



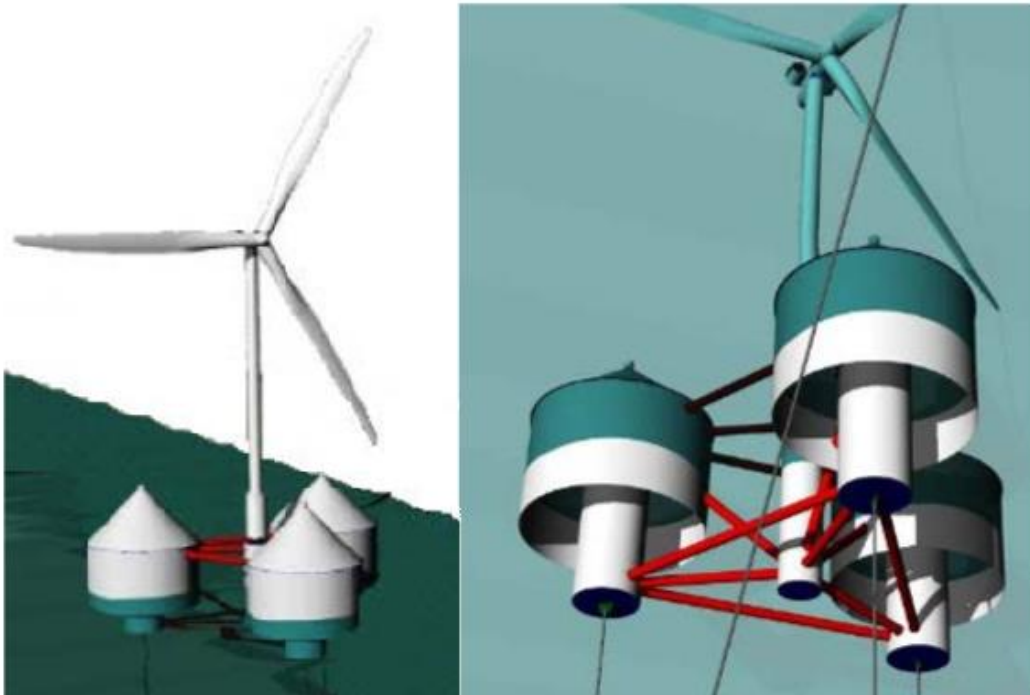
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Δ.Π.Μ.Σ. ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Διπλωματική εργασία

**Διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε
κυματισμούς, πλωτής συσκευής ανάκτησης
κυματικής και υπεράκτιας αιολικής ενέργειας**



Επιβλέπων Καθηγητής: Σπυρίδων Α. Μαυράκος

Ηλίας Α. Χάντζος

Αθήνα 2015

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Διερεύνηση της Δυναμικής Συμπεριφοράς σε Κυματισμούς, Πλωτής Συσκευής Ανάκτησης Κυματικής και Υπεράκτιας Αιολικής Ενέργειας” αποτελεί μια προσπάθεια να διερευνηθεί η δυναμική απόκριση πλωτής κατασκευής, που συναποτελείται από τρεις μηχανισμούς ανάκτησης κυματικής ενέργειας και μια πλωτή ανεμογεννήτρια, έναντι κυματισμών και ανέμου. Στην υβριδική/συνδυαστική αυτή συσκευή προσδίδεται ακαμψία μέσω της αγκύρωσής της με προεντεταμένους κλάδους αγκύρωσης TLP (Tension Leg Platform). Μέσω της περεταίρω ανάπτυξης του προγράμματος Semisub του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Fortran, επιχειρείται ο προσδιορισμός και η ανάλυση της ευστάθειας και της ακαμψίας της κατασκευής σε συνδυαστικές φορτίσεις κύματος και ανέμου. Μελετώνται και συγκρίνονται διάφοροι συνδυασμοί διαφορετικών βαθών αγκύρωσης και ταχυτήτων ανέμου υπό την ταυτόχρονη λειτουργία ή μη των ανωστικών σωμάτων σαν μηχανισμοί ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Έτσι διερευνάται η επιρροή των ανωτέρω παραγόντων στην ευστάθεια του συστήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή/εισαγωγή περί των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εν συνεχεία στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ανεμογεννήτριες με ιδιαίτερη έμφαση στην υπεράκτια μορφή τους. Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει πληροφορίες για την τεχνολογία των μηχανισμών ανάκτησης κυματικής ενέργειας. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των σχέσεων που διέπουν τις πλωτές υπεράκτιες κατασκευές. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προς μελέτη σύνθετη κατασκευή καθώς και γίνεται η μαθηματική της περιγραφή. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα εξαχθέντα από το πρόγραμμα αποτελέσματα. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων και προτείνονται μελλοντικές έρευνες.

Abstract

This thesis, entitled 'Study of the Dynamic Behavior in Waves of a Floating Wave and Offshore Wind energy Retrieval Device', is an attempt to investigate the dynamic response of the floating structure, which is composed of three wave power converters and one floating wind turbine, against waves and wind. In this hybrid/combinatorial device, stiffness is imparted through anchoring with pretensioned mooring lines TLP (Tension Leg Platform). Through further development of the Semisub program of the Laboratory of Floating Structures and Mooring of School of Naval Architecture and Marine Engineering of National Technical University of Athens, a Fortran programming environment, the implemented simulations attempt to determine and analyze the stability and stiffness of the construction against combined loads of waves and wind. Multiple combinations of different anchoring depths and wind speeds are researched upon simultaneous operation or not of the floating pontoons, used as wave energy converters. Thus, the influence of these factors on the stability of the system is investigated.

The first chapter is a summary/introduction on renewable energy. In the second chapter, there is a reference to wind turbines with special emphasis on their offshore form. The third chapter includes information on the technology of wave energy converters. The fourth chapter is a description of the relations describing floating offshore structures. The fifth chapter presents the study of complex construction and its mathematical description. The sixth chapter presents and analyses the results extracted from the program simulations. Finally, in the seventh chapter there is a presentation of the final conclusions and suggestions on further research.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας βασίζεται στην πολύτιμη αρωγή πολλών ανθρώπων καθ' όλη τη διάρκειά της, τους οποίους οφείλω να ευχαριστήσω.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., Διευθυντή του Δ.Π.Μ.Σ. Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη και Αντιπρύτανη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Σπυρίδωνα Α. Μαυράκο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής καθώς και για το ότι με ενέπνευσε κατά την διάρκεια του κύκλου του ανωτέρω Δ.Π.Μ.Σ. να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Θωμά Π. Μαζαράκο Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η αρωγή του ήταν πολύτιμη τόσο επιστημονικά όσο και σε επίπεδο παρότρυνσης/έμπνευσης για εμβάθυνση σε ως τώρα άγνωστα μα πολύ ενδιαφέροντα για εμένα πεδία του τομέα ειδίκευσής του.

Ακόμη ευχαριστίες οφείλω στον κ. Δημήτρη Κονισπολιάτη Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Τον ευχαριστώ για τον απεριόριστο χρόνο που μου αφιέρωσε καθώς και για τη διάθεση που επεδείκνυε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, ώστε να με καθοδηγήσει επιστημονικά.

Εν κατακλείδι ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένειά μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια και με ενθαρρύνει σε κάθε μου προσπάθεια για την επίτευξη ενός νέου στόχου που θα με κάνει να εξελιχθώ.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	7
1.1	Ιστορική αναδρομή.....	7
1.2	Πηγές ενέργειας.....	8
1.2.1	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	8
1.2.2	Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.3	Θετικά και αρνητικά ΑΠΕ.....	11
1.3.1	Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ.....	11
1.3.2	Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ.....	11
1.4	ΑΠΕ με τις οποίες θα ασχοληθούμε.....	12
2	Ανεμογεννήτριες.....	14
2.1	Σύσταση και είδη Α/Γ.....	14
2.1.1	Ορισμός, Τύποι Α/Γ.....	14
2.1.2	Βασικά κριτήρια εγκατάστασης υπεράκτιας Α/Γ.....	16
2.1.3	Βασικά χαρακτηριστικά Α/Γ οριζόντιου άξονα.....	17
2.1.4	Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της Α/Γ.....	17
2.2	Επιρροές από τη χρήση Α/Γ.....	18
2.3	Αποθήκευση ενέργειας.....	20
2.4	Τύποι έδρασης της Α/Γ.....	21
2.5	Α/Γ σταθερής έδρασης.....	22
2.5.1	Gravity based/βαρύτητας.....	23
2.5.2	Monopile (μονού πυλώνα).....	24
2.5.3	Jacket.....	25
2.5.4	Suction/bucket (εδράσεις κενού).....	26
2.5.5	Παραλλαγές της έδρασης με πασσάλους.....	27
2.6	Πλωτές Α/Γ.....	28
2.6.1	Βασικά χαρακτηριστικά.....	28
2.6.2	Πλεονεκτήματα πλωτών Α/Γ.....	28
2.6.3	Είδη πλωτών Α/Γ.....	31
2.7	Σημαντικότερα projects πλωτών Α/Γ.....	34
2.7.1	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.....	34
2.7.2	Ασία-Ιαπωνία.....	39
2.7.3	Ευρώπη.....	49
3	Μηχανισμοί Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Μ.Α.Κ.Ε.).....	66
3.1	Ενέργεια των κυματισμών.....	66
3.2	Κυματικό δυναμικό.....	67

3.2.1	Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών.....	67
3.2.2	Κατανομή κυματικού δυναμικού	68
3.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Μ.Α.Κ.Ε.	69
3.3.1	Πλεονεκτήματα	69
3.3.2	Μειονεκτήματα	70
3.4	Ιστορική αναδρομή Μ.Α.Κ.Ε.....	70
3.5	Κατηγορίες Μ.Α.Κ.Ε.....	71
3.5.1	Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers).....	71
3.5.2	Συσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης (Oscillating Wave Surge Converter)	72
3.5.3	Συσκευές Υπερπήδησης του Νερού (Overtopping Device).....	74
3.5.4	Συσκευές μακρόστενης ροής (Attenuator)	75
3.5.5	Βυθισμένες Συσκευές Διαφοράς Πίεσης (Submerged Pressure Differential). 76	
3.5.6	Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)	77
3.5.7	Άλλες συσκευές	79
3.6	Κυριότερα πάρκα Μ.Α.Κ.Ε.....	80
3.6.1	Πάρκο Μ.Α.Κ.Ε. Okeanos.....	80
3.6.2	Πάρκο Μ.Α.Κ.Ε. Iberdola OPT.....	81
3.6.3	Πιλοτικό πάρκο OWC	82
4	Σχεδιασμός πλωτών κατασκευών	83
4.1	Αρχές και μέθοδοι σχεδιασμού	83
4.2	Συνθήκες περιβάλλοντος	84
4.2.1	Πεδίο ανέμου	84
4.2.2	Θαλάσσια ρεύματα	86
4.2.3	Θαλάσσιοι κυματισμοί.....	87
4.2.4	Θεωρίες κυματισμών	92
4.3	Φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών.....	98
4.3.1	Φορτία ανέμου.....	99
4.3.2	Φορτία θαλάσσιων κυματισμών.....	100
4.3.3	Συσχετισμός επίδρασης φορτίσεων αναλόγως των στοιχείων της κατασκευής	102
4.4	Αγκύρωση υπό κατακόρυφη προένταση TLP (Tension Leg Platform).....	105
5	Σύνθετη υπό μελέτη κατασκευή	109
5.1	Περιγραφή της κατασκευής	109
5.2	Μαθηματική περιγραφή της κατασκευής	110
5.2.1	Υπολογισμός της συνάρτησης δυναμικού της ταχύτητας	110

5.2.2	Παροχή αέρα	115
5.2.3	Υδροδυναμικές δυνάμεις	116
5.2.4	Συστήματα αγκύρωσης	120
5.2.5	Αεροδυναμικό μοντέλο	121
5.3	Πλάτη Απόκρισης στο Πεδίο Συχνότητων (Response Amplitude Operators-RAOs) ...	121
6	Ανάπτυξη κώδικα επίλυσης-Αποτελέσματα	122
6.1	Ανάπτυξη κώδικα	122
6.2	Αποτελέσματα	122
6.2.1	Διαγράμματα μετακινήσεων	123
6.2.2	Συμπεράσματα διαγραμμάτων μετακινήσεων	149
6.2.3	Διαγράμματα τάσεων.....	150
6.2.4	Συμπεράσματα διαγραμμάτων τάσεων.....	164
7	Συμπεράσματα-προτάσεις	167
7.1	Συμπεράσματα	167
7.2	Προτάσεις.....	169
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ.....	170

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η εύρεση της καταλληλότερης πηγής ενέργειας αποτελεί φλέγον ζήτημα για τη σύγχρονη κοινωνία. Η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση για ενέργεια για την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών και δραστηριοτήτων του σύγχρονου τρόπου ζωής, οδηγεί στην εξεύρεση φιλικότερων για το περιβάλλον λύσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η λεγόμενη “πράσινη” ενέργεια λογίζεται ως μορφή εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως η γεωθερμία, ο άνεμος και η κυκλοφορία του νερού.

Η χρήση των ΑΠΕ ήταν συνυφασμένη με τη ζωή των ανθρώπων σχεδόν καθ’ όλη την ιστορία της ανθρώπινης κοινωνίας. Έτσι η εκμετάλλευση της δύναμης του νερού και του αέρα σε νερόμυλους, ανεμόμυλους και ιστιοπλοΐα ήταν ιδιαίτερα διαδομένη και ίσως αποτελούσαν τις μόνες πηγές ενέργειας πέραν της αποδιδόμενης από τον ίδιο τον άνθρωπο και των οικόσιτων ζώων. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα γινόταν εκτεταμένη χρήση αυτών, καθώς διέθετε ισχυρό δυναμικό ανέμου σε στεριά και θάλασσα και ευρύ δίκτυο χειμάρρων. Βέβαια η επικράτηση αυτών των πηγών ενέργειας διήρκησε έως ότου έκαναν την εμφάνιση τους τα ορυκτά καύσιμα. Έχοντας στη διάθεση του ο άνθρωπος τα πολύ καλής απόδοσης ορυκτά καύσιμα, και ειδικά σε μεγάλες ποσότητες από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα όπου ανακαλύφθηκαν μεγάλες ποσότητες κοιτασμάτων πετρελαίου, εγκατέλειψε την όχι και τόσο αποδοτική τότε καθαρή ενέργεια. Άλλωστε με τα μέχρι τότε μέσα θα ήταν ίσως ανέφικτο να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις του εκβιομηχανισμένου τότε κόσμου μόνο από τις ΑΠΕ.

Ωστόσο όπως προαναφέρθηκε, τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση επαναφοράς στη χρήση ΑΠΕ και η προσπάθεια να βασιστούμε ενεργειακά κυρίως σε αυτές. Οι λόγοι για αυτό ακροβατούν μεταξύ οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων. Η διαρκής μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων φέρει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής χρήσης αυτών. Έτσι επόμενη είναι η αναζήτηση οικονομικότερων και σταθερότερων μακροπρόθεσμα πηγών ενέργειας όπως οι ΑΠΕ.

Βασικότερος ωστόσο λόγος για την ανωτέρω ενεργειακή στροφή αποτελεί η επίτευξη ενός βιώσιμου περιβάλλοντος παρά την αλόγιστη πολλές φορές χρήση ενέργειας από τους ανθρώπους. Η χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγεί εν τέλει σε περιβαλλοντικές

καταστροφές. Είτε λόγω έμμεσων μακροχρόνιων συνεπειών όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου από την καύση υδρογονανθράκων, είτε λόγω άμεσων καταστροφών λόγω ατυχήματος κατά την παραγωγή/μεταφορά/χρήση τους όπως πυρηνικές καταστροφές (Chernobyl, Fukushima) και ατυχήματα πετρελαιοφόρων δεξαμενοπλοίων. Προφανής λοιπόν είναι η αναγκαιότητα που προκύπτει χρήσης πράσινης ενέργειας για να διατηρηθεί ο πλανήτης κατά το δυνατόν ανέπαφος από τις ενεργειακές απαιτήσεις για τις εκάστοτε ανθρώπινες δραστηριότητες.

1.2 Πηγές ενέργειας

Οι πηγές ενέργειας χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τις ανανεώσιμες και τις μη.

1.2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ΑΠΕ θεωρούνται: η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδραυλική, η ωκεάνια ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα και η ενέργεια από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια. Ακολουθεί συνοπτική παρουσίασή τους:

- Αιολική ενέργεια: Είναι η κινητική ενέργεια που προκύπτει από τον άνεμο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ή άμεσα εκμεταλλεύσιμη μηχανική ενέργεια.
- Ηλιακή ενέργεια: Ονομάζεται η εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της εκπεμπόμενης θερμότητας του ήλιου. Έτσι προκύπτουν εφαρμογές θερμικές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι), βιοκλιματικές και μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Γεωθερμική ενέργεια: Είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.
- Υδραυλική ενέργεια: Είναι η εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας των υδάτων (ποταμών συνήθως) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ωκεάνια ενέργεια: Χωρίζεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:
 - i) Ενέργεια από παλίρροιας. Εκμεταλλεύεται την άνοδο των υδάτων κατά την παλίρροια. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέλθει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό.
 - ii) Ενέργεια από κύματα. Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας, μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική.

- iii) Ενέργεια από τους ωκεανούς. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
- Ενέργεια από βιομάζα: Γίνεται χρήση των υδατανθράκων των φυτών που βρίσκονται στα αστικά απόβλητα και απορρίμματα (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Η διαδικασία αυτή μπορεί να μας δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα φιλικότερα στο περιβάλλον από ότι τα αντίστοιχα ορυκτά.

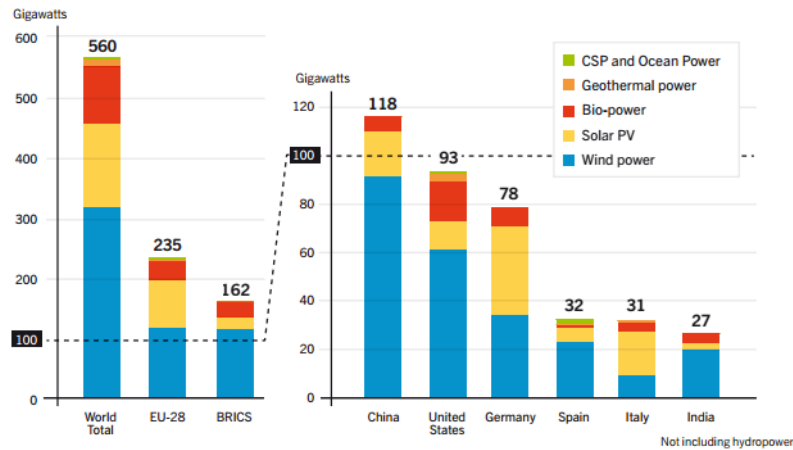
1.2.2 Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας νοούνται οι εξής :

- Η πυρηνική ενέργεια.
- Η καύση ορυκτών καυσίμων: Τα ορυκτά καύσιμα είναι καύσιμα προερχόμενα από φυσικές πηγές όπως αναερόβια αποσύνθεση νεκρών θαμμένων οργανισμών. Η ηλικία των νεκρών οργανισμών που με την εναπόθεσή τους σχηματίζουν τα ορυκτά καύσιμα κυμαίνεται από μερικά εκατομμύρια μέχρι 650 εκατομμύρια χρόνια. Χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:
 - i) Υγρά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και τα παράγωγά του.
 - ii) Αέρια καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο.
 - iii) Στερεά καύσιμα όπως κάρβουνο.

Η εκτιμώμενος χρόνος, σύμφωνα με μελέτες, μέχρι εξαντλήσεως των αποθεμάτων των παραπάνω ορυκτών με τη σημερινή τους κατανάλωση είναι: 37, 55 και 142 αντίστοιχα. Τα πιο αισιόδοξα σενάρια μιλούν για 37, 161 και 411 κάνοντας εκτεταμένη μείωση βέβαια στη χρήση τους.

Figure 4. Renewable Power Capacities in World, EU-28, BRICS, and Top Six Countries, 2013



Εικόνα 1.1 Ποσοστά πηγών ενέργειας για το 2013 σε: παγκόσμια κλίμακα, στην Ε.Ε., του Brics (δηλαδή των κορυφαίων αναδυόμενων αγορών που αποτελείται από πέντε χώρες: τη Βραζιλία, τη Ρωσία, την Ινδία, τη Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας και τη Νότια Αφρική) και των 6 ισχυρών ανωτέρω οικονομιών. Πηγή: [1]

FIGURE 2.3: EU POWER MIX 2000

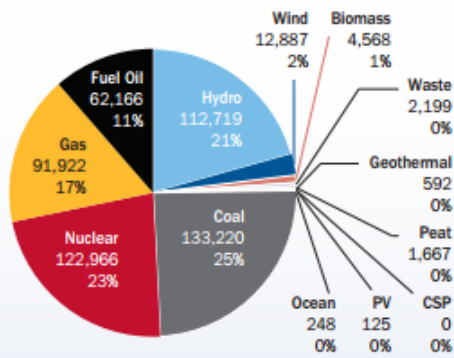
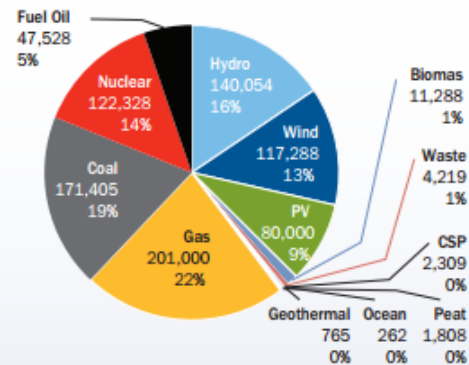
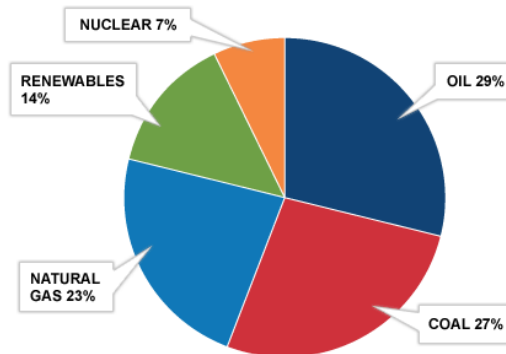


FIGURE 2.4: EU POWER MIX 2013



Εικόνα 1.2 Ποσοστά των πηγών ενέργειας στην Ε.Ε. για τα έτη 2000 και 2013. Πηγή: [2]

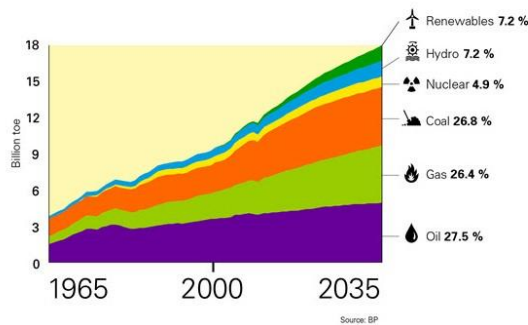
PROJECTED WORLD ENERGY MIX, 2035



SOURCE: EIA

Εικόνα 1.3 Προβλεπόμενα ποσοστά των πηγών ενέργειας, παγκοσμίως για το 2035. Πηγή: [3]

Energy Outlook 2035 insights Consumption by fuel



Εικόνα 1.4 Ποσοστά των πηγών ενέργειας παγκοσμίως από το 1965 έως το 2035, μετρήσιμα σε δισεκατομμύρια ισοδύναμους ενεργειακά τόνους πετρελαίου. Btoe: billion tons of oil equivalent. Πηγή: [3]

1.3 Θετικά και αρνητικά ΑΠΕ

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη της απαιτούμενης ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα και μερικά μειονεκτήματα/σημεία που χρήζουν βελτίωσης. Ακολουθεί συνοπτική ανάλυσή τους:

1.3.1 Πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

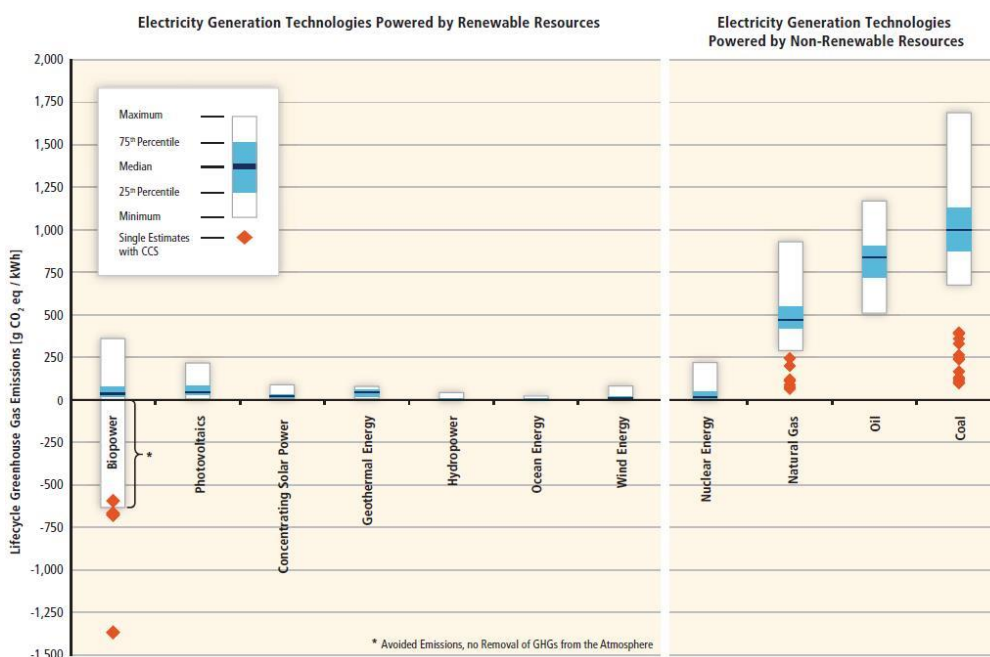
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον.
- Είναι κατ' ουσίαν ανεξάντλητες.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, από ενεργειακή αυτονομία κατοικίας μέχρι ολόκληρης κοινότητας στην ύπαιθρο. Έτσι υπάρχει αναλογία ζήτησης ενέργειας και μεγέθους έργων παροχής της. Έτσι καταργείται και η ανάγκη για έργα μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αφού η κάθε περιοχή θα φροντίζει για την αυτονομία της.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει αρκετά καλό χρόνο ζωής.
- Είναι ήδη αρκετά αποδοτικές και έχουν αρκετές δυνατότητες εξέλιξης.

1.3.2 Μειονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ

- Έχουν μικρό συντελεστή απόδοσης (περίπου 30%), με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερα αρχικά κεφάλαια και διαθέσιμες εκτάσεις εγκατάστασής τους (εφόσον

μιλάμε για τη στεριά). Έτσι προς το παρόν δεν μπορούν να καλύψουν εύκολα μεγάλα αστικά κέντρα. Ωστόσο η ενεργειακή τους απόδοση είναι τομέας που διαρκώς εξελίσσεται και βελτιώνεται με τα χρόνια και την πρόοδο της τεχνολογίας.

- Σε κάποιες μορφές ΑΠΕ υπάρχει εξάρτηση από τα εποχιακά καιρικά φαινόμενα, το γεωγραφικό πλάτος και μικρόκλιμα της περιοχής. Έτσι υπάρχει αυξομειώση της ενεργειακής παροχής, κάτι που μπορεί να αντισταθμιστεί με συνδυασμό διαφορετικών ΑΠΕ.



Εικόνα 1.5 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των εκάστοτε πηγών ενέργειας. Πηγή: [4]

1.4 ΑΠΕ με τις οποίες θα ασχοληθούμε

Από τα προρρηθέντα γίνονται πρόδηλα τα πολλαπλά πλεονεκτήματα της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ενεργειακή κάλυψη, κατά το δυνατόν, του πλανήτη. Σίγουρα το όλο εγχείρημα έχει και μειονεκτήματα που μπορεί κάποιος να προσάψει. Ωστόσο όπως είδαμε και παραπάνω υπάρχει διαρκής βελτίωση των σημείων που υστερούν οι ΑΠΕ και οι επιστημονική κοινότητα βρίσκεται σε διαρκή αναζήτηση λύσεων, ώστε να γίνει εκτεταμένη τους χρήση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε πως ανταποκρίνεται δυναμικά σε κυματισμούς ένα σύνθετο/υβριδικό μοντέλο ΑΠΕ. Συγκεκριμένα θα

ασχοληθούμε με τη σύνθετη κατασκευή που συναποτελείται αφενός από πλωτή ανεμογεννήτρια (Α/Γ) και αφετέρου από μηχανισμούς ανάκτησης κυματικής ενέργειας (Μ.Α.Κ.Ε).

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση κάθε κατασκευής (Α/Γ και Μ.Α.Κ.Ε) ξεχωριστά, ως προς τις ιδιότητες, τους τρόπους λειτουργίας, τα διαφορετικά τους είδη, τα έως τώρα υπάρχοντα λειτουργικά τους δείγματα κ.α., ώστε να κατανοήσουμε γιατί επιλέχθηκαν και πως θα συντελέσουν από κοινού στην όλη κατασκευή.

2 Ανεμογεννήτριες

2.1 Σύσταση και είδη Α/Γ

2.1.1 Ορισμός, Τύποι Α/Γ

Ανεμογεννήτρια είναι η αιολική μηχανή η οποία εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ανέμου και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βασικότερος διαχωρισμός των Α/Γ είναι σε δυο τύπους, σε κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Ο διαχωρισμός γίνεται αναλόγως της κατεύθυνσης που έχει ο βασικός άξονας γύρω από τον οποίο περιστρέφονται τα πτερύγια. Έτσι έχουμε :

2.1.1.1 Α/Γ Οριζόντιου άξονα

Ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με το οριζόντιο επίπεδο και την κατεύθυνση του ανέμου. Είναι περισσότερο θορυβώδεις από τις κατακόρυφου άξονα, αλλά αρκετά πιο αποδοτικές. Συνήθως αποτελούνται από έλικα με τρία πτερύγια. Χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες τις προσήνεμης και υπήνεμης διάταξης. Στη μεν πρώτη κατηγορία ο άνεμος συναντά πρώτα τα πτερύγια και μετά τον πυλώνα, ενώ στη δε δεύτερη γίνεται το αντίστροφο.

2.1.1.2 Α/Γ Κατακόρυφου άξονα

Ονομάζονται οι ανεμογεννήτριες στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος με το οριζόντιο επίπεδο. Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα μπορούν να εγκατασταθούν κοντά στο έδαφος (όπως σε σκεπές κτιριακών εγκαταστάσεων) και συμπεριφέρονται καλύτερα στις αλλαγές διεύθυνσης του ανέμου. Επιπλέον σε σχέση με τις αντίστοιχες Α/Γ οριζοντίου άξονα, οι κατακόρυφου διαθέτουν χαμηλότερο κέντρο βάρους. Το γεγονός αυτό τις καθιστά ασφαλέστερες επιλογές σε κατασκευές πλωτών Α/Γ αφού είναι ευσταθέστερες καταβιβάζοντας το κέντρο βάρους τους. Βασικότεροι τύποι αυτού του είδους ανεμογεννήτριας είναι οι εξής:

- Savonius (έχει σχήμα S στην κάτοψη)
- Darrieus (έχει σχήμα σαν καλάθι)



Εικόνα 2.1 Darrieus, Savonius, Οριζόντιου άξονα. Πηγή: [5]

2.1.1.3 Άλλα είδη Α/Γ

Βέβαια υπάρχουν πολλά είδη Α/Γ κάθετου άξονα, αλλά οι περισσότερες ανήκουν στις δυο παραπάνω κατηγορίες ή σε υβριδικές αυτών. Παρατίθενται δυο δείγματα Α/Γ διαφορετικού τύπου από τους συνήθεις ανωτέρω δυο.

- Ιπτάμενη Α/Γ

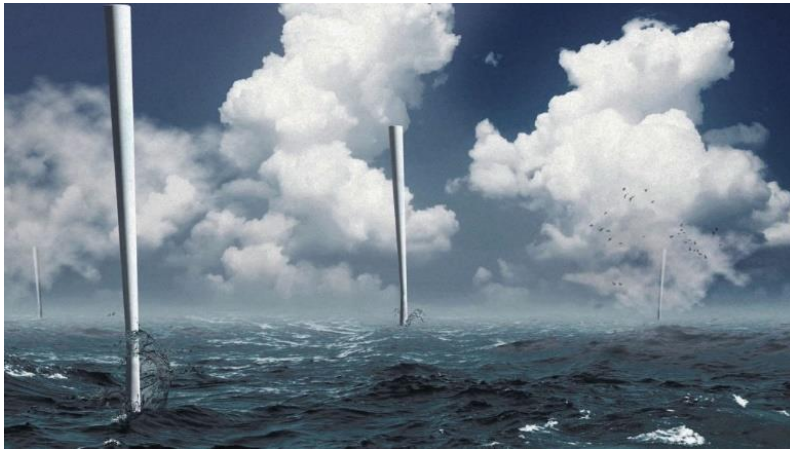
Η εταιρεία Altaeros παρουσίασε μια ριζοσπαστική πρόταση ιπτάμενης Α/Γ. Η τουρμπίνα περικλείεται από ένα φουσκωτό κέλυφος (από υλικά κατασκευής αερόστατων), γεμάτο με ήλιο ώστε να υπερίπταται. Η κατασκευή αιωρείται σε ύψος 300-600m από το έδαφος, όπου το αιολικό δυναμικό είναι υψηλότερο από το ύψος που βρίσκονται συνήθως οι ρότορες των συμβατικών Α/Γ. Στις καλωδιώσεις πρόσδεσής της στο έδαφος, συμπεριλαμβάνονται και τα καλώδια μεταφοράς της ενέργειας. Αφότου οι επερχόμενες δοκιμές της στην Αλάσκα στεφθούν με επιτυχία, θα αποτελεί μια πολύ καλή λύση για περιοχές απομακρυσμένες όπου οι σταθερές Α/Γ θα είναι δύσκολο να εγκατασταθούν είτε τεχνικά είτε οικονομικά.



Εικόνα 2.2 Ιπτάμενη Α/Γ. Πηγή: [6]

- A/Γ Bladeless

Η ισπανική startup εταιρεία Vortex σχεδίασε ανεμοτουρμπίνα χωρίς έλικες. Κατ' ουσίαν πρόκειται για πυλώνα μονής λεπίδας ο οποίος χάριν της δυναμικής του ανέμου δονείται. Αυτή η δόνηση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο πυλώνας αυτός έχει στην βάση του μαγνήτες ώστε να δονείται ακόμη και αν το ανεμολογικό δυναμικό είναι χαμηλό.



Εικόνα 2.3 Bladeless A/Γ. Πηγή: [7]

2.1.2 Βασικά κριτήρια εγκατάστασης υπεράκτιας A/Γ

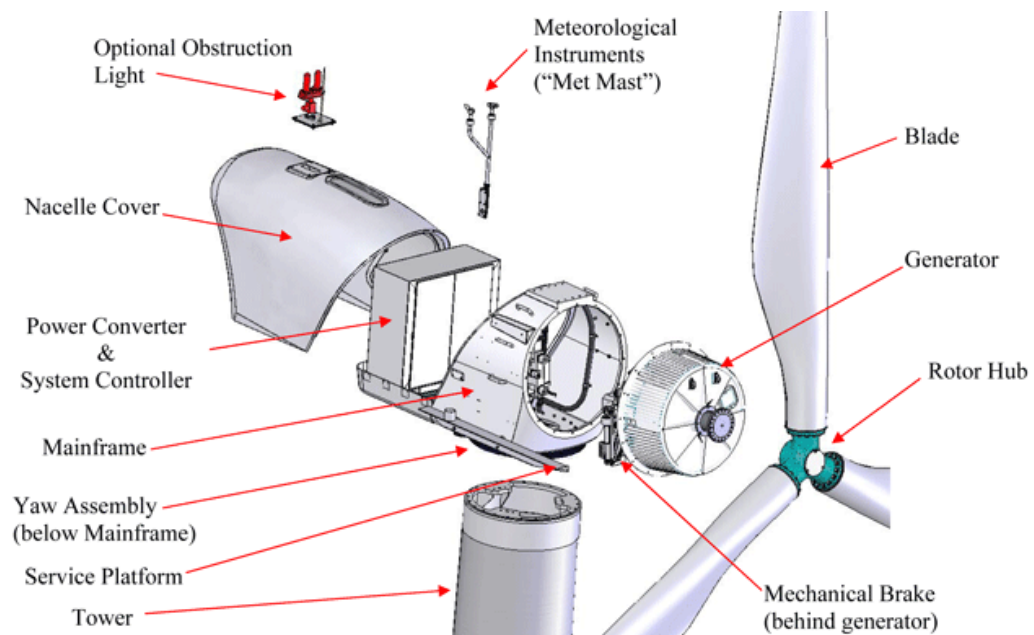
Τα σημαντικότερα κριτήρια για την εγκατάσταση μιας A/Γ στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι τα εξής:

- Το αιολικό δυναμικό της περιοχής.
- Η ευκολία της πόντισης καθώς και η προσβασιμότητα για την εκάστοτε διαδικασία συντήρησής της.
- Το βάθος και η μορφολογία του βυθού. Είτε πρόκειται για σταθερής έδρασης είτε για πλωτή A/Γ μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά του πυθμένα, όπου θα εδράσουμε και θα αγκυρώσουμε αντίστοιχα την A/Γ.
- Η ενδεχόμενη ακουστική όχληση η οποία, εν αντιθέσει με τις A/Γ στην ξηρά, θεωρείται αμελητέα στο θαλάσσιο περιβάλλον.
- Η μεταξύ των A/Γ του πάρκου απόσταση προς αποφυγήν αλληλεπίδρασής τους.
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και οι επιπτώσεις της κάλυψης περιοχών διαφορετικής ως τώρα χρηστικότητας όπως αλιευτικές περιοχές.
- Η απόσταση από την ακτογραμμή, ώστε να αποφευχθεί η οπτική όχληση.

2.1.3 Βασικά χαρακτηριστικά Α/Γ οριζόντιου άξονα

Η Α/Γ αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τον πύργο/πυλώνα που στηρίζει όλη την κατασκευή. Οι πύργοι είναι συνήθως μεταλλικές (χαλύβδινες) σωληνωτές κατασκευές ή δικτυώματα. Μερικοί πύργοι αποτελούνται και από σκυρόδεμα.
- Τα πτερύγια/ρότορες που γυρίζουν υπό την επίδραση του ανέμου και ακολούθως στρέφουν την γεννήτρια. Είναι κατασκευασμένα συνήθως από αλουμίνιο και σύνθετα υλικά.
- Την άτρακτο η οποία εμπεριέχει όλα τα μηχανικά μέρη της κατασκευής όπως: την πλήμνη που ενώνονται τα πτερύγια, γεννήτρια, φρένα, κιβώτιο ταχυτήτων, μηχανισμό ψύξης κ.α.. Βρίσκεται στην κορυφή του πυλώνα και συνήθως είναι κατασκευασμένη από fiberglass.



Εικόνα 2.4 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Πηγή: [8]

2.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της Α/Γ

Η κάθε ανεμογεννήτρια προσδιορίζεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας της. Τα σημαντικότερα είναι τα εξής:

- Η ονομαστική ισχύς της, δηλαδή η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς υπό κανονική λειτουργία της Α/Γ.
- Η παραγόμενη ισχύς.
- Η τάση λειτουργίας της.
- Η διάμετρος της πτερωτής.
- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, δηλαδή η ελάχιστη ταχύτητα του ανέμου με την οποία αρχίζει η κατασκευή να παράγει ισχύ.
- Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας. Ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία είναι επικίνδυνο για την κατασκευή η συνέχιση της περιστροφής.
- Ονομαστική ταχύτητα, υπό την οποία η ανεμογεννήτρια επιτυγχάνει την ονομαστική ισχύ.

