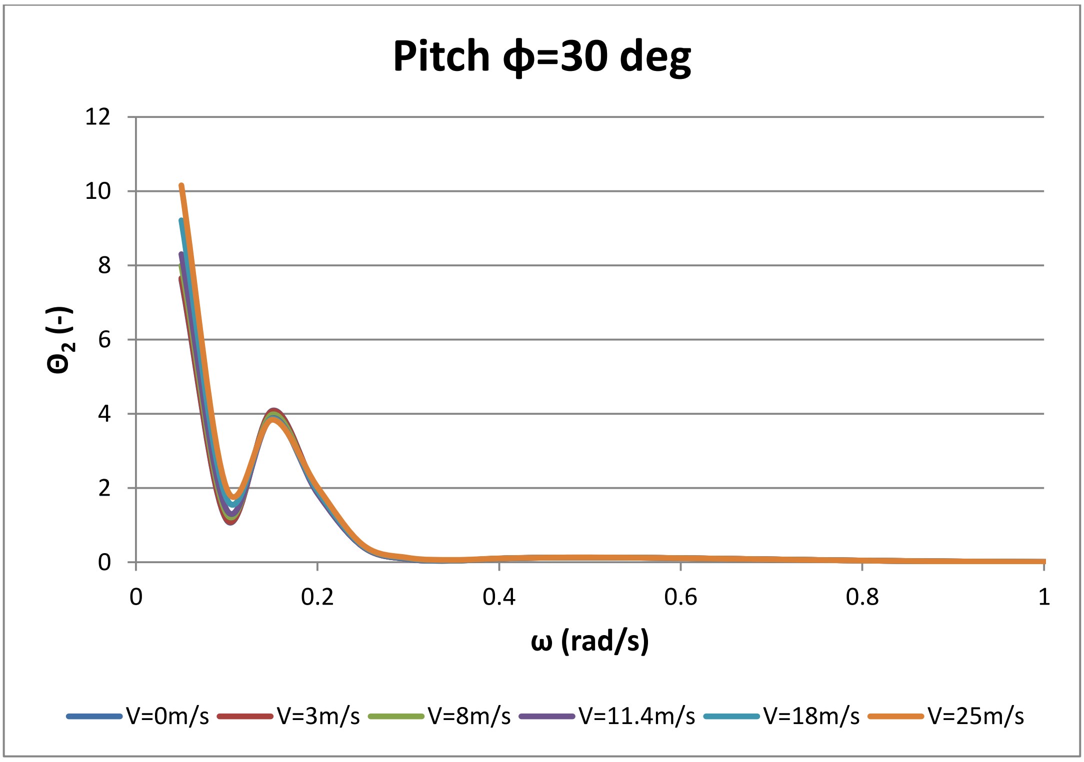
- <u>**Περιστροφή ως προς τον y-άξονα (Pitch)**</u>



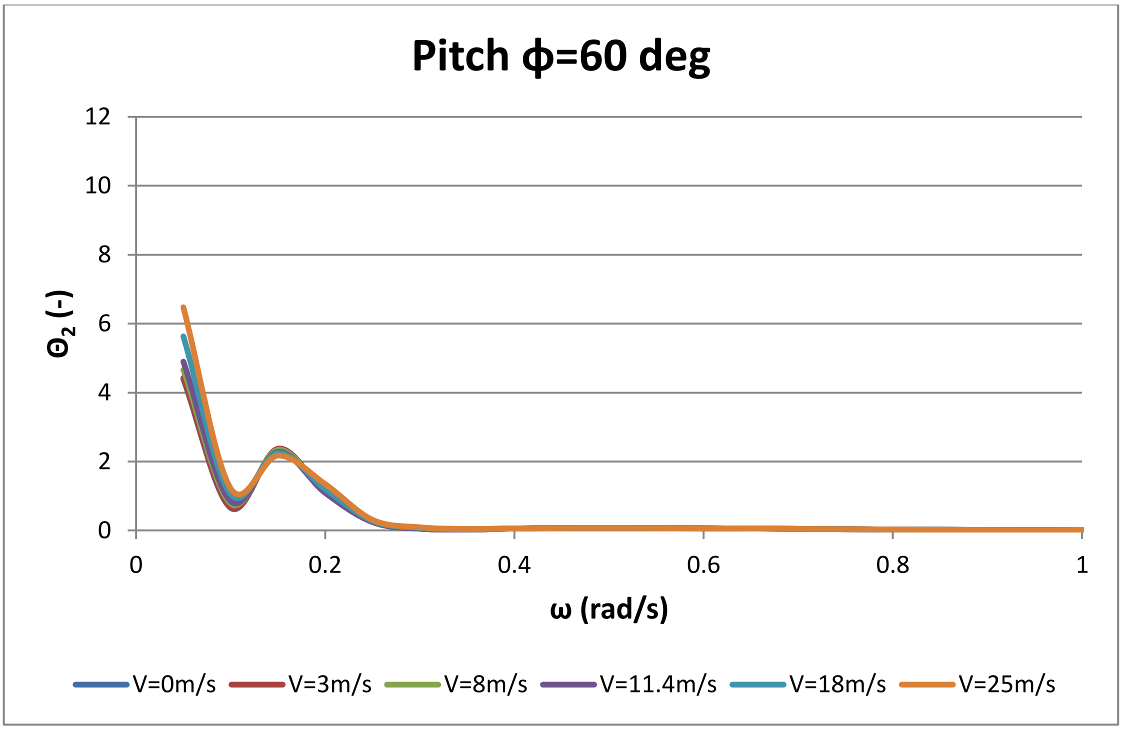
Σχήμα 4.67 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης του κυματισμού, για την αγκυρωμένη κατασκευή.



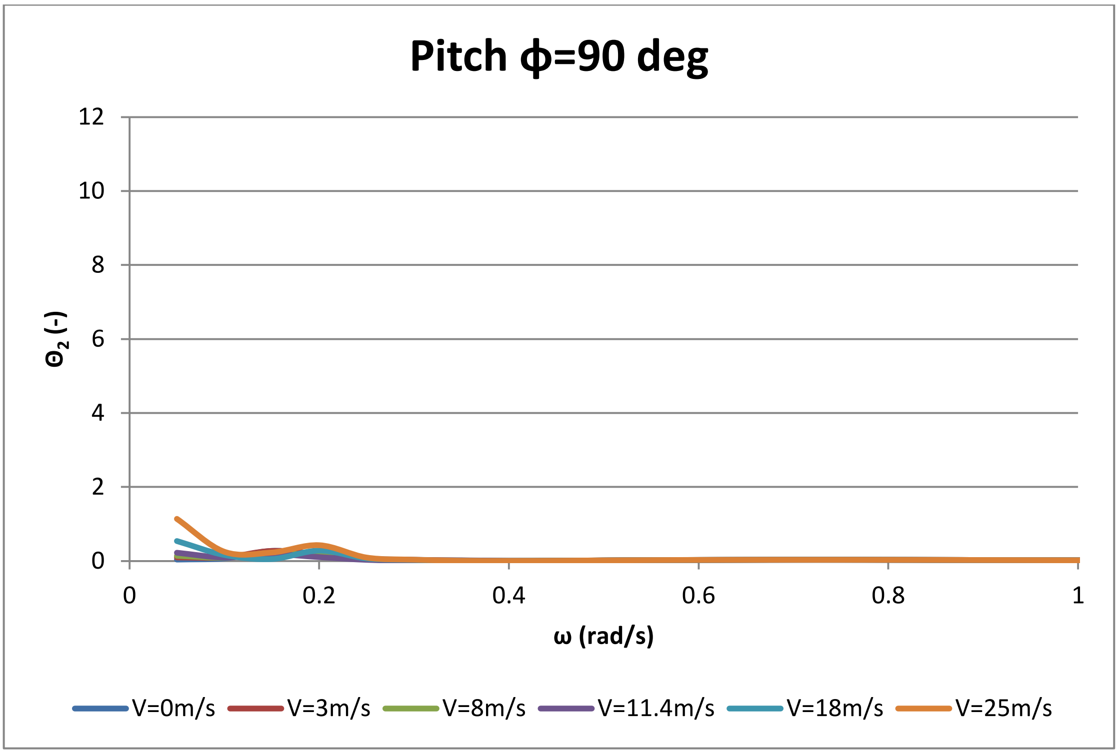
Σχήμα 4.68 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.



Σχήμα 4.69 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.



Σχήμα 4.70 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.

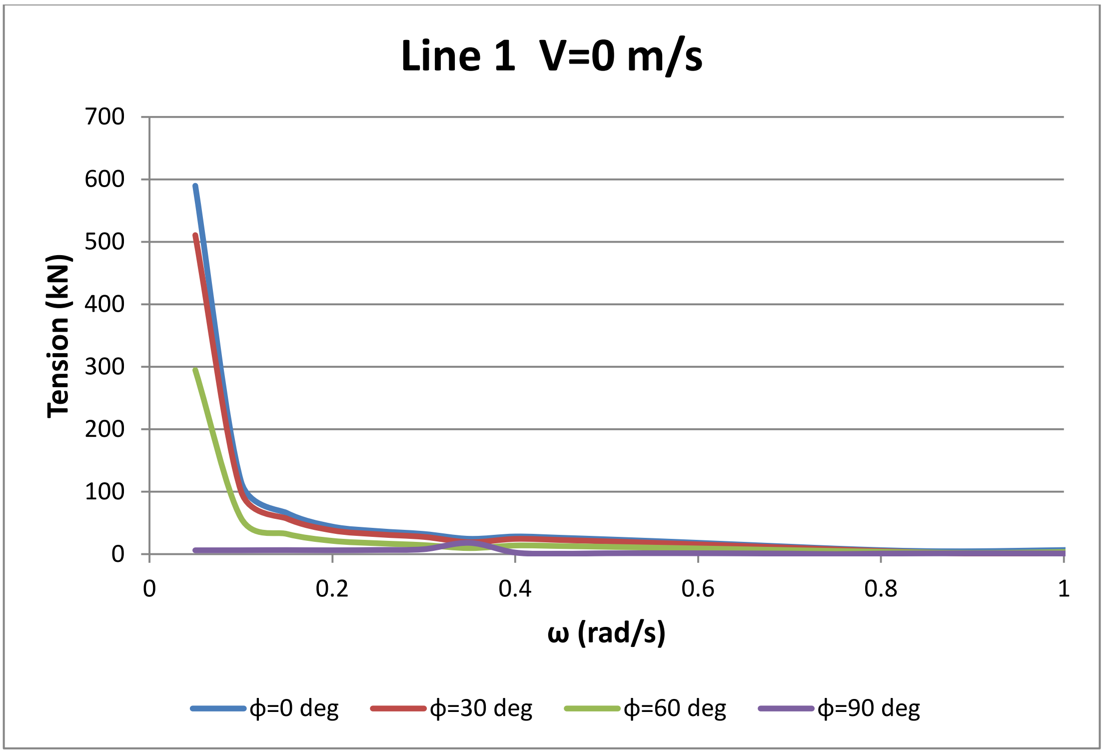


Σχήμα 4.71 Αδιαστατοποιημένη περιστροφή ως προς τον y άξονα στο πεδίο συχνοτήτων για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για τις διάφορες ταχύτητες του ανέμου, για την αγκυρωμένη καταστκευή.

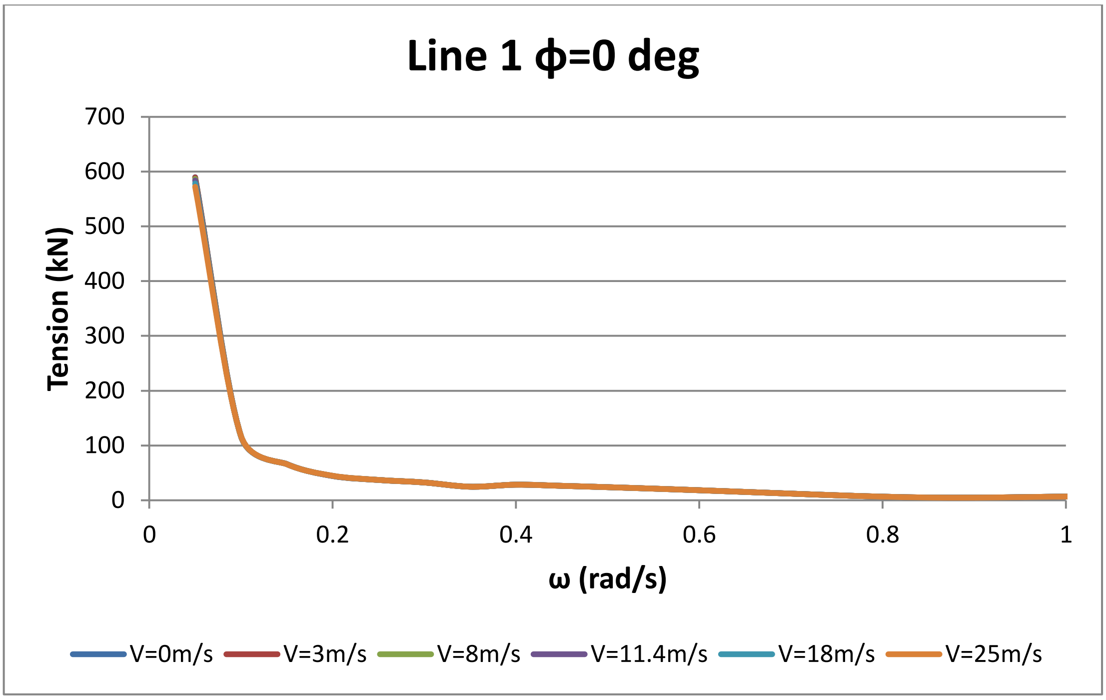
4.2.4.2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ (TENSIONS)

Σύμφωνα με το σύστημα αγκύρωσης που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4, υπολογίζονται οι τάσεις στις γραμμές αγκύρωσης 1, 2 και 3, όπου η γραμμή 1 είναι εκείνη που βρίσκεται πάνω στον άξονα x (line 1: x=-28.87m , y=0m, z=-14m), γραμμή 2 είναι εκείνη που βρίσκεται 120^o από τη γραμμή 1 και βρίσκεται στα θετικά του άξονα y (line 2: x=14.43m , y=25m, z=-14m), ενώ γραμμή 3 είναι αυτή που βρίσκεται στα αρνητικά y και 120^o από τη γραμμή 2 (line 3: x=14.43m , y=-25m, z=-14m) (βλ. Σχήμα 3.1 και 3.2). Έχουμε, λοιπόν, τα εξής αποτελέσματα:

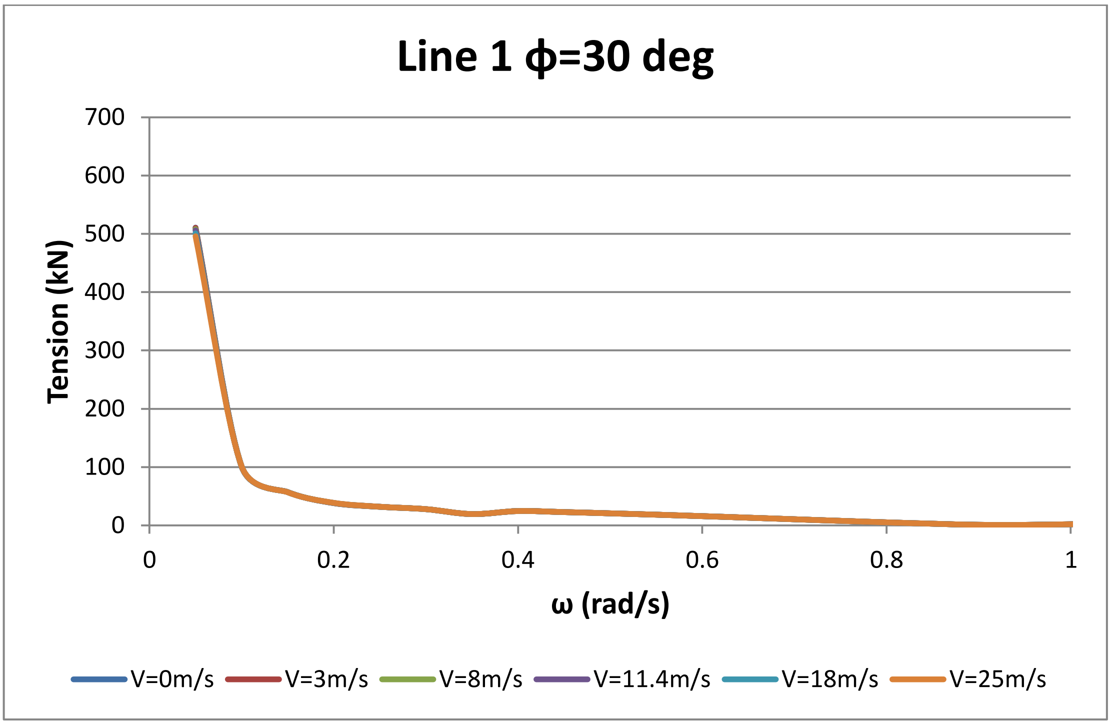
<u>Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1</u>



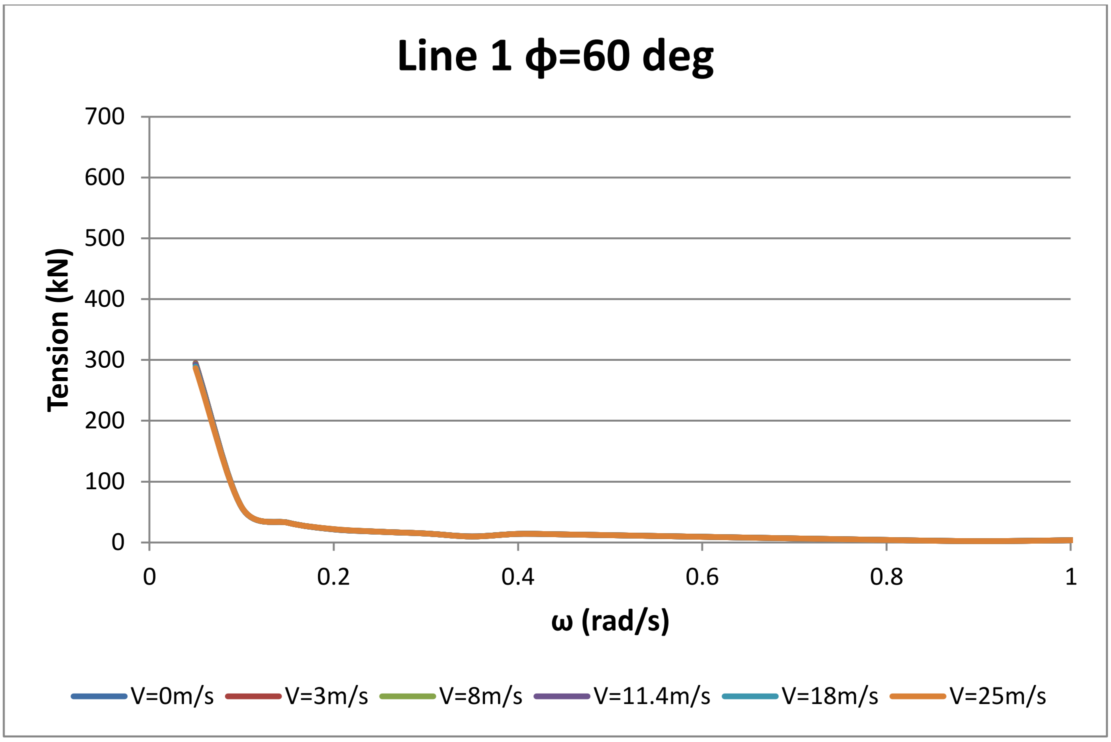
Σχήμα 4.72 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1 για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και για μηδενική ταχύτητα ανέμου.



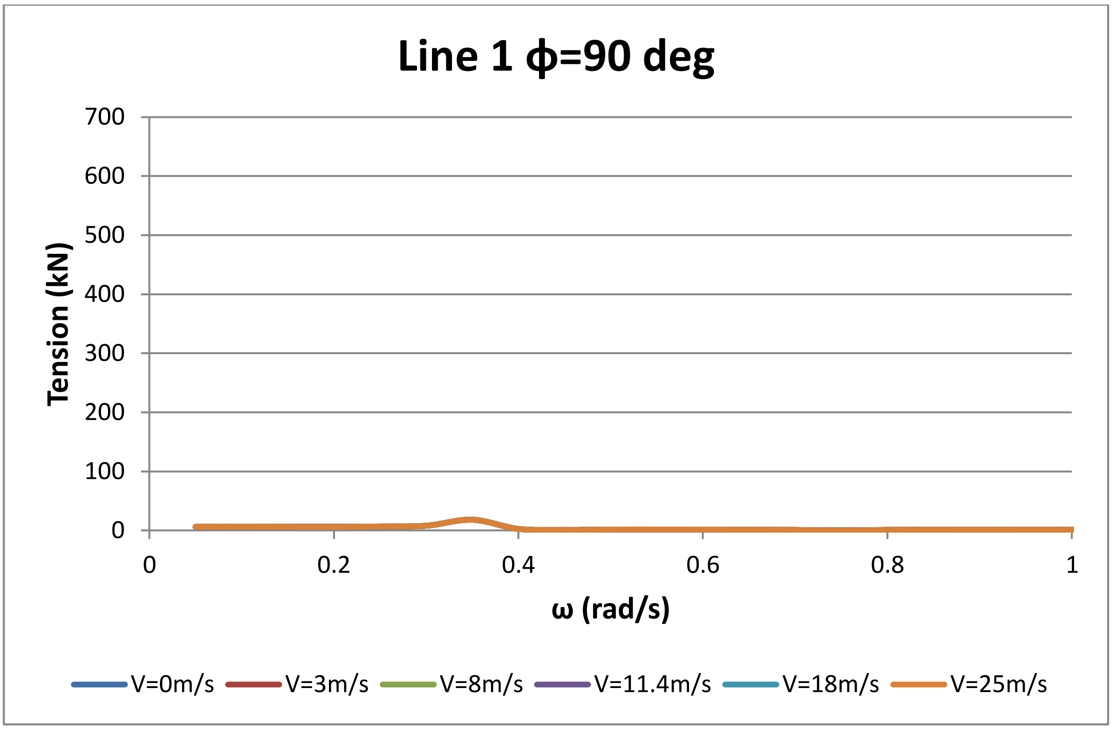
Σχήμα 4.73 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 4.74 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

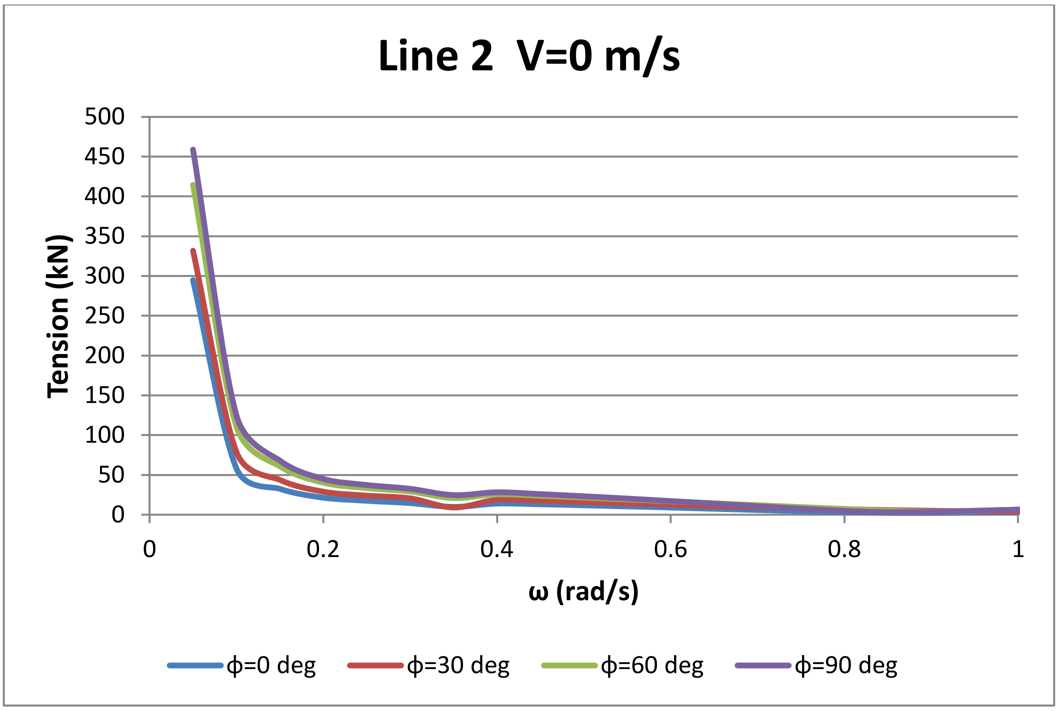


Σχήμα 4.75 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60^o και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

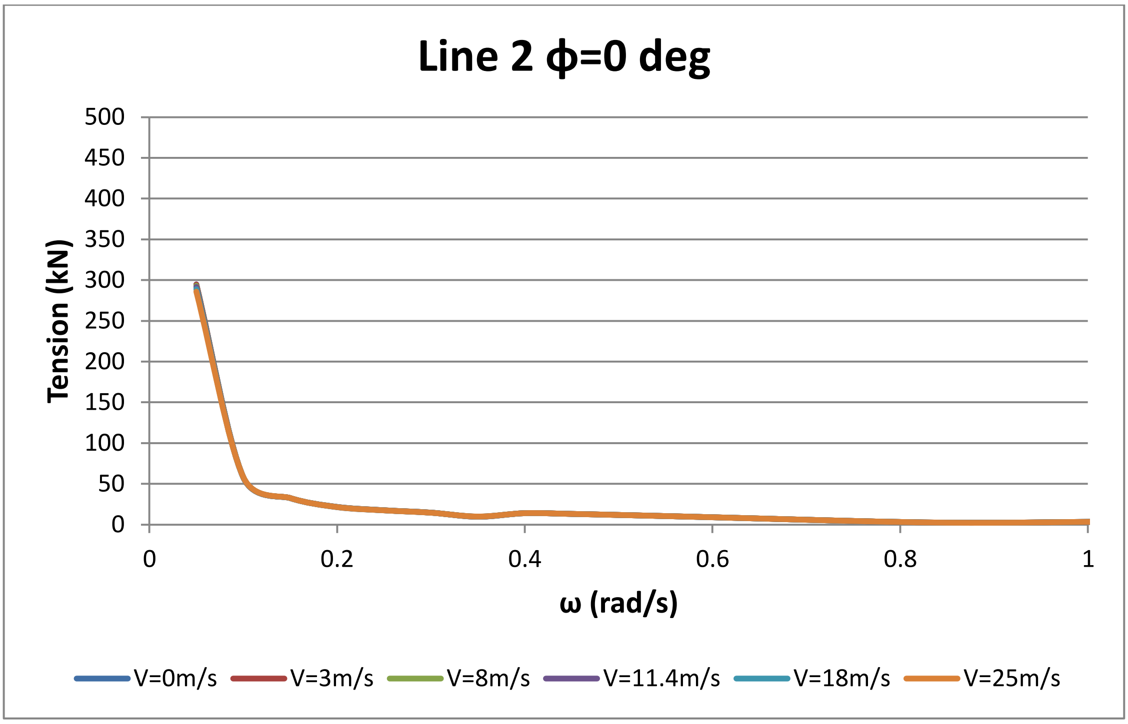


Σχήμα 4.76 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 1 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90^o και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