2.2 Επιρροές από τη χρήση Α/Γ

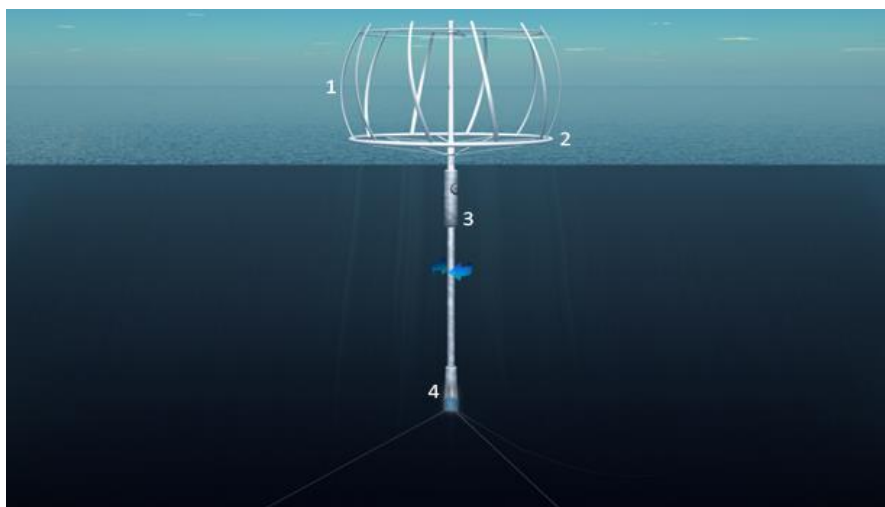
Όπως προαναφέρθηκε οι ΑΠΕ συγκεντρώνουν πολλαπλά πλεονεκτήματα. Έτσι και η χρήση των Α/Γ επιφέρει πολλά οφέλη όπως:

- Ο άνεμος είναι ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.
- Η αιολική ενέργεια ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κοινωνιών κάθε μεγέθους, από μικρές κοινότητες μέχρι ολόκληρα κράτη.
- Η αιολική ενέργεια δεν εμποδίζει τις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες.
- Για κάθε εγκατεστημένο MW αιολικής ενέργειας μειώνεται ανά έτος η έκλυση από 1.500 τόνους διοξειδίου του άνθρακα, 6,5 τόνους διοξείδιο του θείου , 3,2 τόνους οξειδίων του αζώτου και 60 κιλά υδρογόνου, από τη λειτουργία αντίστοιχα συμβατικών πηγών ενέργειας ισχύος 1MW [1].
- Με την αιολική ενέργεια αποφεύγεται η επιβάρυνση του τοπικού περιβάλλοντος με επικίνδυνους αέριους ρύπους, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και καρκινογόνα μικροσωματίδια.

Ωστόσο υπάρχουν και ζητήματα που χρήζουν βελτίωσης όπως:

- Συχνά κατηγορούν τις ανεμογεννήτριες για οπτική όχληση και για θανάτους πουλιών. Για το μεν πρώτο προωθείται η λύση των υπεράκτιων κατασκευών και για το δε δεύτερο είναι σχετικά έωλες οι κατηγορίες αφού σύμφωνα με μελέτες για κάθε 10.000 θανάτους πουλιών, λιγότερο από ένας προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες. Η πραγματική απειλή για τα πτηνά, αλλά και τα ζώα, είναι οι κλιματικές αλλαγές που οφείλονται στη χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας [9].

- Η αποδοτικότητα τους θεωρείται ακόμη μικρή συγκρίσιμη με συμβατικές πηγές ενέργειας. Έτσι χρειάζεται μεγαλύτερο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διαρκώς εξελίσσεται και βελτιώνεται η απόδοσή τους.
- Οι ανεμογεννήτριες εγκαθιστάμενες σε χερσαία περιοχή κατηγορούνται πως προκαλούν εκτεταμένη ακουστική όχληση. Όμως οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι αρκετά αθόρυβες και διαρκώς βελτιώνονται σε αυτόν τον τομέα. Το επίπεδο του ήχου σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια είναι 50-60 dB.
- Υπάρχει δυσκολία αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας. Η αποθήκευσή της γίνεται με συσσωρευτές (μπαταρίες) για μικρά συστήματα, μέσω της αντλησιοταμίευσης και της αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα σε ελαστικά αεροφυλάκια στον βυθό της θάλασσας για μεγάλα συστήματα (θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο 2.3 κεφάλαιο).
- Ο άνεμος είναι περιοδικά διακοπτόμενος με αποτέλεσμα συχνά όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση ενέργειας να μην μπορεί να την υποστηρίξει το αιολικό δυναμικό αφού εκείνο το διάστημα είναι χαμηλό. Βέβαια η επιστημονική κοινότητα αναζητά συνέχεια λύσεις σε αυτό το ζήτημα και προτείνει ρηξικέλευθα συστήματα. Σημαντικό δείγμα το παρακάτω Σουηδικό πόνημα SeaTwirl το οποίο με τη χρήση σφονδύλου αποθηκεύει όταν περιστρέφεται, η κάθετου άξονα ανεμογεννήτριά του, δυναμική ενέργεια μέσω του νερού. Όταν σταματά να υπάρχει ισχυρό ανεμικό δυναμικό στην περιοχή, εκτονώνει την αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια του νερού στον σφόνδυλο και συνεχίζει να περιστρέφεται παράγοντας κινητική ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική.



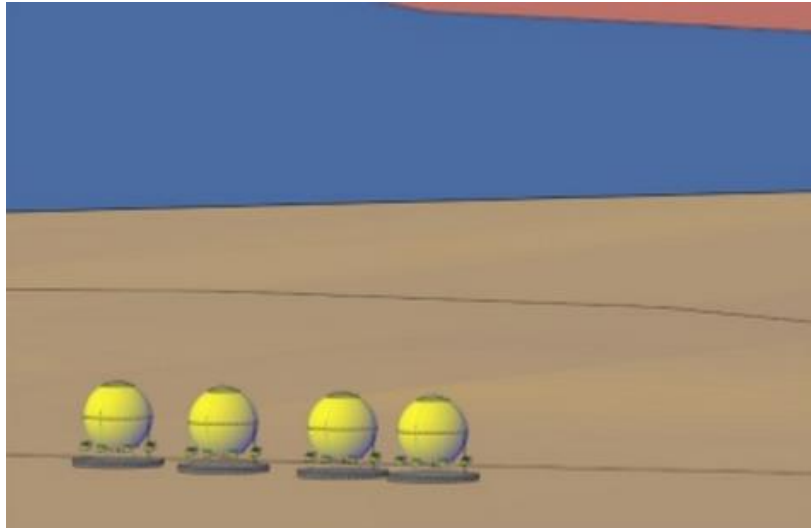
Εικόνα 2.5 Κατασκευή Seatwirl. Πηγή: [10]

2.3 Αποθήκευση ενέργειας

Η αποθήκευση αποδιδόμενης ενέργειας από της Α/Γ είναι μια μεγάλη πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Καθώς η ζήτηση ενέργειας δεν εναρμονίζεται πάντα με την ύπαρξη ή μη ισχυρού δυναμικού ανέμου, χρειάζεται την εκάστοτε περίσσεια ενέργειας να την αποθηκεύσουμε ώστε να την έχουμε διαθέσιμη τις ώρες αιχμής οπότε οι ανεμογεννήτριες μπορεί να μην λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ.

Οι τρόποι αποθήκευσής της είναι οι εξής:

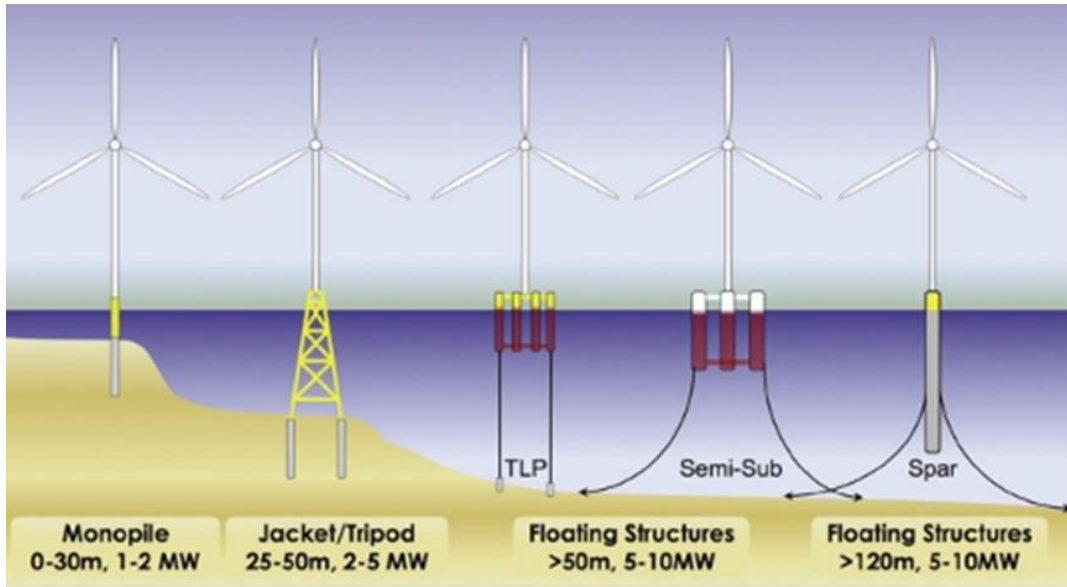
- Με συσσωρευτές/μπαταρίες, κάτι που αφορά μικρά ενεργειακά συστήματα.
- Μέσω αντλησιοταμίευσης. Κατά την αντλησιοταμίευση στις ώρες χαμηλής ζήτησης το νερό αντλείται μεταξύ δύο ταμιευτήρων με υψομετρική διαφορά. Έτσι σε ώρες αιχμής το αποθηκευμένο υψομετρικό δυναμικό του νερού μέσω υδροηλεκτρικού συστήματος μετατρέπεται σε ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ο συντελεστής απόδοσης τους είναι το 75% της δαπανηθείσης. Στον ελλαδικό χώρο έχουν εγκριθεί προς το παρόν να γίνουν τέτοιου είδους έργα στον Άγιο Νικόλαο στην Κρήτη και στην Αμφιλοχία.
- Προσωρινή αποθήκευση της ενέργειας με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα σε ελαστικά αεροφυλάκια τύπου μπαλονιού που εγκαθίστανται στον βυθό της θάλασσας, σε περίπτωση υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Τα μπαλόνια περιβάλλονται από ειδικής κατασκευής δίκτυ από το οποίο αναρτώνται βάρη τα οποία ενισχύουν τις άγκυρες του μπαλονιού στη συγκράτησή του όταν είναι πλήρες πεπιεσμένου αέρα και εξασφαλίζουν την ήπια συρρίκνωση του σε αφόρτιστη κατάσταση. Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης έχει πολλά πλεονεκτήματα για μεγάλα βάθη αφού εκεί η πίεση είναι μεγάλη και σταθερή. Έτσι ισοσταθμίζεται η εσωτερική μεγάλη πίεση του πεπιεσμένου αέρα με την εξωτερική και δεν χρειάζονται υλικά κατασκευής των μπαλονιών με μεγάλα περιθώρια αντοχής, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος. Τα μπαλόνια αυτά δύνανται να αποθηκεύσουν μεγάλα ποσά ενέργειας, αναλόγως του μεγέθους τους και του βάθους που είναι βυθισμένα [11].



Εικόνα 2.6 Ελαστικά υποθαλάσσια αεροφυλάκια αποθήκευσης ενέργειας. Πηγή: [11]

2.4 Τύποι έδρασης της Α/Γ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τις ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Στη θάλασσα το αιολικό δυναμικό είναι καλύτερο από αυτό στα χερσαία μέρη λόγω απουσίας τοπογραφικών εμποδίων και ελεύθερης κυκλοφορίας του ανέμου. Ακόμη η χωρική συνέχεια στη θάλασσα επιτρέπει τη δημιουργία συγκεντρωμένων μεγάλων εγκαταστάσεων/επενδύσεων. Γίνεται προφανές πως η εγκατάσταση Α/Γ στη θάλασσα υπερτερεί έναντι αυτής στη ξηρά. Οι υπεράκτιες Α/Γ χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες αναλόγως του τρόπου έδρασής τους. Ονομάζουμε έδραση το τμήμα της κατασκευής που απορροφά τις μεταφερόμενες σε αυτήν από τον πύργο καταπονήσεις από την όλη Α/Γ. Διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες Α) Α/Γ σταθερής έδρασης και Β) Πλωτές Α/Γ. Εν συνεχεία θα αναλύσουμε αυτούς τους δυο τύπους.



Εικόνα 2.7 Τύποι έδρασης Α/Γ. Πηγή: [12]

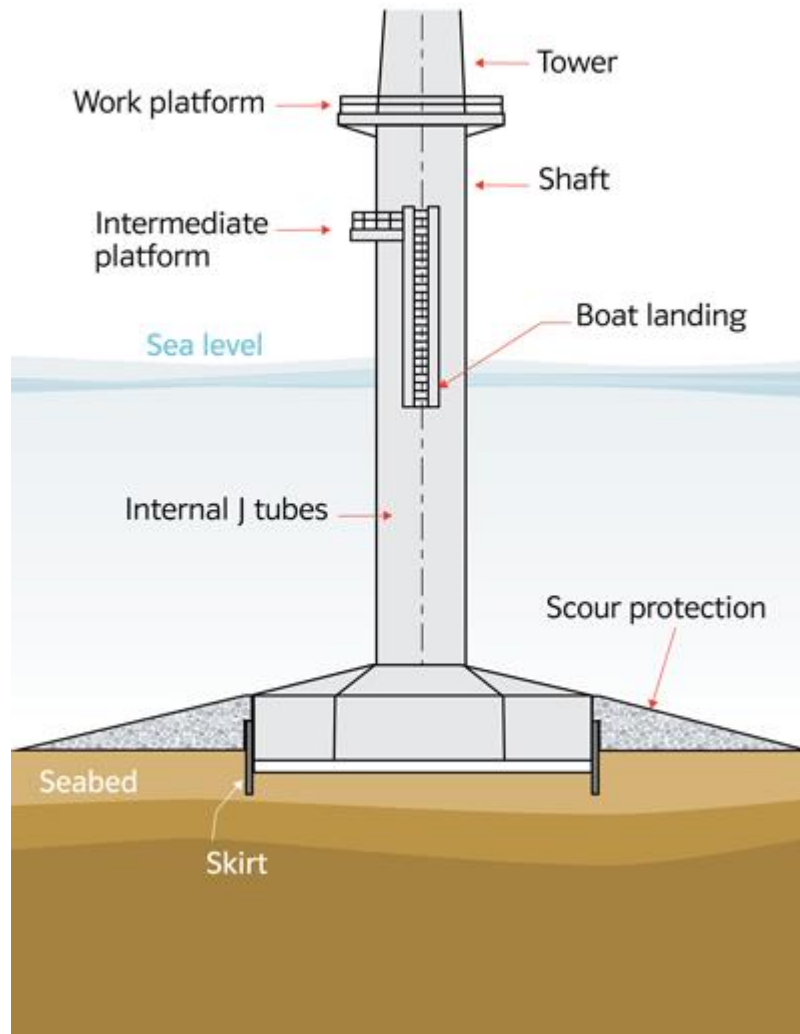
2.5 Α/Γ σταθερής έδρασης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν Α/Γ που εδράζονται στον πυθμένα τις θάλασσας. Συνήθως αυτές οι κατασκευές πραγματοποιούνται σε βάθη έως περίπου 40m. Αναλόγως του είδους της θεμελίωσης τις διακρίνουμε στις εξής υποκατηγορίες:

- Gravity (βαρύτητας)
- Suction (αναρρόφησης)
- Piled (εμπηγνυοόμενοι πάσσαλοι στον πυθμένα)
- Jacket

Παρακάτω ακολουθούν τύποι σταθερής έδρασης που αποτελούν παραλλαγές των παραπάνω υποκατηγοριών, είτε συνδυασμούς τους.

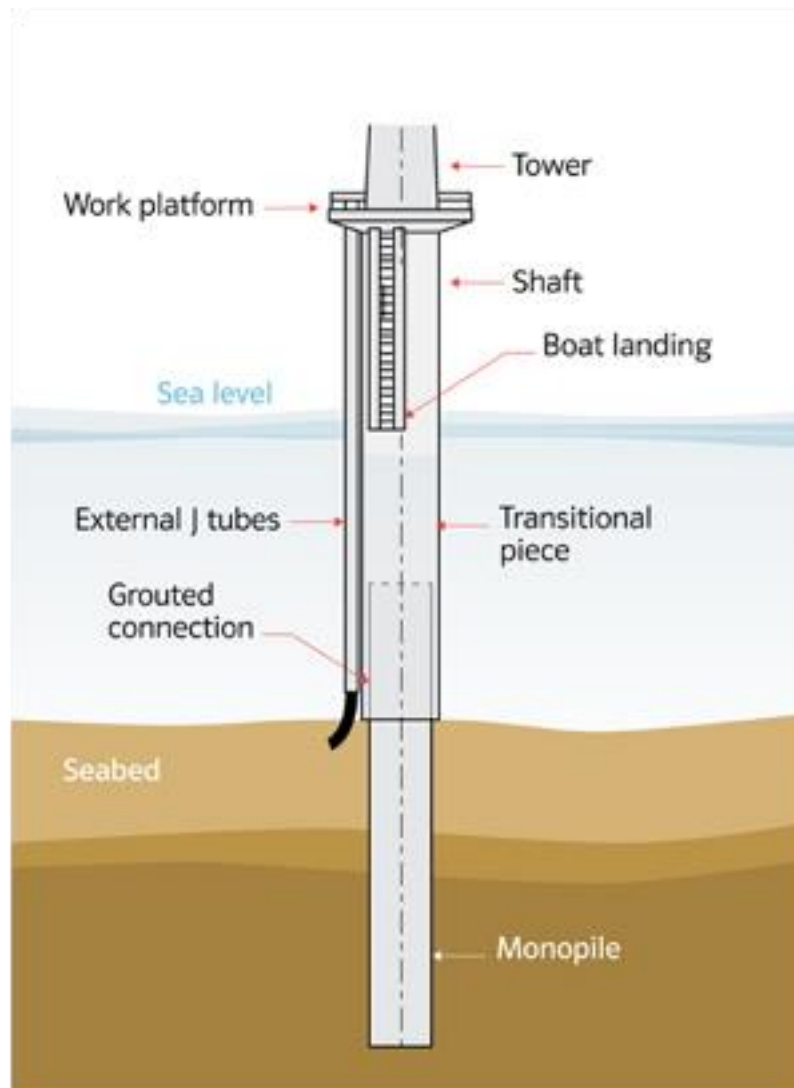
2.5.1 Gravity based/βαρύτητας



Εικόνα 2.8 Gravity based. Πηγή: [13]

Σε αυτό το είδος έδρασης η αντίσταση της κατασκευής στις εκάστοτε φορτίσεις (άνεμος και κύματα) γίνεται λόγω του ιδίου βάρους της έδρασης, όπου αποτελείται από σκυρόδεμα ή χάλυβα (συνήθως από τον συνδυασμό των δυο αυτών υλικών). Σε αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται κάποια έμπηξη στον πυθμένα και έχουμε απλή έδραση/εναπόθεση της όλης κατασκευής. Απαραίτητη όμως κρίνεται η προετοιμασία του βυθού ώστε να εξασφαλιστεί η επιτεδότητά του και να ικανοποιηθεί η συνθήκη ομοιογενούς υλικού εδράσεως ώστε να αποφευχθούν τυχούσες διαφορικές καθιζήσεις. Συνήθως γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη έως και 25m και για Α/Γ απόδοσης γύρω στα 5MW.

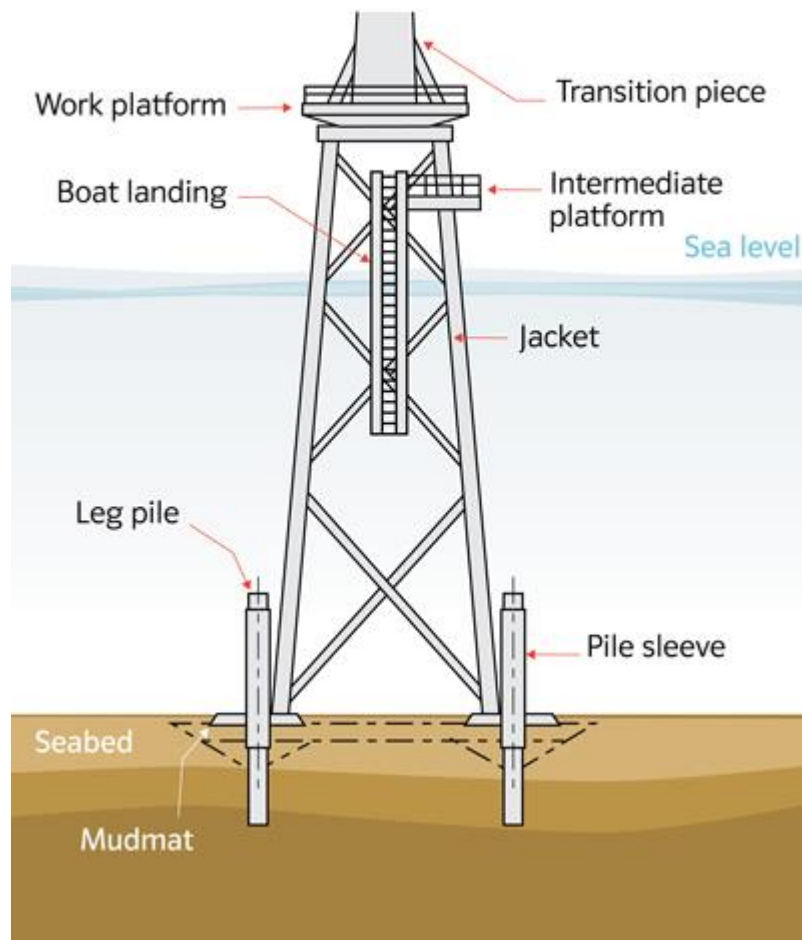
2.5.2 Monopile (μονού πυλώνα)



Εικόνα 2.9 Monopile. Πηγή: [13]

Σε αυτό το είδος ο πυλώνας συνδέεται είτε απευθείας είτε μέσω ενός συνδετικού τμήματος με έναν εμπηγμένο στον βυθό πάσσαλο. Η χρήση του μεταβατικού τμήματος γίνεται για να καταστήσει πιο εύκολη τη συναρμολόγηση της όλης κατασκευής καθώς και για να άρει τις κλίσεις που παίρνει ο πύργος(μεταφέρει τις όποιες διατμητικές και ορθές τάσεις στο έδαφος). Είναι από τις σχετικά εύκολες κατασκευές σταθερής έδρασης Α/Γ. Συνήθως γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη έως 30m και για Α/Γ απόδοσης έως 2MW.

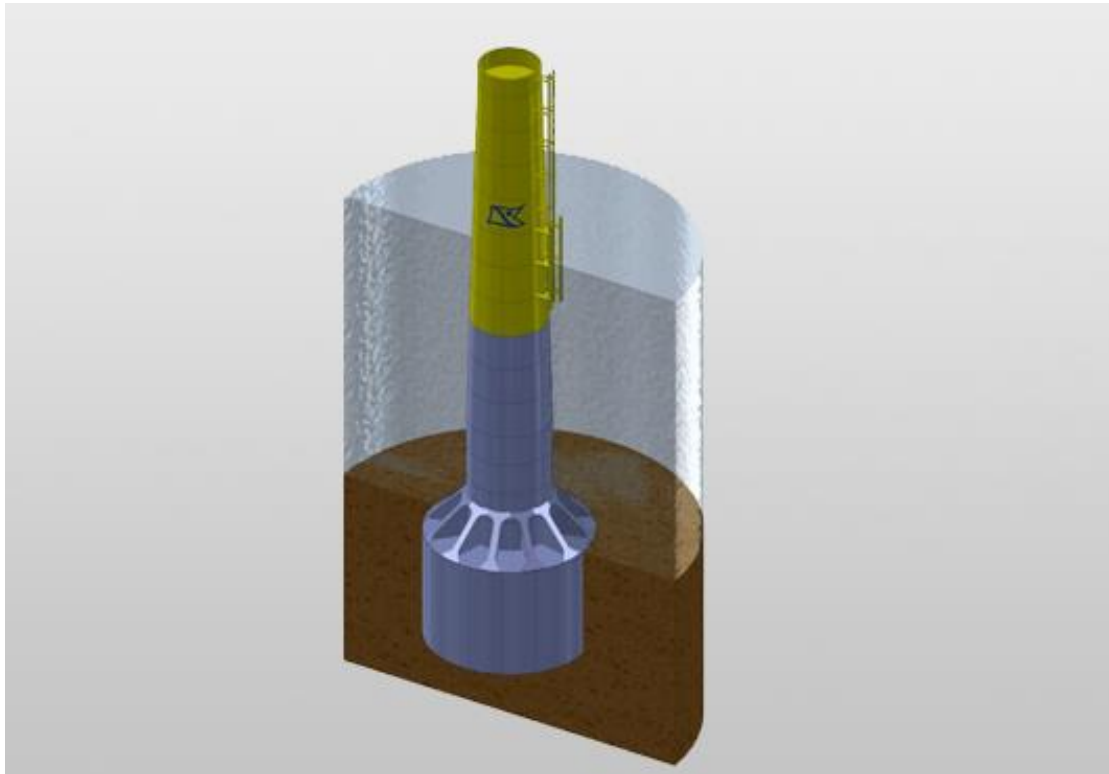
2.5.3 Jacket



Εικόνα 2.10 Jacket. Πηγή: [13]

Οι εδράσεις τύπου jacket αποτελούν πύργους από μεταλλικά χωροδικτυώματα. Δημιουργούνται κοντά στο λιμάνι και από εκεί ρυμουλκούνται μέχρι την περιοχή θεμελίωσης. Αναλόγως των συνθηκών του εδάφους στον βυθό προτιμώνται και οι εκάστοτε τύποι θεμελίωσης όπως βαρύτητας και πασσαλοέμπτυξης που αναφέραμε στις παραγράφους 2.5.1 και 2.5.2. Είναι πιο σύνθετη κατασκευή από τις προηγούμενες δυο και μεγαλύτερης αντοχής για μεγαλύτερα βάθη λόγω του πλαισιακού της χαρακτήρα. Συνήθως γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη 20-50m και για Α/Γ απόδοσης έως 5MW.

2.5.4 Suction/bucket (εδράσεις κενού)



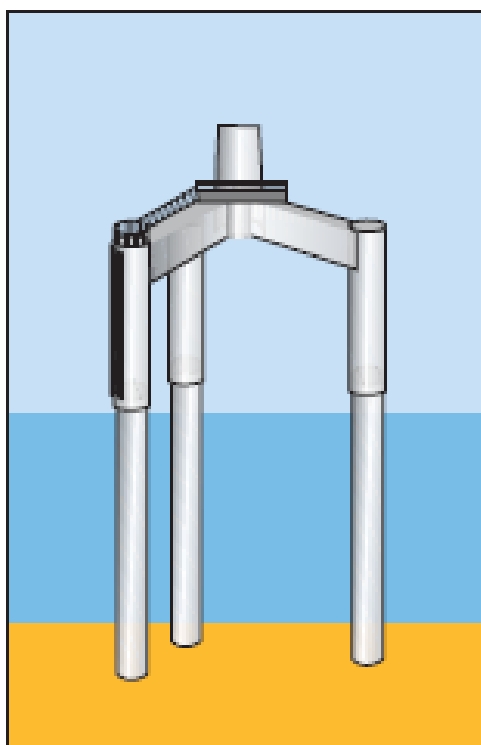
Εικόνα 2.11 Suction. Πηγή: [14]

Αυτό το είδος κατασκευής αποτελεί συγκερασμό της έδρασης μονού πυλώνα με τη λειτουργία της έδρασης βαρύτητας (gravity). Αποτελείται από έναν πυλώνα που εδράζεται με έμπηξη στο έδαφος (όπως monopile). Το τελειώμά του έχει κωνική μορφή και καταλήγει σε ένα τμήμα που αποτελείται από πολλά διαμερίσματα/κοιλότητες. Κατά την πόντιση και εγκατάστασή του αντλείται το νερό που υπάρχει σε αυτές τις κοιλότητες και έτσι δημιουργείται μια διαφορά πίεσης η οποία συγκρατεί την κατασκευή στον βυθό, λειτουργώντας με αυτόν τον τρόπο και σαν έδραση βαρύτητας. Αυτό το είδος έχει το πλεονέκτημα πως είναι εύκολα μεταφέρσιμο αφού ανοίγοντας τις βαλβίδες στεγάνωσης των κοιλότητων, εισρέει εκ νέου νερό σε αυτές και αποκολλάται από τον βυθό λόγω άνωσης. Συνήθως γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη έως 25m και για Α/Γ απόδοσης 2- 5MW.

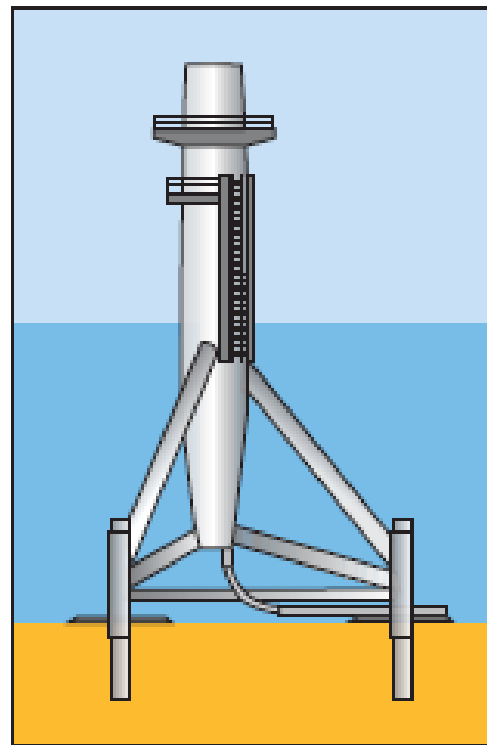
2.5.5 Παραλλαγές της έδρασης με πασσάλους

Πέραν της μονοριλέ κατασκευής, το είδος έδρασης μέσω έμπηξης πασσάλων στον πυθμένα χρησιμοποιείται και για κατασκευές που καταλήγουν σε περισσότερους πασσάλους. Ο πιο συνήθης αριθμός πασσάλων είναι τρεις. Χαρακτηριστικότερα δείγματα είναι τα παρακάτω δυο:

- **Tripile/Τριπλού πυλώνα:** Σε αυτό το είδος οι τρεις κάθετοι πάσσαλοι ενώνονται πάνω από την επιφάνεια του νερού σε μια κατασκευή συνδετική στην οποία εδράζεται και ο πύργος. Είναι αρκετά σταθερές κατασκευές και συνήθως γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη 20-40m.
- **Tripod/Τρίποδο:** Σε αυτόν τον τύπο έδρασης οι τρεις κάθετοι πάσσαλοι ενώνονται μέσω τριών διαγώνιων συνδετικών ράβδων με το κυρίως μέρος του πυλώνα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Όπως και στο tripile έχουμε καλή παρεχόμενη ευστάθεια και γίνεται χρήση αυτής της έδρασης για βάθη 20-50m, λίγο βαθύτερα δηλαδή από την τριπλού πυλώνα.



Space Frame (Tri-pile)



Space Frame (Tripod)

Εικόνα 2.12 Tripile/Tripod. Πηγή: [15]

2.6 Πλωτές Α/Γ

2.6.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Οι υπεράκτιες Α/Γ με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην διπλωματική και θα ερευνήσουμε τη δυναμική τους απόκριση σε κυματισμό είναι πλωτές. Πλωτές είναι οι κατασκευές που τη στήριξή τους την αναλαμβάνει το νερό.

Μέσω πλωτήρων εξασφαλίζεται λόγω άνωσης η διατήρηση της κατασκευής στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι εν λόγω ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε πλωτήρες είτε ομαδικά είτε μεμονωμένες. Η σύνδεση των Α/Γ με τον πυθμένα γίνεται μέσω κατάλληλων γραμμών αγκύρωσης. Δυο είναι τα βασικά διαφορετικά είδη αγκύρωσης, με προεντεταμένη καλωδίωση και με συμβατικούς κλάδους αγκύρωσης. Έτσι έχοντας εξασφαλισμένη την επίπλευση από τους πλωτήρες επιδιώκουμε τη σταθερότητα στις κινήσεις surge, sway, heave, roll, pitch και yaw μέσω των κλάδων αγκύρωσης. Τα υλικά των κλάδων αγκύρωσης ποικίλουν. Έτσι έχουμε καλωδιώσεις από μεμονωμένα υλικά όπως χάλυβας και σύνθετα υλικά, καθώς και συνδυασμούς αυτών.

Η αγκύρωση στον πυθμένα λαμβάνει χώρα με τα εξής είδη αγκυρών:

- Gravity based: Βαρύτητας
- Drilled and grouted pile: Άγκυρες που οδηγούνται από πάσσαλο μετά από διάτρηση του πυθμένα.
- Drag embedded: Που εμπηγνύονται στον βυθό κατά τη φάση που σύρονται.
- Suction: Απορρόφησης.
- Torpedo embedded: Άγκυρες που εισχωρούν βιαίως στον πυθμένα μέσω τορπίλης.

2.6.2 Πλεονεκτήματα πλωτών Α/Γ

Οι πλωτές ανεμογεννήτριες άρχισαν να υφίστανται σαν ιδέα από το 1972, από τον καθηγητή του M.I.T. William E. Heeremus. Η χρήση τους διακρίνεται, πέραν των προαναφερθέντων για τις Α/Γ σε γενικά θαλάσσιο περιβάλλον, από αρκετά επιπρόσθετα πλεονεκτήματα. Ακολουθεί η παρουσίαση των βασικότερων εξ αυτών :

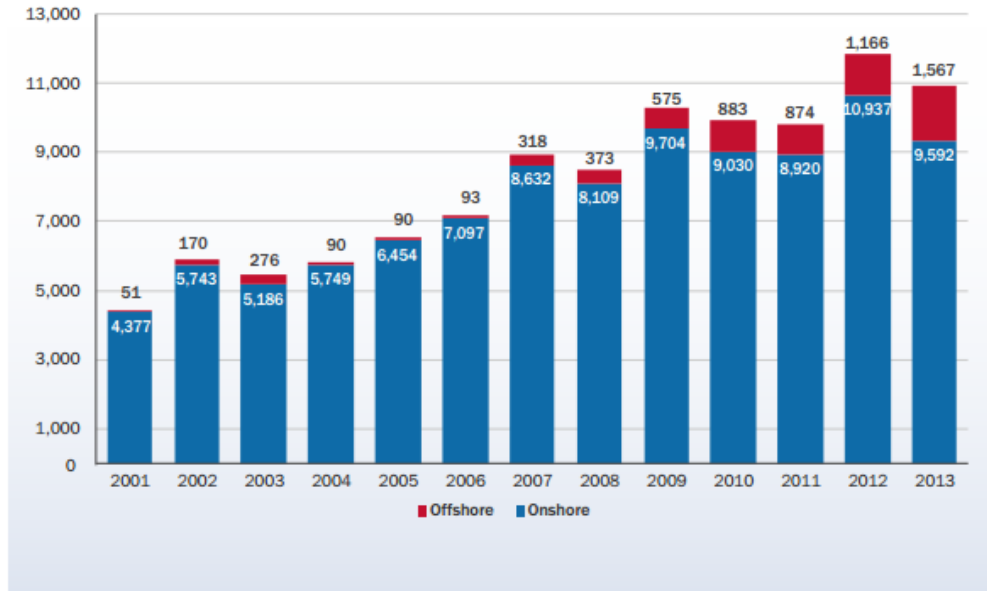
- Κατ' αρχάς από τους βασικότερους λόγους που αντιτίθενται αρκετές κοινωνίες στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων κοντά στην ακτογραμμή είναι η λεγόμενη οπτική όχληση. Δημιουργώντας υπεράκτια πλωτά αιολικά πάρκα απομακρυσμένα από την ακτογραμμή προσπερνούμε αυτό το πρόβλημα.
- Απομακρύνοντας τα αιολικά πάρκα από την ακτογραμμή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερης ισχύος ανεμογεννήτριες ώστε να αξιοποιήσουμε

το γεγονός ότι οι άνεμοι που πνέουν στις ανοικτές θάλασσες έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από τους ανέμους στην ξηρά, η οποία μάλιστα αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από τις ακτές. Λόγω απουσίας γειτνιαζόντων τοπογραφικών εμποδίων το δυναμικό του ανέμου είναι αρκετά ισχυρότερο από ότι αυτό που υπάρχει παράκτια, καθώς και σταθερότερο και με μικρότερη τύρβη.

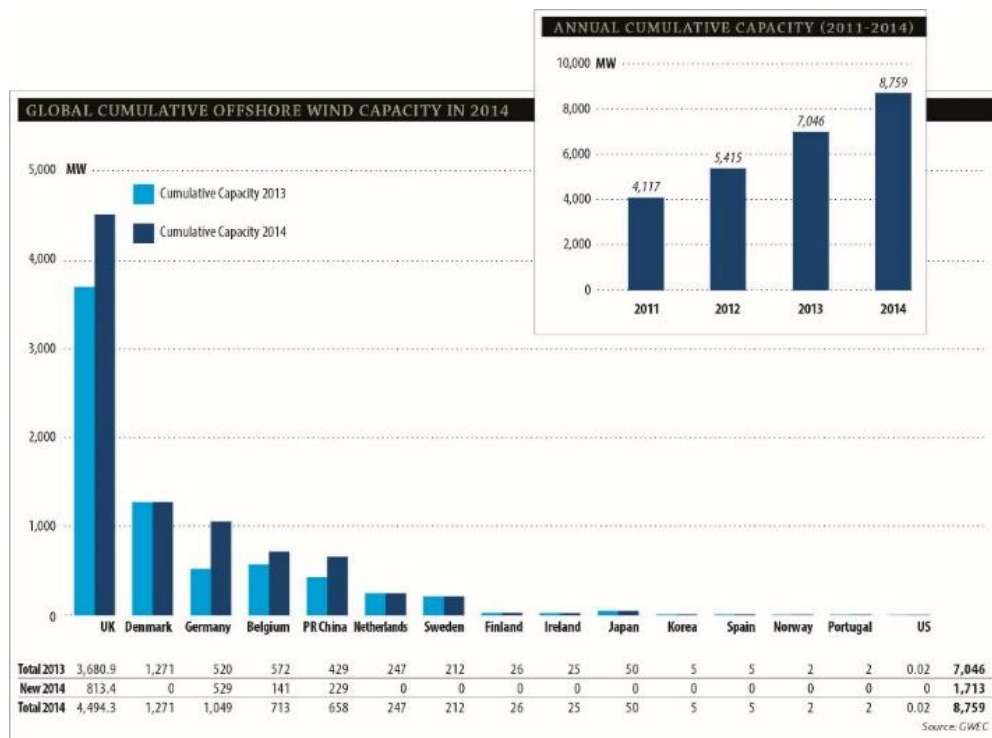
- Η θεμελίωση σταθερής έδρασης Α/Γ μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι τα βάθη των 50m. Από εκεί και έπειτα είναι ή τεχνικά ανέφικτη ή οικονομικά ασύμφορη. Συνήθως όμως το ανάγλυφο του βυθού είναι τέτοιο που ούσες απομακρυσμένες οι ανεμογεννήτριες για τους ανωτέρω λόγους (μη οπτική όχληση και καλύτερο δυναμικό) βρίσκονται σε νερά βάθους πολύ μεγαλύτερα των 50m. Είναι πολύ σπάνιο ο πυθμένας να βρίσκεται σε μικρότερο βάθος όταν απομακρυνόμαστε χιλιόμετρα μακριά από την ακτογραμμή. Ειδικά στην Ελλάδα μοιάζει ακόμη σπανιότερο λόγω του αρκετά απότομου υποθαλάσσιου ανάγλυφου της.
- Έχουν μικρότερο κόστος συναρμολόγησης/εγκατάστασης. Η συναρμολόγηση γίνεται στην ξηρά και ακολούθως ρυμουλκούνται στο σημείο πόντισης.
- Έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα αφού δεν επηρεάζουν τον πυθμένα σημαντικά κατά την εγκατάστασή τους. Ακόμη μπορούμε να τις αποσυναρμολογήσουμε εύκολα και άμεσα ώστε να μεταφερθούν αλλού χωρίς να αφήσουν κατάλοιπα στον πυθμένα (όπως αντίστοιχα οι βαρύτητες).
- Δεν επηρεάζουν τον κλάδο της αλιείας αρνητικά όπως οι σταθερής έδρασης. Έχοντας μικρότερη επιρροή στον υποθαλάσσιο κόσμο αφού δεν προστίθενται στον πυθμένα βαριές και ογκώδεις κατασκευές ώστε να τον αλλάξουν, δεν μειώνουν τη θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα της γύρω περιοχής. Έτσι σε αντίθεση με τις θεμελιωμένες Α/Γ, που για αρκετά χρόνια από τη φάση της εγκατάστασής τους και μετά μειώνουν δραματικά την υποθαλάσσια ζωή, οι πλωτές Α/Γ δεν επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα της περιοχής ώστε να επιδρά αρνητικά αυτό και στην εν δυνάμει αλιευτική δραστηριότητα.
- Τέλος ειδικά για τις ελληνικές θάλασσες και δη στο Αιγαίο ενδείκνυται ιδιαίτερα η χρήση των πλωτών Α/Γ. Στον χώρο αυτό έχουμε παρουσία ισχυρών ανέμων με το ύψος των κυμάτων να μην ξεπερνάει τα 8 μέτρα. Έτσι οι κυματισμοί δύσκολα θα μπορούσαν να προκαλέσουν μηχανική βλάβη στην ανεμογεννήτρια, για παράδειγμα να σπάσουν ένα πτερύγιο. Αυτό σημαίνει ότι οι πλωτήρες θα είναι ακόμη πιο απλοί και πιο φθηνοί σε κόστος. Ακόμη κρίνεται συμφέρουσα η λύση των πλωτών Α/Γ στον ελλαδικό χώρο λόγω εξαιρετικά απότομου ανάγλυφου του

πυθμένα, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να βρεθεί σημείο θεμελίωσης (έως 50m) μακριά από την ακτογραμμή που είναι και το ζητούμενο.