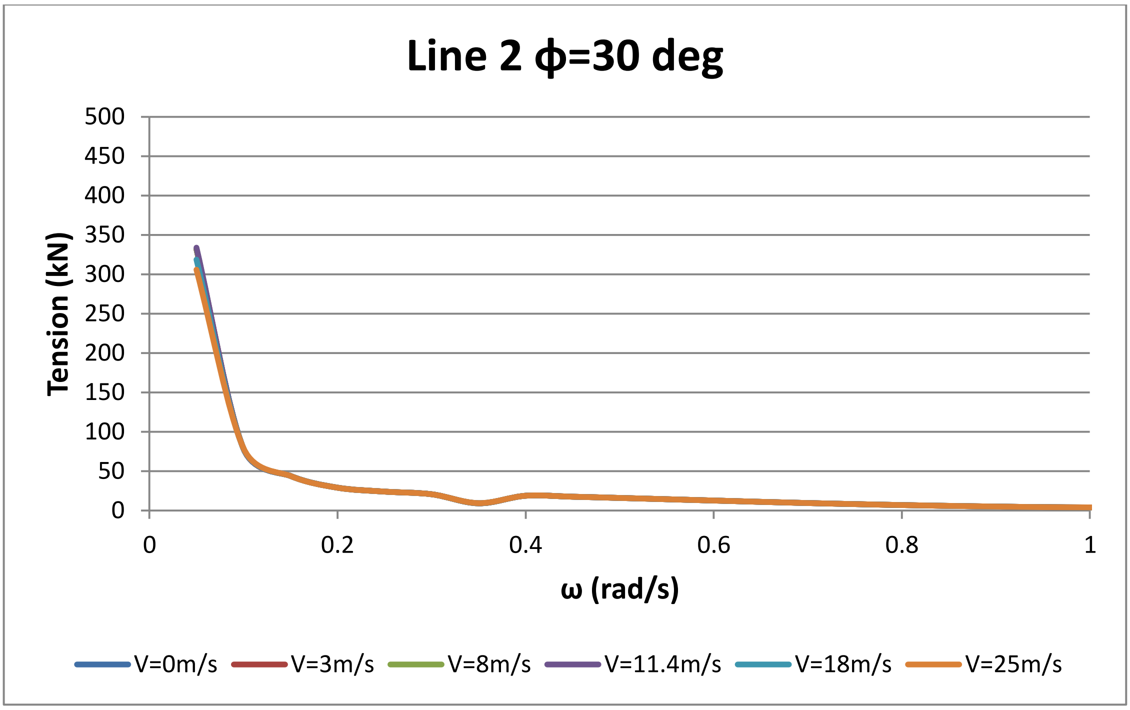
Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2



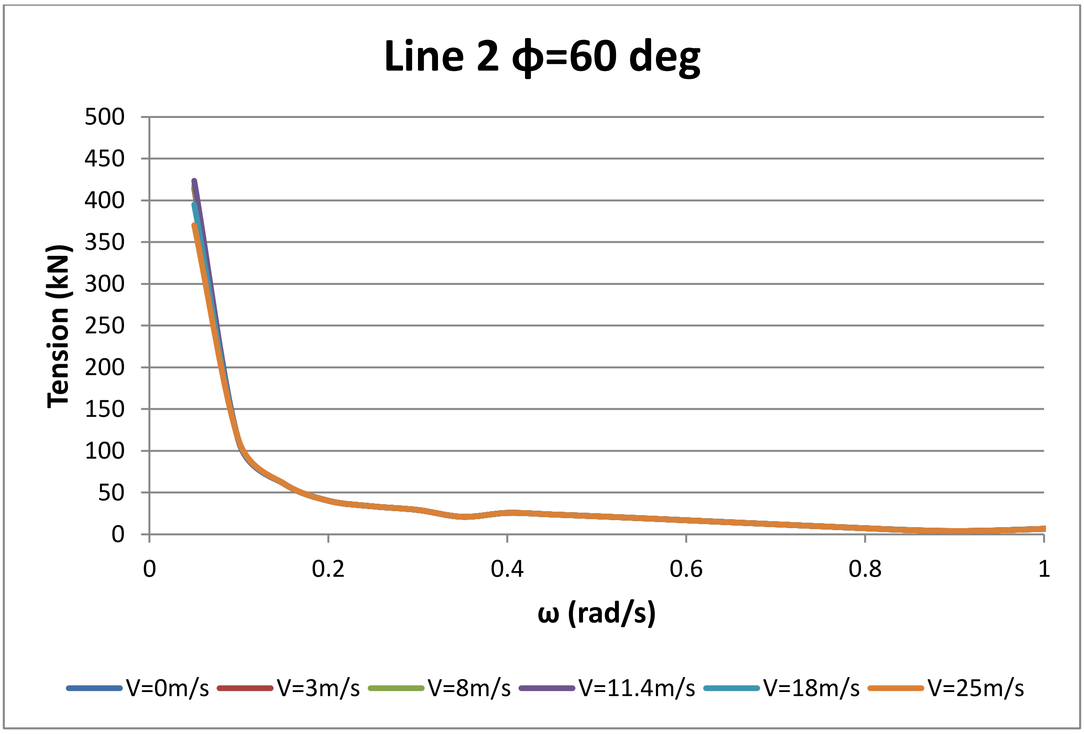
Σχήμα 4.77 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και για μηδενική ταχύτητα ανέμου.



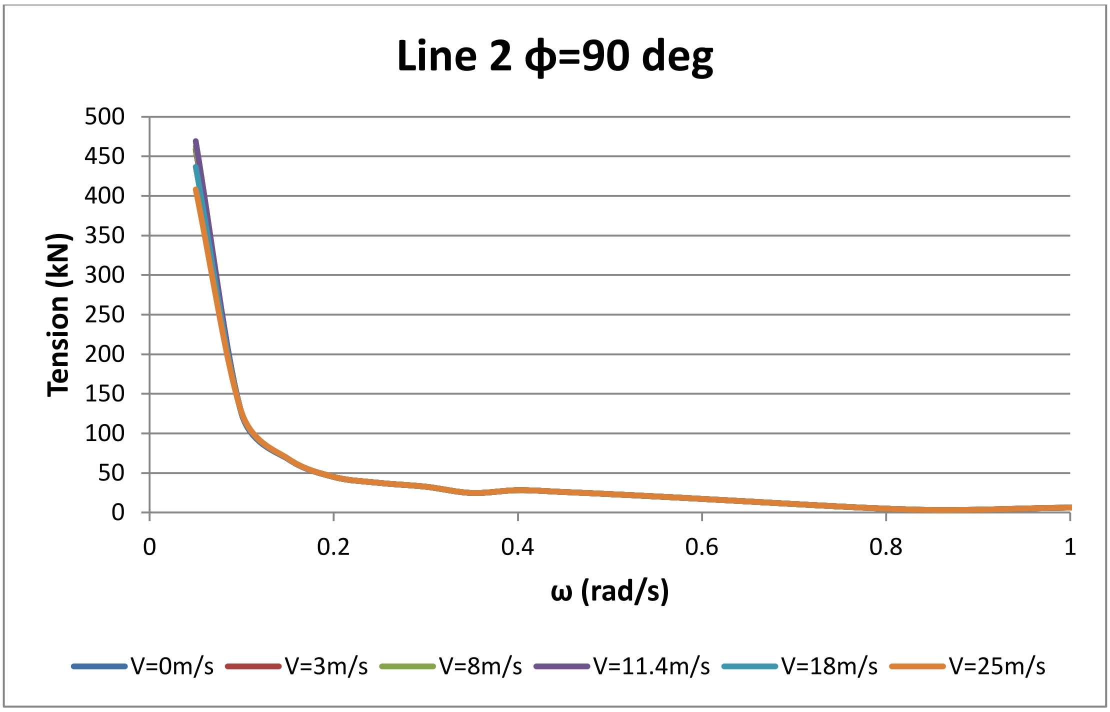
Σχήμα 4.78 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 4.79 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

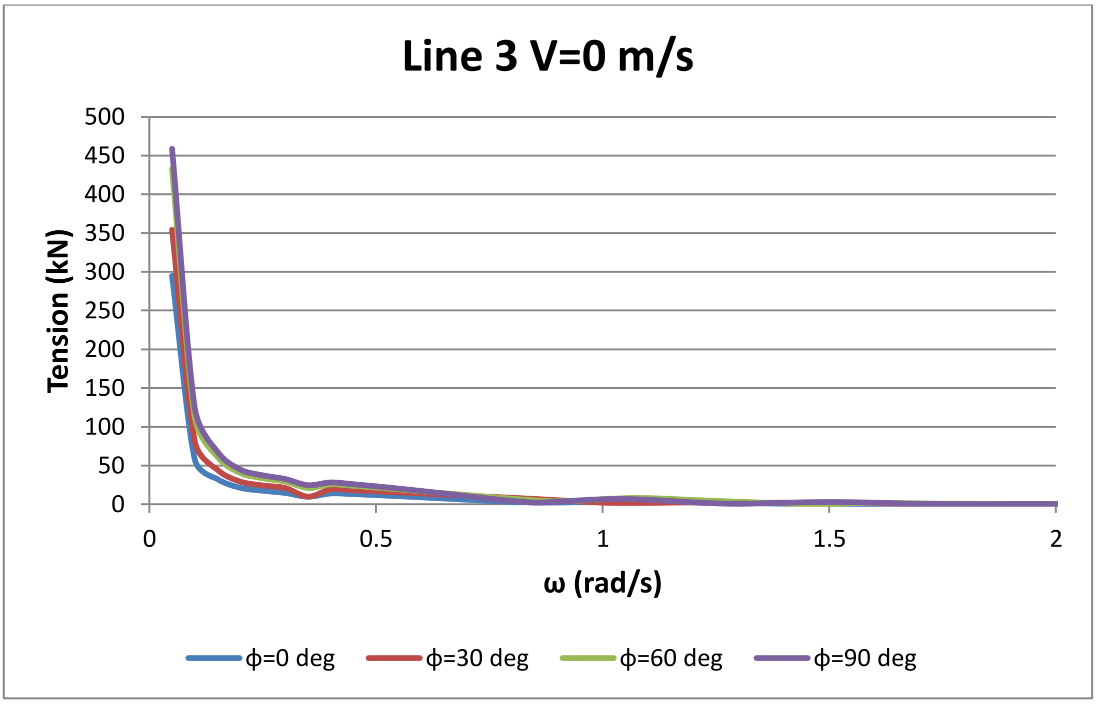


Σχήμα 4.80 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

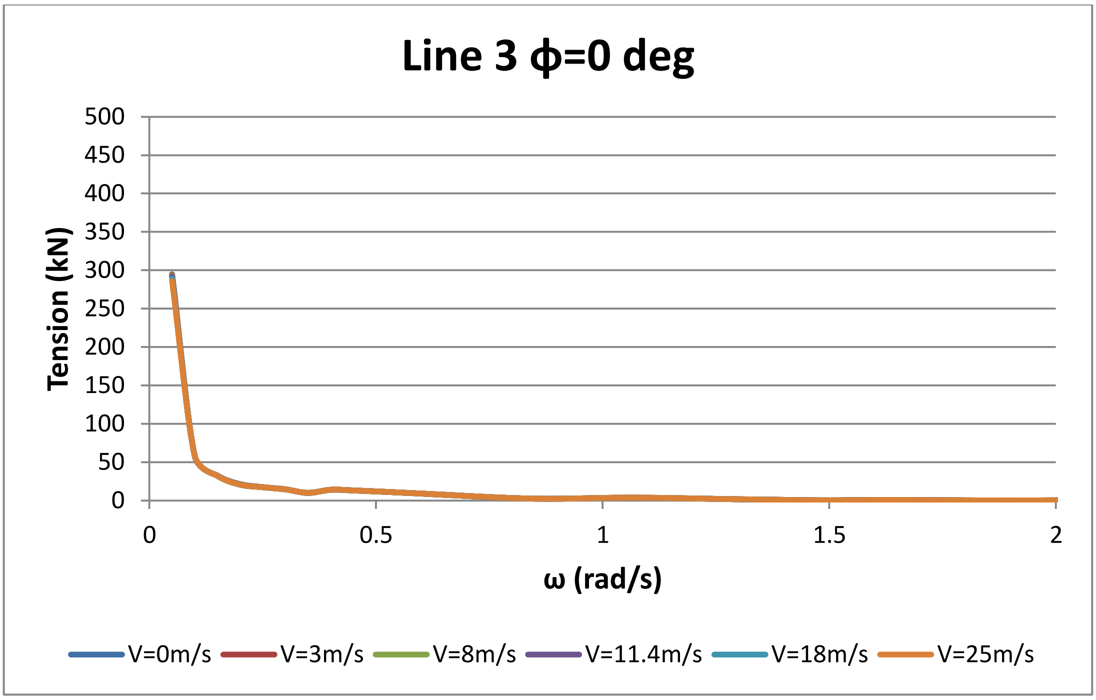


Σχήμα 4.81 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

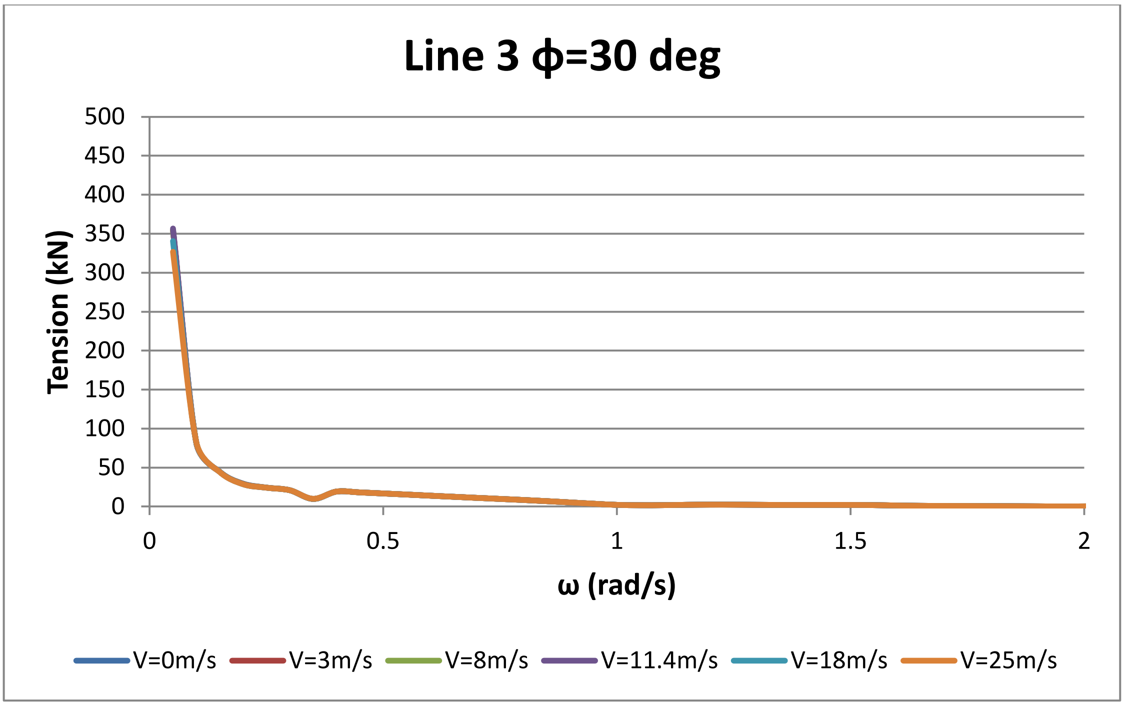
Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 3



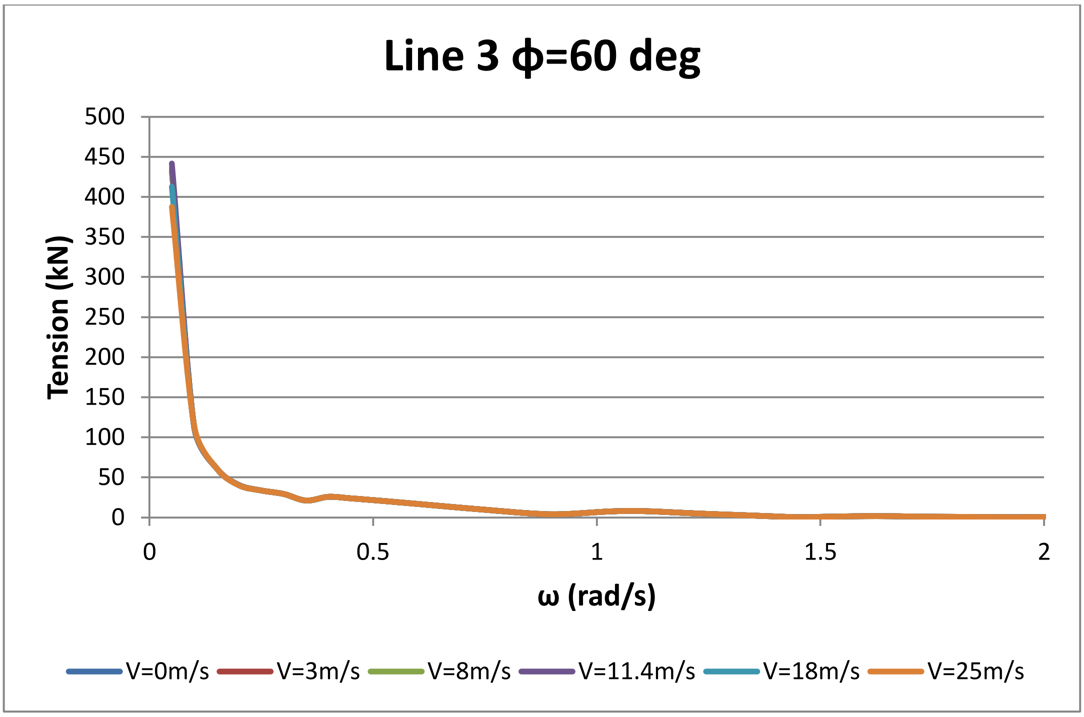
Σχήμα 4.82 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 2 για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού και για μηδενική ταχύτητα ανέμου.



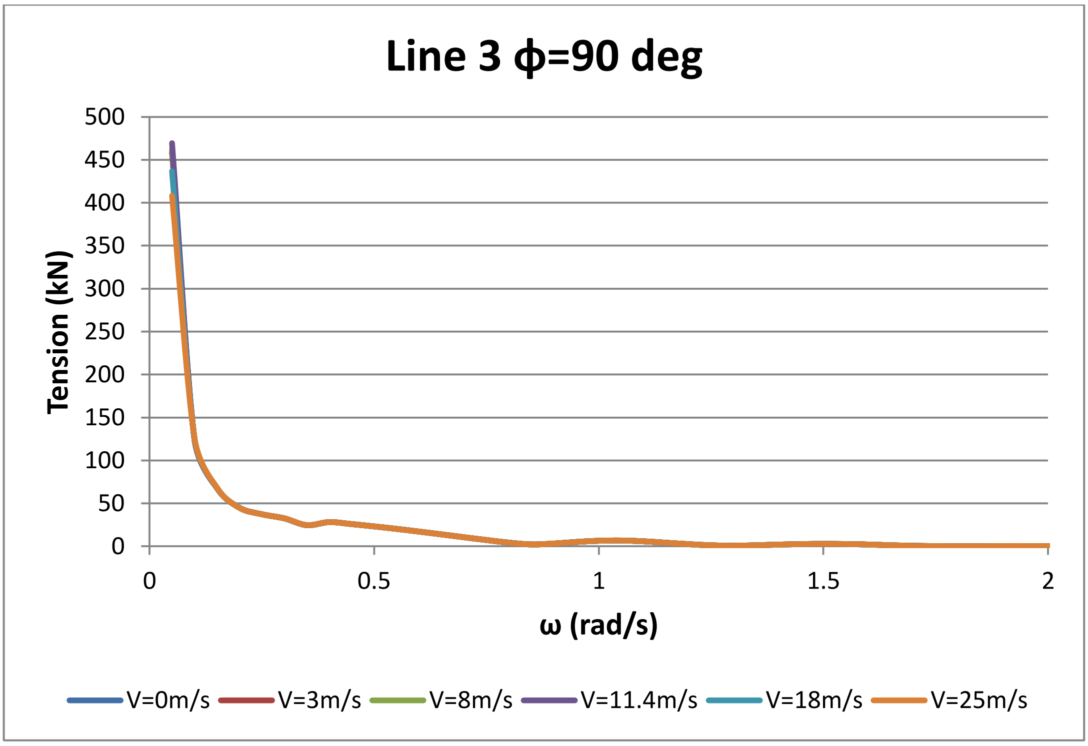
Σχήμα 4.83 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 3 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=0° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 4.84 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 3 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=30° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 4.85 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 3 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=60° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.



Σχήμα 4.86 Τάσεις στη γραμμή αγκύρωσης 3 για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού φ=90° και για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την ελεύθερα πλέουσα κατασκευή (free floating structure) παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις διέγερσης κατά τον x-άξονα (exciting forces F_x, σχ. 4.1) παρουσιάζουν ομοιότητα για τα εξής ζεύγη γωνιών πρόσπτωσης του κυματισμού: 0^o και 180^o, 30^o και 150^o, 60^o και 120^o. Το ίδιο συμβαίνει και για τις δυνάμεις διέγερσης που δρουν κατά τον y-άξονα (exciting forces F_y, σχ. 4.2), εμφανίζουν δηλαδή ομοιότητα για τα ίδια ζεύγη γωνιών πρόσπτωσης του κυματισμού. Οι δυνάμεις διέγερσης κατά τον z-άξονα (exciting forces F_z, σχ. 4.3) τείνουν στο μηδέν για μεγάλες τιμές της συχνότητας ω, όπως ακριβώς αναμενόταν, ενώ μηδενίζονται και για μικρότερη συχνότητα, στη συχνότητα μηδενισμού (cancellation frequency).

Σε ότι αφορά τις ροπές M_x, M_y και M_z (σχ. 4.4 - 4.6), παρατηρούμε ότι και αυτές παρουσιάζουν ομοιότητα για τα ίδια ζεύγη γωνιών, δηλαδή για τις 0^0 και 180^o, 30^o και 150^o και 60^o και 120^o. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο μιας και η ροπή είναι το γινόμενο της δύναμης επί έναν μοχλοβραχίονα, επομένως είναι λογικό να παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τις δυνάμεις.

Όσον αφορά τις κινήσεις και συγκεκριμένα την κίνηση κατά τον x και y άξονα (surge και sway αντίστοιχα, σχ. 4.7 και 4.8), πέρα από την ομοιότητα που εμφανίζεται στα προαναφερθέντα ζεύγη γωνιών, παρατηρείται και ομοιότητα μεταξύ surge και sway για τις εξής γωνίες: οι 0^o ή 180^o σε surge με τις 90^o σε sway, οι 30^o ή 150^o σε surge με τις 60^o ή 120^o σε sway και αντίστοιχα οι 60^o ή 120^o σε surge με τις 30^o ή 150^o σε sway και οι 90^o σε surge με τις 0^o ή 180^o σε sway.

Για την κίνηση κατά τον z άξονα (heave, σχ. 4.9) διαπιστώνουμε ότι είναι όμοια για κάθε γωνία πρόσπτωσης κυματισμού, πράγμα που ήταν αναμενόμενο καθώς η κατεύθυνση του κυματισμού είναι πάντα στο x-y επίπεδο (βλ. Σχήμα 3.1). Επίσης η συχνότητα στην οποία έχουμε συντονισμό, είναι προφανές από το σχ. 4.9 ότι βρίσκεται μεταξύ 0,35 και 0,4 rad/s. Πράγματι χρησιμοποιώντας τον τύπο 2.4.1 που δίνει την ιδιοσυχνότητα της καθ' ύψος κίνησης εκ περιστροφής συμμετρικών σωμάτων έχουμε:

$$\omega_3 = \left(\frac{\rho g A_{WL}}{m + a_{33}}\right)^{1/2} = \left(\frac{1{,}025 \cdot 9{,}81 \cdot 372{,}3}{13473 + 13500}\right)^{1/2} = 0{,}37\, rad/s$$

όπου

$\rho = 1{,}025\ t/m^3$ η πυκνότητα του νερού

$g = 9{,}81\ m/s^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας

$A_{WL} = 372{,}3\ m^2$ η ίσαλος επιφάνεια της κατασκευής

$m = 13473\ t$ η μάζα της κατασκευής και

$a_{33} = 13500\ t$ η υδροδυναμική μάζα στην καθ' ύψος κίνηση

Σε ότι αφορά τις περιστροφές ως προς τους τρεις άξονες (roll, pitch, yaw, σχ. 4.12) είναι επίσης αντιληπτή η ομοιότητα για τα συνήθη ζεύγη γωνιών 0^o και 180^o, 30^o και 150^o, 60^o και 120^o, όπως επίσης και η ομοιότητα μεταξύ roll και pitch για τις εξής γωνίες: 0^o ή 180^o σε roll με τις 90^o σε pitch, οι 30^o ή 150^o σε roll με τις 60^o ή 120^o σε pitch και αντίστοιχα οι 60^o ή 120^o σε roll με τις 30^o ή 150^o σε pitch και οι 90^o σε roll με τις 0^o ή 180^o σε pitch.

Για τις δυνάμεις έκπτωσεις (drift forces) στην x κατεύθυνση (σχ. 4.13) είναι προφανές ότι για τα ζεύγη γωνιών 0^o – 180^o, 30^o – 150^o και 60^o – 120^o είναι ίσες και αντίθετες, ενώ για τις 90^o είναι για όλες τις συχνότητες περίπου μηδέν. Για τις δυνάμεις έκπτωσης στην y κατευθυνση (σχ. 4.14) έχουμε ομοιότητα μεταξύ των ζευγών 0^o και 180^o, 30^o και 150^o, 60^o και 120^o και για τη ροπή έκπτωσης (σχ. 4.15) παρατηρούμε ότι για τις γωνίες 0^o, 60^o, 120^o και 180^o είναι σχεδόν μηδέν, ενώ έχουμε ομοιότητα για τις γωνίες 30^o και 150^o στις οποίες η ροπή είναι ίση και αντίθετη από την αντίστοιχη για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 90^o.

Λόγω συμμετρίας της κατασκευής ως προς το επίπεδο xz, οι υδροδυναμικές μάζες $\alpha_{23} = \alpha_{43} = \alpha_{63} = \alpha_{32} = \alpha_{34} = \alpha_{36} = 0$. Το ίδιο και οι αντίστοιχες υδροδυναμικές αποσβέσεις. Επίσης επιβεβαιώνεται η συμμετρία των μητρώων $[\alpha_{ij}]$ και $[b_{ij}]$ μιας και οι υδροδυναμικές μάζες α_{24} και α_{15} και οι υδροδυναμικές αποσβέσεις b_{24} και b_{15} είναι ίδιες με τις συμμετρικές τους.

Με την προσθήκη της δυναμικής της ανεμογεννήτριας οι κινήσεις της κατασκευής δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλλαγές (σχ. 4.28, 4.33, 4.38). Είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες χωρίς την παρουσία της ανεμογεννήτριας. Επιπροσθέτως, δεν παρατηρείται αλλαγή στις κινήσεις για διαφορετική ταχύτητα ανέμου. Να τονίσουμε επίσης ότι και εδώ η κίνηση κατά τον x άξονα (surge) είναι περίπου ίδια με την κίνηση κατά τον y άξονα (sway) για τις εξής γωνίες: οι 0^o σε surge με τις 90^o σε sway, οι 30^o σε surge με τις 60^o σε sway και αντίστοιχα οι 60^o σε surge με τις 30^o σε sway και οι 90^o σε surge με τις 0^o σε sway.

Όταν η κατασκευή αγκυρώνεται τότε είναι προφανές ότι για τις κινήσεις Surge και Sway έχουμε συντονισμό για πολύ χαμηλές συχνότητες (περίπου 0,05 rad/sec) και λογικό είναι η απόκριση να πολλαπλασιάζεται σε σύγκριση με την αντίστοιχη της ελέυθερα πλέουσας κατασκευής στην ίδια συχνότητα. Οι δύο αυτές κινήσεις παρουσιάζουν επίσης ομοιότητα για τα ζεύγη 0^o (surge) με 90^o (sway), 30^o (surge) με 60^o (sway) και αντίστροφα, με μόνη διαφορά ότι στην κίνηση surge οι κορυφές (peaks) που σχηματίζονται στη συχνότητα συντονισμού είναι λίγο μεγαλύτερες (σχ.4.51 και 4.56). Στην καθ' ύψος κίνηση (heave, σχ. 4.61) ο συντονισμός επέρχεται στην ίδια περίπου συχνότητα ω, όπως και στην ελεύθερα πλέουσα κατασκευή, μιας και η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής αλλάζει ελάχιστα. Αυτό που έχει σημασία είναι ότι η κορυφή (peak) στο συντονισμό παρουσιάζει μείωση της τάξης του 10%, γεγονός που αναμενόταν λόγω της ύπαρξης της αγκύρωσης.

Τέλος, σε ότι αφορά τις τάσεις στα σχοινιά αγκύρωσης, είναι περίπου ίδιες ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου. Η γραμμή αγκύρωσης 1 δέχεται τη μέγιστη τάση για γωνία πρόσπτωσης κύματος 0^o η οποία είναι και η μεγαλύτερη δυνατή και ισούται με 590 kN. Επιπλέον για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 0^o και 90^o οι τάσεις στις γραμμές αγκύρωσης 2 και 3 είναι ίσες, ενώ για τις γωνίες 30^o και 60^o η τάση στη γραμμή 3 είναι μεγαλύτερη από τη γραμμή 2.

6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο τελευταίο μέρος της διπλωματικής εργασίας αναφέρονται κάποιες προτάσεις για πιθανή μελλοντική έρευνα και ανάλυση πλωτών κατασκευών, οι οποίες μπορεί να αποδειχθούν αρκετά ενδιαφέρουσες και πολύ χρήσιμες για την κατανόηση και μελέτη των πλωτών Α/Γ αλλά και των μεμονωμένων σωμάτων γενικότερα.