FIGURE 3.3: ANNUAL ONSHORE AND OFFSHORE INSTALLATIONS (MW)



Εικόνα 2.13 Εξέλιξη των παραχθεισών MW τόσο από παράκτιες (μπλε χρώμα) όσο και από υπεράκτιες (κόκκινο χρώμα), από το 2001 έως το 2013. Πηγή: [2]

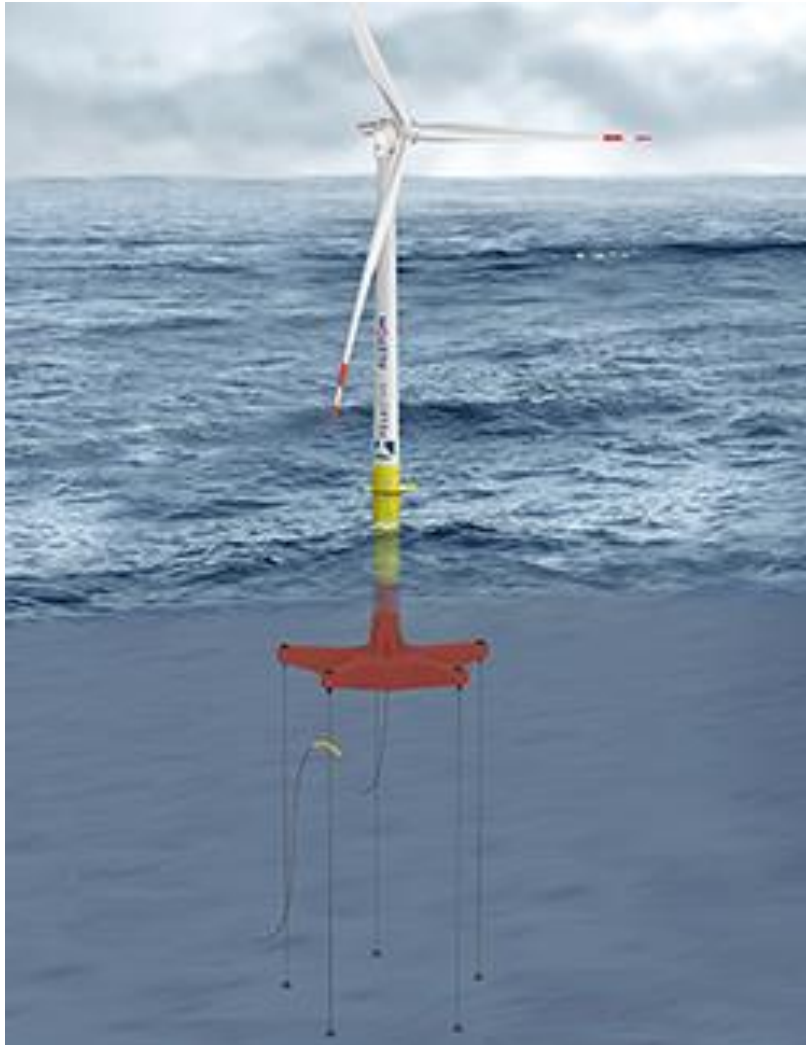


Εικόνα 2.14 Παραχθείσα ισχύς από υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παγκοσμίως από το 2011 έως και το 2014. Για τα έτη 2013 και 2014 στο γράφημα υπάρχει και ο καταμοιρασμός της ανά περιοχή. Πηγή: [16]

2.6.3 Είδη πλωτών Α/Γ

Οι βασικότερες κατηγορίες πλωτών ανεμογεννητριών είναι οι εξής τρεις:

2.6.3.1 TLP (*tension-leg platform*)



Εικόνα 2.15 TLP. Πηγή: [13]

Οι πλατφόρμες TLP είναι συνδεδεμένες με τις άγκυρες στον βυθό, μέσω προεντεταμένων καλωδίων συνήθως από χάλυβα. Τα εν λόγω καλώδια βρίσκονται στην κάθε γωνία της πλωτής κατασκευής, τα οποία μέσω της προέντασης που έχουν δεχτεί περιορίζουν τις αξονικές κινήσεις (heave). Ακόμη προσφέρουν αρκετά καλή ευστάθεια στην κατασκευή, λόγω της σημαντικής ροπής επαναφοράς σε pitch και roll κινήσεις που προσδίδουν. Η ίσαλος γραμμή είναι αρκετά μικρή αφού διατηρείται η πλατφόρμα λίγο χαμηλότερα από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι υπάρχει μικρή επιρροή από τα υδροδυναμικά κύματα.

Οι TLP θεωρούνται λιγότερο κατάλληλες για δύσκολα εδάφη αγκύρωσης αφού εξαρτώνται από τα είδη αγκυρών στα οποία θα προσδέσουν. Επίσης αποφεύγεται η χρήση τους σε περιοχές με έντονα παλιρροιακά φαινόμενα λόγω αυξομείωσης της στάθμης της θάλασσας και σε περιοχές με συχνά έντονες καταιγίδες.

2.6.3.2 Spar-buoy (ballast stabilized/σταθεροποίηση με έρμα)



Εικόνα2.16 Spar- buoy. Πηγή: [17]

Οι spar-buoy ανεμογεννήτριες αποτελούνται από έναν κατακόρυφο πυλώνα ο οποίος αφενός διαθέτει έρμα στην βάση του για να φέρει το κέντρο βάρους κατά το δυνατόν χαμηλότερα από το κέντρο πλευστότητας και αφετέρου στην κορυφή του είναι κενός υλικού (κούφιος) και εσωκλείει μεγάλες ποσότητες αέρα ώστε να επιπλέει. Η

αγκύρωσή τους γίνεται και με τις δυο κατηγορίες (κλασσικοί κλάδοι αγκύρωσης ή με προένταση) αναλόγως των συνθηκών. Είναι εγγενώς σταθερή κατασκευή και έχει χαμηλό λειτουργικό ρίσκο. Λόγω μικρής ισάλου γραμμής αποφεύγονται οι επιρροές από κυματικές φορτίσεις. Σε περιπτώσεις που γέρνει παραπάνω από το αναμενόμενο λόγω των φορτίσεων του ανέμου και των κυμάτων, λύση αποτελεί η προσθήκη έρματος. Μειονέκτημά της αποτελεί πως υπάρχει δυσκολία στη διαδικασία της εγκατάστασης/συναρμολόγησής της σε περίπτωση που γίνεται σε μη προστατευμένες περιοχές βαθιών νερών. Χρησιμοποιείται σε βάθη μεγαλύτερα των 100m.

2.6.3.3 Barge/Semisubmersible/ Ημιβυθισμένες



Εικόνα 2.17 Barge. Πηγή: [18]

Οι πλωτές Α/Γ τύπου Barge αποτελούν ημιβυθισμένες πλατφόρμες. Η αγκύρωσή τους γίνεται συνήθως με κλασσικούς κλάδους αγκύρωσης. Έχουν πιο ευέλικτο σχεδιασμό από τα άλλα δυο είδη αλλά είναι λιγότερο σταθερές. Σημαντικό τους προτέρημα είναι πως κατασκευάζονται πλήρως εκτός θάλασσας και απλώς με ρυμούλκηση εγκαθίστανται στον χώρο που μας ενδιαφέρει.

2.7 Σημαντικότερα projects πλωτών Α/Γ

Εν συνεχεία θα παρουσιάσουμε τα σημαντικότερα ανά τον κόσμο projects πλωτών ανεμογεννητριών, που βρίσκονται εν εξελίξει την περίοδο αυτή. Η κατηγοριοποίησή τους θα γίνει βάσει της ηπείρου που ανήκουν καθώς και της μεθόδου έδρασής τους.

2.7.1 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

2.7.1.1 *Windfloat (Η.Π.Α./Πορτογαλία) (Semisubmersible)*

Η εταιρεία Principle Power είναι μια εταιρεία με έδρα το Seattle, έχουσα εξειδίκευση σε υπεράκτιες κατασκευές σε νερά μεσαίου και μεγάλου βάθους. Η πρότασή της για κατασκευή πλωτής Α/Γ είναι το Windfloat. Η έδρασή της γίνεται σε ημιβυθισμένη πλατφόρμα, αποτελούμενη από τρεις πυλώνες. Στους πυλώνες αυτούς γίνεται χρήση έρματος, ώστε μέσω αυτής της πατενταρισμένης τεχνολογίας να αμβλυνθεί η επιρροή των κυματισμών στην κατασκευή. Ακόμη μέσω του κλειστού τύπου γάστρας της πλατφόρμας, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σταθερότητά της έναντι των αλλαγών του ανέμου (σύστημα HTS hull trim system).

Στα προτερήματα της Windfloat (πέραν της προαναφερθείσας σταθερότητας) συγκαταλέγονται αφενός η χρήση συνήθων καλωδίων αγκύρωσης (αλυσίδες χάλυβα και πολυεστερικές γραμμές) και αφετέρου η δυνατότητα εξ ολοκλήρου κατασκευής της πλατφόρμας σε παράκτια περιοχή ώστε με ρυμούλκηση αυτής να γίνει η πόντισή της στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι ανωτέρω συνθήκες αποσκοπούν στην μείωση του τελικού κόστους του έργου.

Πλήρους κλίμακας μοντέλο ετέθη επιτυχημένα σε λειτουργία στις 22 Οκτωβρίου του 2011 σε απόσταση 5km από την ακτογραμμή της περιοχής Rónoa de Varzim της Πορτογαλίας. Η Α/Γ αυτή έχει ισχύ 2MW. Ωστόσο προβλέπεται το 2017 η χρήση της ίδιας τεχνολογίας για πάρκο 5 πλωτών Α/Γ συνολικής ισχύος 30MW, σε βάθος 345m στην περιοχή Coos Bay, στο Oregon της Αμερικής.

Προδιαγραφές [19]:

Ονομαστική ισχύς $\approx 3.0-10\text{MW}$

Διάμετρος ρότορα $\approx 120-170\text{m}$

Ύψος έδρασης της τουρμπίνας $\approx 80-90\text{m}$

Βάρος της ατράκτου $\approx 225 - 315$ τόνους

Βάρος πυλώνα ≈ 180 έως 315 τόνους

Βάθος βύθισης $\approx 20\text{m}$

Επιχειρησιακό βάθος νερού $> 50\text{m}$

Συμβατικές γραμμές πρόσδεσης: 4 γραμμές, εκ των οποίων οι 2 θα είναι στον πυλώνα που εδράζεται η Α/Γ και οι άλλες δυο στους άλλους δυο πυλώνες της πλατφόρμας.

Περιοχές πόντισης: (2011) Ρόνοα de Varzim Portugal $41^{\circ}22'48''\text{N } 8^{\circ}45'39''\text{W}$, (2017) Coos Bay, Oregon USA 2017 $43^{\circ}22'35''\text{N } 124^{\circ}14'14''\text{W}$



Εικόνα 2.17 Α/Γ: Windfloat. Πηγή: [19]

2.7.1.2 DeepCwind Voltturn US (Η.Π.Α.) (Semisubmersible)

Το 2011 η κοινοπραξία DeepCwind υπό την αιγίδα του πανεπιστημίου Maine, ξεκίνησε μελέτες για την εύρεση του ιδανικότερου μοντέλου πλωτής Α/Γ. Υπέβαλλε σε δοκιμές διάφορες προτάσεις Α/Γ σε ειδικές δεξαμενές στην Ολλανδία, καταλήγοντας σε αυτήν της ημιβυθισμένης πλατφόρμας. Η γάστρα αυτής θα αποτελείται από μπετόν, ενώ ο πύργος της από σύνθετα υλικά. Τον Ιούνιο του 2013 ετέθη υπό δοκιμή μοντέλο κλίμακας 1/8 σε σχέση με το στοχευόμενο, στην πολιτεία Maine έξω από το νησί Monhegan. Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι 19.8m ύψος και 20kw ισχύος. Έως αυτή τη στιγμή τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι εξαιρετικά επιτυχημένα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η έγκριση από τις ρυθμιστικές αρχές του κράτους, τον Ιανουάριο του 2014, της εγκατάστασης των δυο ανεμογεννητριών πλήρους μεγέθους στην περιοχή το 2016. Οι εν λόγω Α/Γ θα είναι ύψους 128,9m και ισχύος 6MW, αποδίδοντας συνολικά 12MW.

Προδιαγραφές [20]:

Ονομαστική ισχύς: 6MW

Ύψος : 128.9m

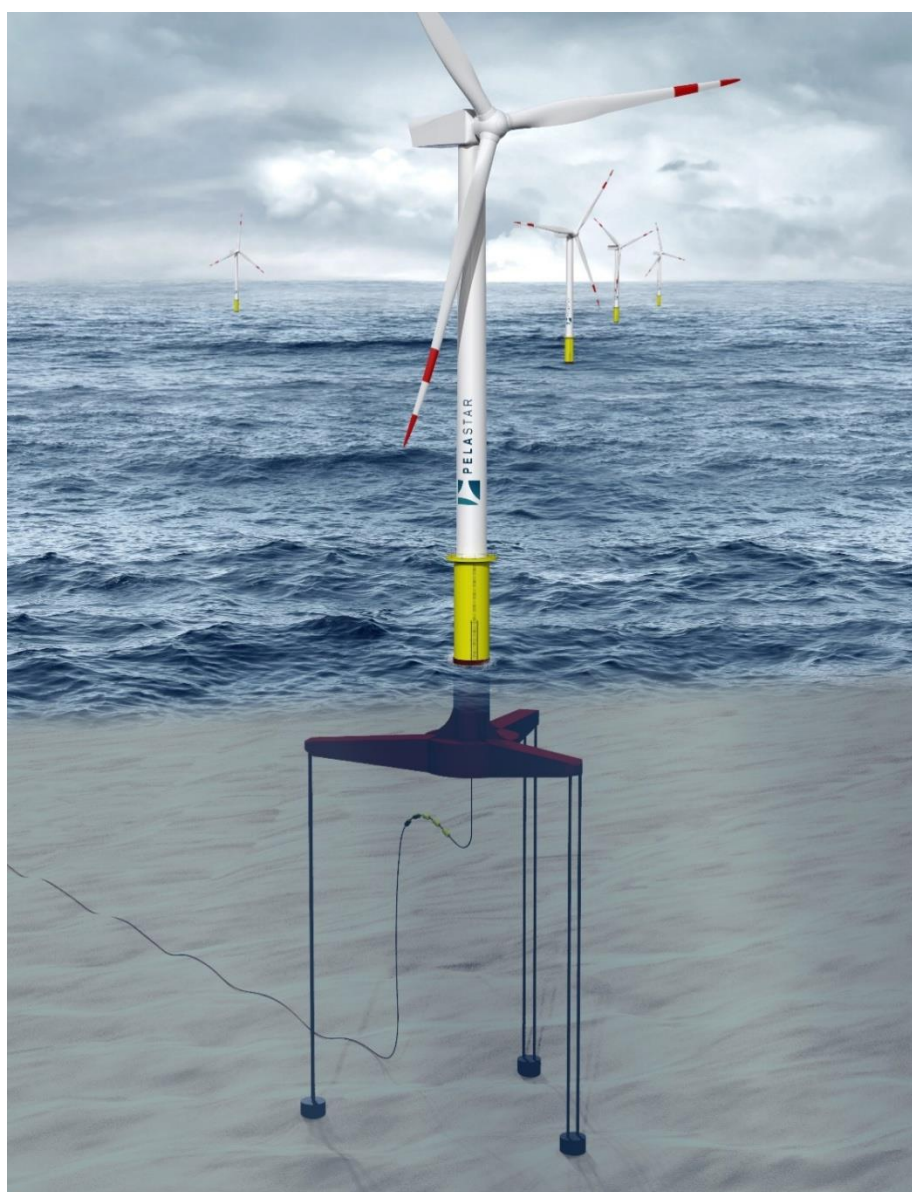
Περιοχή πόντισης: 43°43'18"N 69°17'39"W



Εικόνα 2.18 Α/Γ: Voltturn. Πηγή: [20]

2.7.1.3 Pelastar (Η.Π.Α.) (TLP)

Η εταιρεία Glosten Associates από το Seattle άρχισε από το 2006 να μελετά την κατασκευή πλωτής υπεράκτιας Α/Γ. Η πρότασή της εν τέλει ήταν το Glosten Pelastar. Η κατασκευή αυτή είναι πλατφόρμα μορφής TLP. Μπορεί να υποστηρίξει διάφορα μεγέθη πυλώνων καθώς και ποικιλία ισχύος Α/Γ, ήδη υφιστάμενων αλλά και μελλοντικών. Η πρόσδεσή της στον πυθμένα θα γίνεται είτε μέσω χαλύβδινων προεντεταμένων καλωδίων, είτε μέσω τενόντων από σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής. Για το 2015 προβλέπεται η κατασκευή πλήρους κλίμακας μοντέλου ισχύος 6MW , όπου θα λειτουργήσει στις νότιες ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου [21].

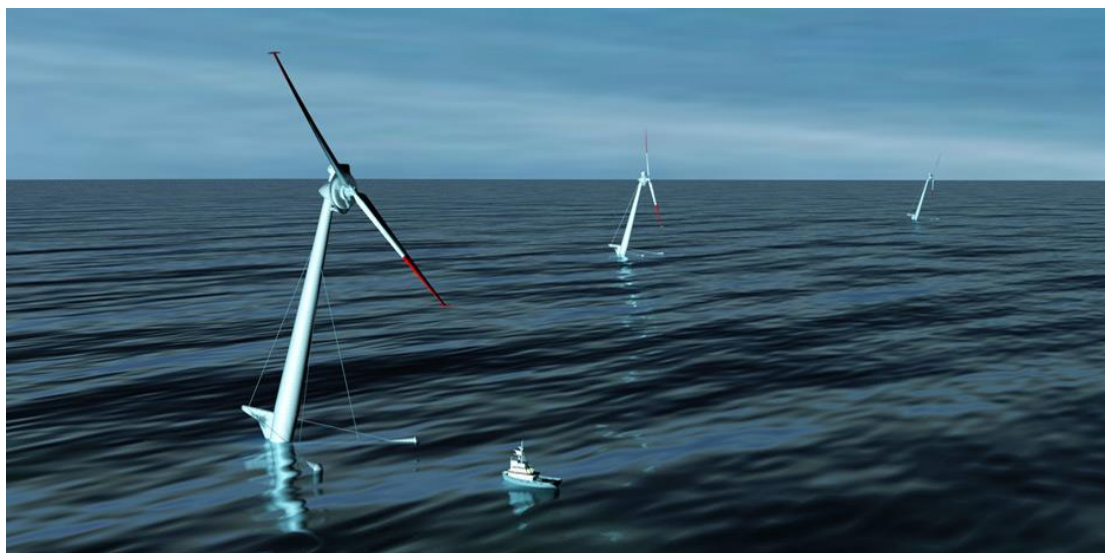


Εικόνα 2.19 Α/Γ: Pelastar. Πηγή: [22]

2.7.1.4 Nautica Windpower AFT (H.Π.A.) (TLP)

Η εταιρεία Nautica Windpower σχεδίασε την πλωτή ανεμογεννήτρια Advanced Floating Turbine (AFT). Παρ' όλων ότων μοιάζει με κατασκευή spar-buoy κατ'ουσίαν είναι ένα υβρίδιο TLP και Semisubmersible, με χαρακτηριστικά περισσότερο TLP πλατφόρμας. Ο σχεδιασμός του είναι ιδιαίτερα ριζοσπαστικός επιτυγχάνοντας σύμφωνα με την εταιρεία σημαντική μείωση κόστους σε κάθε στάδιο από την κατασκευή και την μεταφορά έως και την συντήρηση. Έτσι λόγω της μειωμένης έκτασης της βάσης έδρασης (εν αντιθέσει με τις TLP και Semisubmersible), της χρήσης μόνο μιας γραμμής αγκύρωσης, της ύπαρξης μόνο δυο πτερυγίων έναντι τριών έχουμε μείωση του απαραίτητου υλικού κατασκευής κατά 75%. Επιπλέον στην μείωση του κόστους συνεπικουρούν: η ευκολία μεταφοράς από το λιμάνι κατασκευής της με απλές φορηγίδες, η απλή διαδικασία πόντισής της και η απλουστευμένη (λόγω της μορφής της) συντήρησή της .

Οι δοκιμές που ακολούθησαν του σχεδιασμού έλαβαν μέρος σε ειδικές δεξαμενές, καθώς και σε μεγάλες λίμνες (με μοντέλο κλίμακας 1/2). Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως το είδος της κατασκευής είναι αρκετά σταθερό ακόμη και σε πιθανό τυφώνα. Το 2016 προβλέπεται η δοκιμαστική πόντιση του προαναφερθέντος μοντέλου κλίμακος 1/2 σε θαλάσσιο περιβάλλον μεγάλου βάθους και εν συνεχεία η έναρξη παραγωγής του AFT πλήρους μεγέθους το 2018 [23].



Εικόνα 2.20 Α/Γ: AFT. Πηγή: [23]

2.7.2 Ασία-Ιαπωνία

Στην ασιατική ήπειρο το ενδιαφέρον για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι μεγάλο, αλλά μόνο η Ιαπωνία προς το παρόν ασχολείται ενεργά με τον τομέα των πλωτών Α/Γ. Οι υπόλοιπες χώρες, όπως Κίνα και Νότια Κορέα, εστιάζουν τις έρευνές τους σε αυτές της σταθερής έδρασης.

2.7.2.1 Fukushima floating offshore windfarm

Έπειτα από τις καταστροφικές επιπτώσεις του πυρηνικού ατυχήματος στη Fukushima τον Μάρτιο του 2011, η Ιαπωνία, με περισσότερα από 10 χρόνια ερευνών στις πλωτές υπεράκτιες κατασκευές, έστρεψε το ενδιαφέρον της στην κατασκευή του μεγαλύτερου υπεράκτιου πλωτού αιολικού πάρκου. Στόχος της Ιαπωνικής κυβέρνησης είναι να ικανοποιεί τις ενεργειακές της ανάγκες αποκλειστικά από ΑΠΕ έως το 2030. Άλλωστε το ιαπωνικό κέντρο έρευνας του αιολικού δυναμικού, υποστηρίζει πως ένας ρεαλιστικός στόχος ενεργειακής απόδοσης του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού είναι τα 608GW.

Ο προγραμματισμός του έργου είναι η ολοκλήρωση έως το 2015 της λειτουργίας ενός μικρού πάρκου 16MW και η πλήρης λειτουργία του έως το 2018. Το πρώτο σκέλος χωρίζεται σε δυο φάσεις: Η μεν πρώτη ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2013 και συμπεριελάμβανε την κατασκευή/λειτουργία ενός πλωτού υποσταθμού advanced-spar 25MVA, ενός υποθαλάσσιου καλωδίου 66kV σύνδεσης με την ξηρά και μιας 4 πυλώνων ημιβυθισμένης ανεμογεννήτριας απόδοσης 2MW. Η δε δεύτερη φάση περιέχει την λειτουργία δυο ανεμογεννητριών ισχύος 7MW, εκ των οποίων η μια θα είναι 3 πυλώνων ημιβυθισμένη και η άλλη advanced-spar. Η ημιβυθισμένη ετέθη σε εφαρμογή στα τέλη του Φεβρουαρίου του 2015 και η advanced-spar σύμφωνα με το πρόγραμμα θα πρέπει να είναι σε λειτουργία μέχρι τα τέλη του 2015.

Προδιαγραφές [24]:

Βάθος νερού: 100-200m

Ετήσια μέση τιμή ανέμου: 7m / s (στο ύψος της νασέλλας)

Μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος: 7-14m


Απόσταση από την ακτογραμμή: περίπου 20km

Συνολική ισχύς έως τα τέλη του 2015: 16MW

Περιοχή πόντισης: 37°46'N 140°28'E



Εικόνα 2.21 Α/Γ του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Fukushima. Πηγή: [24]

	Fukushima Offshore Wind Consortium
	Marubeni Corporation 1-4-2 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8088
	The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656
	Mitsubishi Corporation 2-3-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8086
	Mitsubishi Heavy industries, Ltd. 2-16-5 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8215
	Japan Marine United Corporation 5-36-7 Shiba, Minato-ku, Tokyo 108-0014
	Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. 5-6-4 Tsukiji Chuo-ku, Tokyo 104-8439
	Nippon Steel & Sumitomo Metal 2-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8071
	Hitachi Ltd. 1-6-6 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8280
	Furukawa Electric Co., Ltd. 2-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8322
	Shimizu Corporation 2-16-1 Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo 104-8370
	Mizuho Information & Research institute, Inc 2-3 Kandanishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8443

Εικόνα 2.22 Εταιρείες κοινοπραξίας υπεράκτιου αιολικού πάρκου Fukushima. Πηγή: [24]

2.7.2.2 Kagoshima Island, Kyush (Spar)

Υπό την κοινοπραξία του υπουργείου περιβάλλοντος της Ιαπωνίας και των Kyoto University Marine Development, Fuji Heavy Industries, Toda Construction και National Maritime Research Institute of Japan, ετέθη σε δοκιμαστική λειτουργία τον Ιούνιο του 2012 η ½ κλίμακας spar Α/Γ, ισχύος 100Kw. Έπειτα από την επιτυχή της δοκιμή, η κοινοπραξία κατασκεύασε και έθεσε σε λειτουργία πιλοτικά την πλήρους μεγέθους spar Α/Γ ισχύος 2MW.

Προδιαγραφές [21]:

Βάθος νερού: 80-100m

Ύψος πυλώνα: 170m

Διάμετρος ρότορα: 80m

Περιοχή πόντισης: 33° 0' 0" N, 131° 0' 0" E



Half Scale— Image Source: Kyoto University, Toda Construction



Full Scale - Image Source: Sankei Media

Εικόνα 2.23 Πλήρους και 1/2 κλίμακας δοκιμαστικά μοντέλα της Α/Γ: Kyush. Πηγή: [25]

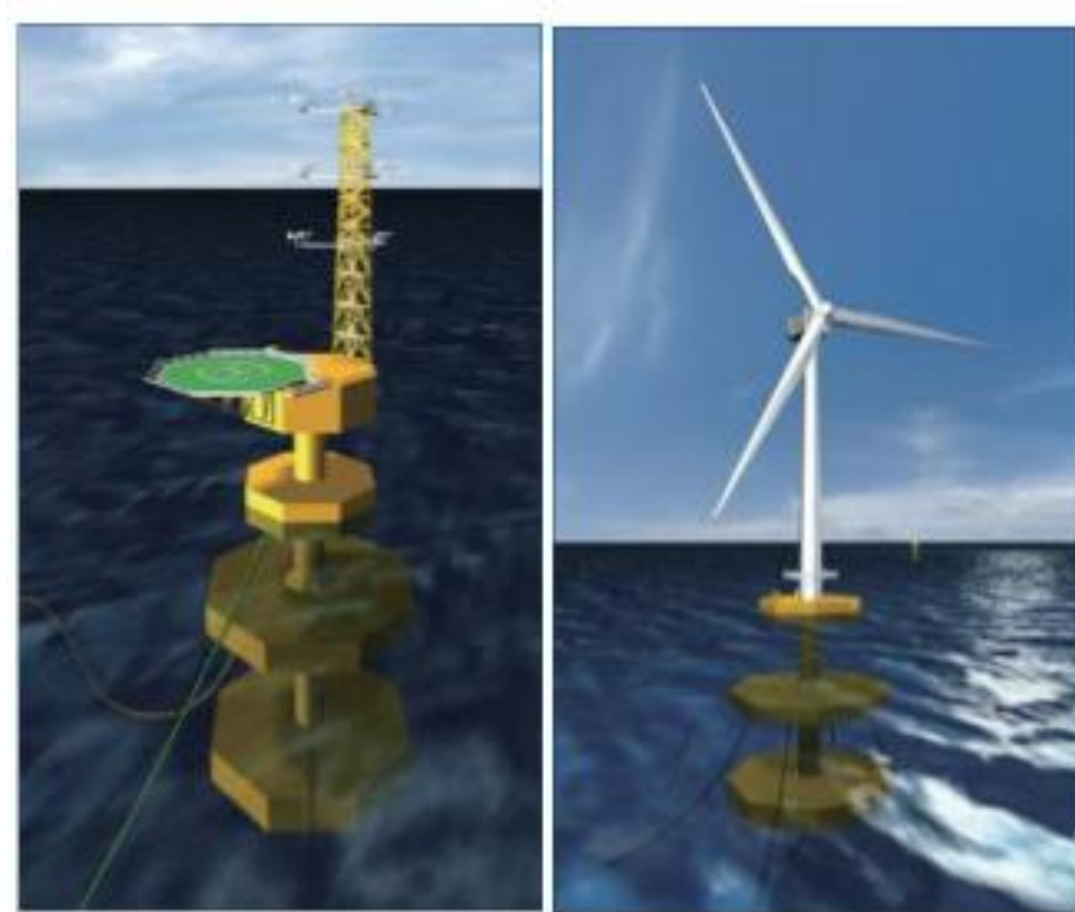
2.7.2.3 Japan Marine United (Advanced Spar)

Η Japan Marine United (IHI) σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Τόκιο ανέπτυξαν το συγκεκριμένο μοντέλο πλωτής spar ανεμογεννήτριας. Η προκειμένη Α/Γ έχει τη δυνατότητα περιορισμού των ταλαντώσεων κατά τις κινήσεις heave και sway. Η κατασκευή είναι ικανή να υποστηρίξει τόσο τον υποσταθμό στο αιολικό πάρκο της Fukushima, όσο και την Α/Γ με την τουρμπίνα της Mitsubishi των 7MW.

Προδιαγραφές για την πλωτή Α/Γ [21] :

Ύψος πλήμνης: 105m

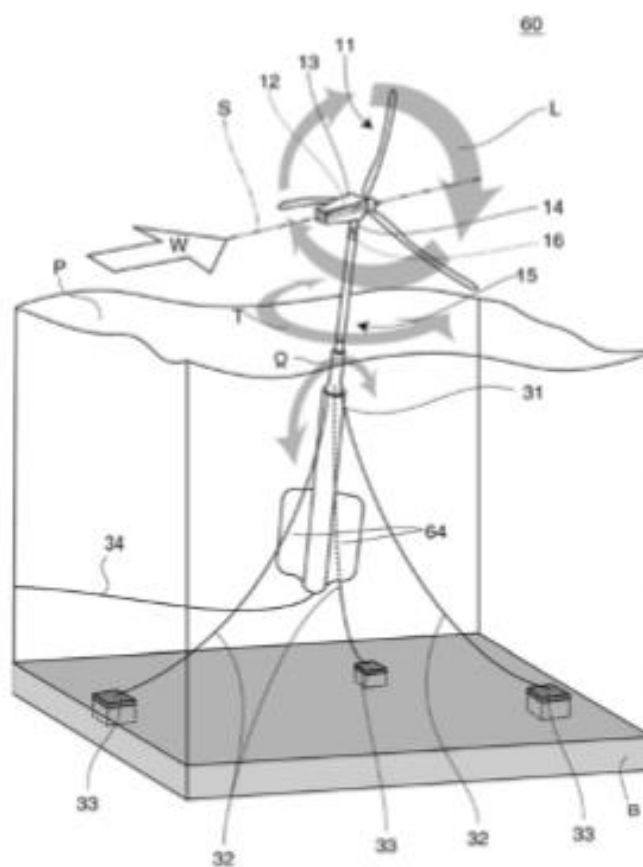
Διάμετρος ρότορα: 167m



Εικόνα 2.24 Advanced Spar Α/Γ της εταιρείας 2.7.2.3 Japan Marine United. Πηγή: [24]

2.7.2.4 National Maritime Research Institute of Japan (Spar)

Το ινστιτούτο θαλασσίων ερευνών της Ιαπωνίας χρηματοδοτείται τόσο από κυβερνητικά προγράμματα, όσο και από ιδιωτικούς πόρους για την ανάπτυξη υπεράκτιων κατασκευών. Στο πλαίσιο αυτό σχεδίασε πλωτή ανεμογεννήτρια Spar η οποία έχει περάσει με επιτυχία τα υπολογιστικά τεστ προσομοιώσεων καθώς και αυτά σε δεξαμενές κλίμακας. Απομένει η εξέλιξη του ρότορα και η βελτίωση έναντι ανατροπής στις κινήσεις yaw και pitch[26].



Εικόνα 2.25 Σχέδιο Spar A/Γ του ινστιτούτου National Maritime Research Institute of Japan. Πηγή: [26]

2.7.2.5 Wind Lens, Kyushu (Floater, Hybrid)

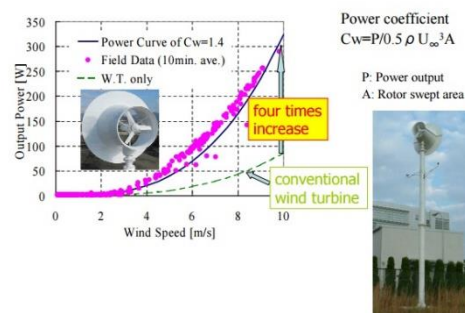
Ο τομέας μελέτης των ανανεώσιμων πηγών του πανεπιστημίου του Kyushu, ανέπτυξε ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα με την ονομασία Wind Lens η οποία φέρει δακτυλιοειδές κέλυφος γύρω από τον ρότορα. Μέσω αυτού του διαχύτη δημιουργούνται ισχυροί στρόβιλοι και παράγεται χαμηλή πίεση στην περιοχή πίσω από την τουρμπίνα. Αυτή η διαφορά πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ροή μάζας εντός της ανεμογεννήτριας. Έτσι η απόδοση της δύναται να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις συνήθεις κατασκευές Α/Γ αντίστοιχων χαρακτηριστικών.

Η έδραση των εν λόγω δυο Α/Γ γίνεται σε εξάεδρο που στηρίζεται σε αντίστοιχα έξι πλωτήρες. Στην πρώτη φάση του προγράμματος οι Wind Lens δοκιμάστηκαν σε ακραίες συνθήκες σε έρημο στην Κίνα και η πλωτή εξέδρα έδρασης σε δεξαμενές δοκιμών κλίμακας του πανεπιστημίου. Ακολούθησε η πόντιση στις 4 Δεκεμβρίου 2011 της υπό κλίμακα, διαμέτρου 18m, πλωτής εξέδρας με δύο τουρμπίνες των 3kW, 600 μέτρα από την ακτογραμμή του κόλπου Hakata. Η εν λόγω εξέδρα έφερε στο κατάστρωμα της και ηλιακούς συλλέκτες.

Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την κατασκευή/λειτουργία πλατφόρμας διαμέτρου 80m, η οποία θα διαθέτει δυο ανεμογεννήτριες των 100kW απόδοσης και θα είναι αγκυρωμένη μέσω προεντεταμένης καλωδίωσης (TLP) σε απόσταση 2000km από την ακτογραμμή. Επιπλέον θα διαθέτει και αυτή ηλιακούς συλλέκτες καθώς και μηχανισμούς ανάκτησης της κυματικής ενέργειας στους πλωτήρες. Ακόμη δεν έχει υπάρξει κάποια ανακοίνωση για την ενδεχόμενη ημερομηνία έναρξης της φάσης αυτής [27].



Result of 500W wind-lens turbine field test:



The result shows a significant increase of power output as much as 400% compared to conventional turbine. However, for larger turbines, reduction of the mass of the wind lens, and the size of the brim is important.

Εικόνα 2.26 Υπεράκτιο πάρκο Α/Γ: Wind Lens. Πηγή: [27]

2.7.2.6 SKWID, MODEC (Floater, Hybrid)

Η εταιρεία MODEC (Mitsui Ocean Development & Engineering Company) ανέπτυξε την υβριδική πλωτή κατασκευή SKWID. Χαρακτηρίζεται υβριδική διότι συνδυάζει την εκμετάλλευση του ανέμου και των θαλάσσιων ρευμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Το μεν πρώτο επιτυγχάνεται μέσω μια ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα (Darrieus), ενώ το δε δεύτερο μέσω μιας συσκευής ανάκτησης κυματικής ενέργειας (Savonius) που βρίσκεται στον πλωτήρα έδρασης της Α/Γ.

Εξαιτίας του χαμηλού κέντρου βάρους λόγω της μορφής της Α/Γ (κατακόρυφου άξονα) και του έρματος που βρίσκεται στον πλωτήρα η κατασκευή χαρακτηρίζεται εξαιρετικά σταθερή στις εκάστοτε θαλάσσιες συνθήκες. Ακόμη λόγω της μορφής που έχει είναι εύκολα προσβάσιμη για τις απαραίτητες επιδιορθώσεις και εργασίες συντήρησης. Επιπλέον χαρακτηριστικό του SKWID είναι πως δεν χρειάζεται εξωτερική πηγή ενέργειας για να ενεργοποιήσει την κίνηση του ρότορα σε περίπτωση χαμηλού/οριακού δυναμικού του ανέμου. Τον ρόλο αυτόν μπορεί να αναλάβει ο μηχανισμός ανάκτησης κυματικής ενέργειας, όπου μέσω κατάλληλου σερβομηχανισμού χρησιμοποιεί την κίνησή του από τα θαλάσσια ρεύματα για να εκκινήσει την Α/Γ.

Προδιαγραφές επικείμενου έργου [28]:

Ύψος πύργου: 47m

Βάθος κατασκευής: 16m

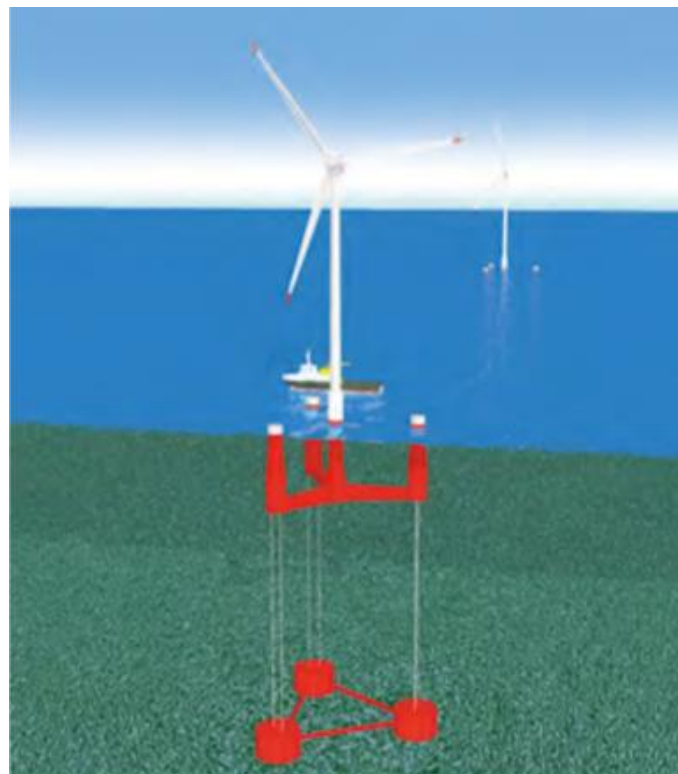
Ισχύς τουρμπίνας: 500kw



Εικόνα 2.27 Υβριδική Α/Γ κατακόρυφου άξονα: SKWID. Πηγή: [28]

2.7.2.7 Mitsui Zosen (TLP)

Η εταιρεία ναυπήγησης Mitsui έχει αναπτύξει το παρακάτω μοντέλο TLP πλατφόρμας Α/Γ σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Τόκιο, το Ινστιτούτο Θαλασσίων Ερευνών της Ιαπωνίας, την Shimizu Corporation και την Tokyo Electric Power Company. Σύμφωνα με την εταιρεία έχουν αρχίσει ήδη η δοκιμές σε δεξαμενές υπό κλίμακα μοντέλων [29].