Σαν μια περαιτέρω ανάλυση προτείνεται η μελέτη πλωτής Α/Γ που χρησιμοποιεί διαφορετικό σύστημα αγκύρωσης, π.χ. TLP (Tension Leg Platform) ή άλλο υλικό κατασκευής. Επίσης ενδιαφέρουσα θα ήταν μια προσέγγιση της κατασκευής σε διαφορετικό βύθισμα σχεδίασης ή σε διαφορετικό βάθος εγκατάστασης.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το ενδεχόμενο να μελετηθεί η κατασκευή σε διαφορετική περιοχή εγκατάστασης με διαφορετικό κυματικό προφίλ, ή να συνδυαστεί με σύστημα ανάκτησης της κινητικής ενέργειας (OWC). Το τελευταίο είναι τεράστιας σημασίας ειδικά την σημερινή εποχή, όπου ως πρώτο μέλημα πλέον σε κάθε νέα και σύγχρονη μηχανική εγκατάσταση είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης με την εκμετάλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επιπροσθέτως, τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση αντικατάστασης των ανεμογεννητριών ισχύος 5MW με αντίστοιχες των 7MW και 10MW, επομένως η μελέτη της ίδια κατασκευή με Α/Γ μεγαλύτερης ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Εκτός από αυτό, με βάση τους κανονισμούς του DNV, θα έχει ενδιαφέρον να γίνουν συγκρίσεις με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου (RENEW 2014).

Τέλος, μιας και τα τελευταία χρόνια οι πλωτές ανεμογεννήτριες (και όχι μόνο) χρησιμοποιούνται μαζικά για καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, η μελέτη ενός ενδεχόμενου αιολικού πάρκου (wind farm) με χρήση πλωτών ανεμογενντριών OC4, θα οδηγούσε σε πολύ σημαντικά αποτελέσματα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, 2010, *A Brief History of Offshore Oil Drilling,* Staff Working Paper No. 1
2. Silcox, W.H., et al. 1987. Offshore Operations. In *Petroleum Engineering Handbook,* second edition. Richardson, Texas: SPE, Chapter 18.
3. Barnes, K.B., and McCaslin, L.S. Jr. 1948. Gulf of Mexico Discovery. *Oil & Gas J 47* (March 18): 96.
4. *Mobile Rig Register,* eighth edition. 2002. Houston, Texas: ODS-Petrodata
5. Howe, R.J. 1966. The Evolution of Offshore Mobile Drilling Units. *Drilling and Production Practice.*
6. Laborde, A.J. 1997. *My Life and Times.* New Orleans, Louisiana: Laborde Print Company.
7. Σ.Α. Μαυράκου, 1999, Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Harris, L.M. 1957. Humble SM-1 Offshore Exploration Vessel, Petroleum Engineering Project Report. Los Angeles, California: Humble Oil and Refining Co., Production Department California Area.
9. Howe, R.J. 1986. Evolution of Offshore Drilling and Production Technology. Presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 5-8 May. OTC-5354-MS.
10. Mohamed A. El-Reedy, 2012, Offshore Structures. *Design, Construction and Maintenance,* 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA.
11. James G. Speight, October 2014, Handbook of Offshore Oil and Gas Operations, Chapter 3, *Offshore Platforms,* Gulf Professional Publishing.
12. B. Trabucco et al.*. 2012, Monitoring of Impacts of Offshore Platforms in the Adriatic Sea (Italy), ISPRA Italian Institute for Environmental Protection and Research, Rome, Italy.
13. Grob GR (2011) Wind Power Evolution. International Sustainable Energy Organization for Renewable Energy and Energy Efficiency. http://www.uniseo.org/documents/ (accessed June 2011).
14. Sathyajith, Mathew (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer Berlin Heidelberg. pp. 1–9.
15. Dietrich Lohrmann, 1995, "Von der östlichen zur westlichen Windmühle", *Archiv für Kulturgeschichte*, Vol. 77, Issue 1, pp.1-30 (10f.)
16. A.G. Drachmann, 1961, "Heron's Windmill", *Centaurus*, 7, pp. 145-151
17. Ahmad Y Hassan, Donald Routledge Hill (1986). *Islamic Technology: An illustrated history*, p. 54. Cambridge University Press.
18. Lynn White Jr., 1962, *Medieval technology and social change* (Oxford) p. 87.
19. Fleming PD and Probert SD (1984) The evolution of wind-turbines: An historical review. Applied Energy 18: 163–177.
20. Musgrove P (2010) Wind Power, 1st edn. Cambridge: Cambridge University Press.
21. Pasqualetti MJ, Righter R, and Gipe P (2004) History of wind energy. In: Cleveland C (ed.) Encyclopedia of Energy, pp. 419–433. San Diego, CA: Academic Press.
22. J.K. Kaldellis, D.P. Zafirakis, 2012, Reference Module in Earth Systems and Environmental Science, from Comprehensive Renewable Energy, Volume 2, Pages 671-724, “*Trends, Prospects, and R&D Directions in Win Turbine Technology”*.

23. Meyer NI (1995) Danish wind power development. Energy for Sustainable Development 2: 18–25.
24. Carmoy D (1978) The USA faces the energy challenge. Energy Policy 6: 36–52.
25. Thomas RL and Robbins WH (1980) Large wind-turbine projects in the United States wind energy program. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 5: 323–335.
26. Gipe P (1991) Wind energy comes of age California and Denmark. Energy Policy 19: 756–767.
27. Righter RW (1996) Pioneering in wind energy: The California experience. Renewable Energy 9: 781–784.
28. Ackermann T and Söder L (2002) An overview of wind energy-status 2002. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6: 67–127.
29. Esteban MD, Diez JJ, López JS, and Negro V (2011) Why offshore wind energy? Renewable Energy 36: 444–450.
30. Global Wind Energy Council (GWEC) (2010) Global Wind Report. http://www.gwec.net/ (accessed June 2011).
31. J.K. Kaldellis, D.P. Zafirakis, 2012, Reference Module in Earth Systems and Environmental Science, from Comprehensive Renewable Energy, Volume 2, Pages 431-468, "*Offshore Wind Power Basics"*.
32. Doerner H (2010) Milestones of wind energy utilization 1. http://www.ifb.uni-stuttgart.de/~doerner/ewindenergie1.html (accessed May 2011).
33. Heronemus WE (1972) Pollution-free energy from offshore winds. In: Proceedings of the 8th Annual Conference and Exposition Marine Technology Society, Washington, DC, USA, September 11–13.
34. (Dyre K (1992) Vindeby offshore wind farm – The first experiences. In: Proceedings of the EWEA Conference. Herning, Denmark, 8–11 September.
35. Musial W, Thresher R, and Ram B (2010) Large-Scale Offshore Wind Energy for the United States: Assessment of Opportunities and Barriers. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
36. Patel, Prachi (22 June 2009), "Floating Wind Turbines to Be Tested", IEEE Spectrum.
37. Deep water wind turbines, 2010-10-18, *The Institution of Engineering and Technology*.
38. European Wind Energy Association (EWEA), Offshore Statistics, http://www.ewea.org/statistics/offshore-statistics/ (accessed 12/1/2015).
39. Xiaojing Sun, Diangui Huang, Guoqing Wu, 2012, The current state of offshore wind energy technology development, Shangai, China.
40. U.S. Department of Energy, 2010, Creating an offshore wind industry in the United States: a strategic work plan for the United States, Professional Draft.
41. Breton SP, Moe G., 2009 Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America. Renewable Energy; 34(3):646-54.
42. Global Wind Energy Council, GWEC, www.gwec.net (accessed 15/1/2015).
43. Houlsby GT, Ibsen L-B, Bryne BW., 19-21 September, 2005, Suction caisson for wind turbines. In: Proceedings of international symposium on frontiers in offshore geotechnics; [Perth Australia].
44. Lemming J, Morthorst PE, Clausen NE, Jensen PH., 2008, Contribution to the chapter on wind power. In: Energy perspectives 2008. Int Energy Ag.

45. J.J. Stoker, 1957, “Water Waves” Interscience Publishers, Inc. New York.
46. B. Kinsman, 1965, “Wind Waves” Prentice-Hall”, Inc. Englewood Cliffs, N.J..
47. J.V.Wehause, E.V.Laitone, 1960, “Surface Waves”. Handbuch der Physik, Band IX , Springer-Verlag.
48. R. G. Dean, Sept. 1965, “Stream Function Representation of Non-Linear Ocean Waves” Journal of Geophysical Research. Vol. 70 p. 4561-4572.
49. Kokkinowrachos, K., Bardis, L. and Mavrakos, S., 1982, “Drift Forces on one and two-body structures in regular waves”, Boss’ 82.
50. Θ. Λουκάκη, Φ. Αθανασούλη, Γ. Γάνου, 1982, «Υδροδυναμική Πλοίου. Δυναμική Ευστάθεια και Πηδαλιουχία. Συμπεριφορά σε Θαλάσσιους Κυματισμούς». Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
51. Kokkinowrachos, K., 1980, «Hydromechanik der Seebauwerke” in Handbuch der Werften, Band XV.
52. Σ.Α. Μαυράκου, 1999, «Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών Κατασκευών», σελ. 118, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
53. Σ.Α. Μαυράκου, Ι.Κ. Χατζηγεωργίου, Νοέμβριος 2007, «Αγκυρώσεις Πλωτών Κατασκευών», Σημειώσεις για το μάθημα του 9^{ου} εξαμήνου, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις,Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
54. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., February 2009, *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, NREL/TP-500-38060, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
55. Jonkman, J., May 2010*, Definition of the Floating System for Phase IV of OC3*, NREL/TP-500-47535, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
56. A. Robertson, J. Jonkman, M. Masciola, H. Song, A. Goupee, A. Coulling, and C. Luan, “Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4”.
57. Pinkster, J.A. and Oortmerssen, G.Van. 1977. Computation of the first and second order wave forces on oscillating bodies in regular waves. Proc. *2nd Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics*, Berkeley.
58. Spyros, A., Mavrakos and Dimitrios, N., Konispoliatis. 2014, Mean Drift Loads on Arrays of Free Floating OWC Devices Consisting of Concentric Cylinders, 29th Intl Workshop on Water Waves and Floatin Bodies, Osaka, Japan.
59. Βλάχου Χρ., 2013, Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των φορτίσεων σε τριγωνική εξέδρα στήριξης πλωτής ανεμογεννήτριας, διπλωματική εργασία, Αθήνα.
60. T.P. Mazarakos et. al, 2014, Conceptual design and advanced hydro-aero-elastic modeling of a TLP concept for floating wind turbine applications, RENEW, Portugal.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αρχείο input του προγράμματος HAMVAB (ω=0,05-1,5)

```
HYDRODYNAMIC ANALYSIS. OC4 FLOATING W/T. ANALYSIS AGAINST OMEGA. NO MOTIONS. SMALLER OMEGA RANGE
.TRUE. .TRUE. .TRUE. .FALSE. .TRUE.
200.0      4  30   7   00.000
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
12.00    12.00    12.00    3.250
-28.87   14.43    14.43    0.000
0.000    25.00    -25.0    0.000
0.000
   7  39   7   1   1   0
   012.0
0.050  0.100  0.150  0.200  0.250  0.300  0.350  0.400  0.450  0.500
0.550  0.600  0.650  0.700  0.750  0.800  0.850  0.900  0.950  1.000
1.050  1.100  1.150  1.200  1.250  1.300  1.350  1.400  1.450  1.500
   2   1   1   1   2
0.0  0.0  -13.46  1.4074E4  6.772E6   6.772E6   1.188E7
12.00    12.00    12.00    3.25
   1
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDERS AT THE CORNERS
12.00
.TRUE. .TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
    1
200.0    186.0
   39   49
6.000    12.00
    0
180.0
   79
12.00
200.0    0.000    356800.   4405.13
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER SUPPORTING THE W/T
3.25
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
    0
180.0
   79
3.25
200.0    0.000    1796.    680.25
```

Αρχείο input του προγράμματος HAMVAB (ω=1,55-3)