Εικόνα 2.28 TLP Α/Γ της Mitsui Zosen. Πηγή: [21]

2.7.2.8 Mitsui Zosen (Semisubmersible)

Η εταιρεία Mitsui πέραν της ανωτέρω (2.7.2.7) πλωτής Α/Γ με τύπο έδρασης TLP, σχεδίασε και δημιούργησε την αντίστοιχη Α/Γ εδραζόμενη σε ημιβυθισμένη πλατφόρμα. Υλοποίηση αυτής είναι η Α/Γ ισχύος 2MW που ετέθη σε λειτουργία το 2013 στο αιολικό πάρκο της Fukushima (2.7.2.1) [29].



Εικόνα 2.29 Ημιβυθισμένη Α/Γ της Mitsui Zosen. Πηγή: [29]

2.7.2.9 Mitsubishi Heavy Industries (Semisubmersible)

Η Mitsubishi αποτελεί μια εταιρεία που έχει ιδιαίτερα ασχοληθεί κατά το παρελθόν με τις πλωτές κατασκευές. Δείγμα αυτής της ενασχόλησης αποτελεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της πλωτής Α/Γ για το αιολικό πάρκο Fukushima (που είδαμε στην παράγραφο 2.7.2.1) η οποία εδράζεται σε ημιβυθισμένη πλατφόρμα τριών πυλώνων και έχει ισχύ 7MW.

Προδιαγραφές έργου [30]:

Ύψος πυλώνων: 105m

Διάμετρος ρότορα: 167m

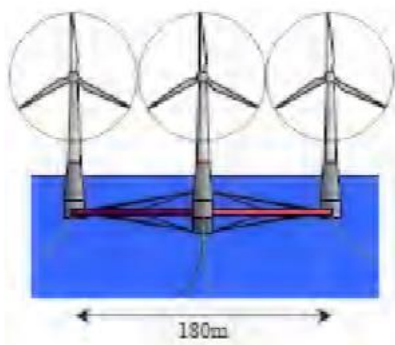
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας: 15m/s
Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας: 21m/s
RPM: 10.3
Βάρος: 26,000 t
Διάμετρος πυλώνα: 14 m



Εικόνα 2.29 Ημιβυθισμένη Α/Γ της Mitsubishi Heavy Industries. Πηγή: [30]

2.7.2.10 Shimizu Corporation (Semisubmersible)

Η Shimizu συνεργαζόμενη με το πανεπιστήμιο του Τόκιο, την Penta Ocean Construction Co. Ltd, την Tokyo Electric Power Company και υπό την εποπτεία του καθηγητή Ishihara (του πανεπιστημίου του Τόκιο) ανέπτυξαν την παρακάτω ημιβυθισμένη πλατφόρμα που φέρει τρεις ανεμογεννήτριες. Η Shimizu μετέχει στην κοινοπραξία για την υλοποίηση του αιολικού πάρκου στη Fukushima. Έτσι συνεχίζει να αποκτά εμπειρία στον τομέα αυτό εξελίσσοντας συγχρόνως τις δικές τις προτάσεις όπως η προκειμένη [21].



Εικόνα 2.30 Α/Γ της Shimizu corporation. Πηγή: [31]

2.7.3 Ευρώπη

2.7.3.1 Statoil Hywind, Norway (Spar)

Τον Σεπτέμβριο του 2009 ετέθη σε λειτουργία η πλωτή Α/Γ spar ισχύος 2.3MW στην περιοχή Karmøy της Νορβηγίας. Η κατασκευή των 5300tons βάρους αποτελείται από χαλύβδινο πυλώνα του οποίου το βύθισμα είναι μεγαλύτερο των 100m και κάνει χρήση έρματος εξισορρόπησης από νερό και σκυρόδεμα. Την πρόσδεσή της στο βυθό αναλαμβάνουν 3 γραμμές αγκύρωσης. Η κατασκευή και λειτουργία της είναι αποτέλεσμα της κοινοπραξίας των εξής εταιρειών: Statoil, Siemens WindPower, Technip και Nexon. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πρώτων ετών λειτουργίας της, αναλόγως πάντα του ετήσιου δυναμικού του ανέμου στην περιοχή πόντισης, η απόδοσή της κυμαίνεται μεταξύ 40-50%. Την περίοδο αυτή μελετάται η πιλοτική πόντιση 5 αντίστοιχων Α/Γ, ισχύος 6MW η καθεμία, 25km από την ακτογραμμή της Σκωτίας.

Προδιαγραφές [32]:

Βάρος τουρμπίνας: 138tons

Ύψος νασέλλας: 65m

Διάμετρος ρότορα: 82.4m

Βύθισμα πυλώνα: 100m

Διάμετρος πυλώνα στην ίσαλο γραμμή: 6m

Διάμετρος βυθισμένου πυλώνα: 8.3m

Βάθος νερού: 200m

Αγκυροβόλιο: Τρεις γραμμές

Περιοχή πόντισης: 59°15'23"N 5°14'57"E



Εικόνα 2.31 Spar A/G της Statoil. Πηγή: [32]

2.7.3.2 Sea Twirl, Sweden (Spar)

Το SeaTwirl είναι μια πλωτή κατασκευή Spar A/G κατακόρυφου άξονα η οποία συμπεριλαμβάνει τεχνολογία αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας, κατά την φάση στην οποία επικρατεί υψηλό δυναμικό στην περιοχή πόντισής της, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2. Τα μόνα μέρη της κατασκευής που δεν περιστρέφονται είναι το σύστημα αγκύρωσης και ο άξονας της γεννήτριας. Μέσω αυτής της διάταξης δεν υπάρχει ανάγκη για

άξονα μετάδοσης και κιβώτιο ταχυτήτων. Επίσης το αποθηκευμένο νερό χρησιμεύει σαν σύστημα εξισορρόπησης αφού χαμηλώνει το κέντρο βάρους της.

Τον Αύγουστο του 2011 διεξήχθη επιτυχής δοκιμή πειραματικής υπό κλίμακα 1:50 διάταξης και μέσα στο 2015 αναμένεται δοκιμή με μεγαλύτερου μεγέθους αντίστοιχης κατασκευής.

Προδιαγραφές μελλοντικής κατασκευής πραγματικού μεγέθους [10]:

Ονομαστική ισχύς: 10 MW

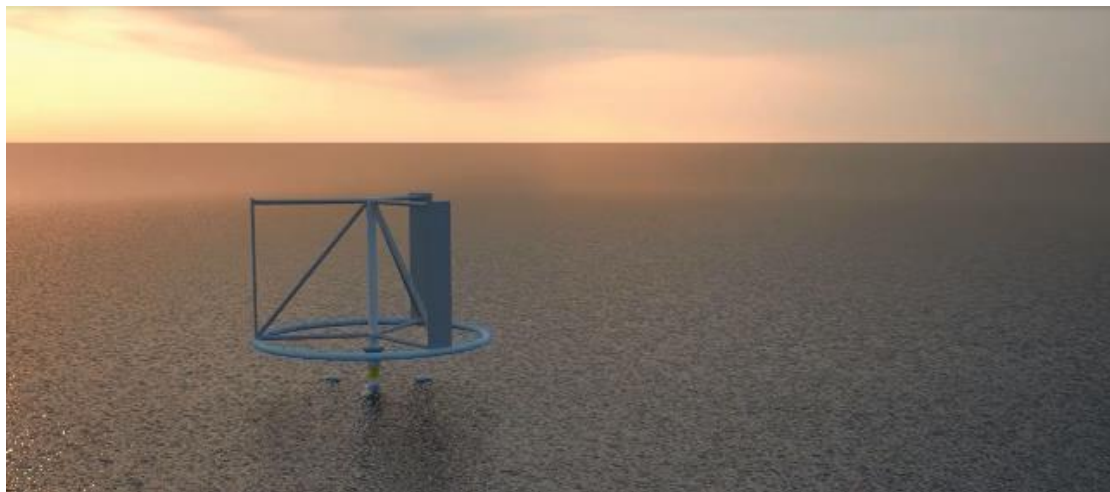
Μέση ισχύς: 4.5 MW

Ετήσια παραγωγή: 39 000 MWh

Ενέργεια αποθήκευσης: 25 000 kWh (θα μπορούσε να υποστηρίξει 8.000 νοικοκυριά κατά τη διάρκεια 1 ώρας)

Ύψος από την ίσαλο γραμμή: 210 m

Βάθος από την ίσαλο γραμμή: 228 m



Εικόνα 2.32 Α/Γ: SeaTwirl. Πηγή: [10]

2.7.3.3 Poseidon, Denmark (Semisubmersible, Hybrid)

Η πλατφόρμα Poseidon αποτελεί μια υβριδική συσκευή ανάκτησης κυματικής και υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Η ημιβυθισμένη κατασκευή χρησιμοποιεί και απορροφά την εγγενή ενέργεια των κυμάτων μειώνοντας έτσι το ύψος τους στα κατάντη της ροής τους. Έτσι πέραν της μετατροπής της κινητικής κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική, επιτυγχάνεται και καλύτερη εξισορρόπηση της κατασκευής λόγω των ηπιότερων κυματισμών που την επηρεάζουν μετά την απορρόφησή τους από αυτήν. Διευκολύνεται λοιπόν και η πρόσβαση στα εκάστοτε συνεργεία συντήρησης της εν λόγω συσκευής αφού στην πίσω πλευρά της επικρατούν ομαλότερες κυματικές συνθήκες.

Οι Α/Γ που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αυτή θα είναι από αυτές που ήδη κυκλοφορούν στο εμπόριο, ώστε να μην απαιτείται επιπλέον κόστος εξέλιξης εξειδικευμένου εξοπλισμού. Από τον Σεπτέμβριο του 2013 έχει τεθεί σε λειτουργία με επιτυχία, στις βόρειες ακτές της νήσου Lolland της Δανίας, πειραματικό μοντέλο υπό κλίμακα.

Προδιαγραφές μοντέλου υπό κλίμακα [33]:

Βάρος (μη ερματισμένου): 280 t

Μήκος: 25 m

Πλάτος: 37 m

Ύψος (χωρίς Α/Γ): 6 m

Ύψος νασέλλας τη: 12 m

Βύθισμα: 4.5 m

Περιοχή πόντισης: 54°46'10"N 11°25'28"E



Εικόνα 2.33 Υβριδική κατασκευή Α/Γ με μηχανισμούς ανάκτησης κυματικής ενέργειας: Poseidon. Πηγή: [33]

2.7.3.4 *Wind Sea, Norway (Semisubmersible)*

Η ημιβυθισμένη πλατφόρμα Wind Sea είναι αποτέλεσμα της κοινοπραξίας των: NLI (owner and leader), Force Technology (owner and leader), Riso DTU, SeMar, Scana Industrier ASA και Moog Inc. Αποτελείται από 3 πυλώνες Α/Γ και έχει αυτοματοποιημένο σύστημα εύρεσης του κατάλληλου προσανατολισμού για βέλτιστη εκμετάλλευση του ανέμου. Το σύστημα αγκύρωσής της είναι συνδεδεμένο σε έναν πυργίσκο που μπορεί να περιστρέφεται, τον οποίο διαπερνούν και τα καλώδια μετάδοσης της ενέργειας. Μέχρι στιγμής έχουν γίνει επιτυχή πειράματα σε δεξαμενές δοκιμών με υπό κλίμακα μοντέλα, χωρίς να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα για δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Προδιαγραφές [34]:

Ύψος προσήνεμα της Α/Γ πάνω από τη στάθμη της θάλασσας: 71 m

Ύψος υπήνεμο ανεμογεννήτριες πάνω από τη στάθμη της θάλασσας: 90 m

Απόσταση μεταξύ προσήνεμων στροβίλων: 103 m

Ισχύς εκάστης τουρμπίνας: 3,6MW, συνολική 10,8 MW

Διάμετρος ρότορα: 104 m

Βύθισμα: 23m

Βάρος χωρίς τουρμπίνες: 3.780t



Εικόνα 2.34 Α/Γ: Windsea. Πηγή: [34]

2.7.3.5 *Gusto Trifloater, Netherlands (Semisubmersible)*

Η ημιβυθισμένη πλωτή Α/Γ άρχισε να σχεδιάζεται το 2002. Το 2011 διεξήχθησαν επιτυχείς δοκιμές πειραματικών μοντέλων σε δεξαμενή. Διαθέτει 6 γραμμές πρόσδεσης αλυσοειδούς μορφής και είναι σχεδιασμένη για βάθη νερού μεγαλύτερα των 50 μέτρων. Η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω εύκαμπτης καλωδίωσης. Η προβλεπόμενη ισχύς είναι στα 5MW.

Προδιαγραφές [35]:

Συνολικό προβλεπόμενο βάρος: 3600t

Βύθισμα (λειτουργίας): 13.2m

Βάθος πυθμένα: 100m

Ύψος νασέλλας: 85m



Εικόνα 2.35 Α/Γ: Gusto Trifloater. Πηγή: [35]

2.7.3.6 WEMU, Russian Federation (Semisubmersible)

Το πανεπιστήμιο Far Eastern Federal σχεδιάζει την κάθετου άξονα Α/Γ δακτυλιοειδούς μορφής Wind Energy Marine Unit (WEMU). Η διάμετρός της είναι περισσότερα από 100m και η προβλεπόμενη ισχύς της θα είναι μεγαλύτερη από 20MW. Γίνεται εκτενής έρευνα για την κατασκευή της WEMU για πάνω από μια δεκαπενταετία.

Προδιαγραφές [36]:

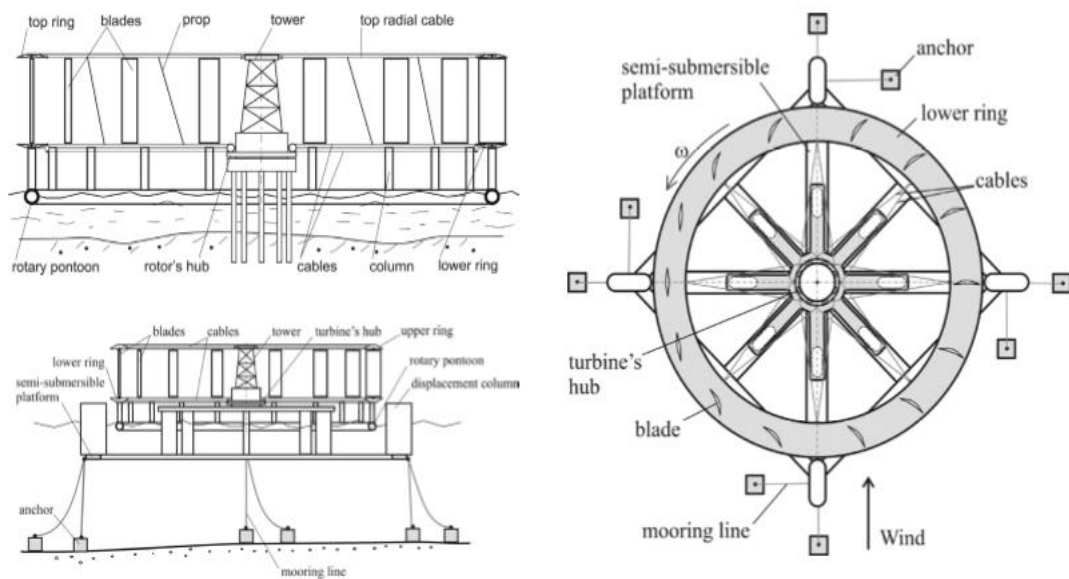
Διάμετρος: 50-300m

Διαστήματα μεταξύ των λεπίδων: 20-60m

Βάθος της θέσης εγκατάστασης: 5-700m

Διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου: 3-40m/s

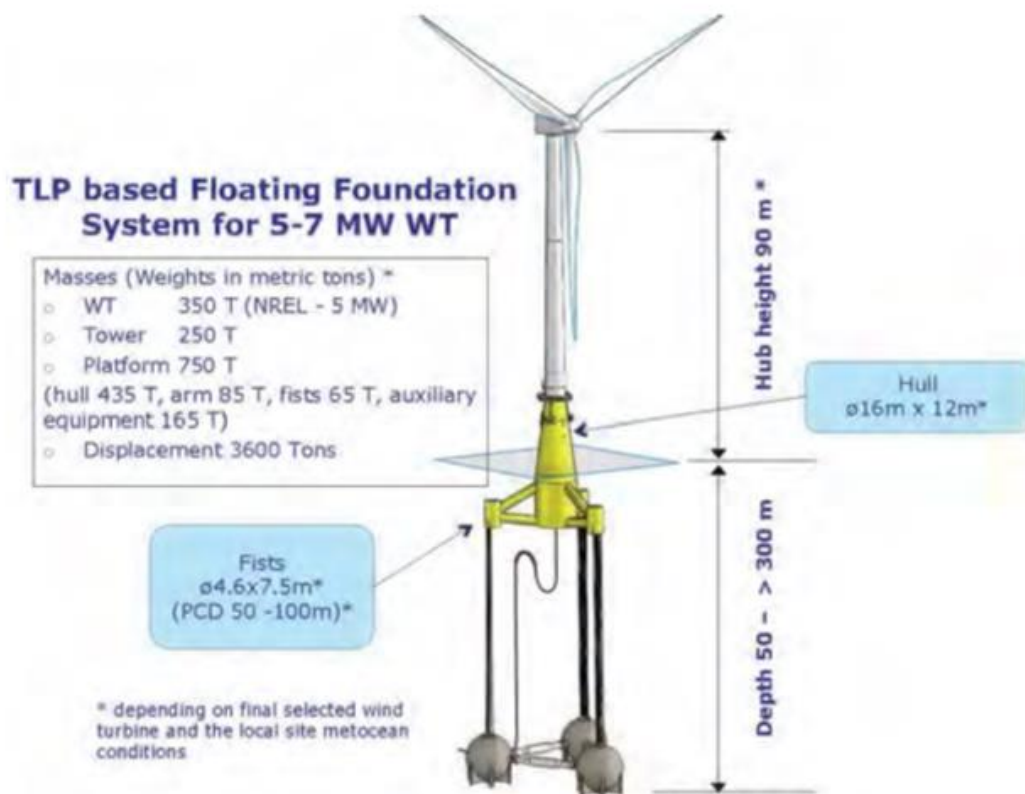
Ονομαστική ταχύτητα του ανέμου: 10-25m/s



Εικόνα 2.36 Α/Γ κατακόρυφου άξονα WEMU. Πηγή: [36]

2.7.3.7 Blue H, Netherlands (TLP)

Το 2008 μοντέλο υπό κλίμακα 75% της Α/Γ Blue H δοκιμάστηκε με επιτυχία για έναν χρόνο σε νερά βάθους 113m, σε απόσταση 23km από την ιταλική ακτογραμμή και έχοντας απόδοση 2MW. Ακολούθησε επεξεργασία των αποτελεσμάτων και επιπλέον δοκιμές σε δεξαμενές ώστε εντός του 2015 να αναμένεται η πόντιση μοντέλου πλήρους μεγέθους και το 2016 η έναρξη της εμπορικής του διάθεσης. Η προβλεπόμενη ισχύς της εν λόγω TLP Α/Γ θα είναι 5MW [37].



Εικόνα 2.37 Α/Γ: Blue H. Πηγή: [37]

2.7.3.8 GICON-SOF, Germany (TLP)

Η αγκύρωση TLP Α/Γ GICON-SOF (Schwimmendes Offshore Fundament), δύναται να λειτουργήσει τόσο σε ρηχά όσο και σε βαθιά νερά (από 20-700m). Μπορεί να σχεδιαστεί με διαφορετικά είδη πρόσδεσης, αναλόγως του πυθμένα στην περιοχή πόντισης. Επιπλέον αποτρέπει τις υψηλές επιταχύνσεις και μετακινήσεις.

Το 2012 μοντέλο κλίμακας 1:25 δοκιμάστηκε με υπέρ το δέον επιτυχία στην δεξαμενή HSVA στο Αμβούργο. Δοκιμάστηκε και ανταπεξήλθε σε προσομοιώσεις συνθηκών τόσο λειτουργίας όσο και οριακές [38].



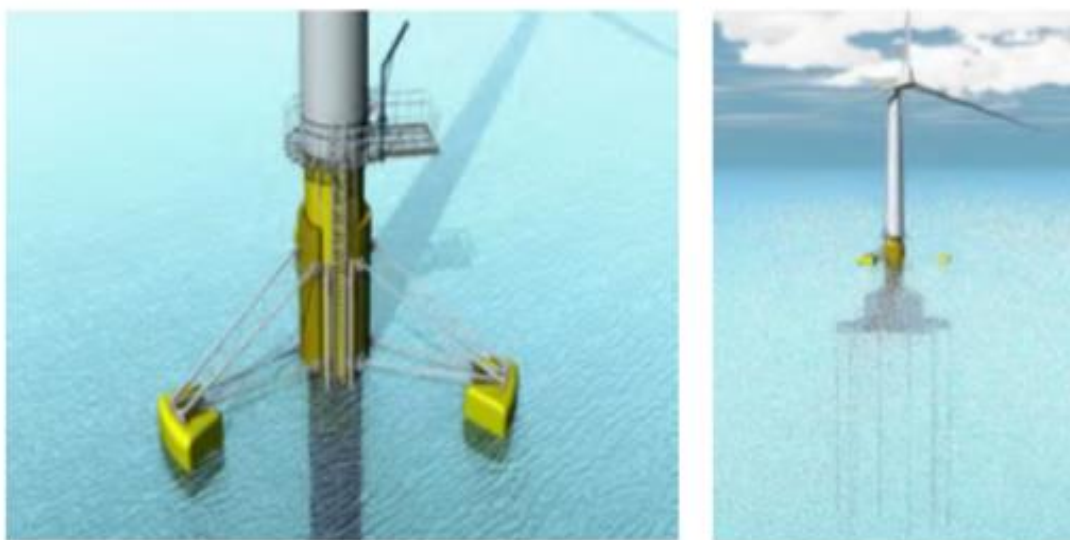
Εικόνα 2.38 TLP Α/Γ της Gicon-Sof. Πηγή: [38]

2.7.3.9 Iberdrola FLOTTEK, Spain (TLP)

Η Iberdrola σχεδιάζει δυο μοντέλα Α/Γ με αγκύρωση TLP. Το μεν πρώτο θα είναι για να δέχεται ανεμογεννήτρια 2MW, ενώ το δε δεύτερο 5MW. Έχει ήδη κάνει πειράματα σε δεξαμενές με μοντέλα κλίμακας 1/35 και 1/40 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τους φιλόδοξους στόχους που είχαν τεθεί για τα έργα αυτά, συμπεριλαμβανομένης της επίδοσης σε συνθήκες κύματος ύψους έως 31 μέτρα [39].

Προδιαγραφές:

Ισχύς	2MW	5MW
Βάθος νερού (m) / Hs / Hmax ₅₀	100 / 10.3 / 20	80 / 15 / 31
Αριθμός ποντονίων	4	4
Αριθμός γραμμών καλωδίωσης/ποντόνι	2	2
Βύθισμα λειτουργίας (m)	24	39.8
Βάρος κατασκευής (t)	2534	4333
Βάρος καλωδίων (t)	750	1053
Υλικό καλωδίωσης	Χάλυβας	Χάλυβας



Εικόνα 2.39 Α/Γ: Iberdrola. Πηγή: [39]

2.7.3.10 *Xanthus Energy Ocean Breeze, UK (TLP)*

Η πλωτή κατασκευή ανεμογεννήτριας με τύπο αγκύρωσης (TLP), είναι σχεδιασμένη για βαθιά νερά και για χαμηλό κόστος παραγωγής έχοντας προκαθορισμένες μεθόδους συναρμολόγησής της.

Προδιαγραφές [40]:

Ύψος νασέλλας: 72m

Διάμετρος ρότορα: 90-100m

Βάθος νερού: 60+m

Ύψος κύματος: 20m

Βάρος πλωτής κατασκευής: 702t

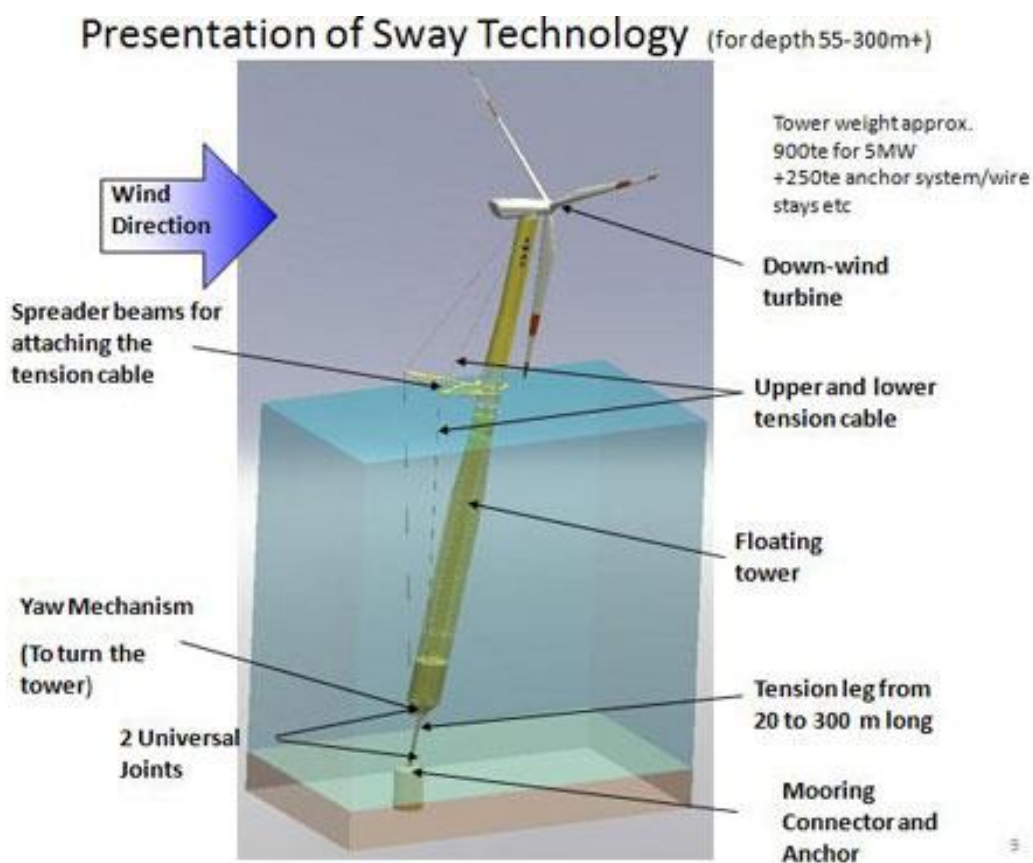


Εικόνα 2.40 Α/Γ: Xanthus. Πηγή: [40]

2.7.3.11 Sway, Norway (Floating Tower)

Η εταιρεία Sway AS ασχολείται με την κατασκευή Α.Π.Ε. και ειδικότερα με πλωτά πάρκα Α/Γ. Σχεδίασε το μοντέλο Α/Γ Sway για τουρμπίνες απόδοσης ισχύος 10MW. Ωστόσο έχει προβλεφθεί και η δυνατότητα συνδυασμού του πλωτού πυλώνα με συμβατικές Α/Γ 5MW. Η πρόβλεψη είναι να μπορεί να ποντίζεται σε ποικίλα βάθη νερού από 80 έως 400m. Για βαθύτερα νερά προτιμάται η αγκύρωση προέντασης TLP. Μέχρι στιγμής δοκιμές έχουν γίνει με μοντέλα κλίμακας 1/6 σε συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος στο Hjeltefjorden έξω από το Bergen της Νορβηγίας καθώς και στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Κίνα σε βάθη νερού 55m [41].

Περιοχή πόντισης 1/6 μοντέλου: 60°40'N 04°55'E



Εικόνα 2.41 Α/Γ:Sway. Πηγή: [41]

2.7.3.12 Winflo, France (Floater)

Η πλωτή Α/Γ Winflo είναι αποτέλεσμα κοινοπραξίας που ηγείται η εταιρεία Nass & Win. Αναμένονται αποτελέσματα από την δοκιμή μοντέλου πλήρους κλίμακας με Α/Γ ισχύος 1MW (έναντι 2MW που δύναται να φέρει η κατασκευή), στην περιοχή Le Croisic στη χερσόνησο της Βρετάνης της Γαλλίας. Επόμενο στάδιο θα είναι η μελέτη και ανάπτυξη μοντέλου που θα έχει ισχύ 5MW [42].

Περιοχή πόντισης: 47° 17' 37" N 2° 30' 47" O



Εικόνα 2.42 Α/Γ: Winflo. Πηγή: [43]

2.7.3.13 Vertiwind, France (Floater)

Η Technip σε συνεργασία με άλλες εταιρείες του χώρου σχεδίασε την πλωτή Α/Γ κατακόρυφου άξονα Vertiwind. Προτερήματά της αποτελούν το χαμηλό κέντρο βάρους, το μικρό του βύθισμα (9.5m), η σημαντική σταθερότητα ως προς τις κινήσεις yaw και pitch, η απουσία ανάγκης για κιβώτιο ταχυτήτων και η ευκολία στις διαδικασίες της εγκατάστασης και της συντήρησης.

Το 2009 μοντέλο κλίμακας 1/10 και ισχύος 35KW ετέθη υπό δοκιμή. Στην συνέχεια μέσα στο 2015 μοντέλο πλήρους κλίμακας και ισχύος 2MW θα ποντιστεί για δοκιμές στην περιοχή Fos-sur-Mer της Γαλλίας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών θα χρησιμεύσουν ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το μελλοντικό πάρκο 13 τέτοιων Α/Γ, σε απόσταση 5km από το λιμάνι St-Louis της Γαλλίας το 2017 [21].

Περιοχή πόντισης Fos-sur-Mer: 43°26'25"N 4°56'55"E

Περιοχή πόντισης St-Louis: 43°23'15"N 4°48'14"E



Εικόνα 2.43 Α/Γ: Vertiwind. Πηγή: [44]

2.7.3.14 IDEOL, France (Floater)

Η εταιρεία IDEOL σε συνεργασία με άλλες σχεδίασε την ομώνυμη πλωτή Α/Γ ισχύος 2MW. Η πλατφόρμα IDEOL αποτελείται από έναν δακτυλιοειδή σε σχήμα πλωτήρα με ρηχό βύθισμα και συμπαγείς διαστάσεις. Έχει γίνει εκτενής χρήση σκυροδέματος στην κατασκευή.

Μοντέλα υπό κλίμακα έχουν τεθεί με επιτυχία σε δοκιμές σε δεξαμενές υπό αντίξοες συνθήκες, όπως την προσομοίωση κυματισμών ύψους έως 25m και ανέμων ταχύτητας έως 90km/h [45].

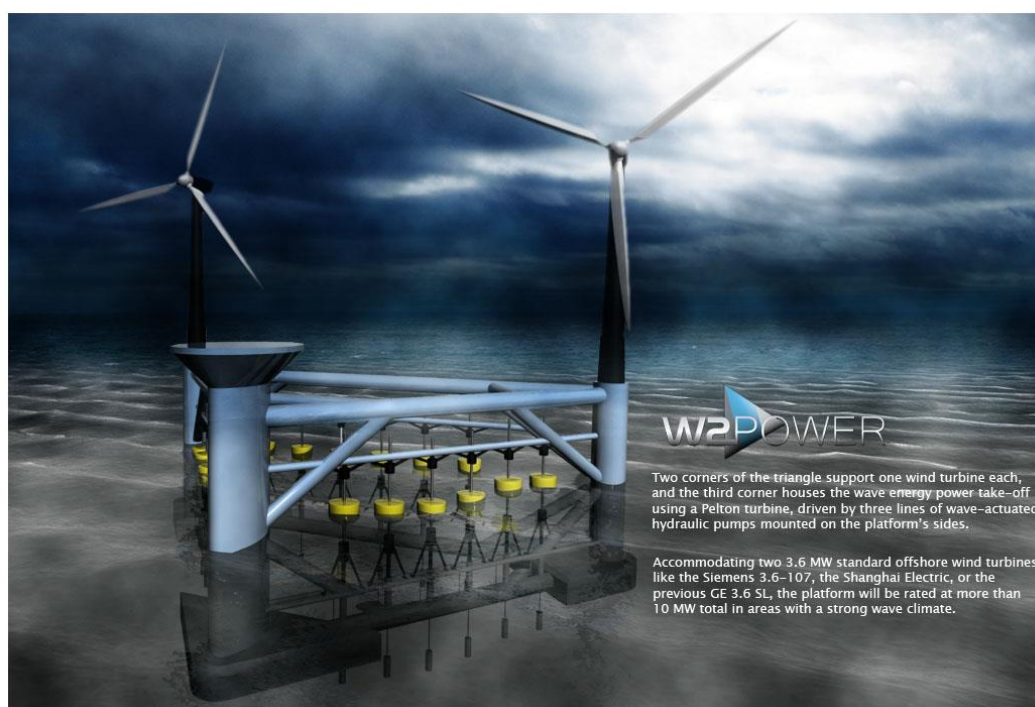


Εικόνα 2.44 Α/Γ: ideol. Πηγή: [45]

2.7.3.15 W2Power-Pelagic Power, Norway (Floater, Hybrid)

Η πλατφόρμα W2Power αποτελεί μια υβριδική κατασκευή, κάνοντας ανάκτηση τόσο κυματικής όσο και αιολικής ενέργειας μετατρέποντάς τις σε ηλεκτρική. Στις δυο γωνίες του τριγώνου πλωτήρα, υπάρχουν ανεμογεννήτριες ισχύος 3.6MW. Η τρίτη γωνία στεγάζει το πατενταρισμένο σύστημα μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων, χρησιμοποιώντας ένα συμβατικό στρόβιλο Pelton οδηγούμενο από τρεις γραμμές υδραυλικών αντλιών ενεργοποιούμενες από τους κυματισμούς, τοποθετημένες στις τρεις πλευρές της πλατφόρμας.

Η διάμετρος του ρότορα θα είναι 107m και της νασέλλας θα είναι 85m. Η συνολική ισχύς της κατασκευής υπολογίζεται να είναι μεγαλύτερη των 10MW [46].



Εικόνα 2.45 Υβριδική κατασκευή αποτελούμενη από Α/Γ και μηχανισμούς ανάκτησης κυματικής ενέργειας W2power. Πηγή: [46]

2.7.3.16 Hexicon, Sweden (Floater)

Η εταιρεία Hexicon σε συνεργασία με τις κυβερνήσεις της Σουηδίας, της Μάλτας και της Κύπρου ανέπτυξε την ομώνυμη πλατφόρμα Α/Γ. Στα αρχικά σχέδια ήταν η κατασκευή να περιλάμβανε 20 Α/Γ. Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα η πρόταση της εταιρείας είναι η πλατφόρμα να έχει 3 Α/Γ των 6MW η κάθε μία συνολικής ισχύος 18MW. Η κατασκευή θα μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της και αυτόματα να αναζητά τον προσανατολισμό με το βέλτιστο δυναμικό του ανέμου.

Η κατασκευή της πλατφόρμας θα μπορεί να γίνεται στο εκάστοτε λιμάνι και να ρυμουλκείται στην περιοχή πόντισής της. Επιπροσθέτως ο σχεδιασμός της την κάνει εύκολα προσβάσιμη για τις απαραίτητες επιδιορθώσεις και εργασίες συντήρησης.

Προδιαγραφές [47]:

Αριθμός Α/Γ: 3

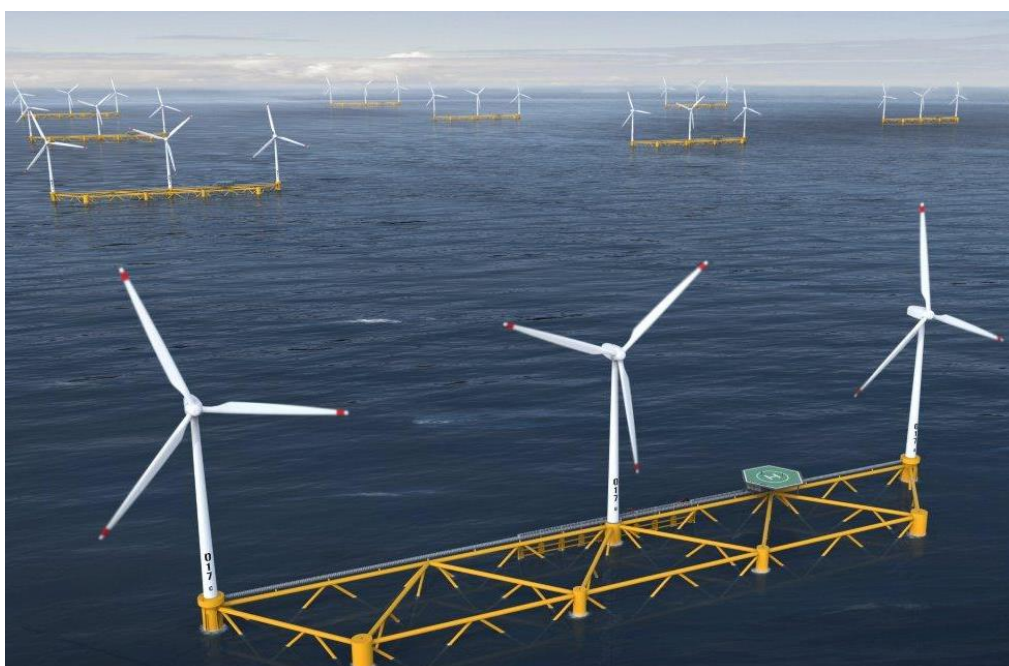
Ισχύς κάθε Α/Γ: 6MW

Μήκος πλατφόρμας: 464m

Πλάτος πλατφόρμας: 77m

Βύθισμα πλατφόρμας: 17m

Ύψος νασέλλας: 105m



Εικόνα 2.46 Α/Γ: Hexicon. Πηγή: [47]

3 Μηχανισμοί Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Μ.Α.Κ.Ε.)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται: οι τύποι κυματισμών και οι γενεσιουργίες τους αιτίες, το θαλάσσιο δυναμικό τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και στον ελλαδικό χώρο, η ιστορική αναδρομή των Μ.Α.Κ.Ε. από τον 18ο αιώνα έως σήμερα, η δυνατότητα εκμετάλλευσής τους καθώς και οι βασικότεροι τύποι Μ.Α.Κ.Ε και οι τρόποι λειτουργίας τους.

3.1 Ενέργεια των κυματισμών

Τα εκάστοτε κυματικά φαινόμενα οφείλονται σε ποικιλία δυνάμεων που είτε επενεργούν μεμονωμένα, είτε συνήθως σε συνδυασμό στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι δυνάμεις αυτές χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: α) γεωλογικής προέλευσης, όπως σεισμικά φαινόμενα και τσουνάμι, β) αστρονομικής προέλευσης, όπως παλιρροιακά φαινόμενα και γ) μετεωρολογικής προέλευσης, δηλαδή ανεμογενούς προέλευσης. Τα τελευταία θεωρούνται και τα σημαντικότερα προς αξιοποίηση από τους Μ.Α.Κ.Ε..

Κατά την επενέργεια του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, δημιουργούνται σε αυτήν κοιλάδες και κορυφές. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται αποθήκευση της αιολικής ενέργειας στη θάλασσα. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί έχουν διαφορά φάσης σε σχέση με τους αιολικούς κυματισμούς. Επομένως, τα μέγιστα και τα ελάχιστά τους απέχουν συνήθως ποικίλα χρονικά διαστήματα. Η ενεργειακή πυκνότητα των αιολικών κυματισμών μπορεί να μείνει ανεπηρέαστη εκτός αν συναντήσουν αντίθετους ανέμους ή τοπογραφικά εμπόδια. Η ανάκτηση της απολεσθείσας ενέργειας λόγω της αλληλεπίδρασης με την ξηρά επιτυγχάνεται μέσω των φαινομένων της διάθλασης και της ανάκλασης, όπου δημιουργούνται εστίες συγκέντρωσης ενέργειας.