HYDRODYNAMIC ANALYSIS. OC4 FLOATING W/T. ANALYSIS AGAINST OMEGA. NO MOTIONS. SMALLER OMEGA RANGE

```
.TRUE. .TRUE. .TRUE. .FALSE. .TRUE.
200.0       4  30   7   0180.000
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1
12.00     12.00     12.00     3.250
-28.87    14.43     14.43     0.000
0.000     25.00     -25.0     0.000
0.000
   7  39   7   1   1   0
   012.0
1.550  1.600  1.650  1.700  1.750  1.800  1.850  1.900  1.950  2.000
2.050  2.100  2.150  2.200  2.250  2.300  2.350  2.400  2.450  2.500
2.550  2.600  2.650  2.700  2.750  2.800  2.850  2.900  2.950  3.000
   2   1   1   1   2
0.0  0.0  -13.46  1.3473E4  6.772E6   6.772E6   1.188E7
12.00     12.00     12.00     3.25
   1
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDERS AT THE CORNERS
12.00
.TRUE. .TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
    1
200.0     186.0
   39   49
6.000     12.00
    0
180.0
   79
12.00
200.0     0.000     356800.   4405.13
GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CYLINDER SUPPORTING THE W/T
3.25
.FALSE..TRUE. .TRUE. .FALSE..TRUE.
    0
180.0
   79
3.25
200.0     0.000     1796.     680.25
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Ενδεικτικό αρχείο input του προγράμματος SEMISUB (με σύστημα αγκύρωσης)

0.0	0.0	0.0	0.0	42121.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-42121.0	0.0	-96.101
0.0	0.0	0.0	0.0	-153.850	0.0
0.0	-42121.0	0.0	3426400.0	0.0	8861.9
42121.0	0.0	-153.850	0.0	3410800.0	0.0
0.0	-96.101	0.0	8861.9	0.0	26637.0
6.899	0.001	-0.039	-15.989	614.860	-11.435
-0.041	0.182	-0.035	-15.077	-1145.3	-1.951
-0.092	-0.036	0.166	-0.461	-8.549	-1142.2
2287.5	-15.077	-7.298	7525.1	307050.0	258.350
613.580	7.825	-2.650	-1984.600	59438.0	22011.0
-5.191	-0.87	8.161	94.665	-23253.0	4707.500
0.0	0.0	0.0	0.0	0.024	0.0
0.0	0.0	0.0	-0.003	-0.238	-2.340
0.0	0.0	0.0	-0.003	2.238	0.238
0.0	0.0	0.0	-413060.0	47.331	199.630
0.0	0.0	0.0	-0.138	-413080.0	-25.860
0.0	0.0	0.0	-942.520	25.364	-20.780
0.0	0.0	0.0	0.0	42101.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-42101.0	0.0	-96.101
0.0	0.0	0.0	0.0	-1285.800	0.0
0.0	-42101.0	0.0	3423400.0	0.0	9573.200
42101.0	0.0	-1285.800	0.0	3410800.0	0.0
0.0	-96.101	0.0	9573.200	0.0	26637.0
21.632	0.039	-0.505	-19.244	1931.700	-48.604
-0.609	4.644	-0.232	-411.170	-1424.300	-52.350
-1.977	-0.246	4.505	-4.241	-198.870	-1398.0
2821.700	-410.150	-50.817	56935.0	375930.0	8199.900
1923.200	9.737	-33.100	-1276.500	188040.0	28631.0
-4.345	-22.204	9.292	2406.500	-30185.0	16594.0
0.0	0.0	0.0	-0.016	2.513	-0.453
0.0	0.0	0.0	-0.795	-4.970	-27.567
0.0	0.0	0.0	0.130	23.508	4.962
0.0	0.0	0.0	-412840.0	889.750	2334.700
0.0	0.0	0.0	-7.234	-412630.0	-288.780
0.0	0.0	0.0	-941.420	239.070	-0.299
0.0	0.0	0.0	0.0	42053.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-42053.0	0.0	-96.101
0.0	0.0	0.0	0.0	-2387.400	0.0
0.0	-42053.0	0.0	3415700.0	0.0	10259.00
42053.0	0.0	-2387.400	0.0	3410800.0	0.0
0.0	-96.101	0.0	10259.0	0.0	26637.0

29.769	0.172	-1.183	-31.122	2628.300	-123.280
-1.322	7.862	0.024	-687.750	-1849.600	52.523
-4.876	-0.038	6.763	-58.932	-456.160	-1868.800
3713.0	-686.980	-167.050	90514.0	486990.0	12191.0
2604.500	17.694	-101.610	-540.450	253660.0	37975.0
-14.425	-38.951	9.906	4504.0	-41498.0	22758.0
0.0	0.0	0.0	-0.267	9.387	-4.336
0.0	0.0	0.0	-4.377	0.124	-80.711
0.0	0.0	0.0	-0.211	39.096	-0.084
0.0	0.0	0.0	-412170.0	1581.700	6469.200
0.0	0.0	0.0	-35.868	-411700.0	-739.210
0.0	0.0	0.0	-926.660	491.140	211.860
0.0	0.0	0.0	0.0	42105.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-42105.0	0.0	-96.101
0.0	0.0	0.0	0.0	-1153.500	0.0
0.0	-42105.0	0.0	3424000.0	0.0	9490.400
42105.0	0.0	-1153.500	0.0	3410800.0	0.0
0.0	-96.101	0.0	9490.400	0.0	26637.0
43.244	0.023	-1.456	-384.300	3870.300	-53.393
-0.231	-10.059	-0.010	905.550	-1940.200	51.195
-1.900	-0.044	-10.367	-32.547	-198.960	-1936.500
3875.300	905.070	-96.191	-116830.0	518150.0	-2905.600
3864.0	191.810	-158.910	-50059.0	376050.0	38002.0
2.072	50.439	191.570	-3667.100	-38869.0	29872.0
0.0	0.0	0.0	-0.052	3.653	-1.745
0.0	0.0	0.0	5.372	-2.410	179.940
0.0	0.0	0.0	0.081	-203.200	2.940
0.0	0.0	0.0	-413400.0	1218.0	-16325.0
0.0	0.0	0.0	-106.080	-413130.0	-3616.800
0.0	0.0	0.0	-970.710	3718.700	-981.340
0.0	0.0	0.0	0.0	42111.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-42111.0	0.0	-96.101
0.0	0.0	0.0	0.0	-888.930	0.0
0.0	-42111.0	0.0	3425000.0	0.0	9324.500
42111.0	0.0	-888.930	0.0	3410800.0	0.0
0.0	-96.101	0.0	9324.500	0.0	26637.0
54.398	0.009	-1.561	-792.630	4866.700	-39.756
-0.243	-17.270	-0.012	1554.100	-1864.500	87.390
-1.861	-0.054	-17.638	-10.425	-221.420	-1857.200
3721.300	1553.0	-63.275	-205440.0	497750.0	-6430.300
4859.800	395.770	-198.530	-105220.0	471830.0	37370.0
5.205	86.582	396.570	-6948.0	-38246.0	36593.0
0.0	0.0	0.0	-0.075	1.254	-3.213
0.0	0.0	0.0	10.357	-1.481	441.060
0.0	0.0	0.0	0.0043	-468.320	2.433
0.0	0.0	0.0	-413890.0	1350.500	-39877.0
0.0	0.0	0.0	-238.080	-414360.0	-10027.0
0.0	0.0	0.0	-993.810	10275.0	-2219.300

```
0.0        0.0        0.0        0.0        42121.0    0.0
0.0        0.0        0.0        -42121.0   0.0        -96.101
0.0        0.0        0.0        0.0        96.101     0.0
0.0        -42121.0   0.0        3426400.0  0.0        8704.0
42121.0    0.0        96.101     0.0        3410800.0  0.0
0.0        -96.101    0.0        8704.0     0.0        26637.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        -413060.0  0.0        0.0
0.0        0.0        0.0        0.0        -413060.0  0.0
0.0        0.0        0.0        -942.430   0.0        0.0
FLOATING WIND TURBINE - OC4 CONFIGURATION ARISTEIA 200m
00202030001010400040400000001
200.0    2.000    1000.0   1.025    9.81
44.000   10.12    3.300    90.000

000000 0.
0100000100-28.87    0.000    -14.00
01
010000010014.43     25.00    -14.00
02
010000010014.43     -25.00   -14.00
03
01000100000.000     0.000    10.000
02
0101
0.000    0.000    -13.15   78.1000  0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
-13.46   13473.0  6.772E6  6.772E6  1.188E7
0201
0.0000   0.0000   0.0000   0.000    0.000    0.000    0.000    0.000
10.00    601.00   1.106E6  1.106E6  1.987E6
01
-28.87   0.000    -14.00
35.40    0.000    6.3666
-1901.0  0.000    613.0
01
14.43    25.00    -14.00
17.70    35.40    6.3666
950.5    1646.3   613.0
01
14.43    -25.00   -14.00
```

```
17.70     35.40     6.3666
950.5     -1646.3   613.0
hamvabv16_80.f
D300101
   12.0000   20.0000    0.0000    0.0000  200.0000  180.0000  200.0000
   78.1000     372.3    0.0000 5482.0000    0.0000    0.0000
0101          90.000    12.000
   1.55000 0.12177E+00-0.70343E-01 0.10059E+01-0.22486E+01-0.10221E+00 0.10900E+00
        0.36549E+00-0.89478E+00 0.16732E-02 0.40237E-01 0.69186E-01 0.32020E-01
   1.55000-0.43831E-02 0.35164E-02-0.20196E-01 0.91262E-01 0.24165E-02-0.25820E-02
        0.92912E-03-0.42057E-02-0.30369E-03 0.13924E-03-0.13678E-03-0.44506E-04
        0.23318E-01 0.22815E+00-0.22767E-01
        0.17948E-01 0.19570E+00-0.17599E-01
  1.550011   2.7434    1.8911    0.2449
  1.550022   2.7432    1.8915    0.2449
  1.550033   7.6519    0.0138    0.2449
  1.550013   0.0000    0.0000    0.2449
  1.550015  -3.0338   -0.6294    0.2449
  1.550024   3.0338    0.6295    0.2449
  1.550026  -0.0008   -0.0004    0.2449
  1.550035   0.0021    0.0000    0.2449
  1.550044  26.0260    0.2739    0.2449
  1.550055  26.0248    0.2738    0.2449
  1.550066  14.4161    7.1105    0.2449
  1.550046  -0.0008   -0.0001    0.2449
   1.60000 0.52420E-01 0.62636E-01 0.83651E+00-0.17820E+01-0.48883E-01 0.10415E+00
        0.21538E+00-0.72800E+00-0.30427E-03 0.15203E-01 0.11302E+00-0.16805E-01
   1.60000-0.25999E-02-0.22500E-02-0.19464E-01 0.72263E-01 0.10789E-02-0.23025E-02
        0.10116E-02-0.31260E-02-0.15266E-03-0.16990E-03-0.18644E-03 0.48817E-04
        0.16223E-01 0.24141E+00-0.59347E-01
        0.13021E-01 0.23554E+00-0.57472E-01
  1.600011   2.2366    1.6187    0.2610
  1.600022   2.2363    1.6188    0.2610
  1.600033   7.6677    0.0097    0.2610
  1.600013   0.0000    0.0000    0.2610
  1.600015  -2.9440   -0.5191    0.2610
  1.600024   2.9439    0.5192    0.2610
  1.600026  -0.0007   -0.0004    0.2610
  1.600035   0.0021    0.0000    0.2610
  1.600044  26.0842    0.2074    0.2610
  1.600055  26.0830    0.2074    0.2610
  1.600066  13.6096    6.5024    0.2610
  1.600046  -0.0008   -0.0001    0.2610
   1.65000-0.87948E-01 0.68278E-02 0.40722E+00-0.12204E+01-0.13438E-01 0.88277E-01
        0.38684E-01-0.51157E+00 0.11938E-01 0.36310E-01 0.23543E+00 0.30032E+00
   1.65000 0.33266E-02-0.96281E-03-0.10241E-01 0.46320E-01 0.27712E-03-0.18269E-02
        0.60403E-03-0.18678E-02 0.17390E-03-0.10409E-03-0.39450E-03-0.41936E-03
        0.14629E-01 0.22613E+00-0.28033E-01
```

0.10750E-01 0.23255E+00-0.25667E-01
1.650011 2.0622 1.0472 0.2775
1.650022 2.0620 1.0472 0.2775
1.650033 7.6804 0.0070 0.2775
1.650013 0.0000 0.0000 0.2775
1.650015 -2.9399 -0.3476 0.2775
1.650024 2.9398 0.3476 0.2775
1.650026 -0.0006 -0.0004 0.2775
1.650035 0.0021 0.0000 0.2775
1.650044 26.1547 0.1378 0.2775
1.650055 26.1535 0.1378 0.2775
1.650066 12.9411 5.3557 0.2775
1.650046 -0.0008 -0.0001 0.2775
1.70000-0.81032E-01-0.11721E+00-0.34948E-01-0.81928E+00 0.56978E-02 0.66695E-01
-0.94718E-01-0.32983E+00 0.18033E-02 0.73622E-01 0.17853E+00 0.93207E+00
1.70000 0.32502E-02 0.35800E-02 0.26591E-02 0.27761E-01-0.11118E-03-0.12952E-02
0.89553E-05-0.10675E-02 0.16984E-03 0.99266E-04-0.32004E-03-0.12289E-02
0.15688E-01 0.21819E+00-0.25902E-01
0.13010E-01 0.22240E+00-0.24178E-01
1.700011 2.2510 0.6314 0.2946
1.700022 2.2508 0.6315 0.2946
1.700033 7.6910 0.0051 0.2946
1.700013 0.0000 0.0000 0.2946
1.700015 -3.0184 -0.2222 0.2946
1.700024 3.0183 0.2222 0.2946
1.700026 -0.0005 -0.0003 0.2946
1.700035 0.0021 0.0000 0.2946
1.700044 26.2353 0.0883 0.2946
1.700055 26.2341 0.0883 0.2946
1.700066 13.0869 3.9129 0.2946
1.700046 -0.0008 -0.0001 0.2946
1.75000-0.59416E-02-0.17721E+00-0.26729E+00-0.52777E+00 0.60393E-02 0.44916E-01
-0.14237E+00-0.19065E+00-0.13512E-01 0.96619E-01-0.14233E-01 0.14059E+01
1.75000 0.56991E-03 0.53604E-02 0.89874E-02 0.16213E-01-0.11053E-03-0.82037E-03
-0.28259E-03-0.61301E-03 0.41518E-04 0.16156E-03-0.67836E-04-0.16552E-02
0.21359E-02 0.22903E+00-0.57326E-01
-0.35118E-03 0.23105E+00-0.57866E-01
1.750011 2.4880 0.4576 0.3122
1.750022 2.4878 0.4576 0.3122
1.750033 7.6998 0.0038 0.3122
1.750013 0.0000 0.0000 0.3122
1.750015 -3.1047 -0.1589 0.3122
1.750024 3.1046 0.1589 0.3122
1.750026 -0.0006 -0.0001 0.3122
1.750035 0.0021 0.0000 0.3122
1.750044 26.3094 0.0598 0.3122
1.750055 26.3081 0.0598 0.3122
1.750066 13.8167 3.0882 0.3122