Η μηχανική ενέργεια των κυμάτων αποτελείται από δυναμική και κινητική ενέργεια. Η δε δυναμική ενέργεια, καθορίζεται τόσο από τη βαρύτητα όσο και από την επιφανειακή τάση. Βέβαια, για κυματισμούς με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 0,1 μέτρων συνήθως θεωρούμε αμελητέα την επιφανειακή τάση και σαν προέλευση των κυμάτων θεωρείται κυρίως η βαρύτητα, οπότε τα ονομάζουμε βαρυτικά κύματα. Η ταχύτητα διάδοσης αυτών των κυμάτων εξαρτάται από τη συχνότητά τους αλλά και από τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης.

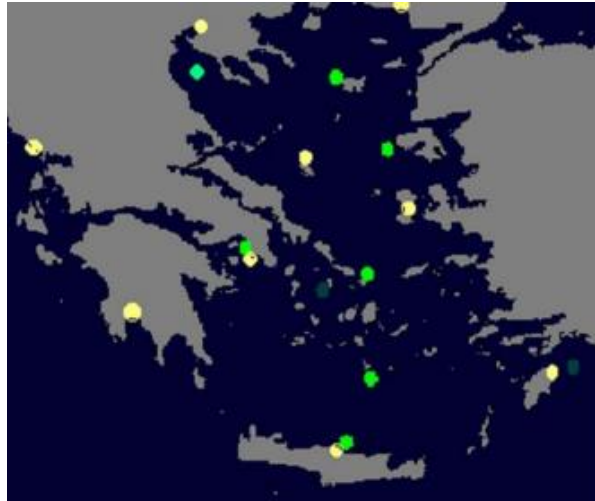
3.2 Κυματικό δυναμικό

3.2.1 Μέθοδοι μετρήσεως και πρόγνωσης θαλάσσιων κυματισμών

Οι τρόποι λήψης και εκτίμησης δεδομένων είναι οι εξής:

- Από δορυφόρους (σκεδασιόμετρα και αλτίμετρα) που προσδίδουν συνεχή παροχή δεδομένων σχετικά με τη θαλάσσιο περιβάλλον έχοντας μόνο μειονέκτημα ότι η θέση τους συνεχώς αλλάζει (Satellite radar altimeter-RA, ERS-1/2, TOPEX, Geosat Follow-On, Jason, Envisat), Synthetic Aperture Radar – SAR)
- Από επιτόπιες μετρήσεις οι οποίες παρέχουν συνεχή ενημέρωση. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως το υπάρχον δίκτυο είναι μικρό (κυματογράφοι, πιεσόμετρα βυθού, συστήματα sonar ULS, Doppler current profilers, κλπ)
- Μέσω επιχειρησιακών μοντέλων προσομοίωσης τα οποία λειτουργούν ως προγνωστικά σε συνεχή ροή, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παρελθόντος καθώς και των δορυφορικών και επιτόπιων μετρήσεων.

Στον ελλαδικό θαλάσσιο χώρο σημαντικό σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης των κυματισμών αποτελεί το “Ποσειδών” του Ινστιτούτου Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.). Το δίκτυο παρακολούθησης του συστήματος αποτελείται από 12 ωκεανογραφικούς και 10 πλωτήρες SeaWatch και μέσω αυτών μετράται το ύψος και η κατεύθυνση των κυματισμών. Στους πλωτήρες είναι εγκατεστημένοι και αισθητήρες για την μέτρηση: α) της ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, β) της θερμοκρασίας και της πίεσης της ατμόσφαιρας, γ) του σημαντικού ύψους, της κατεύθυνσης και της περιόδου του κύματος, δ) της επιφανειακής θερμοκρασίας και αλατότητας και ε) της ταχύτητας και της κατεύθυνσης των ρευμάτων. Τα παραπάνω δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται καταλλήλως καθ’ όλη την διάρκεια της ημέρας και εν συνεχεία αποστέλλονται κάθε 3 ώρες δορυφορικά στο Ε.Λ.ΚΕ.Θ.Ε. προς περαιτέρω επεξεργασία και εισαγωγή τους στα προγνωστικά του μοντέλα.

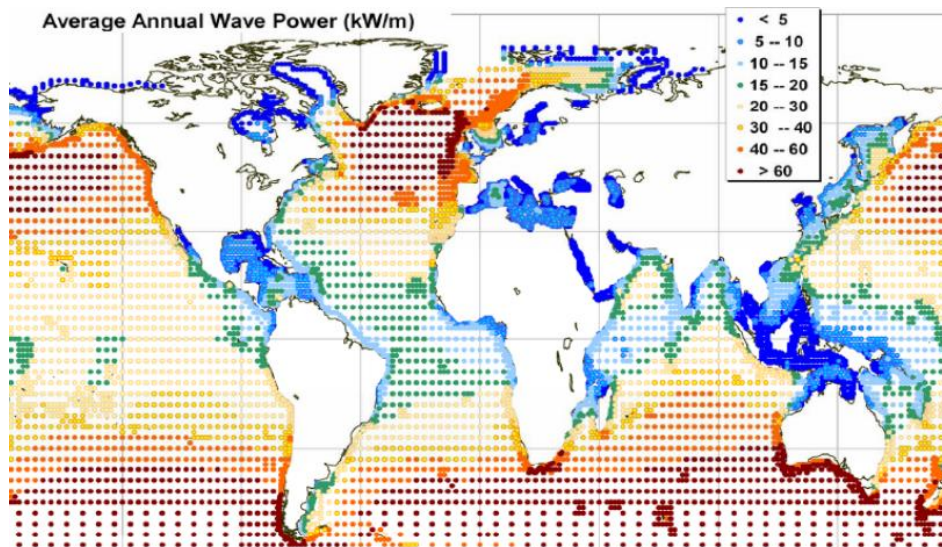


Εικόνα 3.1 Δίκτυο πλωτήρων του συστήματος Ποσειδών. Πηγή:[48]

3.2.2 Κατανομή κυματικού δυναμικού

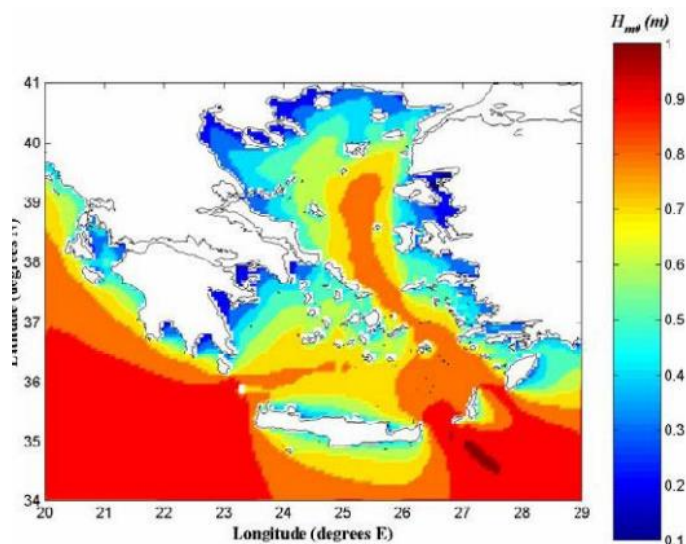
Το παγκόσμιο κυματικό δυναμικό υπολογίζεται πως είναι 8000 έως 80000 TWh/y [49]. Ικανό δηλαδή να καλύψει τις σημερινές παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες.

Η κυματική ενέργεια είναι ανισομερώς κατανεμημένη παγκοσμίως. Στην εύκρατη ζώνη δηλαδή σε γεωγραφικά ύψη μεταξύ 30° και 60° το δυναμικό των κυματισμών είναι υψηλότερο, με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 20-70GW/m κυματικού μετώπου.



Εικόνα 3.2 Ετήσιο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό. Πηγή: [50]

Υπολογίζεται πως το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό των χωρών της Ε.Ε. είναι 150-230 TWh/y, εκ των οποίων τα 4-11TWh/y αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες.



Εικόνα 3.3 Μέση ετήσια κατανομή σημαντικού ύψους κύματος. Πηγή: [48]

3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Μ.Α.Κ.Ε.

Η χρήση συσκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, τα οποία θα δούμε παρακάτω.

3.3.1 Πλεονεκτήματα

- Διαθέτουν την μεγαλύτερη πυκνότητα και διαθεσιμότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τις άλλες Α.Π.Ε..
- Δημιουργούν ελάχιστη οπτική όχληση σε σχέση με άλλες υπεράκτιες Α.Π.Ε. (όπως οι πλωτές Α/Γ), οπότε υπάρχει η δυνατότητα πόντισης και λειτουργίας τους πιο κοντά στην ακτογραμμή. Λόγω αυτού επιτυγχάνεται ευκολότερη προσβασιμότητα συντήρησης και μικρότερο κόστος καλωδιώσεως μεταφοράς της ενέργειας προς την ακτή.
- Η ενδεχόμενη ηχητική όχληση στο πλησίον ηπειρωτικό περιβάλλον είναι μηδαμινή.
- Η αναγκαία έκταση πόντισής τους είναι αμελητέα και συνήθως βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή, αφού το καταλληλότερο βάθος βυθού για τις Μ.Α.Κ.Ε. είναι της τάξης των 50m. Έτσι δεν παρεμποδίζονται άλλες χρήσεις που προϋπήρχαν στην περιοχή αυτή, όπως περιοχές αλιείας.

3.3.2 Μειονεκτήματα

Τροχοπέδη στην ως τώρα ανάπτυξη και χρήση τους αποτέλεσαν τα εξής:

- Οι εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες στις οποίες οι συσκευές αυτές και οι αγκύρωσή τους υποβάλλονται λόγω των κυματισμών. Έτσι χρειάζεται ειδική μελέτη για την επίτευξη της αντοχής τους τόσο σε ακραίες συνθήκες, όσο και σε κόπωση [49].
- Η ακαθόριστες και ανομοιόμορφες κατευθύνσεις, φάσεις και συχνότητες των κυματισμών δημιουργούν πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό βέλτιστων μηχανισμών απορρόφησης της ενέργειας.
- Η μετατροπή της ενέργειας των κυματισμών ακανόνιστης και μικρής συχνότητας στην απαιτούμενη σταθερή συχνότητα ηλεκτρισμού.
- Η δυσκολία, όπως σε κάθε Α.Π.Ε., της αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας σε περιόδους που η ζήτησή της είναι χαμηλή.
- Η ποικιλομορφία των συσκευών

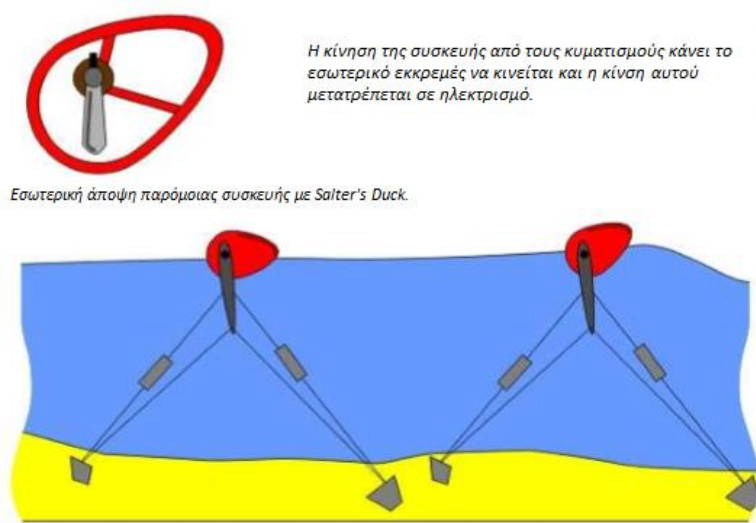
3.4 Ιστορική αναδρομή Μ.Α.Κ.Ε.

Η χρήση συσκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας εμφανίστηκε σε πρώιμο στάδιο τον 18ο αιώνα. Πρώτη ευρεσιτεχνία για παραγωγή ενέργειας από τα κύματα αποτέλεσε αυτή που κατατέθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Girard, η οποία δεν εφαρμόστηκε ποτέ. Ακολούθησαν αρκετές άλλες ευρεσιτεχνίες, όμως η πρώτη εφαρμογή μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική έγινε το 1910 στο Bordeaux της Γαλλίας από τον Bochaux-Pratique προς ηλεκτροδότηση του σπιτιού του. Αποτελούσε συγχρόνως και την πρώτο δείγμα συσκευής OWC (Oscillating Water Column).

Πολύ σημαντική έρευνα υπό το σύγχρονο επιστημονικό πρίσμα ξεκίνησε την δεκαετία του 1940 από τον Ιάπωνα Yoshio Masuda, ο οποίος μελέτησε και δοκίμασε διάφορα είδη διατάξεων Μ.Α.Κ.Ε. και ανέπτυξε ιδιαίτερα τον τύπο OWC (Oscillating Water Column).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ξεκίνησε εκτεταμένη έρευνα για Α.Π.Ε. και δη για Μ.Α.Κ.Ε., λόγω της τότε πετρελαϊκής κρίσης. Συμμετείχαν και ασχολήθηκαν επί του θέματος πολλοί διακεκριμένοι ακαδημαϊκοί όπως οι: Kiell Budal, Johannes Falnes, Michael French, John Newman David Evans, Michael McCormick και Stephen Salter. Ο τελευταίος, από το πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, εφηύρε την ομώνυμη συσκευή Salter's Duck. Η απόδοσή της σύμφωνα με τα υπό κλίμακα πειράματα ήταν 80%. Περιείχε ένα εκκρεμές στο

εσωτερικό της και όσο κινείται η συσκευή από τους κυματισμούς, ταλαντώνταν και αυτό μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική.



Εικόνα 3.4 Συσκευή Μ.Α.Κ.Ε.: Salter's Duck. Πηγή: [50]

Ωστόσο την επόμενη δεκαετία η τιμή του πετρελαίου επανήλθε στα πρότερα φυσιολογικά της επίπεδα και συνεπακόλουθα ο ως τότε ρυθμός εξέλιξης Μ.Α.Κ.Ε. ελαττώθηκε σημαντικά. Όμως την τελευταία 20ετία το ενδιαφέρον για χρήση Μ.Α.Κ.Ε. και γενικότερα για Α.Π.Ε. αυξήθηκε σημαντικά λόγω της κλιματικής αλλαγής και της ανάγκης απεξάρτησης από την επιβλαβή χρήση υδρογονανθράκων προς παραγωγή ενέργειας. Πρώτο σημαντικό δείγμα πάρκου Μ.Α.Κ.Ε. αποτέλεσε το 2008 το Agoucadoura.

3.5 Κατηγορίες Μ.Α.Κ.Ε.

3.5.1 Σημειακοί απορροφητές ενέργειας (Point absorbers)

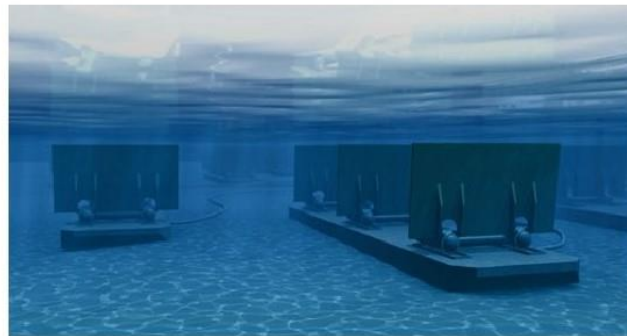
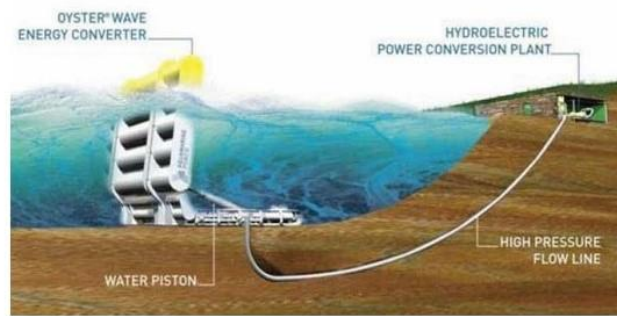
Αποτελούν ως είθισται πλωτές συσκευές, οι οποίες απορροφούν ενέργεια από κάθε κατεύθυνση λόγω της μετακίνησης στην οποία υπόκεινται από τα κύματα στην ίσαλο γραμμή ή κοντά σε αυτήν. Αναλόγως της κίνησης του πλωτήρα που προκύπτει σαν αντίδραση στον κυματισμό, το σύστημα ανάκτησης της ενέργειας μπορεί να ποικίλει. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτού του είδους Μ.Α.Κ.Ε. είναι τα: Manchester bobber, POT, Wavebob, Fred Olsen & Co και το WaveStar.



Εικόνα 3.5 Μ.Α.Κ.Ε.: OPT, WaveStar, Wavebob. Πηγές: [51],[52]

3.5.2 Συσσκευές οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης-πρόνευσης (Oscillating Wave Surge Converter)

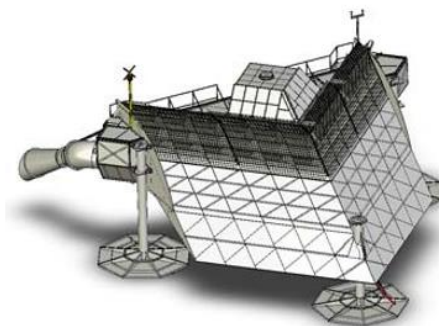
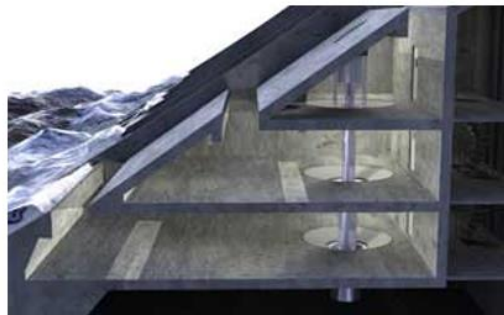
Οι συσκευές αυτές, αποτελούνται από μια περιστρεφόμενη άτρακτο και έναν βραχίονα εδραζόμενο πάνω σε αυτήν που παλινδρομεί εξαιτίας της οριζόντιας κατεύθυνσης των κυματισμών. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται εκμετάλλευση της ενέργειας των οριζόντιων κυματισμών. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτού του είδους Μ.Α.Κ.Ε. είναι τα: Neptune Triton, Oyster, Waveroller, και το Langlee system.



Εικόνα 3.6 Μ.Α.Κ.Ε.: Oyster, Langlee, Waveroller. Πηγές: [53], [54], [55]

3.5.3 Συσκευές Υπερπήδησης του Νερού (Overtopping Device)

Αποτελούνται από ανοικτές δεξαμενές των οποίων το χείλος βρίσκεται πάνω από τη συνήθη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας. Το νερό που ξεπερνά το ύψος της δεξαμενής συλλέγεται σε αυτή και επαναφέρεται στη θάλασσα μέσω ενός συμβατικού υδροστροβίλου, όπου μέσω γεννήτριας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτού του είδους Μ.Α.Κ.Ε. είναι τα: Waveplane, Seawaveslot και Wave Dragon.



Εικόνα 3.7 Μ.Α.Κ.Ε.: Seawaveslot, Waveplane, Wave Dragon. Πηγές: [56], [57]

3.5.4 Συσκευές μακρόστενης ροής (Attenuator)

Αποτελούν πλωτές επιμήκεις σπονδυλωτές κατασκευές με μικρή μετωπική επιφάνεια προς το κύμα. Οι συσκευές αυτές ακολουθούν κατά μήκος τις κινήσεις του κύματος και μέσω υδραυλικών μηχανισμών μεταξύ των αρθρωτών τμημάτων μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτής της κατηγορίας Μ.Α.Κ.Ε αποτελούν τα: Oceantech, Dexawave και Pelamis.



Εικόνα 3.8 Μ.Α.Κ.Ε : Pelamis. Πηγή : [58]

3.5.5 Βυθισμένες Συσκευές Διαφοράς Πίεσης (Submerged Pressure Differential)

Οι συσκευές αυτές βρίσκονται συνήθως παράκτια και εδράζονται σταθερά στον πυθμένα της θάλασσας. Ο κυματισμός διαφοροποιεί την υποκείμενη πίεση η οποία μεταφέρεται καταλλήλως στον μηχανισμό κινητικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό δείγμα αυτού του είδους Μ.Α.Κ.Ε. είναι το AWS.



Εικόνα 3.9 Μ.Α.Κ.Ε.: AWS. Πηγή: [59]

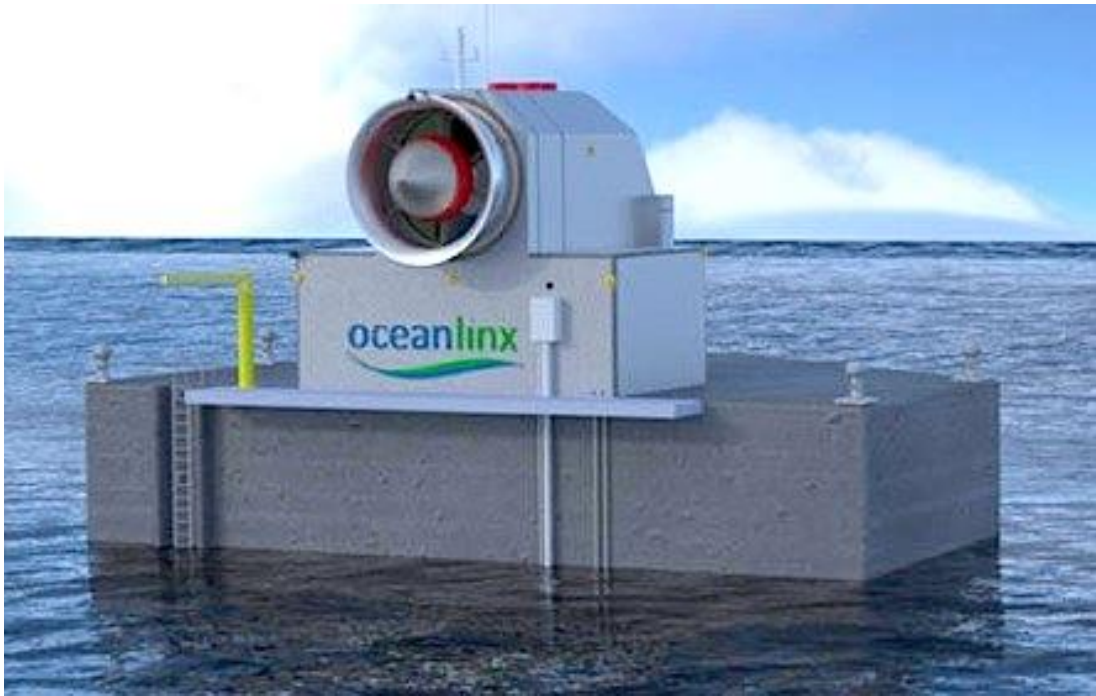
3.5.6 Παλινδρομούσα στήλη νερού (Oscillating Water Column)

Αποτελούν κατασκευές ημιβυθισμένες, ούσες κενές εσωτερικά σε μορφή θαλάμου. Είναι ανοιχτές στο κατώτερο μέρος τους, όπου το ανώτερο σημείο αυτού του ανοίγματος εντοπίζεται κάτωθεν της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας. Πάνω από την επιφάνεια του νερού ο θάλαμος περιέχει αέρα. Λόγω της παλινδρομικής κίνησης του νερού, η στήλη αέρα συμπιέζεται και αποσυμπιέζεται. Όταν η στάθμη του νερού μειώνεται, επέρχεται εκτόνωση του θαλάμου και αναρροφάται ποσότητα αέρα από την ατμόσφαιρα μέσω ενός αεροστροβίλου. Κατά την άνοδο της στάθμης της ισάλου γραμμής ο θάλαμος συμπιέζεται και ο περιεχόμενος αέρας οδηγείται μέσω του ίδιου αεροστροβίλου προς και από την ατμόσφαιρα. Ο αεροστρόβιλος στρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξαρτήτως της φοράς κίνησης του αέρα (εκτόνωση, συμπίεση προς εξισορρόπηση της πίεσης). Μέσω αυτής της κίνησής του ενεργοποιείται μια γεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, εκμεταλλευόμενη την κινητική ενέργειά του [60].

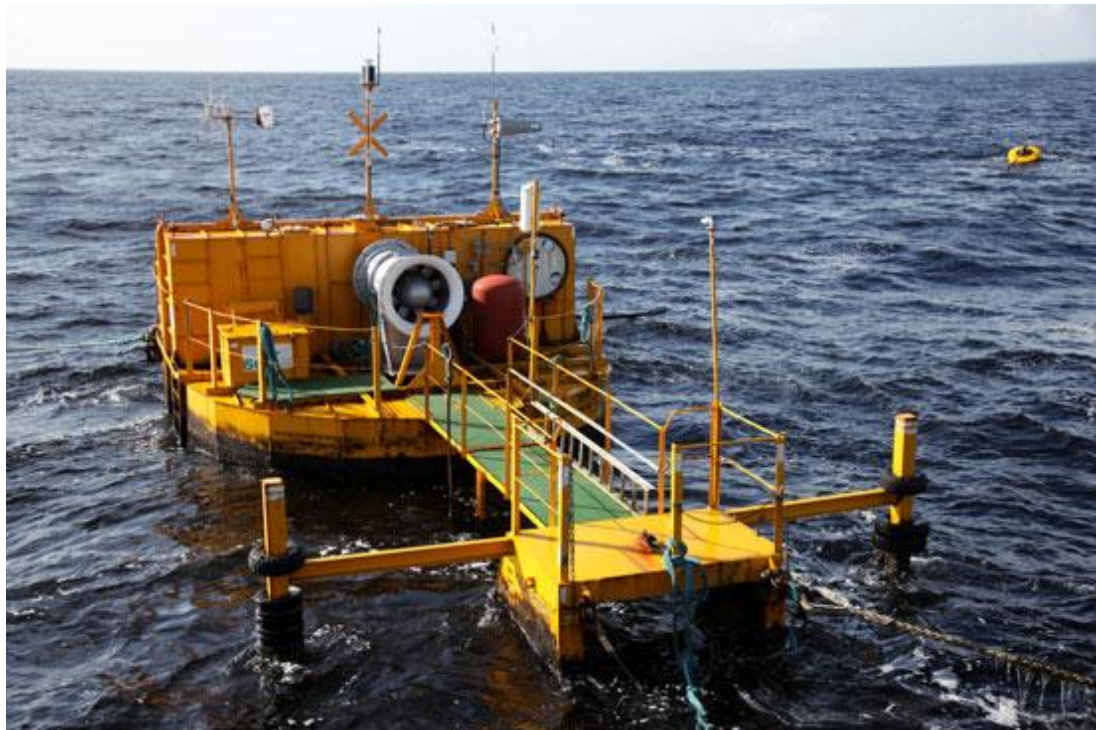
Οι πρώτες συσκευές αυτής της τεχνολογίας ήταν σταθερά εδραζόμενες σε παράκτιες κατασκευές της ακτογραμμής όπως κυματοθραύστες. Εν συνεχεία δοκιμάστηκαν με επιτυχία και χρησιμοποιούνται πλωτές τέτοιες συσκευές, οι οποίες έχοντας κατάλληλη αγκύρωση μπορούν να λειτουργούν απρόσκοπτα σε υπεράκτιες συνθήκες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τέτοιου είδους Μ.Α.Κ.Ε., οι οποίοι αποτελούν μέρος της κατασκευής μας. Χαρακτηριστικά δείγματα αυτής της κατηγορίας Μ.Α.Κ.Ε. είναι τα εξής: Wavegen, Oceanlix, Ocean Energy Buoy.



Εικόνα 3.10 Μ.Α.Κ.Ε.: Wavegen. Πηγή: [61]



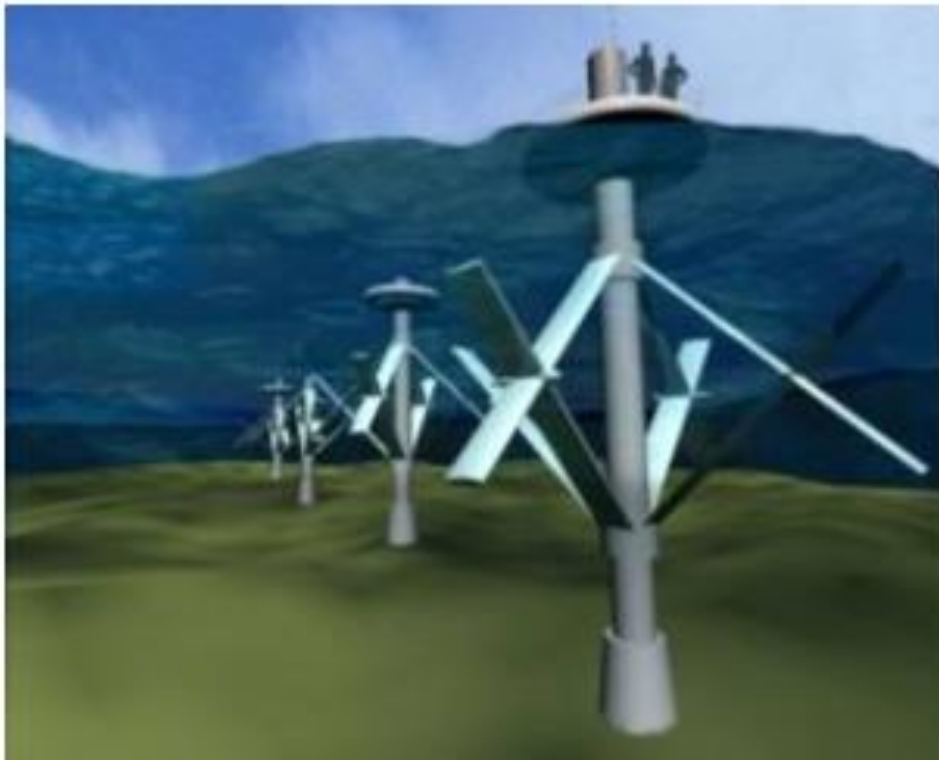
Εικόνα 3.11 Μ.Α.Κ.Ε.: Oceanlinx. Πηγή: [62]



Εικόνα 3.12 Μ.Α.Κ.Ε.: ΟΕ Βουογ. Πηγή: [63]

3.5.7 Άλλες συσκευές

Πέραν των προρρηθέντων βασικών κατηγοριών Μ.Α.Κ.Ε., υπάρχουν είδη τέτοιων συσκευών που δεν εντάσσονται σε κάποια από αυτές. Διαθέτουν είτε τελείως ξεχωριστό σχεδιασμό, είτε αποτελούν συνδυασμό των ανωτέρω κατηγοριών. Παράδειγμα αποτελούν οι εύκαμπτες κατασκευές που το σχήμα και ο όγκος τους αλλάζει με βάση τον κυματισμό, όπως και η συσκευή Wave Rotor που έχει μορφή στροβίλου απευθείας κινούμενου από τα κύματα.



Εικόνα 3.13 Μ.Α.Κ.Ε: WaveRotor. Πηγή: [56]

3.6 Κυριότερα πάρκα Μ.Α.Κ.Ε.

Στην συνέχεια θα αναφερθούν μερικά χαρακτηριστικά δείγματα εγκαταστάσεων συσκευών ανάκτησης κυματικής ενέργειας.

3.6.1 Πάρκο Μ.Α.Κ.Ε. Οκεανος

Το κυματικό πάρκο Οκεανος βρίσκεται στην Πορτογαλία στην περιοχή Aguçadoura. Αποτελείται από τρεις συσκευές ανάκτησης κυματικής ενέργειας τεχνολογίας Pelamis (Attenuator παράγραφος 3.2.4), ισχύος 750KW η καθεμία. Η κατασκευή έγινε στην Σκωτία και στα μελλοντικά σχέδια της εταιρείας είναι η επέκταση του αριθμού των συσκευών αυτών σε 30.

Προδιαγραφές:

Ισχύς πάρκου: 2.25MW

Έτος κατασκευής: 2008

Είδος Μ.Α.Κ.Ε.: Pelamis

Περιοχή πόντισης: 41°25'57"Ν 08°50'33"Ω



Εικόνα 3.14 Πάρκο Οκεανος. Πηγή: [64]

3.6.2 Πάρκο M.A.K.E. Iberdola OPT

Το κυματικό πάρκο Iberdola βρίσκεται στην Ισπανία στην περιοχή Santona. Αποτελείται από δέκα σημειακούς απορροφητές ενέργειας (Point absorbers), όπου οι εννιά είναι ισχύος 150KW ο καθένας και ο δέκατος 40KW. Ο πυθμένας της περιοχής πόντισης του πάρκου είναι αμμώδης και έχει βάθος 50m. Σύμφωνα με υπολογισμούς για ένα τέτοιο πάρκο απόδοσης 10MW, απαιτείται έκταση $0.125km^2$.

Προδιαγραφές:

Ισχύς πάρκου: 1.39MW

Έτος κατασκευής: 2008-2009

Είδος M.A.K.E.: Point Absorber, OPT

Περιοχή πόντισης: 43°27'49"N 3°26'01"O



Εικόνα 3.15 Πάρκο Iberdola. Πηγή: [65]

3.6.3 Πιλοτικό πάρκο OWC

Το κυματικό πάρκο Pico ολοκληρώθηκε το 1999 στις Αζόρες της Πορτογαλίας. Όμως παρουσιάστηκαν δυσλειτουργίες στους στροβίλους των Μ.Α.Κ.Ε. του, τεχνολογίας OWC-Wells, όταν πλημμύρισε το έργο. Η κατασκευή επιδιορθώθηκε και επαναλειτούργησε το 2005. Η αποδιδόμενη ισχύς του είναι 0.4MW.

Προδιαγραφές:

Ισχύς πάρκου: 0.4MW

Έτος κατασκευής: 1999, 2005

Είδος Μ.Α.Κ.Ε.: OWC, Wells

Περιοχή πόντισης: 38°28'19"N 28°51'50"W



Εικόνα 3.16 Πάρκο Pico. Πηγή: [66]

4 Σχεδιασμός πλωτών κατασκευών

4.1 Αρχές και μέθοδοι σχεδιασμού

Ως επί το πλείστον οι πλωτές κατασκευές διέπονται από εκτεταμένη πολυπλοκότητα και συνθετότητα, όπως προαναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Λαμβάνοντας υπόψη και την ποικιλομορφία των συνθηκών στο θαλάσσιο περιβάλλον, γίνεται αντιληπτή η εν γένει δυσκολία σχεδιασμού τους ώστε να λειτουργούν απρόσκοπτα.

Ο προσδιορισμός της αλληλεπίδρασης της κατασκευής με το εκάστοτε περιβάλλον είναι απαραίτητος για την εν τέλει επαρκή της λειτουργία. Η ασφάλεια της κατασκευής εξασφαλίζεται όταν προσδιοριστούν τα φορτία που επιδρούν στην κατασκευή και η απόκρισή της (παραμορφώσεις, κινήσεις, τάσεις) εντάσσεται στα επιτρεπόμενα πλαίσια. Η συμπεριφορά της πρέπει να είναι η δέουσα τόσο σε Ο.Κ.Α. (οριακή κατάσταση αστοχίας), όσο και σε Ο.Κ.Λ. (οριακή κατάσταση λειτουργικότητας). Κρίσιμη βέβαια θεωρείται και η αντοχή της σε κόπωση, δηλαδή για τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας της να αντέξει επαρκώς κατά τη διάρκεια των ετών που θέλουμε να βρίσκεται εν λειτουργία.

Σημαντικό στοιχείο ενός τέτοιου έργου είναι και οικονομοτεχνικός έλεγχός του. Είναι απαραίτητη η εκτενής μελέτη των απαιτούμενων οικονομικών πόρων για κάθε φάση του έργου (κατασκευή, πόντιση, λειτουργία και συντήρηση), καθώς και η απόδοσή του σε βάθος χρόνου. Έτσι αναλόγως των συμπερασμάτων της μελέτης, γίνεται επανακαθορισμός ή μη της αναγκαιότητάς του και της πιθανότητας εκ νέου διαστατοποίησης έως ότου έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Οι αρχές που προσδιορίζουν τον σχεδιασμό μιας πλωτής κατασκευής καθορίζονται από τους εκάστοτε οργανισμούς και φορείς των περιοχών κατασκευής καθώς και από τους νηογνώμονες.

Σε γενικές γραμμές τα βασικότερα κριτήρια σχεδιασμού μιας offshore κατασκευής είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός των περιβαλλοντολογικών συνθηκών στην περιοχή εγκατάστασης και λειτουργίας.
- Προσδιορισμός των φορτίσεων που επιδέχεται η κατασκευή από το περιβάλλον και η απόκρισή της σε αυτές.
- Εκλογή και εφαρμογή μεθόδου προσδιορισμού της στατικής και δυναμικής αντοχής της κατασκευής.
- Επιλογή υλικών.

- Επιλογή των κριτηρίων σχεδίασης.
- Πλήρης και με λεπτομέρεια κατασκευαστικός σχεδιασμός ακόμη και για την διαδικασία παραγωγής.
- Καθορισμός των απαιτήσεων συντήρησης και ελέγχου.
- Οικονομοτεχνικός έλεγχος.

4.2 Συνθήκες περιβάλλοντος

Η γνώση και η μελέτη των συνθηκών περιβάλλοντος που επικρατούν στην περιοχή πόντισης της κατασκευής κρίνεται απαραίτητη, ώστε να προσδιοριστεί η απόκριση της κατασκευής μας

Τα βασικότερα στοιχεία που επιδρούν σε μια offshore κατασκευή είναι τα εξής:

- Ο άνεμος.
- Τα θαλάσσια ρεύματα.
- Οι θαλάσσιοι κυματισμοί.
- Η γεωμορφολογία του πυθμένα είτε έχουμε να κάνουμε με σταθερής έδρασης είτε με πλωτή κατασκευή.

4.2.1 Πεδίο ανέμου

Για να προσδιορίσουμε τις φορτίσεις στις οποίες υποβάλλεται μια υπεράκτια κατασκευή από τον άνεμο, χρειάζεται να γνωρίζουμε την καθ' ύψος κατανομή της μέσης ταχύτητας \bar{V}_{tz} . Λόγω της πνοής του ανέμου (gust), γίνεται η εξής παραδοχή για τη στιγμιαία τιμή της:

$$V = \bar{V}_{tz} + v' \quad (4.2.1.1)$$

Όπου:

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

v' : η στατιστική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής V .

Το μέγεθος \bar{V}_{tz} είναι συναρτήσεως της καθ' ύψος απόστασης του θεωρούμενου σημείου από την επιφάνεια της θάλασσας και του χρονικού διαστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τον σχηματισμό της μέσης τιμής. Στην περίπτωση που δεν διατίθενται για την περιοχή λειτουργίας της κατασκευής αξιόπιστες μετρήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος εκθετικός νόμος :

$$\bar{V}_{tz} = a\bar{V}_{1hr10} \left(\frac{z}{10}\right)^\beta \quad (4.2.1.2)$$

Όπου :

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

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

α, β : σταθερές που δίνονται στον πίνακα 4.1. Μέσω αυτών λαμβάνονται υπόψη αποκλίσεις που προκύπτουν στη μέση τιμή όταν ο μέσος χρόνος μέτρησης δεν συμπίπτει με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της \bar{V}_{1hr10}

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

Πίνακας 4.1 Συντελεστές α, β της σχέσης (4.2.1.2). Πηγή: [67].

Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται η στοχαστική διαδικασία προσδιορισμού των φορτίων από τον άνεμο θα πρέπει να έχουμε γνώση του φάσματος της κατανομής του. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, όπως ισχύει και στους θαλάσσιους κυματισμούς, ο άνεμος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διαδικασία κατά Gauss. Στο πεδίο των συχνοτήτων μια τέτοια διαδικασία περιγράφεται πλήρως όταν είναι γνωστό το φάσμα κανονικής κατανομής της ενέργειάς της.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Νορβηγικού Νοηognώμονα το τελευταίο δίνεται από τη σχέση :

$$fS(f) = 4k\bar{V}_{1hr10} \frac{\tilde{f}}{(2 + \tilde{f})^{5/6}} \quad (4.2.1.3)$$

Όπου :

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

S: πυκνότητα φάσματος (m^2/h_z)

f: συχνότητα (h_z)

L: μέγεθος κλίμακας (m). Συνηθέστερα λαμβάνουμε $L=1\ 800m$

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

4.2.2 Θαλάσσια ρεύματα

Ο προσδιορισμός της καθ' ύψος διανομής της ταχύτητας των Θαλασσιών ρευμάτων γίνεται συνήθως με την θεώρησή τους σαν υπέρθεση ρεύματος που δημιουργείται από το πεδίο ανέμου και ρεύματος που προκαλείται από παλίρροιες. Για τα μεν πρώτα θεωρούμε γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας τους από το βάθος ενώ για τα δε δεύτερα, τα ρεύματα παλίρροιας, θεωρούμε αντίστοιχα εκθετική εξάρτηση. Επομένως μπορούμε να γράψουμε τα εξής:

$$V_{\text{ρευμ}}(z) = V_{\text{παλ}}(z) + V_{\text{ανεμ}}(z) \quad (4.2.2.1)$$

$$V_{\text{παλ}}(z) = V_{\text{παλ}} \left(\frac{d+z}{d} \right)^{1/7} \quad \text{για } z \leq 0 \quad (4.2.2.2)$$

$$V_{\text{ανεμ}}(z) = V_{\text{ανεμ}} \left(\frac{d_0+z}{d_0} \right) \quad \text{για } -d_0 \leq z \leq 0 \quad (4.2.2.3)$$

$$V_{\text{ανεμ}}(z) = 0 \quad \text{για } z < -d_0 \quad (4.2.2.4)$$

Όπου :

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

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

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

d : το βάθος του νερού μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια

d_0 : το βάθος αναφοράς για ρεύματα προκαλούμενα από τον άνεμο ($d_0 = 50\text{m}$) .

Κάτω από το βάθος αυτό λαμβάνεται ως μηδενική η ταχύτητά τους

z : η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια, λαμβάνοντας ως θετική την κατεύθυνση προς τα πάνω

Υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα για τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκαλούνται από παλίρροιες, για πληθώρα περιοχών παγκοσμίως. Στην περίπτωση των ταχυτήτων των ανεμογενών ρευμάτων όπου συχνά υπάρχει έλλειψη μετρήσεων, θεωρούμε πως στην επιφάνεια της ανοιχτής θάλασσας ισχύει η εξής σχέση:

$$V_{\text{ανεμ}} = 0.02 \bar{V}_{1\text{hr}10} \quad (4.2.2.5)$$

4.2.3 Θαλάσσιοι κυματισμοί

Η επιφάνεια της θάλασσας είναι ένα συνεχές μέσο με άπειρους βαθμούς ελευθερίας, επομένως και άπειρες ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Έτσι μέσα στο νερό μπορούμε να έχουμε κύματα με οιαδήποτε συχνότητα (εκτός των περιπτώσεων που το ρευστό είναι περατό, οπότε οι οριακές συνθήκες θέτουν περιορισμούς στη μορφή των κυμάτων).

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

Οι βασικότερες εξισώσεις περιγραφής της κίνησης ασυμπίεστου ρευστού είναι οι:

- Οι εξισώσεις Navier-Stokes

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (4.2.3.1)$$

Όπου :

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

p: η πίεση

P: η πυκνότητα

F: οι εξωτερικά επιβαλλόμενες δυνάμεις (ανά μονάδα μάζας)

- Οι εξισώσεις συνέχειας

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2.3.2)$$

Στη διατύπωση του γενικού οριακού προβλήματος, θα πρέπει να σημειωθεί πως για τα κύματα βαρύτητας παραλήφθηκαν οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης. Οι δυνάμεις αυτές λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη στις εξής δυο περιπτώσεις: i) Κατά τον σχηματισμό ανεμογενών κυματισμών, λόγω του ότι τα κύματα που εμφανίζονται υπό την επίδραση του ανέμου είναι πρωτίστως επιφανειακά και ii) Κατά την διεξαγωγή πειραμάτων, όπου στα κύματα μικρού μήκους τα αποτελέσματα υπάρχει περίπτωση να μην ισχύουν λόγω της ύπαρξης των δυνάμεων επιφανειακής τάσης.

Θεωρώντας υγρό χωρίς συνεκτικότητα οι εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes μετασχηματίζονται σε αυτές του Euler και εν συνεχεία αν η κίνησή του είναι αστρόβιλη, έχουμε δυναμικό ροής Φ ώστε:

$$\vec{V} = \vec{\nabla}\Phi \quad (4.2.3.3)$$

Οπότε η εξίσωση (4.2.3.2) ανάγεται σε εξίσωση Laplace:

$$\Delta\Phi = 0 \quad (4.2.3.4)$$

Ολοκληρώνοντας την τελευταία λαμβάνουμε την εξίσωση Bernoulli:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2 \right] + gz + \frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (4.2.3.5)$$

Εν συνεχεία θα τεθούν οι οριακές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται από το ζητούμενο δυναμικό Φ . Είναι οι εξής:

- Κινηματική συνθήκη πυθμένα

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = \vec{\nabla}\Phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.2.3.6)$$

Όπου:

\vec{n} : το κάθετο διάνυσμα στο θεωρούμενο σημείο του πυθμένα, εκφράζοντας το αδιαπέρατό του από τα μόρια του ρευστού

- Κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

Θεωρώντας πως η ελεύθερη επιφάνεια περιγράφεται από τη σχέση $z=\zeta(x,y,t)$, τότε η κινηματική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται από την σχέση:

$$\frac{D}{Dt}(z - \zeta) = 0 \quad (4.2.3.7)$$

Και επειδή:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \quad (4.2.3.8)$$

Έχουμε:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (4.2.3.9) \text{ για } z = \zeta(x, y, t)$$

οπότε το μόριο του ρευστού παραμένει στην ελεύθερη επιφάνεια καθ' όλη την διάρκεια της κίνησής της.

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια

Εκφράζει μαθηματικά πως η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική, οπότε έχουμε:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = \text{const} \quad (4.2.3.10) \text{ για } z = \zeta(x, y, t)$$

όπου λαμβάνοντας την σταθερή τιμή ίση με το μηδέν, έχουμε:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g z = 0 \quad (4.3.2.11) \text{ για } z = \zeta(x, y, t)$$

χωρίς να χάσουμε από την γενικότητα.

Για τις ανωτέρω συνθήκες έχουμε να παρατηρήσουμε πως: i) το όριο $z=\zeta(x,y,t)$ είναι άγνωστο, ii) οι οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μη γραμμικές, iii) το όλο πρόβλημα δεν επιδέχεται κλειστή λύση και iv) χρήζει χρήσης προσεγγιστικών μεθόδων με τις οποίες θα γίνει γραμμικοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας.

Συνήθως το ύψος κύματος H , είναι μικρότερο από το μήκος του. Έτσι η παράμετρος $\varepsilon=H/2\lambda$ είναι αρκετά μικρότερη από τη μονάδα.

$$\frac{H}{\lambda} = \varepsilon \ll 1$$

Κάνουμε χρήση αυτής της παραμέτρου για την ανάπτυξη σε σειρές διαταραχών όλων των μεγεθών που λαμβάνουν χώρα στο πρόβλημα. Έτσι έχουμε τις εξής σειρές:

- Σειρές για το δυναμικό

$$\Phi(x, y, z; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \Phi^{(n)}(x, y, z; t) \quad (4.2.3.12)$$

- Σειρές για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

$$\zeta(x, y; t) = \sum_{n=1} \varepsilon^n \zeta^{(n)}(x, y; t) \quad (4.2.3.13)$$

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

Ο όρος μηδενικής τάξης για το δυναμικό ισούται με μηδέν, ενώ για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας δεν υφίσταται όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Θεωρώντας τους n πρώτους όρους των αναπτύξεων αυτών έχουμε τη λύση του προβλήματος n -στης τάξης. Για να αποφύγουμε τη δυσκολία ικανοποίησης των οριακών συνθηκών (4.2.3.9) και (4.2.3.11) στο άγνωστο όριο $z=\zeta(x,y,t)$ αναπτύσσουμε τα εμφανιζόμενα στις συνθήκες αυτές μεγέθη του δυναμικού των παραγώγων του σε σειρές Taylor περί της θέσης $z=0$ που αντιστοιχεί στην αδιατάρακτη επιφάνεια του νερού. Έτσι αν θεωρήσουμε ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\zeta(x,y,t)$ είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, έχουμε :

$$\Phi \Big|_{z=\zeta} = \Phi \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.3.14)$$

και τις παραγώγους:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.3.15)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y \partial z^2} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.3.16)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial^3 \Phi}{\partial z^3} \Big|_{z=0} + \dots \quad (4.2.3.17)$$

Έτσι κατά την διατύπωση των ανωτέρω οριακών συνθηκών λαμβάνουμε υπόψη τη μη γραμμικότητα και υπολογίζουμε τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην ελεύθερη επιφάνεια. Στις μη γραμμικές οριακές συνθήκες (4.2.3.9) και (4.2.3.11), εισάγουμε τις (4.2.3.12) έως και (4.2.3.17) και διατάσσουμε τους εμφανιζόμενους όρους ως δυνάμεις του ε . Έτσι έχουμε:

- Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} - \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y} \right] + 0(\varepsilon^3) = 0 \quad \text{για } z = 0, \quad (4.2.3.18)$$

- Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} - g \zeta^{(1)} \right] + \varepsilon^2 \left[g \zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial z^2} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] + 0(\varepsilon^3) = 0 \quad \text{για } z = 0 \quad (4.2.3.19)$$

Οι εξισώσεις αυτές θα πρέπει να ισχύουν για όλα τα 'ε', οπότε πρέπει όλοι οι συντελεστές των δυνάμεων του 'ε' να ισούνται με μηδέν. Έτσι προκύπτουν η κινηματική και δυναμική n-τάξης οι οποίες θα ικανοποιούν οι n-στοί όροι της ανάπτυξης (4.2.3.12) στην ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι προκύπτουν από την (4.2.3.18):

Πρόβλημα 1^{ης} τάξης (n=1)

- Κινηματική συνθήκη:

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} = 0 \text{ για } z = 0 \quad (4.2.3.20)$$

- Δυναμική συνθήκη:

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} - g\zeta^{(1)} = 0 \quad (4.2.3.21)$$

Πρόβλημα 2^{ης} τάξης (n=2)

- Κινηματική συνθήκη:

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial y} \text{ για } z = 0 \quad (4.2.3.22)$$

- Δυναμική συνθήκη:

$$g\zeta^{(2)} + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} = -\zeta^{(1)} \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial z^2} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} z = 0 \quad (4.2.3.23)$$

Από τις ανωτέρω οριακές συνθήκες (4.3.2.21) και (4.3.2.23), γίνεται προφανές ότι για την εύρεση της προσεγγιστικής λύσης 2ης τάξης απαιτείται η πρότερη γνώση της 1ης τάξης. Γενικά οι σχέσεις (4.3.2.21) και (4.3.2.23) για τη n-στη τάξη μπορούν να γραφούν στην εξής μορφή:

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial z} - \frac{\partial \zeta^{(n)}}{\partial t} = G^{(n-1)} \text{ για } z = 0 \quad (4.2.3.24)$$

και

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial t} + g\zeta^{(n)} = F^{(n-1)} \quad \text{για } z = 0 \quad (4.2.3.25)$$

Όπου οι $G^{(n-1)}$ και $F^{(n-1)}$ αποτελούν συνδυασμό των προσεγγιστικών λύσεων 1^{ης} 2^{ης} και (n-1) τάξης.

Οι συναρτήσεις $\Phi^{(n)}$ που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του ζητούμενου δυναμικού της ροής Φ με σειρά διαταραχών θα πρέπει να ικανοποιούν, εκτός από τις οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια (4.2.3.24) και (4.2.3.25) τις εξής συνθήκες:

- τη συνθήκη στον πυθμένα (4.2.3.6) καθώς και
- την εξ. του Laplace(4.2.3.4))

Θα πρέπει δηλαδή για τον n-στο όρο της (4.2.3.12) να έχουμε:

$$\Delta \Phi^{(n)} = 0 \text{ στο πεδίο ροής} \quad (4.2.3.26)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(n)}}{\partial n} = \vec{\nabla} \Phi^{(n)} = 0 \text{ στον πυθμένα} \quad (4.2.3.27)$$

4.2.4 Θεωρίες κυματισμών

Οι επικρατέστερες θεωρίες κυματισμών όπως θα δούμε παρακάτω είναι η γραμμική θεωρία απλών αρμονικών κυμάτων και η μη γραμμική θεωρία κατά Stokes. Η καθεμία έχει εφαρμογή σε διαφορετικές συνθήκες και κατασκευές, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

4.2.4.1 Γραμμική θεωρία-Απλά αρμονικά κύματα

Ο απλός αρμονικός κυματισμός (κύματα Airy) προκύπτει σαν λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος 1^{ης} τάξης που περιγράφεται από τις εξ. (4.2.320), (4.2.322), (4.2.326) και (4.2.327), για n=1. Η λύση του προβλήματος μας δίνει τα εξής αποτελέσματα για πεπερασμένο βάθος νερού, για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (Α.Ε.Ε.) και το δυναμικό του πεδίου ροής (Δ.Π.Ρ.) αντίστοιχα:

- Α.Ε.Ε.

$$\zeta^{(1)}(x; y; t) = \frac{H}{2} \cos[k(x\cos\theta + y\sin\theta - \omega t)] \quad (4.2.3.4.1)$$

- Δ.Π.Ρ

$$\Phi^{(1)}(x; y; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \sin[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t] \quad (4.2.3.4.2)$$

Όπου:

k: ο αριθμός κύματος που ισούται με $k=2\pi/\lambda$

λ: το μήκος κύματος

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

d: το βάθος του νερού

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

Σε περίπτωση σύμπτωσης των δύο διευθύνσεων οι εξισώσεις (4.2.3.4.1) και (4.2.3.4.2) που θα περιγράψουν απλό αρμονικό κυματισμό κινούμενο κατά τη διεύθυνση του θετικού ημιάξονα x, γίνονται :

- Α.Ε.Ε.

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (4.2.3.4.3)$$

και

- Δ.Π.Ρ.

$$\Phi^{(1)}(x; y; t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4.2.3.4.4)$$

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

- Α.Ε.Ε.

$$\zeta^{(1)}(x; t) = \operatorname{Re} \left[\frac{H}{2} e^{i[k(\cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]} \right] \quad (4.2.3.4.5)$$

και

- Δ.Π.Ρ.

$$\Phi^{(1)}(x; y; t) = \operatorname{Re}\left[-i \frac{H g \cosh[k(z+d)]}{2 \omega \cosh(kd)} e^{i[k(\cos\theta + y \sin\theta) - \omega t]}\right] \quad (4.2.3.4.6)$$

Αξίζει να υπενθυμίσουμε πως στην περίπτωση απλού αρμονικού κύματος οι τροχιές των μορίων του ρευστού είναι κλειστές και έχοντας σαν αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται μεταφορά μάζας.

4.2.4.2 Μη γραμμική θεωρία-Κατά Stokes 2^{ης}, 3^{ης} και 5^{ης} τάξης

Για να ευρεθούν λύσεις ανώτερης τάξης στα πλαίσια της θεωρίας διαταραχών πρέπει να λυθεί το αντίστοιχο πρόβλημα οριακών τιμών που ορίζεται από τις σχέσεις (4.2.3.21), (4.2.3.23), (4.2.3.26) και (4.2.3.27) για $n=2$, χρησιμοποιώντας τη λύση πρώτης τάξης του απλού αρμονικού κυματισμού που αναφέρθηκε στην §4.2.3.4.1. Έτσι είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα μεγέθη $\zeta^{(2)}$ και $\Phi^{(2)}$ καθώς και το ε . Έτσι έχουμε:

2^{ης} τάξης

- A.E.E. 2^{ης} τάξης

$$\zeta = \varepsilon \zeta^{(1)} + \varepsilon^2 \zeta^{(2)} = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8 \lambda} \frac{[2 + \cosh(2kd)] \cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \cos[2(kx - \omega t)]$$

(4.2.4.2.1)

- Δ.Π.Ρ. 2ης τάξης

$$\Phi = \varepsilon \Phi^{(1)} + \varepsilon^2 \Phi^{(2)} =$$

$$= \frac{H}{2T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3\pi H^2}{16T} \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin[2(kx - \omega t)] \quad (4.2.4.2.2)$$

Η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας παρατηρούμε στην εξίσωση (4.2.4.2.1) πως δεν είναι συμμετρική. Έτσι για ανύψωση κορυφής και κοιλάδας του κύματος, θέτουμε $\theta=0$ και $\theta=kx-\omega t$ και έχουμε αντίστοιχα:

$$\frac{\alpha_{\text{κορυφής}}}{H} = \frac{1}{2} + \frac{\pi H}{8 \lambda} \frac{[2 + \cosh(2kd)] \cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \quad (4.2.4.2.3)$$

και

$$\frac{\alpha_{\text{κοιλάδας}}}{H} = \frac{1}{2} - \frac{\pi H}{8\lambda} \frac{[2 + \cosh(2kd)] \cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \quad (4.2.4.2.4)$$

Όπου για βαθύ νερό ($d > \lambda/2$) οι (4.2.4.2.3) και (4.2.4.2.3) γίνονται αντίστοιχα:

$$\frac{\alpha_{\text{κορυφής}}}{H} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1.57H}{\lambda}\right) \quad (4.2.4.2.5)$$

και

$$\frac{\alpha_{\text{κοιλάδας}}}{H} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1.57H}{\lambda}\right) \quad (4.2.4.2.6)$$

με τις ταχύτητες μετατόπισης και το μήκος κύματος να μένουν ως έχουν με αυτά της 1^{ης} τάξης:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd) \quad \text{και} \quad \lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad (4.2.4.2.7)$$

3^{ης} τάξης

- A.E.E. 3^{ης} τάξης

$$\frac{\zeta^{(3)}}{\lambda} = A_1 \cos(kx - \omega t) + A_2 \cos|2(kx - \omega t)| + A_3 \cos|3(kx - \omega t)| \quad (4.2.4.2.8)$$

Όπου:

$$A_1 = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (4.2.4.2.9)$$

$$A_2 = \pi A_1^2 f_2(kd) \quad (4.2.4.2.10)$$

$$A_3 = \pi^2 A_1^3 f_3(kd) \quad (4.2.4.2.11)$$

$$f_2(kd) = \frac{[2 + \cosh(2kd)] \cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \quad (4.2.4.2.12)$$

$$f_3(kd) = \frac{3}{16} \frac{1 + 8 \cosh^6(kd)}{\sinh^6(kd)} \quad (4.2.4.2.13)$$

Ενώ η σχέση μεταξύ ύψους κύματος H και α είναι η εξής:

$$\frac{H}{d} = \frac{\lambda}{d} \left[2 \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right) + 2\pi^2 \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^3 f_3(kd) \right] \quad (4.2.4.2.14)$$

το μήκος κύματος είναι:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \left[1 + (k\alpha)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2(2kd)}{16 \sinh^4(kd)} \right] \quad (4.2.4.2.15)$$

και η ταχύτητα διάδοσης του κύματος:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \left[1 + (k\alpha)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2(2kd)}{16 \sinh^4(kd)} \right] \quad (4.2.4.2.16)$$

Όταν το νερό είναι βαθύ ($d > \lambda/2$) οι συναρτήσεις $f_2(kd)$ και $f_3(kd)$ τείνουν στο 1 και 1.5 αντίστοιχα, έτσι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται σε αυτή την περίπτωση:

$$\zeta_0 = \alpha \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} k\alpha \cos[2(kx - \omega t)] + \frac{3}{8} k^2 \alpha^3 \cos[3(kx - \omega t)] \quad (4.2.4.2.17)$$

με

$$H_0 = 2\alpha + \frac{3}{4} k^2 \alpha^3 \quad (4.2.4.2.18)$$

και η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος είναι:

$$c_0^2 = \frac{g}{k} [1 + (k\alpha)^2] \quad (4.2.4.2.19)$$

Όπου ο μηδενικός δείκτης χρησιμοποιείται για να δείξει πως έχουμε σχέσεις εκφρασμένες για βαθύ νερό.

- Δυναμικό ταχύτητας για κύμα 3^{ης} τάξης

$$\Phi^{(3)}(x; z; t) = \frac{\omega}{k^2} \left[F_1(kd, k\alpha) \cosh[k(z+d)] \sin(kx - \omega t) + \frac{1}{2} F_2(kd, k\alpha) \cosh[2k(z+d)] \sin[2(kx - \omega t)] + \frac{1}{3} F_3(kd, k\alpha) \cosh[3k(z+d)] \sin[3(kx - \omega t)] \right] \quad (4.2.4.2.20)$$

Όπου:

$$F_1(kd, k\alpha) = \frac{k\alpha}{\sinh(kd)} - (k\alpha)^2 \frac{[1 + 5 \cosh^2(kd)] \cosh^2(kd)}{8 \sinh^5(kd)} \quad (4.2.4.2.21)$$

$$F_2(kd, k\alpha) = \frac{3}{4} \frac{(k\alpha)^2}{\sinh^4(kd)} \quad (4.2.4.2.22)$$

$$F_3(kd, k\alpha) = \frac{3}{64} (k\alpha)^3 \left(\frac{11 - 2 \cosh(2kd)}{\sinh^7(kd)} \right) \quad (4.2.4.2.23)$$

Οι συντελεστές A_1, A_2, A_3 και F_1, F_2, F_3 που δίνονται από τις σχέσεις (4.2.4.2.9)-(4.2.4.2.11) και (4.2.4.2.22), (4.2.4.2.23) δίνονται υπό μορφή πινάκων στο [66]. Ακόμη γίνεται να

υπολογισθούν έπειτα από την εύρεση του d/λ συναρτήσει των H/d και $\frac{2\pi}{gT^2}$ από τις σχέσεις (4.2.4.2.13) και (4.2.4.2.14) όπως δίνονται στα διαγράμματα (3.1) και (3.2) του [67].

Η ταχύτητα μεταφοράς μάζας είναι:

$$U_M = \frac{\Delta\xi_T}{T} = \pi^2 \left(\frac{H}{\lambda}\right)^2 \frac{c \cosh[2k(z+d)]}{2 \sinh^2(kd)} \quad (4.2.4.2.24)$$

Όπου:

$\Delta\xi_T$: η οριζόντια μετατόπιση ενός μορίου ρευστού σε μια περίοδο T

Για βαθύ νερό (όπου το συμβολίζουμε με δείκτη "0"), η ταχύτητα μεταφοράς μάζας θα είναι:

$$U_{M_0} = \pi^2 \left(\frac{H}{\lambda}\right)^2 c_0 e^{(2kz)} = \pi \left(\frac{H}{\lambda}\right)^2 c_0 \exp\left(\frac{4\pi z}{\lambda}\right) \quad (4.2.4.2.24)$$

5^{ης} τάξης

Σύμφωνα με τον Skjebreia-Hendrickson [68], το δυναμικό και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για κύματα 5^{ης} τάξης θα είναι αντίστοιχα τα εξής:

$$\begin{aligned} \Phi^{(5)} = \frac{\lambda^2}{2\pi T} [& (\varepsilon_{11} + \varepsilon^3 A_{13} + \varepsilon^5 A_{15}) \cosh[k(z+d)] \sin(kx - \omega t) + (\varepsilon^2 A_{22} \\ & + \varepsilon^4 A_{24}) \cosh[2k(z+d)] \sin[2(kx - \omega t)] + (\varepsilon^3 A_{33} \\ & + \varepsilon^5 A_{35}) \cosh[3k(z+d)] \sin[3(kx - \omega t)] \\ & + \varepsilon^4 A_{44} \cosh[4k(z+d)] \sin[4(kx - \omega t)] \\ & + \varepsilon^5 A_{55} \cosh[5k(z+d)] \sin[5(kx - \omega t)]] \quad (4.2.4.2.25) \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned} \zeta^{(5)} = \frac{\lambda}{2\pi} [& \varepsilon \cos(kx - \omega t) + (\varepsilon^2 B_{22} + \varepsilon^4 B_{24}) \cos[2(kx - \omega t)] \\ & + (\varepsilon^3 B_{33} + \varepsilon^5 B_{35}) \cos[3(kx - \omega t)] + \varepsilon^4 B_{44} \cos[4(kx - \omega t)] \\ & + \varepsilon^5 B_{55} \cos[5(kx - \omega t)]] \quad (4.2.4.2.26) \end{aligned}$$

Οι συντελεστές A_{ij} και B_{ij} στις ανωτέρω σχέσεις είναι συναρτήσεις του λόγου λ/g και δίνονται στους πίνακες 3.2α-3.2γ [67]. Μεταξύ των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος H , T , λ , d και του συντελεστή ε ισχύουν οι εξής σχέσεις που προκύπτουν από την απαίτηση ικανοποίησης των οριακών συνθηκών:

$$\frac{\pi H}{\lambda} = \frac{1}{\frac{d}{\lambda}} [\varepsilon + \varepsilon^3 B_{33} + \varepsilon^5 (B_{35} + B_{55})] \quad (4.2.4.2.27)$$

$$\frac{d}{\lambda_0} = \frac{d}{\lambda} [1 + \varepsilon^2 C_1 + \varepsilon^4 C_2] \tanh(kd) \quad (4.2.4.2.28)$$

Όπου:

$$\lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2$$

Σύμφωνα με τον Urshell [69] που εισήγαγε την παράμετρο: $H\lambda^2/d^3$, μπορούμε να κάνουμε μια κατάταξη ισχύος των θεωριών κυματισμού σε συναρτήσει αυτής. Έτσι έχουμε:

Κατά Airy:	$H\lambda^2/d^3 < 1$
Κύματα Stokes:	$1 < H\lambda^2/d^3 < 48$
Ελλειπτικά κύματα:	$48 < H\lambda^2/d^3 < 75$
Μεμονωμένα κύματα:	$75 < H\lambda^2/d^3$

4.3 Φορτίσεις θαλάσσιων κατασκευών

Έπειτα από τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών συνθηκών της περιοχής πόντισης και λειτουργίας της θαλάσσιας κατασκευής, επόμενο στάδιο της όλης μελέτης είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων/φορτίσεων που αναλαμβάνει αυτή. Η κατάταξή τους γίνεται σε γενικό βαθμό στις εξής δυο κατηγορίες:

- Τα λειτουργικά φορτία (functional loads), δηλαδή αυτά που οφείλονται στην καθαυτή ύπαρξη της κατασκευής καθώς και εκείνα που επάγονται πάνω της κατά τη φάση εκπλήρωσης του έργου της. Ως τέτοιου είδους φορτία λογίζονται τα εξής:
 - Το ίδιο βάρος της κατασκευής
 - Το βάρος του εξοπλισμού
 - Τα στατικά και δυναμικά φορτία κατά την εκτέλεση εργασιών
 - Η δύναμη της άντωσης
- Οι φορτίσεις που οφείλονται σε δράσεις του περιβάλλοντος (environmental loads), δηλαδή φορτία που προκαλούνται από την άμεση ή έμμεση επίδραση του περιβάλλοντος. Ως έμμεσης δράσης φορτία λογίζονται τα εξής:

- Οι δυνάμεις λόγω των κινήσεων της κατασκευής
- Οι δυνάμεις των αγκυρώσεων
- Φορτία λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής
- Φορτία λόγω μεταβολής της γεωμορφολογίας του πυθμένα

Ως άμεσης δράσης φορτία λογίζονται τα εξής:

- Άνεμοι
- Σεισμοί
- Θαλάσσια ρεύματα
- Θαλάσσιοι κυματισμοί

Από τα ανωτέρω είδη φορτίων στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθούν επισταμένως αυτά με την μεγαλύτερη επιρροή στην υπό μελέτη κατασκευή, δηλαδή ο άνεμος και οι θαλάσσιοι κυματισμοί.

4.3.1 Φορτία ανέμου

Η δύναμη λόγω του πεδίου αέρα F_w που ασκείται σε ένα μεμονωμένο κατασκευαστικό στοιχείο ή σε μια επιφάνεια κάθετη στον άξονα του στοιχείου ή στην επιφάνεια, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Νορβηγικού Νηογνώμονα [70] δίνεται από την εξής σχέση:

$$F_w = cqAsina \quad (4.3.1.1)$$

Όπου:

- A: η προβεβλημένη επιφάνεια του στοιχείου κάθετα στη διεύθυνση της δύναμης
- a: η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και του άξονα του εκτεθειμένου στοιχείου ή της επιφάνειας
- q: η πίεση του ανέμου που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_{tz}^2 \quad (4.3.1.2)$$

Όπου:

- ρ : η πυκνότητα του αέρα με μια θεωρούμενη μέση τιμή: $\rho=1.225\text{kg/m}^3$
- \bar{V}_{tz} : η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος z πάνω από τη μέση επιφάνεια του νερού και για χρονική διάρκεια t. Ο υπολογισμός της γίνεται σύμφωνα με την σχέση (4.2.1.2). Σύμφωνα με τον Νορβηγικό Νηογνώμονα [70] τα α, β λαμβάνονται για μετρήσεις διάρκειας 1min. Τα φορτία του ανέμου που προκύπτουν για την \bar{V}_{tz} για 1min θα πρέπει να συνδυάζονται με το μέγιστο φορτίο από τους

θαλάσσιους κυματισμούς. Σε περίπτωση που το συνολικό αυτό φορτίο είναι μικρότερο από το φορτίο ανέμου για συνολική διάρκεια 3min, τότε και μόνον τότε θα γίνεται η διαστατοποίηση της κατασκευής για χρονική διάρκεια 3min.

C: ο συντελεστής σχήματος. Ο συντελεστής αυτός για μεμονωμένα κατασκευαστικά στοιχεία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = KC_{\infty} (4.3.1.3)$$

Όπου:

C_{∞} : ο συντελεστής σχήματος για απειρομήκη κατασκευαστικά στοιχεία. Στο σχήμα 4.1 του [67] δίνεται για κυκλικές διατομές σαν συνάρτηση του αριθμού Reynolds [70].

$$Re = \frac{D\bar{V}_{tz}}{\nu} (4.3.1.4)$$

Όπου:

D: η διάμετρος της κυκλικής διατομής

\bar{V}_{tz} : η μέση ταχύτητα ανέμου, σύμφωνα με τον ανωτέρω ορισμό της

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα, όπου λαμβάνεται ίση με $1.46 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ υπό την συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία 15°C

Στο σχήμα 4.2 του [67] δίνεται ο συντελεστής C_{∞} για διατομές διάφορες της κυκλικής ενώ στο 4.3 δίνεται ο συντελεστής k που είναι:

k: συντελεστής μείωσης του C_{∞} λόγω πεπερασμένου μήκους του κατασκευαστικού στοιχείου. Στο σχήμα αυτό δίνεται ως συνάρτηση του l/d , όπου l: το μήκος της προς μελέτη κατασκευής και d: η χαρακτηριστική διάσταση της διατομής του (πλάτος ή ύψος) μετρούμενη κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

Ακόμη στο σχήμα 4.4 του [67] δίνεται ο συντελεστής σχήματος C για σφαιρικές ή παραβολοειδείς κατασκευές και στο 4.7 για πρισματικής μορφής.

4.3.2 Φορτία θαλάσσιων κυματισμών

Οι φορτίσεις που επιδέχονται από θαλάσσιους κυματισμούς οι κατασκευές έχουν να κάνουν με τα εξής είδη φαινομένων:

- Φαινόμενα αντίστασης (drag) όπου οφείλονται σε αποκόλληση της ροής. Τα φαινόμενα αυτά δημιουργούν και επιβάλλουν αντίστοιχες δυνάμεις στην

κατασκευή (drag forces) οι οποίες οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας.

- Φαινόμενα αδρανειακά (inertia) όπου οφείλονται σε μεταβολή της πίεσης του περιβάλλοντος ρευστού που σχετίζεται με την επιτάχυνση της ροής. Τα φαινόμενα αυτά δημιουργούν και επιβάλλουν αντίστοιχες δυνάμεις στην κατασκευή, οι οποίες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 - Δυνάμεις Froude-Kryloff είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Κύρια παραδοχή για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία της κατασκευής δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής. Ο υπολογισμός τους γίνεται με απ' ευθείας ολοκλήρωση της πίεσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κυματισμού στη βρεχόμενη επιφάνειά της κατασκευής.
 - Δυνάμεις ακτινοβολίας (radiation): Θεωρώντας την κατασκευή κινούμενη, τότε το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία κυματισμών και κατ' επέκταση η δημιουργία ενός δυναμικού ροής που επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στις δυνάμεις Froude-Kryloff και περίθλασης.
- Φαινόμενα περίθλασης όπου οφείλονται σε παραμόρφωση του πεδίου ροής υπό την παρουσία της κατασκευής. Τα φαινόμενα αυτά δημιουργούν και επιβάλλουν αντίστοιχες δυνάμεις στην κατασκευή (radiation forces). Λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία της κατασκευής και την παραμόρφωση που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής και θεωρώντας πως το σώμα είναι ακίνητο, τότε στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού προστίθεται και το δυναμικό περίθλασης, το οποίο οφείλεται στην παραμόρφωση της ροής. Η υπέρθεση αυτών αποτελεί τις δυνάμεις περίθλασης.

Πέραν των ανωτέρω φαινομένων και των αντίστοιχων δυνάμεων που επάγονται στην κατασκευή, υπάρχουν και άλλες δυνάμεις που εν αντιθέσει με τις προρρηθείσες δεν κάνουν την θεώρηση του απλού αρμονικού κυματισμού. Οι δυνάμεις λόγω των θαλάσσιων κυματισμών είναι μη γραμμικές από τη φύση τους. Μπορούμε να τις υποδιαιρέσουμε σε δυνάμεις 1ης τάξης, σαν λύση του γραμμικού προβλήματος και σε δυνάμεις 2ης και ανώτερης τάξης όταν λαμβάνονται υπόψιν οι μη γραμμικοί όροι του προβλήματος.

4.3.3 Συσχετισμός επίδρασης φορτίσεων αναλόγως των στοιχείων της κατασκευής

Η ποικιλομορφία των θαλάσσιων κατασκευών σε συνδυασμό με την εκτεταμένη διαφορετικότητα των εκάστοτε συνθηκών περιβάλλοντος στις περιοχές λειτουργίας τους, οδηγούν στην αδυναμία εύρεσης ενιαίας υδροδυναμικής ανάλυσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σχετική ομαδοποίηση προσεγγίσεων τόσο των διαφορετικών χαρακτηριστικών των κατασκευών, όσο και των ποικίλων θαλάσσιων συνθηκών.

Ενδεικτική προσέγγιση, προς κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κυματισμών και του είδους της κατασκευής, θα αποτελέσει η μελέτη προσκίπτοντος αρμονικού κύματος σε κύλινδρο εδραζόμενο στον πυθμένα.

Το αρμονικό κύμα περιγράφεται πλήρως από μια τριάδα τιμών, όπως (\bar{u}_z, T, d) ή (H, λ, d) όπου \bar{u}_z η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας των σωματιδίων του ρευστού σε απόσταση z από τον πυθμένα, d το βάθος του νερού, T, λ, H η περίοδος, το μήκος και το ύψος του κύματος αντίστοιχα. Υποθέτοντας πως το κύμα περιγράφεται πλήρως από τριάδες τιμών, ας πούμε την (H, λ, d) , τότε η δύναμη που ασκείται σε κυλινδρικό σώμα θα δίνεται από τη συναρτησιακή σχέση:

$$F=f(D,d,\rho,g,H,\lambda, \mu) \quad (4.3.3.1)$$

Όπου:

D: η διάμετρος του κυλίνδρου

d: το βάθος του νερού

ρ : η πυκνότητα του νερού

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

H: το ύψος του κύματος

λ : το μήκος του κύματος

μ : η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού

Βάσει του θεωρήματος της μηχανικής ομοιότητας η (4.3.3.1) αδιαστατοποιείται ως εξής:

$$\frac{F}{\rho g \pi H \frac{D^2}{8}} = f\left(\frac{2\pi D}{\lambda}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{\mu}{\rho \sqrt{g D^3}}\right) \quad (4.3.3.2)$$

Ωστόσο παρατηρούμε πως η παράσταση:

$$\frac{\mu}{\rho \sqrt{g D^3}} = \frac{\nu}{\sqrt{g D^3}} \quad (\nu \text{ κινηματική συνεκτικότητα})$$

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

Όπου:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{c}{\sqrt{gD}} \quad (4.3.3.3)$$

και

$$Re = \frac{\text{Αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Τριβής}} = \frac{cD}{\nu} \quad (4.3.3.4)$$

(με c την ταχύτητα μετάδοσης του κύματος). Εν συνεχεία διαιρώντας τις τελευταίες δυο εξισώσεις έχουμε:

$$\frac{Fr}{Re} = \frac{\text{Δυνάμεις Τριβής}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{\nu}{\sqrt{gD^3}} \quad (4.3.3.5)$$

Από τα ανωτέρω γίνεται πρόδηλη η συνδυασμένη επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, τριβής και των αδρανειακών. Σύμφωνα με την (4.3.3.5) προκύπτει πως αυξάνοντας την διάμετρο του κυλίνδρου, συνακολουθεί η αύξηση της σχετικής σημασίας των δυνάμεων βαρύτητας έναντι αυτών της τριβής.

Η τιμή της μετατόπισης της ταχύτητας είναι:

$$c = \sqrt{\frac{g \tanh(kd)}{k}}$$

Έτσι αντικαθιστώντας την, η (4.3.3.5) γίνεται:

$$Fr = \left[\frac{g \tanh(kd)}{k} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{\tanh(kd)}{kD}} \quad (4.3.3.6)$$

- Για νερό απείρου βάθους, όπου $\tanh(kd) \cong 1$ προκύπτει από την (4.3.3.6) η εξής σχέση για τον αριθμό Froude:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{1}{\sqrt{kD}} \quad (4.3.3.7)$$

Βάσει των ανωτέρω παρατηρούμε πως για μικρές τιμές του $kD = 2\pi \frac{D}{\lambda}$ οπότε και της διαμέτρου D του σώματος σε σχέση με το μήκος κύματος λ , οι αδρανειακές δυνάμεις υπερτερούν σε σημασία έναντι των βαρυτικών. Αποτέλεσμα αυτού είναι πως για μικρές τιμές του D να μπορούμε να παραβλέψουμε τις δυνάμεις περίθλασης, λόγω της μικρής παραμόρφωσης του πεδίου ροής υπό την παρουσία της κατασκευής.

- Για ρηχό νερό όπου $\tanh(kd) \cong kd$ έχουμε:

$$Fr = \frac{\text{Αδρανειακές δυνάμεις}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.3.3.8)$$

Βάσει των ανωτέρω παρατηρούμε πως για μικρές τιμές του βάθους του νερού d ή για μεγάλες τιμές της διαμέτρου D του σώματος, ασχέτως της τιμής του μήκους κύματος λ , οι δυνάμεις βαρύτητας υπερτερούν σε σημασία έναντι των αδρανειακών. Οι οριακές τιμές των παραμέτρων kd και d/D , πέραν των οποίων θα λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα της παραμόρφωσης της ροής θα αναφερθούν στη συνέχεια. Η θεωρητική τους κάλυψη απαιτεί προσδιορισμό του πεδίου ροής στα πλαίσια της θεωρίας δυναμικού.