```
1.750046  -0.0008    0.0000    0.3122
 1.80000 0.85239E-01-0.19426E+00-0.27907E+00-0.29401E+00-0.14743E-01 0.22030E-01
       -0.11756E+00-0.91831E-01-0.30748E-01 0.10537E+00-0.25586E-01 0.16392E+01
 1.80000-0.22472E-02 0.55830E-02 0.84531E-02 0.83278E-02 0.25369E-03-0.37929E-03
       -0.28355E-03-0.31282E-03-0.79825E-04 0.15985E-03-0.51204E-04-0.17083E-02
       -0.30560E-01 0.22813E+00-0.55648E-01
       -0.33381E-01 0.22991E+00-0.51153E-01
1.800011   2.6544    0.3996    0.3303
1.800022   2.6543    0.3996    0.3303
1.800033   7.7064    0.0033    0.3303
1.800013   0.0000    0.0000    0.3303
1.800015  -3.1714   -0.1261    0.3303
1.800024   3.1714    0.1261    0.3303
1.800026  -0.0006   -0.0001    0.3303
1.800035   0.0021    0.0000    0.3303
1.800044  26.3714    0.0425    0.3303
1.800055  26.3702    0.0425    0.3303
1.800066  14.4283    2.7827    0.3303
1.800046  -0.0008    0.0000    0.3303
 1.85000 0.19217E+00-0.14768E+00-0.13456E+00-0.11217E+00-0.34788E-02-0.11810E-01
       -0.52497E-01-0.28390E-01-0.52031E-01 0.87351E-01 0.15667E+00 0.17233E+01
 1.85000-0.51972E-02 0.40648E-02 0.37867E-02 0.29874E-02 0.56642E-04 0.19181E-03
       -0.12433E-03-0.11264E-03-0.19250E-03 0.10366E-03-0.21503E-03-0.15912E-02
       -0.14401E-01 0.23082E+00-0.41877E-02
       -0.16502E-01 0.23321E+00-0.11545E-01
1.850011   2.7724    0.3641    0.3489
1.850022   2.7723    0.3641    0.3489
1.850033   7.7128    0.0008    0.3489
1.850013   0.0000    0.0000    0.3489
1.850015  -3.2257   -0.1010    0.3489
1.850024   3.2257    0.1010    0.3489
1.850026  -0.0007   -0.0001    0.3489
1.850035   0.0021    0.0000    0.3489
1.850044  26.4249    0.0298    0.3489
1.850055  26.4237    0.0298    0.3489
1.850066  14.8522    2.6843    0.3489
1.850046  -0.0008    0.0000    0.3489
 1.90000 0.24872E+00-0.27184E-01 0.37510E-01 0.18007E-01 0.16080E-02-0.72853E-02
        0.88927E-02 0.74159E-02-0.57959E-01 0.46060E-01 0.41195E+00 0.16858E+01
 1.90000-0.65167E-02 0.75576E-03-0.10030E-02-0.41847E-03-0.24560E-04 0.11193E-03
        0.36356E-04 0.12391E-04-0.23715E-03-0.75330E-05-0.40351E-03-0.13838E-02
       -0.10913E-01 0.25468E+00-0.28979E-01
       -0.11697E-01 0.25469E+00-0.38831E-01
1.900011   2.8937    0.3470    0.3680
1.900022   2.8936    0.3469    0.3680
1.900033   7.7194    0.0003    0.3680
1.900013   0.0000    0.0000    0.3680
1.900015  -3.2796   -0.0842    0.3680
```

1.900024   3.2796   0.0842   0.3680
1.900026 -0.0007   -0.0001   0.3680
1.900035   0.0021   0.0000   0.3680
1.900044 26.4732   0.0216   0.3680
1.900055 26.4720   0.0216   0.3680
1.900066 15.1013   2.7193   0.3680
1.900046 -0.0008   0.0000   0.3680
1.95000 0.21038E+00 0.11807E+00 0.84434E-01 0.55665E-01-0.31703E-03-0.32114E-02
0.30094E-01 0.14592E-01-0.44194E-01 0.18207E-02 0.59679E+00 0.15301E+01
1.95000-0.53405E-02-0.28225E-02-0.20883E-02-0.12723E-02 0.47323E-05 0.46803E-04
0.63960E-04 0.42628E-04-0.18849E-03-0.12064E-03-0.49795E-03-0.11241E-02
-0.61172E-02 0.24493E+00-0.41567E-01
-0.51200E-02 0.24351E+00-0.49705E-01
1.950011   3.0127   0.4013   0.3876
1.950022   3.0126   0.4013   0.3876
1.950033   7.7248   0.0001   0.3876
1.950013   0.0000   0.0000   0.3876
1.950015 -3.3297   -0.0865   0.3876
1.950024   3.3296   0.0864   0.3876
1.950026 -0.0008   -0.0001   0.3876
1.950035   0.0021   0.0000   0.3876
1.950044 26.5157   0.0193   0.3876
1.950055 26.5145   0.0193   0.3876
1.950066 15.1017   2.7836   0.3876
1.950046 -0.0009   0.0000   0.3876
2.00000 0.41493E-01 0.19307E+00-0.65225E-01-0.12394E+00-0.11583E-02-0.18539E-03
0.11662E-02-0.23385E-01-0.80209E-02-0.24328E-01 0.61311E+00 0.12545E+01
2.00000-0.12573E-02-0.45461E-02 0.17786E-02 0.28224E-02 0.16016E-04 0.26678E-05
-0.70348E-04-0.96621E-04-0.42800E-04-0.16415E-03-0.45250E-03-0.83236E-03
-0.13843E-01 0.22732E+00-0.65868E-01
-0.11311E-01 0.22724E+00-0.69031E-01
2.000011   3.0269   0.5471   0.4077
2.000022   3.0268   0.5469   0.4077
2.000033   7.7294   0.0001   0.4077
2.000013   0.0000   0.0000   0.4077
2.000015 -3.3552   -0.1089   0.4077
2.000024   3.3552   0.1089   0.4077
2.000026 -0.0008   -0.0001   0.4077
2.000035   0.0021   0.0000   0.4077
2.000044 26.5493   0.0220   0.4077
2.000055 26.5481   0.0220   0.4077
2.000066 14.9245   2.6683   0.4077
2.000046 -0.0009   0.0000   0.4077
2.05000-0.81419E-01 0.48093E-01-0.16599E+00-0.51946E+00-0.65620E-03 0.15035E-02
-0.22909E-01-0.99288E-01 0.16434E-01-0.44270E-02 0.42859E+00 0.89161E+00
2.05000 0.17808E-02-0.12430E-02 0.46166E-02 0.11606E-01 0.85632E-05-0.19682E-04
-0.15576E-03-0.37736E-03 0.57344E-04-0.43468E-04-0.28492E-03-0.53905E-03
-0.26974E-01 0.19848E+00-0.57373E-01

-0.25788E-01 0.20001E+00-0.61526E-01
2.050011 2.8612 0.5812 0.4284
2.050022 2.8612 0.5810 0.4284
2.050033 7.7335 0.0000 0.4284
2.050013 0.0000 0.0000 0.4284
2.050015 -3.3436 -0.1109 0.4284
2.050024 3.3436 0.1109 0.4284
2.050026 -0.0008 -0.0002 0.4284
2.050035 0.0021 0.0000 0.4284
2.050044 26.5721 0.0213 0.4284
2.050055 26.5708 0.0213 0.4284
2.050066 14.7720 2.3410 0.4284
2.050046 -0.0009 0.0000 0.4284
2.10000 0.73383E-02-0.36991E-01-0.18725E+00-0.71875E+00 0.27872E-03 0.18862E-02
-0.31018E-01-0.13326E+00 0.19601E-03 0.77381E-02 0.98453E-01 0.41139E+00
2.10000-0.12669E-03 0.81748E-03 0.49385E-02 0.15582E-01-0.34724E-05-0.23541E-04
-0.15598E-03-0.48530E-03-0.48481E-05 0.24952E-04-0.61995E-04-0.22851E-03
-0.16533E-01 0.18888E+00-0.21460E-01
-0.16180E-01 0.18993E+00-0.27010E-01
2.100011 2.8042 0.4442 0.4495
2.100022 2.8043 0.4441 0.4495
2.100033 7.7371 0.0000 0.4495
2.100013 0.0000 0.0000 0.4495
2.100015 -3.3504 -0.0820 0.4495
2.100024 3.3504 0.0820 0.4495
2.100026 -0.0007 -0.0002 0.4495
2.100035 0.0021 0.0000 0.4495
2.100044 26.5955 0.0152 0.4495
2.100055 26.5943 0.0152 0.4495
2.100066 14.7816 1.8417 0.4495
2.100046 -0.0009 0.0000 0.4495
2.15000 0.57913E-01 0.94514E-03-0.31225E+00-0.72633E+00 0.10314E-02 0.15663E-02
-0.54268E-01-0.12901E+00-0.92453E-02-0.40279E-04-0.14692E-01-0.91257E-01
2.15000-0.12171E-02 0.30226E-04 0.71710E-02 0.14927E-01-0.12222E-04-0.18605E-04
-0.21517E-03-0.44656E-03-0.36960E-04 0.83832E-06 0.85140E-05 0.46076E-04
-0.17949E-02 0.21143E+00-0.22552E-01
-0.12689E-02 0.21328E+00-0.24944E-01
2.150011 2.8439 0.3615 0.4712
2.150022 2.8440 0.3615 0.4712
2.150033 7.7404 0.0000 0.4712
2.150013 0.0000 0.0000 0.4712
2.150015 -3.3730 -0.0639 0.4712
2.150024 3.3730 0.0639 0.4712
2.150026 -0.0007 -0.0001 0.4712
2.150035 0.0021 0.0000 0.4712
2.150044 26.6193 0.0113 0.4712
2.150055 26.6181 0.0113 0.4712
2.150066 15.1371 1.4214 0.4712

2.150046 -0.0009   0.0000   0.4712
2.20000 0.40220E-01 0.44363E-01-0.44282E+00-0.62062E+00 0.96675E-03 0.13444E-02
-0.74777E-01-0.10498E+00-0.64984E-02-0.74329E-02 0.80757E-01-0.20690E+00
2.20000-0.83563E-03-0.85491E-03 0.92843E-02 0.12045E-01-0.10930E-04-0.15207E-04
-0.26726E-03-0.34662E-03-0.24196E-04-0.24638E-04-0.35026E-04 0.95868E-04
-0.78935E-02 0.24236E+00-0.33668E-01
-0.75925E-02 0.24468E+00-0.32831E-01
2.200011   2.8875   0.3219   0.4934
2.200022   2.8875   0.3220   0.4934
2.200033   7.7436   0.0000   0.4934
2.200013   0.0000   0.0000   0.4934
2.200015 -3.3945   -0.0542   0.4934
2.200024   3.3945   0.0543   0.4934
2.200026 -0.0007   0.0000   0.4934
2.200035   0.0021   0.0000   0.4934
2.200044 26.6411   0.0091   0.4934
2.200055 26.6398   0.0091   0.4934
2.200066 15.4964   1.3445   0.4934
2.200046 -0.0009   0.0000   0.4934
2.25000-0.25143E-02 0.31346E-01-0.50547E+00-0.44386E+00 0.55901E-03 0.42720E-03
-0.81598E-01-0.71431E-01 0.51896E-03-0.50442E-02 0.17475E+00-0.79584E-01
2.25000 0.26021E-04-0.59773E-03 0.99125E-02 0.80953E-02-0.60447E-05-0.46050E-05
-0.27454E-03-0.22429E-03 0.67097E-06-0.16562E-04-0.72412E-04 0.34918E-04
-0.16100E-01 0.24899E+00-0.14896E-01
-0.16095E-01 0.25092E+00-0.14406E-01
2.250011   2.9247   0.3124   0.5161
2.250022   2.9248   0.3125   0.5161
2.250033   7.7460   0.0000   0.5161
2.250013   0.0000   0.0000   0.5161
2.250015 -3.4138   -0.0502   0.5161
2.250024   3.4137   0.0502   0.5161
2.250026 -0.0007   0.0000   0.5161
2.250035   0.0021   0.0000   0.5161
2.250044 26.6605   0.0081   0.5161
2.250055 26.6593   0.0081   0.5161
2.250066 15.6840   1.3534   0.5161
2.250046 -0.0009   0.0000   0.5161
2.30000 0.14800E-01 0.84757E-02-0.44999E+00-0.31111E+00 0.28521E-03 0.82241E-04
-0.69378E-01-0.47652E-01-0.20761E-02-0.12149E-02 0.32392E+00 0.75488E-01
2.30000-0.27606E-03-0.14482E-03 0.84062E-02 0.53678E-02-0.29405E-05-0.84635E-06
-0.22417E-03-0.14326E-03-0.74436E-05-0.38985E-05-0.12460E-03-0.26181E-04
-0.11968E-01 0.24136E+00-0.22044E-01
-0.11510E-01 0.24327E+00-0.23237E-01
2.300011   2.9279   0.3195   0.5392
2.300022   2.9279   0.3197   0.5392
2.300033   7.7485   0.0000   0.5392
2.300013   0.0000   0.0000   0.5392
2.300015 -3.4261   -0.0491   0.5392

2.300024   3.4261   0.0491   0.5392
2.300026 -0.0008   0.0000   0.5392
2.300035   0.0021   0.0000   0.5392
2.300044 26.6775   0.0075   0.5392
2.300055 26.6762   0.0075   0.5392
2.300066 15.7843   1.3605   0.5392
2.300046 -0.0009   0.0000   0.5392
2.35000 0.18694E-01 0.36545E-01-0.19455E+00-0.22226E+00 0.86480E-04-0.37059E-05
-0.28749E-01-0.32608E-01-0.25996E-02-0.52917E-02 0.55591E+00 0.17054E+00
2.35000-0.35138E-03-0.63049E-03 0.35533E-02 0.37831E-02-0.84650E-06 0.51645E-07
-0.91250E-04-0.97234E-04-0.90832E-05-0.16230E-04-0.19650E-03-0.55603E-04
-0.16952E-01 0.23568E+00-0.83636E-02
-0.16706E-01 0.23710E+00-0.10830E-01
2.350011   2.8892   0.3039   0.5629
2.350022   2.8890   0.3041   0.5629
2.350033   7.7507   0.0000   0.5629
2.350013   0.0000   0.0000   0.5629
2.350015 -3.4314   -0.0447   0.5629
2.350024   3.4313   0.0448   0.5629
2.350026 -0.0008   -0.0001   0.5629
2.350035   0.0021   0.0000   0.5629
2.350044 26.6920   0.0066   0.5629
2.350055 26.6908   0.0066   0.5629
2.350066 15.7990   1.3648   0.5629
2.350046 -0.0009   0.0000   0.5629
2.40000-0.29316E-01 0.38209E-01 0.52766E-01-0.57895E-01 0.82948E-05-0.40381E-05
0.74185E-02-0.82025E-02 0.41932E-02-0.53702E-02 0.78150E+00 0.21359E+00
2.40000 0.47917E-03-0.65801E-03-0.86762E-03 0.10003E-02-0.89971E-07 0.53978E-07
0.21484E-04-0.24752E-04 0.11843E-04-0.16297E-04-0.25401E-03-0.63926E-04
-0.14808E-01 0.25114E+00-0.20481E-01
-0.15049E-01 0.25166E+00-0.21907E-01
2.400011   2.8753   0.2135   0.5872
2.400022   2.8751   0.2134   0.5872
2.400033   7.7529   0.0000   0.5872
2.400013   0.0000   0.0000   0.5872
2.400015 -3.4398   -0.0302   0.5872
2.400024   3.4397   0.0302   0.5872
2.400026 -0.0008   -0.0001   0.5872
2.400035   0.0021   0.0000   0.5872
2.400044 26.7058   0.0043   0.5872
2.400055 26.7046   0.0043   0.5872
2.400066 15.7127   1.2609   0.5872
2.400046 -0.0009   0.0000   0.5872
2.45000-0.46729E-01-0.93662E-02 0.89069E-01-0.13085E-01 0.51010E-06-0.91574E-06
0.12059E-01-0.18405E-02 0.63029E-02 0.12689E-02 0.81680E+00 0.17630E+00
2.45000 0.75647E-03 0.13789E-03-0.14331E-02 0.23594E-03-0.22836E-07 0.49922E-08
0.34199E-04-0.56099E-05 0.18061E-04 0.32906E-05-0.24386E-03-0.48622E-04
-0.49040E-02 0.26261E+00-0.47940E-01

-0.50716E-02 0.26323E+00-0.48768E-01
2.450011 2.9351 0.1513 0.6119
2.450022 2.9350 0.1512 0.6119
2.450033 7.7548 0.0000 0.6119
2.450013 0.0000 0.0000 0.6119
2.450015 -3.4576 -0.0205 0.6119
2.450024 3.4576 0.0205 0.6119
2.450026 -0.0007 -0.0001 0.6119
2.450035 0.0021 0.0000 0.6119
2.450044 26.7198 0.0028 0.6119
2.450055 26.7186 0.0028 0.6119
2.450066 15.7445 0.9831 0.6119
2.450046 -0.0009 0.0000 0.6119
2.50000-0.27080E-01-0.49489E-01 0.28024E-01-0.93678E-01 0.20500E-04-0.19784E-04
0.36228E-02-0.12240E-01 0.34483E-02 0.64660E-02 0.66857E+00 0.25183E-02
2.50000 0.42950E-03 0.75635E-03-0.40979E-03 0.14506E-02-0.18887E-06 0.15394E-06
0.94366E-05-0.33375E-04 0.99074E-05 0.17402E-04-0.18286E-03 0.16647E-05
-0.10395E-01 0.27765E+00-0.34373E-01
-0.10559E-01 0.27805E+00-0.35838E-01
2.500011 2.9890 0.1346 0.6371
2.500022 2.9889 0.1345 0.6371
2.500033 7.7566 0.0000 0.6371
2.500013 0.0000 0.0000 0.6371
2.500015 -3.4734 -0.0175 0.6371
2.500024 3.4733 0.0175 0.6371
2.500026 -0.0007 0.0000 0.6371
2.500035 0.0021 0.0000 0.6371
2.500044 26.7326 0.0023 0.6371
2.500055 26.7314 0.0023 0.6371
2.500066 15.9666 0.8044 0.6371
2.500046 -0.0009 0.0000 0.6371
2.55000 0.17234E-01-0.73940E-01-0.66622E-01-0.15603E+00 0.10006E-04 0.38096E-05
-0.83677E-02-0.19539E-01-0.22461E-02 0.93024E-02 0.46215E+00-0.17887E+00
2.55000-0.23846E-03 0.10955E-02 0.10170E-02 0.22901E-02-0.77874E-07-0.58454E-07
-0.22583E-04-0.50861E-04-0.52732E-05 0.24320E-04-0.11586E-03 0.46514E-04
-0.15228E-01 0.28159E+00-0.76480E-02
-0.15376E-01 0.28193E+00-0.92223E-02
2.550011 3.0279 0.1259 0.6628
2.550022 3.0278 0.1259 0.6628
2.550033 7.7583 0.0000 0.6628
2.550013 0.0000 0.0000 0.6628
2.550015 -3.4862 -0.0158 0.6628
2.550024 3.4861 0.0158 0.6628
2.550026 -0.0008 0.0000 0.6628
2.550035 0.0021 0.0000 0.6628
2.550044 26.7441 0.0020 0.6628
2.550055 26.7429 0.0020 0.6628
2.550066 16.1554 0.7828 0.6628

```
2.550046  -0.0009    0.0000    0.6628
 2.60000 0.67022E-01-0.38571E-01-0.17010E+00-0.62356E-01-0.20309E-04 0.26599E-05
       -0.20531E-01-0.74654E-02-0.81369E-02 0.46796E-02 0.25374E+00-0.24105E+00
 2.60000-0.93993E-03 0.55970E-03 0.24195E-02 0.84662E-03 0.18607E-06-0.35023E-07
       -0.51874E-04-0.18166E-04-0.20141E-04 0.11994E-04-0.58333E-04 0.56841E-04
       -0.18907E-01 0.26207E+00 0.19282E-01
       -0.18808E-01 0.26249E+00 0.18970E-01
2.600011   3.0725    0.1298    0.6891
2.600022   3.0724    0.1298    0.6891
2.600033   7.7599    0.0000    0.6891
2.600013   0.0000    0.0000    0.6891
2.600015  -3.4987   -0.0157    0.6891
2.600024   3.4987    0.0157    0.6891
2.600026  -0.0008    0.0000    0.6891
2.600035   0.0021    0.0000    0.6891
2.600044  26.7548    0.0019    0.6891
2.600055  26.7536    0.0019    0.6891
2.600066  16.2580    0.7960    0.6891
2.600046  -0.0009    0.0000    0.6891
 2.65000 0.61500E-01-0.15137E-01-0.32872E+00 0.11143E+00-0.30898E-04 0.10454E-04
       -0.38217E-01 0.13001E-01-0.71676E-02 0.17833E-02 0.10829E+00-0.18834E+00
 2.65000-0.83216E-03 0.22079E-03 0.44407E-02-0.15952E-02 0.25913E-06-0.86181E-07
       -0.91968E-04 0.33028E-04-0.17231E-04 0.45675E-05-0.22809E-04 0.40875E-04
       -0.31478E-01 0.23908E+00-0.20629E-01
       -0.31456E-01 0.23915E+00-0.21009E-01
2.650011   3.0971    0.1580    0.7159
2.650022   3.0971    0.1580    0.7159
2.650033   7.7614    0.0000    0.7159
2.650013   0.0000    0.0000    0.7159
2.650015  -3.5081   -0.0184    0.7159
2.650024   3.5081    0.0184    0.7159
2.650026  -0.0008    0.0000    0.7159
2.650035   0.0021    0.0000    0.7159
2.650044  26.7643    0.0021    0.7159
2.650055  26.7631    0.0021    0.7159
2.650066  16.3079    0.8015    0.7159
2.650046  -0.0009    0.0000    0.7159
 2.70000 0.88444E-01 0.84206E-02-0.47261E+00 0.18330E+00-0.26143E-04 0.19130E-04
       -0.52978E-01 0.20541E-01-0.99258E-02-0.93272E-03 0.67160E-01-0.76748E-01
 2.70000-0.11636E-02-0.84925E-04 0.61518E-02-0.25436E-02 0.22304E-06-0.14017E-06
       -0.12313E-03 0.50912E-04-0.23288E-04-0.17021E-05-0.13229E-04 0.15512E-04
       -0.34527E-01 0.24661E+00-0.16727E-01
       -0.34480E-01 0.24701E+00-0.16738E-01
2.700011   3.0803    0.1925    0.7431
2.700022   3.0802    0.1924    0.7431
2.700033   7.7627    0.0000    0.7431
2.700013   0.0000    0.0000    0.7431
2.700015  -3.5123   -0.0216    0.7431
```

2.700024 3.5122 0.0216 0.7431
2.700026 -0.0008 0.0000 0.7431
2.700035 0.0021 0.0000 0.7431
2.700044 26.7726 0.0024 0.7431
2.700055 26.7714 0.0024 0.7431
2.700066 16.3013 0.7893 0.7431
2.700046 -0.0009 0.0000 0.7431
2.75000 0.63614E-01 0.68246E-01-0.35827E+00 0.75470E-01-0.15962E-04 0.19427E-04
-0.38731E-01 0.81206E-02-0.68858E-02-0.73748E-02 0.56863E-01-0.33414E-01
2.75000-0.82590E-03-0.85275E-03 0.45396E-02-0.10474E-02 0.13474E-06-0.11809E-06
-0.87857E-04 0.20278E-04-0.15983E-04-0.16505E-04-0.10503E-04 0.63189E-05
-0.23864E-01 0.25910E+00-0.29080E-01
-0.23880E-01 0.26011E+00-0.28987E-01
2.750011 3.0439 0.1657 0.7709
2.750022 3.0440 0.1657 0.7709
2.750033 7.7640 0.0000 0.7709
2.750013 0.0000 0.0000 0.7709
2.750015 -3.5141 -0.0179 0.7709
2.750024 3.5141 0.0179 0.7709
2.750026 -0.0008 -0.0001 0.7709
2.750035 0.0021 0.0000 0.7709
2.750044 26.7802 0.0019 0.7709
2.750055 26.7790 0.0019 0.7709
2.750066 16.2731 0.6409 0.7709
2.750046 -0.0009 0.0000 0.7709
2.80000 0.12144E-01 0.75310E-01-0.14532E+00 0.82255E-02-0.87376E-05 0.98485E-05
-0.15163E-01 0.83078E-03-0.12748E-02-0.78485E-02 0.12699E+00-0.16470E+00
2.80000-0.16243E-03-0.92166E-03 0.17811E-02-0.12696E-03 0.64350E-07-0.45146E-07
-0.33346E-04 0.23823E-05-0.30398E-05-0.17258E-04-0.21676E-04 0.28599E-04
-0.23478E-01 0.25191E+00-0.28615E-01
-0.23590E-01 0.25231E+00-0.28964E-01
2.800011 3.0562 0.1263 0.7992
2.800022 3.0563 0.1264 0.7992
2.800033 7.7652 0.0000 0.7992
2.800013 0.0000 0.0000 0.7992
2.800015 -3.5209 -0.0132 0.7992
2.800024 3.5209 0.0132 0.7992
2.800026 -0.0008 0.0000 0.7992
2.800035 0.0021 0.0000 0.7992
2.800044 26.7878 0.0014 0.7992
2.800055 26.7865 0.0014 0.7992
2.800066 16.4320 0.5192 0.7992
2.800046 -0.0009 0.0000 0.7992
2.85000-0.21797E-01 0.54411E-01-0.13096E-01-0.78505E-01-0.63541E-06-0.64964E-07
-0.13259E-02-0.79107E-02 0.21879E-02-0.54671E-02 0.17537E+00-0.31611E+00
2.85000 0.24915E-03-0.64654E-03 0.16702E-03 0.92585E-03-0.19681E-08 0.16523E-07
-0.30259E-05-0.16776E-04 0.45163E-05-0.11719E-04-0.27726E-04 0.50949E-04
-0.13812E-01 0.25157E+00-0.21487E-01

-0.13842E-01 0.25166E+00-0.22042E-01
2.850011 3.0788 0.1146 0.8280
2.850022 3.0788 0.1147 0.8280
2.850033 7.7664 0.0000 0.8280
2.850013 0.0000 0.0000 0.8280
2.850015 -3.5284 -0.0115 0.8280
2.850024 3.5283 0.0115 0.8280
2.850026 -0.0008 0.0000 0.8280
2.850035 0.0021 0.0000 0.8280
2.850044 26.7949 0.0012 0.8280
2.850055 26.7937 0.0012 0.8280
2.850066 16.5507 0.5118 0.8280
2.850046 -0.0009 0.0000 0.8280
2.90000-0.28489E-01 0.32091E-01 0.59929E-02-0.14175E+00 0.15599E-05-0.19055E-05
0.57871E-03-0.13777E-01 0.27647E-02-0.31093E-02 0.12024E+00-0.43884E+00
2.90000 0.32058E-03-0.37012E-03-0.48658E-04 0.16181E-02-0.18026E-07 0.21489E-07
0.85422E-06-0.28395E-04 0.56265E-05-0.64969E-05-0.17438E-04 0.65753E-04
-0.85105E-02 0.27188E+00-0.18026E-01
-0.85166E-02 0.27190E+00-0.18832E-01
2.900011 3.0905 0.1057 0.8573
2.900022 3.0904 0.1058 0.8573
2.900033 7.7675 0.0000 0.8573
2.900013 0.0000 0.0000 0.8573
2.900015 -3.5343 -0.0103 0.8573
2.900024 3.5343 0.0103 0.8573
2.900026 -0.0008 0.0000 0.8573
2.900035 0.0021 0.0000 0.8573
2.900044 26.8015 0.0010 0.8573
2.900055 26.8003 0.0010 0.8573
2.900066 16.6228 0.5182 0.8573
2.900046 -0.0009 0.0000 0.8573
2.95000-0.35896E-01 0.92502E-02-0.19068E-01-0.16121E+00 0.40836E-06-0.11196E-05
-0.17902E-02-0.15143E-01 0.33713E-02-0.86305E-03 0.32801E-01-0.46347E+00
2.95000 0.39432E-03-0.10662E-03 0.23116E-03 0.17739E-02-0.12406E-07 0.96231E-08
-0.39301E-05-0.30157E-04 0.67040E-05-0.18136E-05-0.40358E-05 0.64710E-04
0.18279E-02 0.26303E+00-0.28131E-01
0.18454E-02 0.26308E+00-0.28868E-01
2.950011 3.1024 0.1028 0.8871
2.950022 3.1022 0.1028 0.8871
2.950033 7.7685 0.0000 0.8871
2.950013 0.0000 0.0000 0.8871
2.950015 -3.5400 -0.0097 0.8871
2.950024 3.5399 0.0097 0.8871
2.950026 -0.0008 0.0000 0.8871
2.950035 0.0021 0.0000 0.8871
2.950044 26.8077 0.0009 0.8871
2.950055 26.8065 0.0009 0.8871
2.950066 16.6588 0.5288 0.8871

```
  2.950046  -0.0009    0.0000    0.8871
   3.00000-0.12812E-01-0.97558E-02 0.90240E-02-0.15534E-01-0.75576E-07-0.60583E-07
          0.82405E-03-0.14109E-02 0.11643E-02 0.88928E-03-0.67896E-02-0.29618E+00
   3.00000 0.13775E-03 0.10269E-03-0.94583E-04 0.16674E-03-0.30034E-08-0.22130E-08
          0.15579E-05-0.27469E-05 0.22697E-05 0.16916E-05 0.11968E-05 0.38646E-04
          0.61098E-02 0.27162E+00-0.44486E-02
          0.60905E-02 0.27167E+00-0.46498E-02
  3.000011   3.0969    0.0881    0.9174
  3.000022   3.0968    0.0880    0.9174
  3.000033   7.7694    0.0000    0.9174
  3.000013   0.0000    0.0000    0.9174
  3.000015  -3.5437   -0.0080    0.9174
  3.000024   3.5437    0.0080    0.9174
  3.000026  -0.0008    0.0000    0.9174
  3.000035   0.0021    0.0000    0.9174
  3.000044  26.8133    0.0007    0.9174
  3.000055  26.8120    0.0007    0.9174
  3.000066  16.6390    0.5084    0.9174
  3.000046  -0.0009    0.0000    0.9174
TOWER OF THE WINDTURBINE
O0002


1
1
```