Αν έναντι της τριάδας (H, λ, d) χρησιμοποιήσουμε την τριάδα (\bar{u}_z, T, d) για την περιγραφή του αρμονικού κύματος, όπου $\bar{u}_z = \omega \left(\frac{H}{2}\right)$, τότε η συναρτησιακή σχέση για την εξασκούμενη δύναμη στην κατασκευή είναι:

$$F = f(D, d, \pi, \bar{u}(z), T, \mu) \quad (4.3.3.9)$$

Όπου με τη βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης παίρνει την μορφή:

$$\left(\frac{F}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2(z) D d} \right) = f \left(\frac{\bar{u}(z)}{D}, \frac{\bar{u}(z) D}{\frac{\mu}{\rho}}, \frac{d}{D} \right) \quad (4.3.3.10)$$

Η οποία μπορεί να γραφεί:

$$\frac{F}{\frac{1}{2} \rho u^2(z) D d} = f \left(N_{KC}, Re, \frac{d}{D} \right) \quad (4.3.3.11)$$

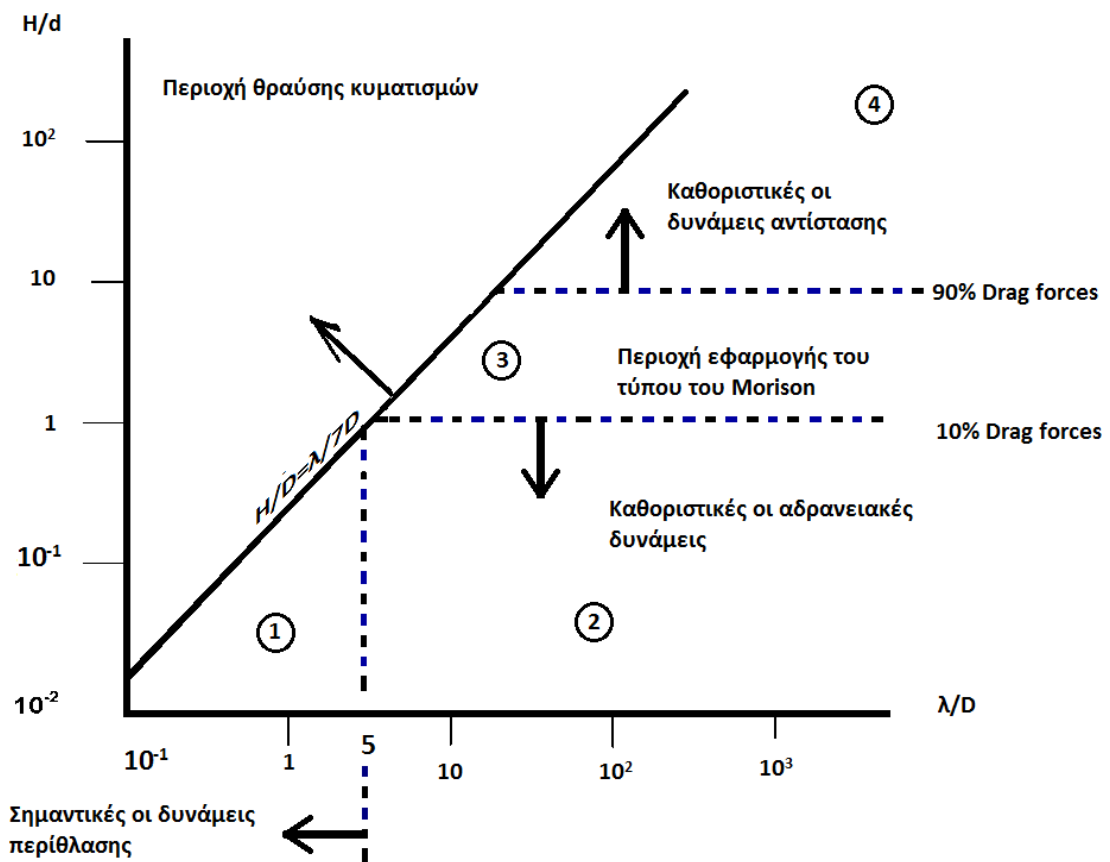
Όπου:

$N_{KC} = \frac{\bar{u}(z)T}{D}$: το αδιάστατο μέγεθος που ονομάζεται σταθερά του Keulegan-Carpenter

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

και εισάγοντας και την απόλυτη τραχύτητα για την περίπτωση μη λείου κυλίνδρου θα έχουμε:

$$\frac{F}{\frac{1}{2}\rho U^2 D d} = f\left(N_{KC}, Re, \frac{d}{D}, \frac{k}{D}\right) \quad (4.3.3.12)$$

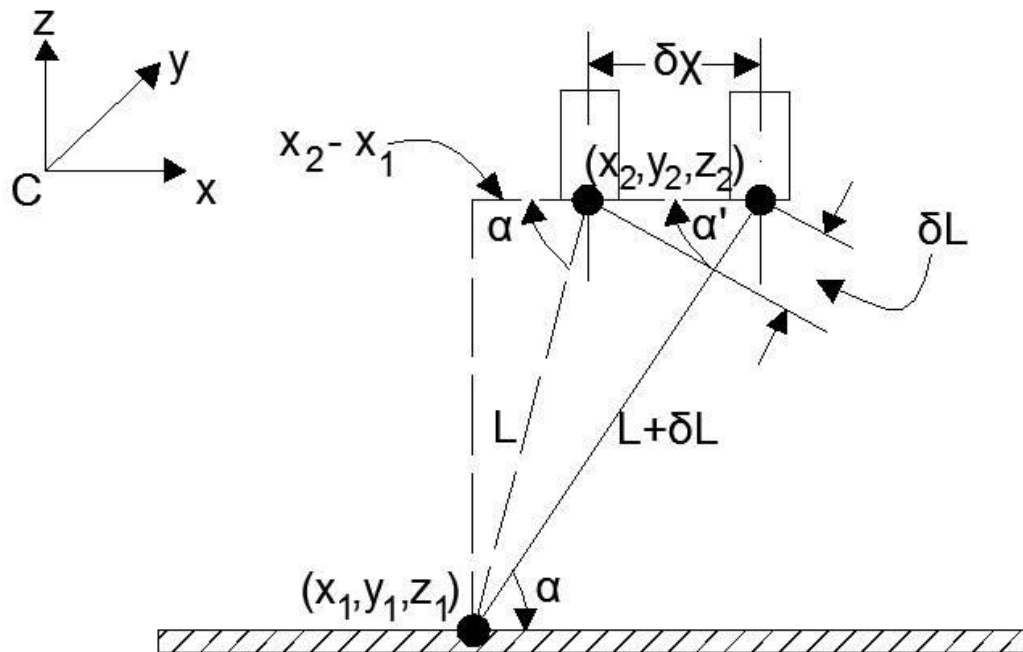


Πίνακας 4.2 Περιοχές σχετικής σημασίας των διαφόρων τύπων δυνάμεων για την περίπτωση κατακόρυφου κυλίνδρου σε άπειρο βάθος νερού [67].

4.4 Αγκύρωση υπό κατακόρυφη προένταση TLP (Tension Leg Platform)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια αναφορά στην διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών επαναφοράς για πλωτή κατασκευή που συγκρατείται στην θέση ισορροπίας της μέσω προεντεταμένων τενόντων (TLP) εικόνα (4.1), όπως και η κατασκευή που μελετάμε. Οι

εξισώσεις που θα περιγράψουν τις δυνάμεις που ασκούνται στους κλάδους αγκύρωσης είναι σύμφωνα με το βιβλίο [71].



Εικόνα 4.1 Σχηματική διάταξη γραμμής υπό κατακόρυφη προένταση για μικρές μετατοπίσεις $\alpha \approx \alpha'$ [71].

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

$$FM_i = kij \cdot \xi_j \quad (4.4.1)$$

όπου:

FM_i : είναι η i συνιστώσα του διανύσματος της δύναμης αγκύρωσης.

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

και

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

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

Τότε:

$$\cos\alpha = \frac{x_2 - x_1}{L}; \cos\beta = \frac{y_2 - y_1}{L}; \cos\gamma = \frac{z_2 - z_1}{L} \quad (4.4.2)$$

$$L = \{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.4.3)$$

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

$$L + \delta L \approx L + \delta x \cdot \cos\alpha = L + \frac{x_2 - x_1}{L} \cdot \delta x \quad (4.4.4)$$

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

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \cos\alpha' - T \cdot \cos\alpha \quad (4.4.5)$$

Επίσης

$$\cos\alpha' = \frac{x_2 - x_1 + \delta x}{L + \delta L} = \frac{(x_2 - x_1) \left[1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)}\right]}{L \cdot \left(1 + \frac{\delta L}{L}\right)} \quad (4.4.6)$$

Συνδυάζοντας τις 4.4.5 και 4.4.6 εξάγουμε:

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \left(\frac{x_2 - x_1}{L}\right) \cdot \left[\frac{1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)}}{1 + \frac{\delta L}{L}}\right] - \frac{T \cdot (x_2 - x_1)}{L} \quad (4.4.7)$$

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

$$\frac{1}{1 + \frac{\delta L}{L}} = 1 - \frac{\delta L}{L} + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + O(\varepsilon^3) = 1 - \frac{\delta L}{L} + O(\varepsilon^2) \quad (4.4.8)$$

Από τις 4.4.7 και 4.4.8 παίρνουμε:

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cdot \cos\alpha \cdot \left[1 + \frac{\delta x}{(x_2 - x_1)}\right] \cdot \left[1 - \frac{\delta L}{L}\right] - T \cdot \cos\alpha \quad (4.4.9)$$

ή αλλιώς

$$\delta T_x = T \cdot \cos\alpha \cdot \left[\frac{\delta x}{(x_2 - x_1)} - \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta T}{T}\right] + O(\varepsilon^2) \quad (4.4.10)$$

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

$$\delta T_x = \frac{T}{L} \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ \left[\frac{L \cdot \delta x}{(x_2 - x_1)} \right] \cos \alpha \cdot \delta x + \frac{\lambda \cdot (x_2 - x_1)}{T} \cdot \delta x \right\} = \left(\lambda \cdot \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \alpha \right) \cdot \delta x \quad (4.4.11)$$

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

$$\lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{\delta T_x}{\delta x} = \frac{\partial T_x}{\partial x} = k_{11} = \lambda \cdot \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \alpha \quad (4.4.12)$$

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

$$k_{21} = k_{12} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (4.4.13)$$

$$k_{31} = k_{13} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \alpha \cdot \cos \gamma \quad (4.4.14)$$

$$k_{22} = \lambda \cdot \cos^2 \beta + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \beta \quad (4.4.15)$$

$$k_{32} = k_{23} = \left[\lambda + \left(\frac{T}{L} \right) \right] \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma \quad (4.4.16)$$

$$k_{33} = \lambda \cdot \cos^2 \gamma + \frac{T}{L} \cdot \sin^2 \gamma \quad (4.4.17)$$

Οι υπόλοιποι όροι που εκφράζουν :

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

προκύπτουν από τους εννέα πρώτους όρους:

$$k_{41} = k_{31} \cdot y_2 - k_{21} \cdot z_2 \quad (4.4.18)$$

$$k_{51} = k_{11} \cdot z_2 - k_{31} \cdot x_2 \quad (4.4.19)$$

$$k_{61} = k_{22} \cdot x_2 - k_{11} \cdot y_2 \quad (4.4.20)$$

$$k_{42} = k_{32} \cdot y_2 - k_{22} \cdot z_2 \quad (4.4.21)$$

$$k_{52} = k_{21} \cdot z_2 - k_{32} \cdot x_2 \quad (4.4.22)$$

$$k_{62} = k_{22} \cdot x_2 - k_{21} \cdot y_2 \quad (4.4.23)$$

$$k_{43} = k_{33} \cdot y_2 - k_{32} \cdot z_2 \quad (4.4.24)$$

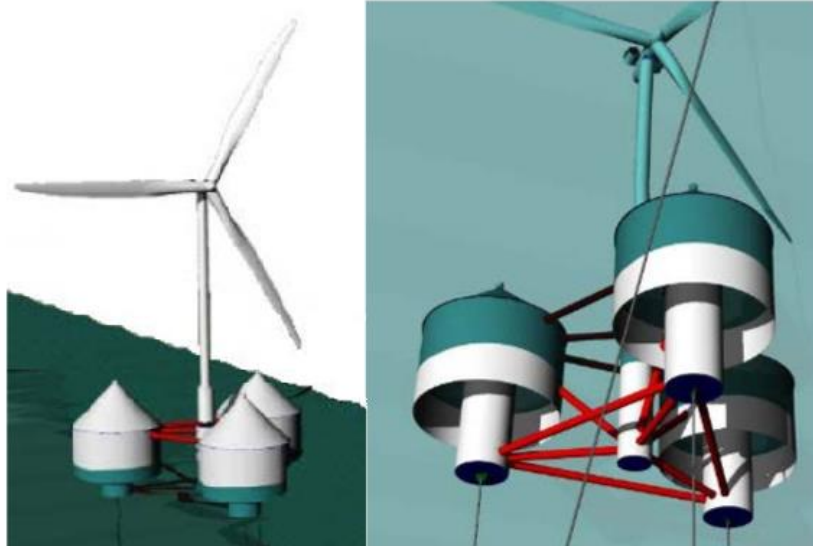
$$k_{53} = k_{31} \cdot z_2 - k_{33} \cdot x_2 \quad (4.4.25)$$

5 Σύνθετη υπό μελέτη κατασκευή

5.1 Περιγραφή της κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον στην ανάπτυξη θαλάσσιων εγκαταστάσεων ταυτόχρονης εκμετάλλευσης διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Η νέα τεχνολογική πρόκληση έγκειται στο συνδυασμό Μηχανισμών Ανάκτησης Κυματικής Ενέργειας (Μ.Α.Κ.Ε.) με Κατασκευές Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας δηλαδή ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Το κύριο μειονέκτημα της ισχύος των θαλάσσιων κυμάτων, καθώς και της αιολικής ενέργειας με την οποία αυτά δημιουργούνται, έχει διαπιστωθεί ότι είναι η τυχαία μεταβλητότητά της σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Ο σχεδιασμός λοιπόν πλωτών ημιβυθισμένων κατασκευών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον συγκερασμό ανέμων και κυμάτων θα μπορούσε να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη από τη λειτουργία μόνο Μ.Α.Κ.Ε.. Η τεχνολογία κατασκευής θαλάσσιων ανεμογεννητριών στο θαλάσσιο περιβάλλον έχει ήδη αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό δεδομένου ότι η δράση του ανέμου είναι παρόμοια τόσο στη θάλασσα όσο και στο χερσαίο περιβάλλον. Επιπλέον, όσον αφορά την ανάλυση τέτοιων δομών πολλαπλών χρήσεων, πρόσφατες έρευνες σχετικά με την υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση μοντέλων τους έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [72], [73].

Στην παρούσα εφαρμογή αντιμετωπίζεται το πρόβλημα συνδυαστικής κατασκευής αποτελούμενης από τρεις όμοιες συσκευές Μ.Α.Κ.Ε. οι οποίες τοποθετούνται στις γωνίες ενός τριγωνικού πλωτήρα. Ο πλωτήρας υποστηρίζει μία Α/Γ ισχύος 5MW (τα χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 5.1 και στις εργασίες [74] και [75]). Η γεωμετρική μορφή της κάθε κατασκευής Μ.Α.Κ.Ε. μοιάζει με μερικώς βυθισμένο δακτυλιοειδή, ταλαντευόμενο θάλαμο συγκεκριμένου όγκου ο οποίος σχηματίζεται μεταξύ ενός εξωτερικού κυλίνδρου/κελύφους και ενός ομόκεντρου εσωτερικού κόλουρου κυλίνδρου στον οποίο συνδέονται κατακόρυφοι τένοντες για την στερέωση του συστήματος στο έδαφος (Εικόνα 5.1). Η πλωτή κατασκευή είναι εκτεθειμένη στη συνδυασμένη δράση ανέμου και κύματος σε βάθη θάλασσας 120m και 200m.



Εικόνα 5.1 Εγκατάσταση 3 Μ.Α.Κ.Ε. και 1 Α/Γ όπως φαίνεται (αριστερά) πάνω και (δεξιά) κάτω από την επιφάνεια του νερού της θάλασσας [67].

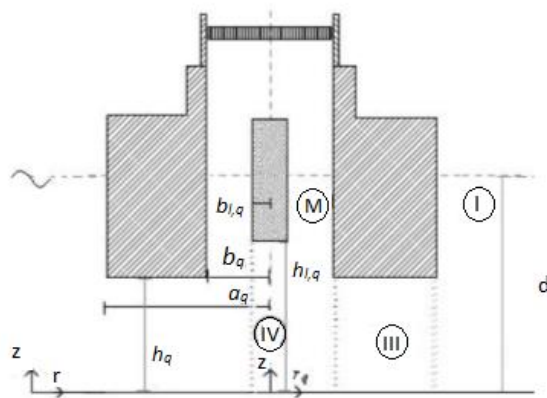
5.2 Μαθηματική περιγραφή της κατασκευής

5.2.1 Υπολογισμός της συνάρτησης δυναμικού της ταχύτητας

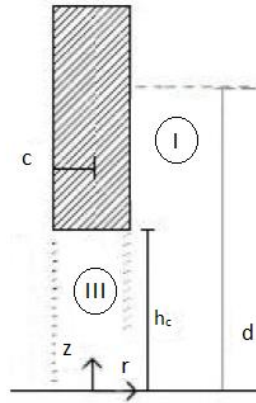
Θεωρούμε ότι η σύνθετη κατασκευή διεγείρεται από επίπεδο περιοδικό κύμα πλάτους $H/2$, συχνότητας ω και αριθμού k το οποίο μεταδίδεται σε νερό πεπερασμένου βάθους. Η απόσταση μεταξύ των κατακόρυφων αξόνων κάθε Μ.Α.Κ.Ε. είναι $L=50\text{m}$. Οι εξωτερικές και εσωτερικές ακτίνες κάθε θαλάμου συσκευής Μ.Α.Κ.Ε., q , όπου $q=1,2,3$, είναι $a_q=14.05\text{m}$ και $b_q=14\text{m}$, αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ του πυθμένα της θάλασσας και της κάτω επιφάνειας κάθε Μ.Α.Κ.Ε. είναι $h_q=112\text{m}$ και $h_q=192\text{m}$ για βάθος νερού 120m και 200m αντίστοιχα. Η ακτίνα κάθε εσωτερικού ομόκεντρου κυλίνδρου σε κάθε q Μ.Α.Κ.Ε. είναι $b_{1,q}=5\text{m}$ και η κατακόρυφη απόσταση της κάτω επιφάνειάς του με τον πυθμένα είναι $h_{1,q}=100\text{m}$ και 180m για βάθος νερού 120m και 200m , αντίστοιχα. Η ακτίνα του κεντρικού κυλινδρικού σώματος που υποστηρίζει την Α/Γ είναι $c=3.25\text{m}$ και η απόσταση του κάτω μέρους του με τον πυθμένα είναι $h_c=100\text{m}$ και 180m για βάθος νερού 120m και 200m , αντίστοιχα (Εικόνες 5.2, 5.3).

Ισχύς	5MW
Προσανατολισμός, διαμόρφωση ρότορα	Κατακόρυφου άξονα, προσήνεμης πλευράς, 3 πτερυγίων
Σύστημα μετάδοσης	Υψηλής ταχύτητας, πολλαπλών σταδίων κιβώτιο ταχυτήτων
Διάμετρος ρότορα, πλήμνης	126m, 3m
Ύψος πλήμνης	90m
Ταχύτητες ανέμου έναρξης και διακοπής λειτουργίας και ονομαστική	3 m/s, 25m/s και 11.4 m/s
Μάζα ρότορα	110000kg
Μάζα νασέλλας	240000kg
Μάζα πυλών	347460kg

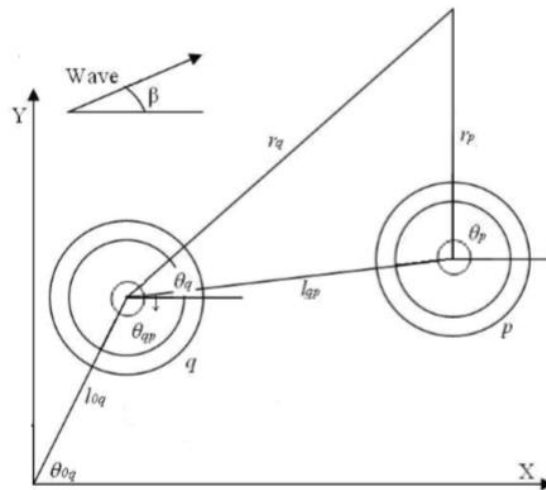
Πίνακας 5.1 χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας [74].



Εικόνα 5.2 Σχήμα προσδιορισμού διαστάσεων της κάθε q συσκευής Μ.Α.Κ.Ε. της συνολικής διάταξης [72].



Εικόνα 5.3 Σχήμα προσδιορισμού διαστάσεων της κεντρικής κυλινδρικής κατασκευής υποστήριξης του πύργου της Α/Γ [76].



Εικόνα 5.4 Σχήμα προσδιορισμού διαστάσεων της κάθε q συσκευής Μ.Α.Κ.Ε. της συνολικής διάταξης [72].

Θεωρούνται κυματισμοί μικρού πλάτους καθώς και αστρόβιλη, μη ιξώδης ροή επομένως ισχύει η γραμμική θεωρία δυναμικού. Η αρχή για το γενικό – καρτεσιανό σύστημα αναφοράς O-XYZ τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας, ενώ ο κατακόρυφος άξονας OZ θεωρείται ότι συμπίπτει με τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του κεντρικού κυλινδρικού σώματος της γενικότερης διάταξης. Επιπλέον θεωρούνται τρία τοπικά κυλινδρικά συστήματα συντεταγμένων (r_q, θ_q, z_q) , $q=1,2,3$ που έχουν τις αρχές τους στον πυθμένα και οι κατακόρυφοι άξονές τους συμπίπτουν με τους κατακόρυφους άξονες συμμετρίας της κάθε συσκευής Μ.Α.Κ.Ε., q . Η ροή του ρευστού γύρω από κάθε $q=1,2,3,4$ σώμα (3 Μ.Α.Κ.Ε. + 1 πυλώνας Α/Γ) μπορεί να περιγραφεί από τη συνάρτηση δυναμικού:

$$\Phi^q(r_q, \theta_q, z; t) = \text{Re}\{\Phi^q(r_q, \theta_q, z)e^{-i\omega t}\} \quad (5.2.1)$$

Σύμφωνα με την εργασία [77] το δυναμικό της ταχύτητας ως συνάρτηση του δυναμικού Φ^q μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους όρους, βάσει της γραμμικής μοντελοποίησης, ως εξής:

$$\Phi^q = \Phi_0^q + \Phi_7^q + \sum_{p=1}^4 \sum_{j=1}^6 x_{j0}^p \Phi_j^{qp} + \sum_{i=1}^3 p_{in0}^i \Phi_p^{qi} \quad (5.2.2)$$

Στην τελευταία σχέση ο δείκτης 0 αντιπροσωπεύει τον αδιατάρακτο επερχόμενο αρμονικό κυματισμό [78] και ο δείκτης 7 αντιστοιχεί στον κυματισμό περίθλασης γύρω από το q -σώμα όταν αυτό είναι σταθερό μέσα στους κυματισμούς και στην περίπτωση των Μ.Α.Κ.Ε., όταν η εσωτερική τους επιφάνεια είναι ανοικτή προς τον ατμοσφαιρικό αέρα. Επομένως η πίεση στην επιφάνεια του εσωτερικού νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Με Φ_j^{qp} συμβολίζεται το δυναμικό ακτινοβολίας γύρω από το σώμα q το οποίο εξαρτάται από την κίνηση/εξαναγκασμένη ταλάντωση κάθε p -σώματος που κινείται με ταχύτητα ανά μονάδα πλάτους \dot{x}_{j0}^p με $\dot{x}_j^p = Re\{\dot{x}_{j0}^p e^{-i\omega t}\}$. Ακόμη, με Φ_p^{qi} συμβολίζεται η εξαρτώμενη από την πίεση συνάρτηση δυναμικού ακτινοβολίας γύρω από το q -σώμα λόγω της ανά μονάδα χρόνου αρμονικής ταλάντωσης του μετώπου της πίεσης $P_{in}^i = Re\{p_{in0}^i e^{-i\omega t}\}$ στο θάλαμο της $i=1,2,3$ συσκευής Μ.Α.Κ.Ε. η οποία θεωρείται σταθερή σε κατά τα άλλα ήρεμο νερό.

Το δυναμικό της ταχύτητας του αδιατάρακτου επερχόμενου κυματισμού που μεταδίδεται με γωνία β ως προς τον θετικό x -άξονα εκφράζεται σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων για κάθε q -σώμα, ως εξής [78]:

$$\Phi_0^q(r_q, \theta_q, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{0,m}^q(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.3)$$

Όπου:

$$\frac{1}{d} \Psi_{0,m}^q(r_q, z) = e^{ikl_{0q} \cos(\theta_{0q} - \beta)} \frac{Z_0(z)}{dZ'_0(d)} J_m(kr_q) e^{-im\beta} \quad (5.2.4)$$

Οι παραπάνω συμβολισμοί ορίζονται στην Εικόνα 5.4. Στις τελευταίες σχέσεις με J_m ορίζεται η συνάρτηση m -τάξης Bessel 1^{ου} είδους και η συνάρτηση $Z_0(z)$ δίνεται από:

$$Z_0(z) = \left[0.5 \left[1 + \frac{\sinh(2kd)}{2kd} \right] \right]^{\frac{1}{2}} \cosh(kz) \quad (5.2.5)$$

Η συχνότητα ω και ο αριθμός κύματος k σχετίζονται μέσω της εξίσωσης διασποράς. Η περίθλαση, δηλαδή η ποσότητα $\Phi^q = \Phi_0^q + \Phi_7^q$, $q=1,2,3,4$ καθώς και τα εξαρτώμενα από την κίνηση δυναμικά ακτινοβολίας γύρω από κάθε q -σώμα μπορούν να εκφραστούν, όταν εξετάζονται μεμονωμένα από το αντίστοιχο τοπικό κυλινδρικό σύστημα αναφοράς, ως εξής:

$$\Phi_D^q(r_q, \theta_q, z) = -i\omega \frac{H}{2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m \Psi_{D,m}^q(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.6)$$

$$\Phi_j^{qq}(r_q, \theta_q, z) = -i\omega \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{j,m}^{qq}(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.7)$$

$$\Phi_p^{qq}(r_q, \theta_q, z) = -\frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{p,m}^{qq}(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.8)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του νερού. Τα δυναμικά Φ_j^l ($l \equiv q, qp; j=D, 1, \dots, 6, P; p, q=1,2,3,4, i=1,2,3$) είναι οι λύσεις της εξίσωσης Laplace σε όλο το πεδίο ροής και ικανοποιούν τις ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$\omega^2 \Phi_j^l - g \frac{\partial \Phi_j^l}{\partial z} = \begin{cases} 0 \text{ για } \begin{cases} r_q \geq a_q; \text{ ή } r_q \geq c \\ l \equiv q, j = D; \text{ ή} \\ l \equiv qp, j = 1, 2, \dots, 6, P \end{cases} \\ 0 \text{ για } \begin{cases} b_{1,q} \leq r_q \leq b_q; \\ l \equiv q, j = D; \text{ ή} \\ l \equiv qp, j = 1, 2, \dots, 6, \end{cases} \\ -\delta_{q,i} \frac{i\omega}{\rho} \text{ για } \begin{cases} b_{1,q} \leq r_q \leq b_q; \\ l \equiv qr, j = P \end{cases} \end{cases} \quad (5.2.9)$$

στην εσωτερική και στην εξωτερική ελεύθερη επιφάνεια του νερού ($z=d$), καθώς και τη συνθήκη μηδενικής κάθετης ταχύτητας στον πυθμένα ($z=0$). Επιπλέον τα δυναμικά θα πρέπει να ικανοποιήσουν τις κινηματικές συνθήκες στη μέση βρεχόμενη επιφάνεια κάθε σώματος $q=1,2,3,4$. Ακόμη απαιτείται και μία συνθήκη ακτινοβολίας η οποία ορίζει ότι οι μεταδιδόμενες διαταραχές στο ρευστό πρέπει να είναι εξερχόμενες από το σύστημα. Οι άγνωστες συναρτήσεις δυναμικού $\Psi_{j,m}^{k,l}$, $k=I, III, M, IV$ (βλ. εξισώσεις 5.2.6-5.2.8) μπορούν να

οριστούν σε κάθε περιοχή του ρευστού που περιβάλλει το q -σώμα (Εικόνες 5.2, 5.3) με χρήση της μεθόδου συνδυασμένων αξονοσυμμετρικών ιδιοσυναρτησιακών επεκτάσεων.

Κατόπιν, τα δυναμικά Φ_j^{qp} , Φ_p^{qi} ($j=1,\dots,6$) γύρω από το σώμα q της συνδυαστικής κατασκευής μπορούν να εκφραστούν, είτε λόγω ταλάντωσης του σώματος $p=1,2,3,4$, δηλαδή σε κατά τα άλλα ήρεμο νερό (όπου εμφανίζεται δυναμικό ακτινοβολίας που εξαρτώμενο από την κίνηση των σωμάτων) είτε λόγω εσωτερικού χρονικά (αρμονικά) μεταβαλλόμενου μετώπου πίεσης στο θάλαμο αέρος της συσκευής $i=1,2,3$, στο κυλινδρικό σύστημα του q -σώματος, ως εξής:

$$\Phi_j^{qp}(r_q, \theta_q, z) = -i\omega \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{j,m}^{qp}(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.10)$$

$$\Phi_p^{qi}(r_q, \theta_q, z) = \frac{1}{i\omega\rho} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_{p,m}^{qi}(r_q, z) e^{im\theta_q} \quad (5.2.11)$$

Για να εκφραστούν τα σχετικά δυναμικά με τις σχέσεις (5.2.10) και (5.2.11) χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση πολλαπλής διασποράς των εργασιών [79] και [80]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω για τη λύση της περίθλασης αλλά και των εξαρτώμενων από την κίνηση των σωμάτων προβλημάτων ακτινοβολίας γύρω από αυθαίρετες γεωμετρίες πλωτών ή/και βυθισμένων κατακόρυφων αξονοσυμμετρικών σωμάτων στις εργασίες [78] και [81] αλλά και στα προβλήματα περίθλασής και εξαρτώμενης από την πίεση στον εσωτερικό θάλαμο ακτινοβολίας για διάταξη Μ.Α.Κ.Ε. στην εργασία [72].

5.2.2 Παροχή αέρα

Η χρονικά εξαρτώμενη παροχή αέρα που δημιουργείται από την ταλαντευόμενη επιφάνεια του εσωτερικού νερού σε κάθε q -Μ.Α.Κ.Ε., $q=1,2,3$, συμβολίζεται ως $Q^q(r_q, \theta_q, z, t) = \text{Re}[q^q(r_q, \theta_q, z)e^{-i\omega t}]$ όπου:

$$q^q = \iint_{S_i^q} u_z dS_i^q = \iint_{S_i^q} \frac{\partial \Phi^q}{\partial z} r_q dr_q d\theta_q \quad (5.2.12)$$

Στην άνω σχέση η u_z είναι η κατακόρυφη ταχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας νερού και S^q η εσωτερική επιφάνεια νερού στον q -Μ.Α.Κ.Ε. Υποθέτοντας ότι ο αεροστρόβιλος-Wells είναι τοποθετημένος μεταξύ του θαλάμου του q -Μ.Α.Κ.Ε. και της εξωτερικής ατμόσφαιρας καθώς και ότι χαρακτηρίζεται από μία χαρακτηριστική σταθερά Λ^q , τότε η συνολική παροχή αέρα προς τον αεροστρόβιλο είναι ίση με (βλ. [77], [82]):

$$Q^q(t) = \Lambda^q P_{in}^q(t) \quad (5.2.13)$$

Αν αναλυθεί η συνολική παροχή αέρα, q^q του q -Μ.Α.Κ.Ε., όμοια με το δυναμικό ταχύτητας κύματος (5.2.2) σε τρεις όρους που σχετίζονται με την περίθλαση, q_D^q και τα προβλήματα κίνησης και πίεσης ακτινοβολίας, q_R^{qp} , q_P^q , αντίστοιχα, προκύπτει:

$$q^q = q_D^q + q_R^{qp} + \sum_{i=1}^3 p_{in0}^i q_P^{qi} \quad (5.2.14)$$

Όπου:

$$q_R^{qp} = \sum_{P=1}^4 \sum_{J=1}^6 \dot{x}_{j0}^p q_{3,j}^p - \dot{x}_{30}^p S_i^p \quad (5.2.15)$$

Ενώ S^p είναι πλέον η επιφάνεια του εσωτερικού νερού στην p -συσσκευή Μ.Α.Κ.Ε., $p=1,2,3$. Η χαρακτηριστική σταθερά αεροστρόβιλου Λ^q στους Μ.Α.Κ.Ε. θεωρήθηκε ως πραγματικός και θετικός αριθμός, ίσος με τον βέλτιστο συντελεστή Λ_{opt} , για την ίδια συσκευή Μ.Α.Κ.Ε., όμως σε κατάσταση απομόνωσης όπως στην [82].

5.2.3 Υδροδυναμικές δυνάμεις

Οι διάφορες δυνάμεις σε κάθε Μ.Α.Κ.Ε. μπορούν να υπολογιστούν από την κατανομή της πίεσης όπως υπολογίζεται από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli:

$$P(r_q, \theta_q, z; t) = -\rho \frac{\partial \Phi^q}{\partial t} = i\omega \rho \Phi^q e^{-i\omega t} \quad (5.2.16)$$

Όπου Φ^q είναι το δυναμικό της ταχύτητας σε κάθε χώρο που καταλαμβάνει το ρευστό από τους I, III, M και IV (Εικόνες 5.2 και 5.3). Οι οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις διέγερσης και ροπές που ασκούνται σε ένα σώμα/κύλινδρο p ($p=1,2,\dots,N$) μπορούν να υπολογιστούν με ολοκλήρωση της πίεσης στη μέση βρεχόμενη επιφάνεια S_p από τις εξής εξισώσεις, σύμφωνα με την εργασία [78]:

$$F = \int_{S_p} p n dS \quad (5.2.17)$$

και

$$M = \int_{S_p} p(\rho \times n) dS \quad (5.2.18)$$

όπου το n υποδηλώνει ένα διάνυσμα θέσης που εκτείνεται από το σημείο αναφοράς των δυνάμεων και ροπών σε ένα τοπικό σημείο στο S_p . Όμως από την γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli και έχοντας ορίσει το δυναμικό της ταχύτητας σε όλες τις περιοχές του ρευστού γύρω από κάθε σώμα της πολυσύνθετης διαμόρφωσης, η υδροδυναμική πίεση λαμβάνεται ίση με:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega \rho \Phi e^{-i\omega t} \quad (5.2.19)$$

επομένως η 5.2.17 γίνεται:

$$F = \int_{S,p} i\omega \rho \Phi_p e^{-i\omega t} n dS \quad (5.2.20)$$

Ολοκλήρωση των ανωτέρω (5.2.18-5.2.20) οδηγεί σε αναλυτικές εκφράσεις για τις διεγείρουσες φορτίσεις των κυματισμών που δρουν σε κάθε «βαθμίδα» της κατασκευής. Έτσι η συνολική υδροδυναμική φόρτιση της σύνθετης κατασκευής μας λαμβάνεται από την εξής σχέση [78]:

$$F_{i,total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [B^{(i)}] [F_i^{(i)}] \quad (5.2.21)$$

όπου για N σώματα ($N=1,2,3,4$ στην προκειμένη περίπτωση) έχουμε τις δυνάμεις διέγερσης F_i (5.2.20) του εκάστοτε σώματος και B_i τις συντεταγμένες του (μητρώο 6×6) ως προς το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων της κατασκευής.

$$[B^i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z^i & y^i & 1 & 0 & 0 \\ z^i & 0 & -x^i & 0 & 1 & 0 \\ -y^i & x^i & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2.22)$$

Η μιγαδική μορφή f_{ij}^{qp} των υδροδυναμικών δυνάμεων και ροπών αντίδρασης F_{ij}^{qp} που ασκούνται σε καθένα από τα q -σώματα Μ.Α.Κ.Ε. και Α/Γ, $q=1,2,3,4$ στην

κατεύθυνση i λόγω ταλάντωσης του σώματος p , $p=1,2,3,4$ στην κατεύθυνση j , μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$f_{ij}^{qp} = \omega^2 \left(a_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} b_{ij}^{qp} \right) x_{j0}^p = \omega^2 \pi_{ij}^{qp} x_{j0}^p \quad (5.2.23)$$

Οι ποσότητες a_{ij}^{qp} και b_{ij}^{qp} είναι οι γνωστοί συντελεστές πρόσθετης μάζας και απόσβεσης αντίστοιχα, πραγματικοί και εξαρτώμενοι από την συχνότητα ω .

Για την εκτίμηση των υδροδυναμικών παραμέτρων ολόκληρης της κατασκευής, θεωρούμε σαν ενιαίο σώμα, πρέπει οι αντίστοιχες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε ανεξάρτητα κινούμενο σώμα της (5.2.23) να γραφούν κατάλληλα υπερτιθέμενες ως προς το σημείο αναφοράς της κίνησης, G , ολόκληρου του συστήματος. Για αυτόν τον σκοπό θα συμβολίσουμε με $x=(x_1, x_2, x_3)$ και $\theta=(x_4, x_5, x_6)$ τα διανύσματα γραμμικής μετάθεσης και περιστροφής του G . Η μετατόπιση και περιστροφή, x^p και θ^p , αντίστοιχα, του σημείου αναφοράς G_p του σώματος p , μπορούν να εκφραστούν ως προς το G ως εξής:

$$x^p = x + \theta \times r^p \quad (5.2.24)$$

$$\theta^p = \theta$$

Εδώ το r^p υποδηλώνει το διάνυσμα θέσης του G_p εν σχέσει με το G . Αντικαθιστώντας τα στοιχεία της (5.2.24) για x_{j0}^p , ($j=1,2,\dots, 5$), στην (5.2.23) και προσθέτοντας τις ιδιοσυναρτήσεις των μετακινήσεων των p σωμάτων που προκαλούν δυνάμεις στο q σώμα κατά τη διεύθυνση i , η συνολική δύναμη f_i^{qp} που ασκείται στο σώμα q κατά τη διεύθυνση i λόγω της κίνησης του σώματος p μπορεί να εκφραστεί με όρους των συνιστωσών κίνησης της όλης κατασκευής x_{j0} ($j=1,2,\dots,6$) ως εξής [81]:

$$f_i^{qp} = \sum_{j=1}^6 f_{ij}^{qp} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 \left(\mu_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} \lambda_{ij}^{qp} \right) x_{j0} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 M_{ij}^{qp} x_{j0} \quad (5.2.25)$$

Όπου M_{ij}^{qp} είναι στοιχεία του 6×6 μητρώου $[M^{qp}]$ που ορίζεται ως:

$$[M^{qp}] = [\pi^{qp}][B^p]^T \quad (5.2.26)$$

Με $[\pi^{qp}]$ να είναι ένας τετραγωνικός πίνακας του οποίου τα στοιχεία δόθηκαν στην (5.2.23) και $[B^p]^T$ ο ανάστροφος μετασχηματισμένος πίνακας $[B^p]$ (5.2.22) για $p=i$.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις αντίδρασης που εκφράστηκαν ως τώρα (5.2.24) είναι εκφρασμένες σε σχέση με το σημείο αναφοράς της κίνησης του q σώματος, G_p . Για να υπολογίσουμε όμως την συνεισφορά της f_i^{qp} στην συνολική δύναμη αντίδρασης ολόκληρης της κατασκευής, πρέπει η f_i^{qp} να γραφθεί ως προς το σημείο αναφοράς G του συσσωματώματος. Συμβολίζοντας με F_i^{qp} τις αντίστοιχες δυνάμεις ($i=1,2,3$) και ροπές ($i=4,5,6$) λαμβάνουμε από την κλασική μηχανική τα εξής:

$$F_i^{qp} = f_i^{qp} \gamma_i \alpha \quad (i = 1,2,3) \quad (5.2.27)$$

και

$$F_i^{qp} = f_i^{qp} + (r^q \times f^{qp})_i \gamma_i \alpha (i = 4,5,6) \quad (5.2.28)$$

όπου $r^q = (x^q, y^q, z^q)$ είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου αναφοράς του σώματος q , G_p , ως προς το σημείο αναφοράς G της συνολικής κατασκευής και $f^{qp} = (f_1^{qp}, f_2^{qp}, f_3^{qp})$. Αντικαθιστούμε την (5.2.24) για f_i^{qp} στην (5.2.28) και χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό:

$$\Pi_{ij}^{qp} = A_{ij}^{qp} + \frac{i}{\omega} B_{ij}^{qp} \quad (5.2.29)$$

για τις υδροδυναμικές παραμέτρους ως προς το σημείο G , όπου A_{ij}^{qp} και B_{ij}^{qp} είναι οι πρόσθετες μάζες και το δυναμικό απόσβεσης του σώματος q στην διεύθυνση i λόγω της κίνησης του σώματος στην j διεύθυνση, λαμβάνουμε τα εξής:

$$F_i^{qp} = \omega^2 \sum_{j=1}^6 \Pi_{ij}^{qp} x_{j0} \quad (5.2.30)$$

Τα στοιχεία Π_{ij}^{qp} του 6×6 τετραγωνικού πίνακα $[\Pi^{qp}]$ δίνονται ως εξής:

$$[\Pi^{qp}] = [M^{qp}][B^q] \approx [B^q][\pi^{qp}][B^p]^T \quad (5.2.31)$$

όπου το μητρώο $[B^i]$, ($i=p,q$) δίνεται από τον πίνακα στη σχέση (5.2.22). Χρησιμοποιώντας τη (5.2.31), οι υδροδυναμικές μάζες και το δυναμικό απόσβεσης ολόκληρης της κατασκευής λαμβάνονται από την άθροιση όλων των τιμών των p και q ($p,q=1,2,\dots,N$, όπου εδώ είναι $N=4$).

Έτσι έχουμε:

$$\Pi_{ij} = \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^N \Pi_{ij}^{qp} \quad (5.2.32)$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές $f_{p,i}^{ql}$ λόγω πίεσης που ασκούνται σε οποιοδήποτε σώμα q , $q=1,2,3,4$ στην κατεύθυνση i λόγω ταλάντωσης του μετώπου πίεσης εσωτερικά στον Μ.Α.Κ.Ε. l , $l=1,2,3$, γράφονται στην ακόλουθη μορφή:

$$f_{p,i}^{ql} = (-e_i^{ql} + i d_i^{ql}) p_{in0}^l \quad (5.2.33)$$

Όπου με e_i^{ql} και d_i^{ql} συμβολίζονται οι συντελεστές απόσβεσης πίεσης. Οι συνολικές υδροδυναμικές δυνάμεις μπορούν να υπολογιστούν για την όλη διάταξη με κατάλληλη υπέρθεση των αντίστοιχων δυνάμεων σε κάθε σώμα ως προς το σημείο αναφοράς κίνησης

της ενιαίας κατασκευής, G , με βάση την εργασία [81]. Έτσι η συνολική δύναμη $f_{p,i}^{ql}$ λόγω πίεσης λαμβάνεται από την εξής σχέση:

$$F_{p,total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} [B^{(i)}] [F_p^{(i)}] \quad (5.2.34)$$

όπου B_i οι συντεταγμένες του εκάστοτε σώματος p (μητρώο 6×6) ως προς το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων της κατασκευής G , όπως στη (5.2.22).

5.2.4 Συστήματα αγκύρωσης

Η πλωτή κατασκευή αγκυρώνεται στο έδαφος με τρεις τένοντες-TLP οι οποίοι επεκτείνονται συμμετρικά γύρω από την πλατφόρμα ως προς τον άξονα Z . Οι θέσεις όπου οι τένοντες συνδέονται στην πλατφόρμα βρίσκονται στη βάση τριών μετατοπισμένων στηλών, σε βάθος 20m από την επιφάνεια του ήρεμου νερού. Οι άγκυρες βυθίζονται στο έδαφος σε βάθος νερού 120m/200m. Κάθε τένοντα έχει απαραμόρφωτο μήκος 100m (για βάθος 120m) και 180m (για βάθος 200m), διάμετρο 0.13m, ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα μήκους 104kg/m, και βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους 888.6N/m. Η προένταση κάθε τένοντα είναι 10800kN. Η ακαμψία της κάθε γραμμής αγκύρωσης είναι $k_{xx}=108\text{kN/m}$ και $k_{zz}=26533\text{kN/m}$ για το μικρότερο βάθος νερού. Για το μεγαλύτερο βάθος, οι αντίστοιχες τιμές είναι $k_{xx}=60\text{kN/m}$ και $k_{zz}=14700\text{kN/m}$. Συγκεντρωτικά τα ανωτέρω είναι στον ακόλουθο πίνακα:

Αριθμός γραμμών αγκύρωσης	3	3
Βάθος αγκύρωσης	120m	200m
Βάθος πρόσδεσης των γραμμών αγκύρωσης στην κατασκευή	20m	20m
Μήκος τενόντων	100m	180m
Διάμετρος γραμμών αγκύρωσης	130mm	130mm
Ισοδύναμη μάζα ανά μονάδα μήκους	104 kg/m	104 kg/m
Ισοδύναμο βυθισμένο βάρος ανά μονάδα μήκους	888.6 N/m	888.6 N/m
Ακαμψία k_{xx} της κάθε γραμμής αγκύρωσης	108 kN/m	60 kN/m
Ακαμψία k_{zz} της κάθε γραμμής αγκύρωσης	26533 kN/m	14700 kN/m
Προένταση κάθε γραμμής αγκύρωσης	10800 kN	10800 kN

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά συστήματος αγκύρωσης [76].

5.2.5 Αεροδυναμικό μοντέλο

Με ανάλυση στο πεδίο συχνότητας μπορεί να προβληθεί η συνεισφορά της Α/Γ στην κίνηση 6 βαθμών ελευθερίας του πλωτού σώματος. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση δυναμικού μοντέλου τύπου-Hamilton θεωρώντας το βάρος και το αεροδυναμικό φορτίο ως τους παράγοντες εξωτερικών δυνάμεων. Η θεωρία Blade Element Momentum (BEM) προσδιορίζει την αεροδυναμική φόρτιση ως συνάρτηση των συνθηκών λειτουργίας και των κινήσεων του πλωτήρα που μεταβάλλουν τις ενεργές γωνίες προσβολής των «λεπίδων» από τον άνεμο. Με γραμμικοποίηση όλων των όρων ως προς τη στατική θέση του πλωτήρα (μηδενικές κινήσεις), μπορούν να προσδιοριστούν τα μητρώα πρόσθετης μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας που συνεισφέρουν στην Α/Γ ως αδρανειακές, αεροδυναμικές και βαρυτικές φορτίσεις, όπως περιγράφεται στην εργασία [83].

5.3 Πλάτη Απόκρισης στο Πεδίο Συχνότητων (Response Amplitude Operators-RAOs)

Η διερεύνηση της δυναμικής ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στο αγκυρωμένο πολλαπλό κατασκευαστικό σύστημα (Μ.Α.Κ.Ε.-Α/Γ) οδηγεί στο ακόλουθο, ευρέως γνωστό σύστημα διαφορικών εξισώσεων κίνησης που περιγράφουν το συνδυασμένο υδρο-αεροελαστικό πρόβλημα της διερευνώμενης κατασκευής στο πεδίο των συχνοτήτων [76], [84]:

$$\sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 \left(M_{i,j} + A_{i,j} + M^{WT} + \frac{i}{\omega} B_{i,j} + \frac{i}{\omega} B_{i,j}^{WT} \right) + K_{i,j} + K_{i,j}^{WT} + C_{mooring} \right] x_{j0} = F_i + F_{p,i} \quad (5.3.1)$$

Για $i=1,\dots,6$, όπου $M_{i,j}$, $K_{i,j}$ τα στοιχεία των μητρώων (6X6) μάζας και ακαμψίας της συνολικής εγκατάστασης, $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ (5.2.29-5.2.30) οι υδροδυναμικές μάζες και η απόσβεση δυναμικού επίσης της συνολικής εγκατάστασης, F_i οι δυνάμεις διέγερσης που ασκούνται κατά την i -κατεύθυνση (5.2.21), $F_{p,i}$ είναι η δύναμη που ασκείται στη συνολική εγκατάσταση λόγω ύπαρξης πίεσης αέρα εντός των συσκευών στην i διεύθυνση (5.2.34), x_{j0} η μετατόπιση του συνολικού συστήματος Μ.Α.Κ.Ε. στην j -κατεύθυνση ως προς το γενικό σύστημα αναφοράς G , M^{WT} , B^{WT} και K^{WT} η μάζα, η απόσβεση και η ακαμψία που συνεισφέρουν στην αδρανειακή, αεροδυναμική και βαρυτική φόρτιση της Α/Γ αντίστοιχα, ενώ $K_{mooring}$ η ακαμψία του συστήματος αγκύρωσης.

6 Ανάπτυξη κώδικα επίλυσης-Αποτελέσματα

6.1 Ανάπτυξη κώδικα

Η σχέση που διέπει την κατασκευή μας είναι η:

$$(m + A_{ij}^{ST} + A_{ij}^{WT})\ddot{x} + (B_{ij}^{ST} + B_{ij}^{WT})\dot{x} + (K_{ij}^{ST} + K_{ij}^{WT} + K_{ij}^{MOORING})x = F(\omega)e^{i\omega t} \quad (6.1)$$

Όπου:

m: μάζα

A: το μητρώο πρόσθετης μάζας

B: το μητρώο της απόσβεσης

K: το μητρώο ακαμψίας

Δείκτης ST: αφορά τους M.A.K.E.

Δείκτης WT: αφορά την ανεμογεννήτρια

και δείκτης MOORING: αφορά το σύστημα αγκύρωσης

Από το εργαστήριο “πλωτών κατασκευών και συστημάτων αγκύρωσης” της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών διετέθη το αρχείο υπό τη μορφή της γλώσσας προγραμματισμού Fortran: semisubn16_v08. Το αρχείο αυτό λάμβανε υπόψιν όλους τους όρους της (6.1) εκτός από αυτούς που αφορούν την ανεμογεννήτρια. Δηλαδή υπολόγιζε έως τώρα την δυναμική απόκριση σε κυματισμούς του ημιβυθισμένου συσσωματώματος των τριών ανωστικών σωμάτων. Έτσι για να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα από την ανωτέρω σχέση, εισήχθησαν και τα δεδομένα της Α/Γ στον κώδικα.

6.2 Αποτελέσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής επίλυσης του συστήματος διαφορικών εξισώσεων κίνησης που περιγράφουν το συνδυασμένο υδρο-αεροελαστικό πρόβλημα της διερευνώμενης κατασκευής στο πεδίο των συχνοτήτων [76] που παρουσιάστηκε στο κεφ.5., αναφορικά με τις γενικευμένες κινήσεις της συνδυασμένης κατασκευής (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw) και με έμφαση στην εντατική συμπεριφορά των τενόντων του συγκεκριμένου TLP-συστήματος αγκύρωσης. Η επάρκεια του υπολογιστικού μοντέλου στην εκτίμηση της κινηματικής συμπεριφοράς του συστήματος έχει επιβεβαιωθεί στην εργασία [76].

Μέχρι τώρα ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο φαινόμενο της διαφοροποίησης των πλατών απόκρισης μεταξύ των κινήσεων Roll και Pitch, το οποίο οφείλεται στο ότι δεν συνυπολογίζεται η συνδυασμένη συμπεριφορά σε αυτές τις κινήσεις με την καμπτική ταλάντωση του πύργου της Α/Γ εφόσον η ελαστικότητα του συστήματος δεν λαμβάνεται υπόψη. Με τις επιλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται μία πρώτη εκτίμηση της συνεισφοράς του συστήματος αγκύρωσης-TLP στην ακαμψία/ελαστικότητα του όλου συστήματος.

Αναλυτικότερα, εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις απόκρισης της κατασκευής σε 10 διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (3, 5, 8, 11.4, 12, 15, 18, 21 και 25m/s). Από το εκτεταμένο ανωτέρω εύρος τιμών ταχυτήτων ανέμου παρουσιάζονται/τίθενται υπό σύγκριση στο παρόν οι εξής 3 περιπτώσεις: 5, 11.4 και 25m/s (οι οποίες στα διαγράμματα συμβολίζονται με U5, U11.4 και U25 αντίστοιχα). Οι συγκεκριμένες τιμές θεωρήθηκαν οι αντιπροσωπευτικότερες (αντιστοιχώντας στις περιπτώσεις cut in, maximum και cut out). Ιδιαίτερα η περίπτωση της μέσης ταχύτητας 11.4m/s παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς υπό την επίδρασή της προέκυψαν οι δυσμενέστερες δυνάμεις στο στοιχείο της ανεμογεννήτριας [84].

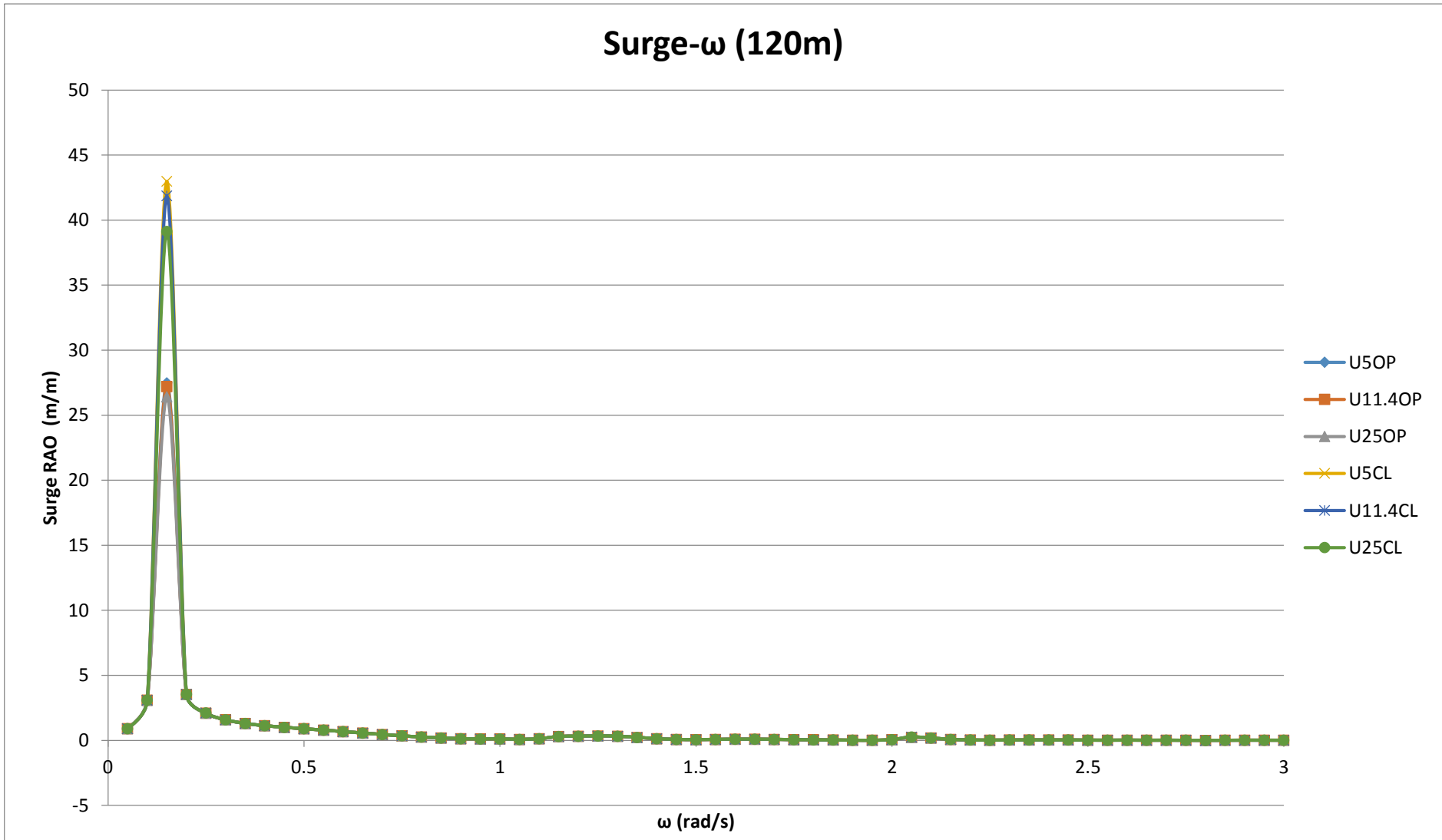
Η κυματική διέγερση ασκείται κατά την x-surge διεύθυνση και αντιστοιχεί σε γωνία πρόσπτωσης 0°. Συνεπώς αναμένεται ότι οι κινήσεις του συστήματος στις υπόλοιπες διευθύνσεις, π.χ. Sway και roll δεν θα είναι ιδιαίτερα έντονες συγκριτικά με την Surge και θα λαμβάνουν τιμές μόνο λόγω συνδυασμένης επίλυσης του συστήματος 6 βαθμών ελευθερίας.

Εξετάστηκαν επιπλέον δυο περιπτώσεις βάθους αγκύρωσης (120, 200m), με διαφορετικές ακαμψίες στους τένοντες (βλ. πίνακα 5.1) και κατά συνέπεια διαφοροποιούν την συχνότητα απόκρισης του συστήματος (RAO). Τέλος πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές επιλύσεις με βάση την λειτουργία των ανωστικών σωμάτων ως wave energy converters ή όχι (Closed και Opened αντίστοιχα με συμβολισμούς στα διαγράμματα CL και OP), παρουσιάζοντας ορισμένα ενδιαφέροντα αποτελέσματα ως προς την επιρροή αυτών στην ευστάθεια και ακαμψία της όλης κατασκευής. Τέλος για την υπό μελέτη περίπτωση λαμβάνουμε πως το ύψος κύματος $H=2m$, οπότε $H/2=1m$.

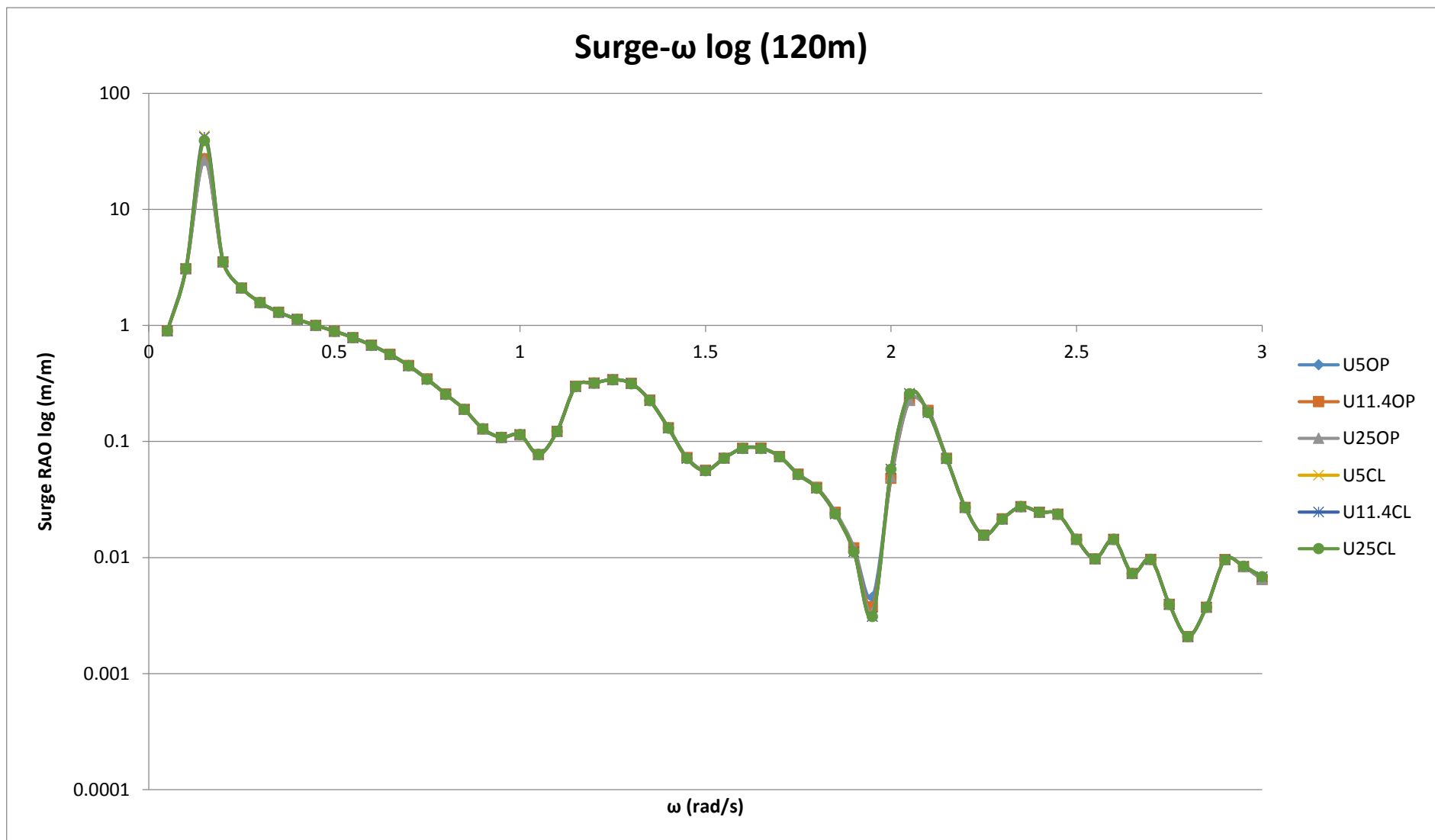
6.2.1 Διαγράμματα μετακινήσεων

Στις ακόλουθες εικόνες 6.1-6.24 περιλαμβάνονται διαγράμματα για τις τρισδιάστατες μετακινήσεις του συστήματος στο πεδίο συχνοτήτων. Στην πρώτη σειρά εικόνων παρουσιάζονται τα αδιαστατοποιημένα πλάτη και τα λογαριθμικά αδιαστατοποιημένα πλάτη των κινήσεων surge (εικόνες 6.1-6.4) για τις διάφορες περιπτώσεις ταχυτήτων

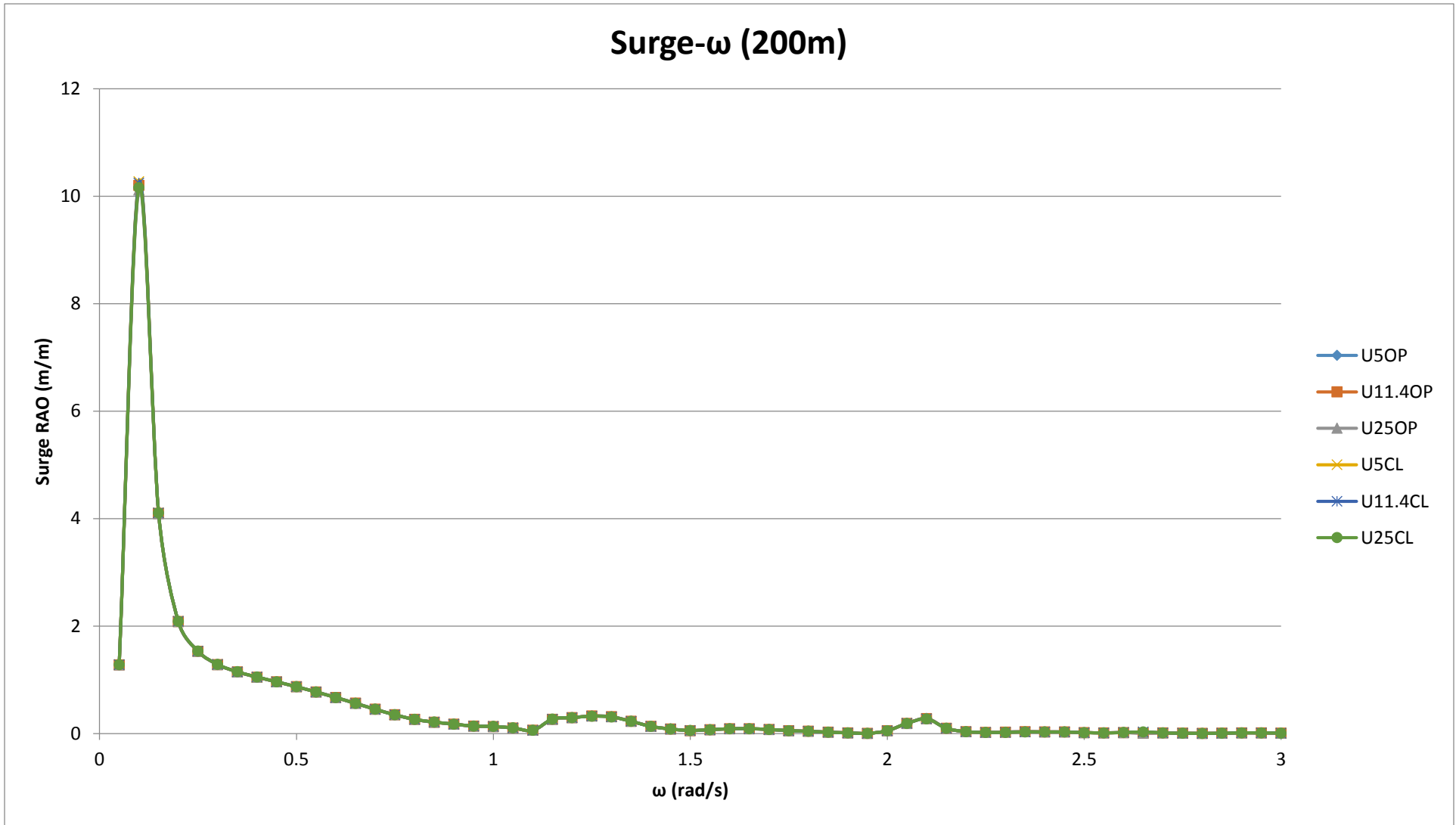
ανέμου, βάθους αγκύρωσης και λειτουργίας ή μη των OWC. Εν συνεχεία στις εικόνες (6.5-6.8), (6.9-12), (6.13-16), (6.17-6.20) και (6.21-6.24), παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αδιαστατοποιημένα πλάτη και τα λογαριθμικά αδιαστατοποιημένα πλάτη των κινήσεων Sway, Heave, Roll, Pitch και Yaw.



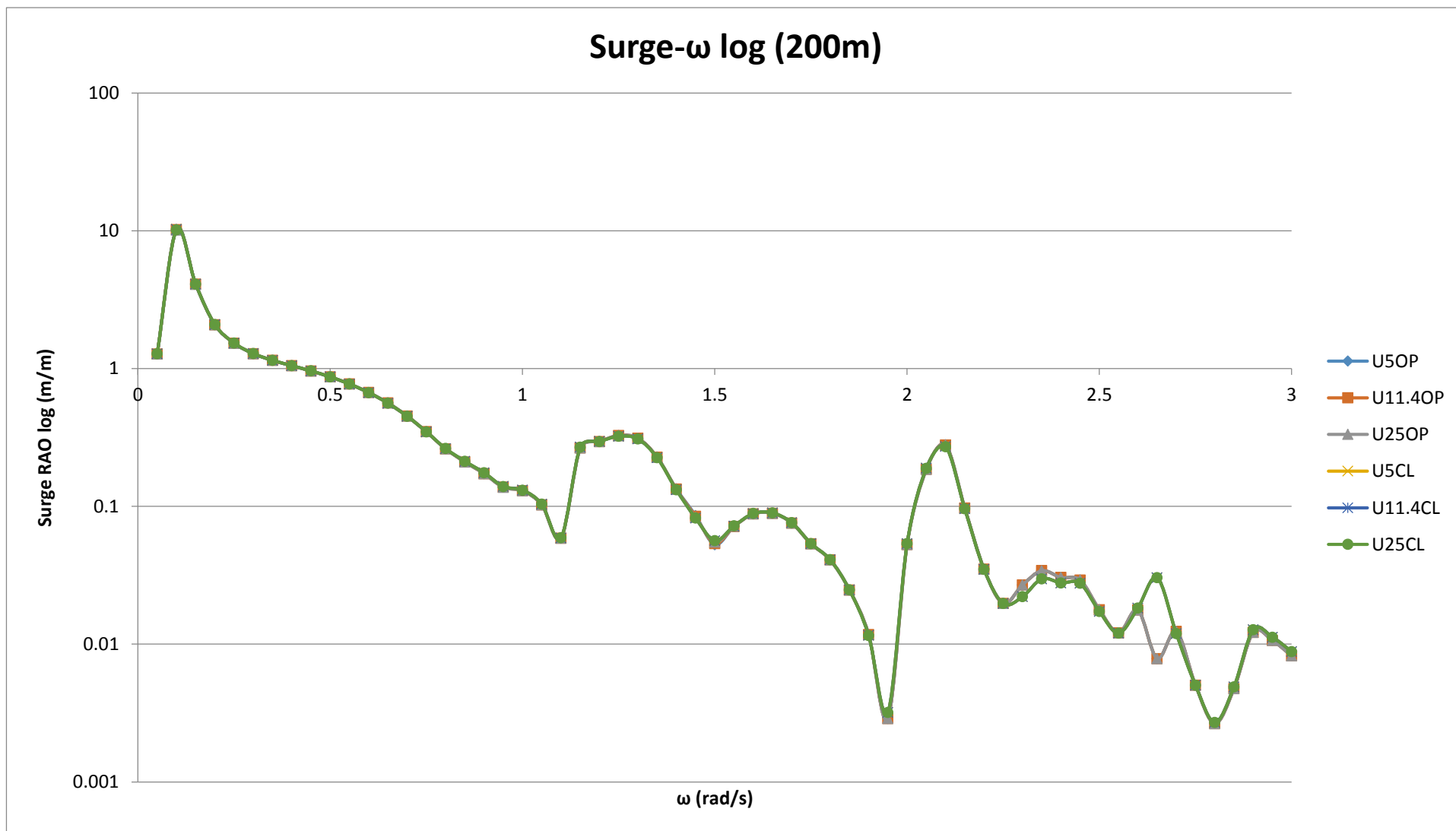
Εικόνα 6.1. RAO της απόκρισης-Surge για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



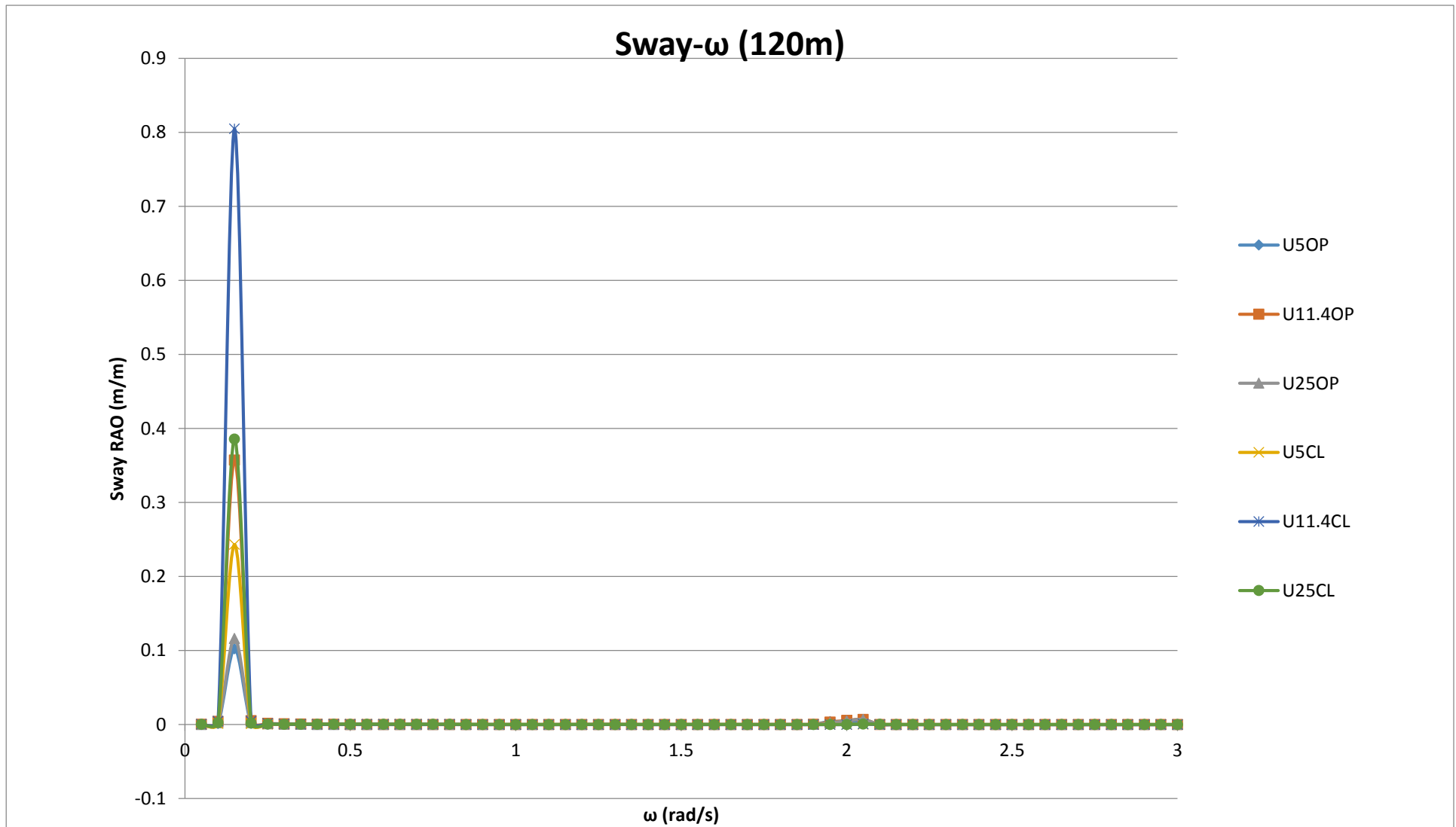
Εικόνα 6.2. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Surge για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



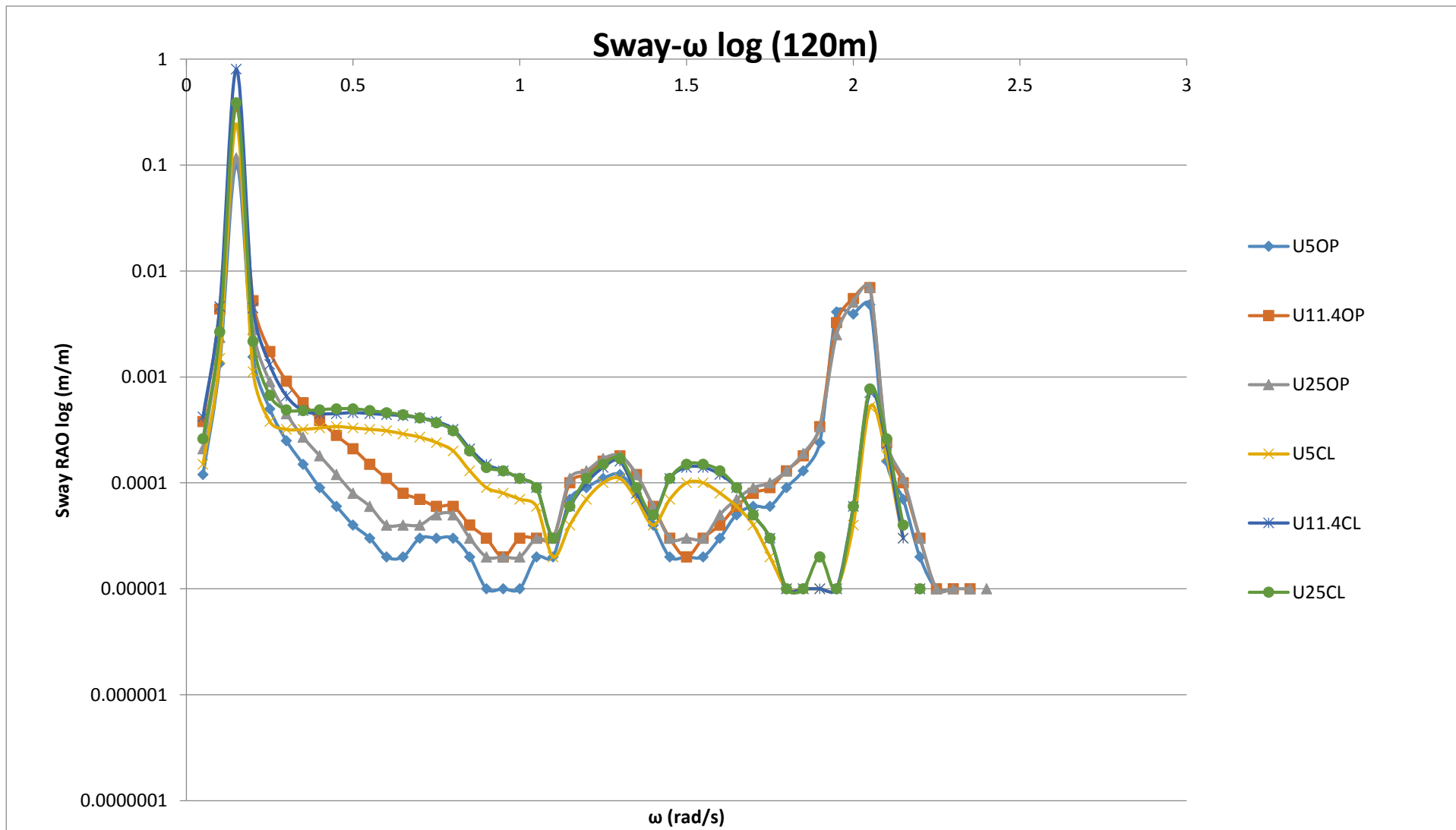
Εικόνα 6.3. RAO της απόκριση -Surge για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



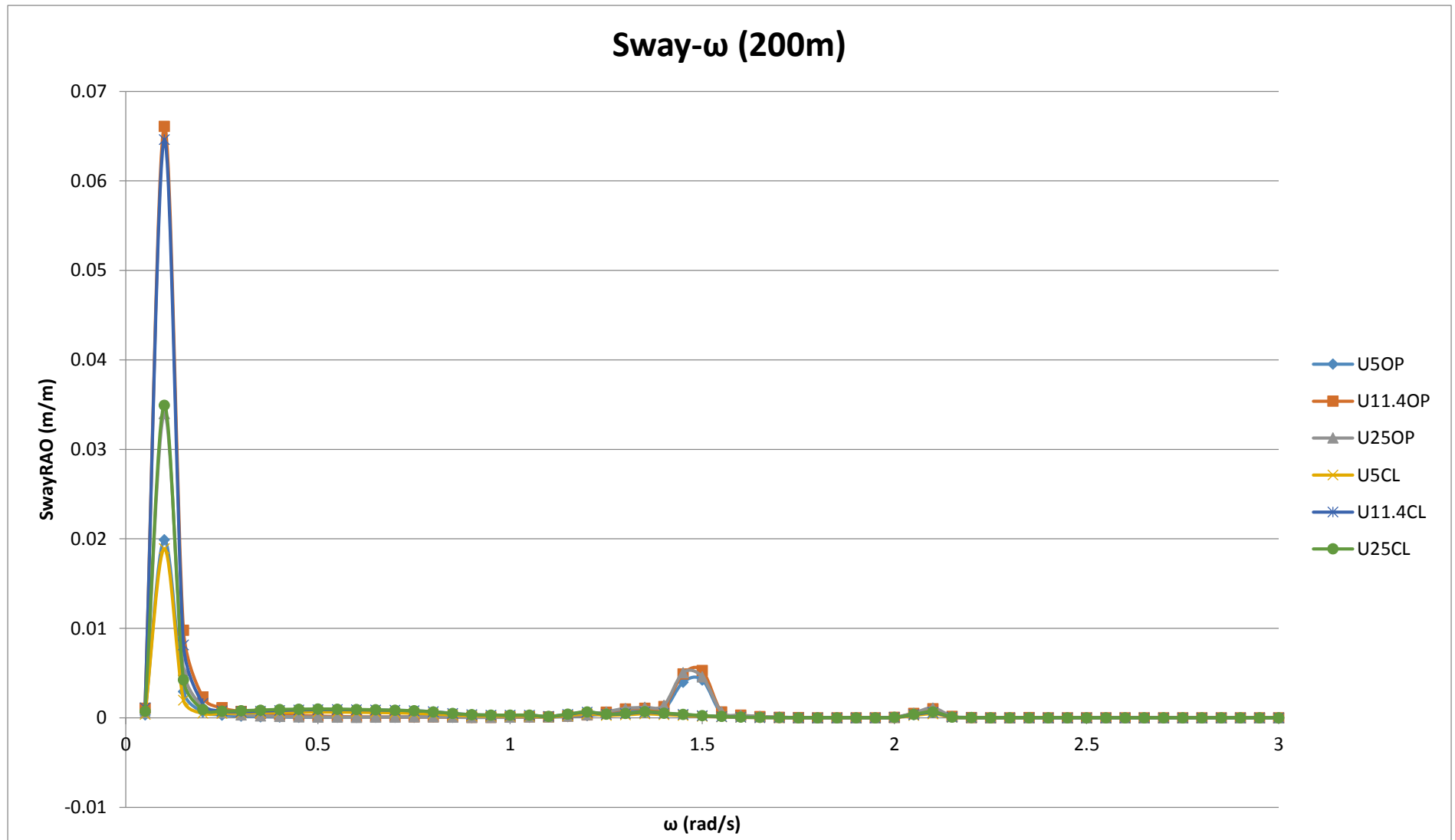
Εικόνα 6.4. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Surge για βάθος ακύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



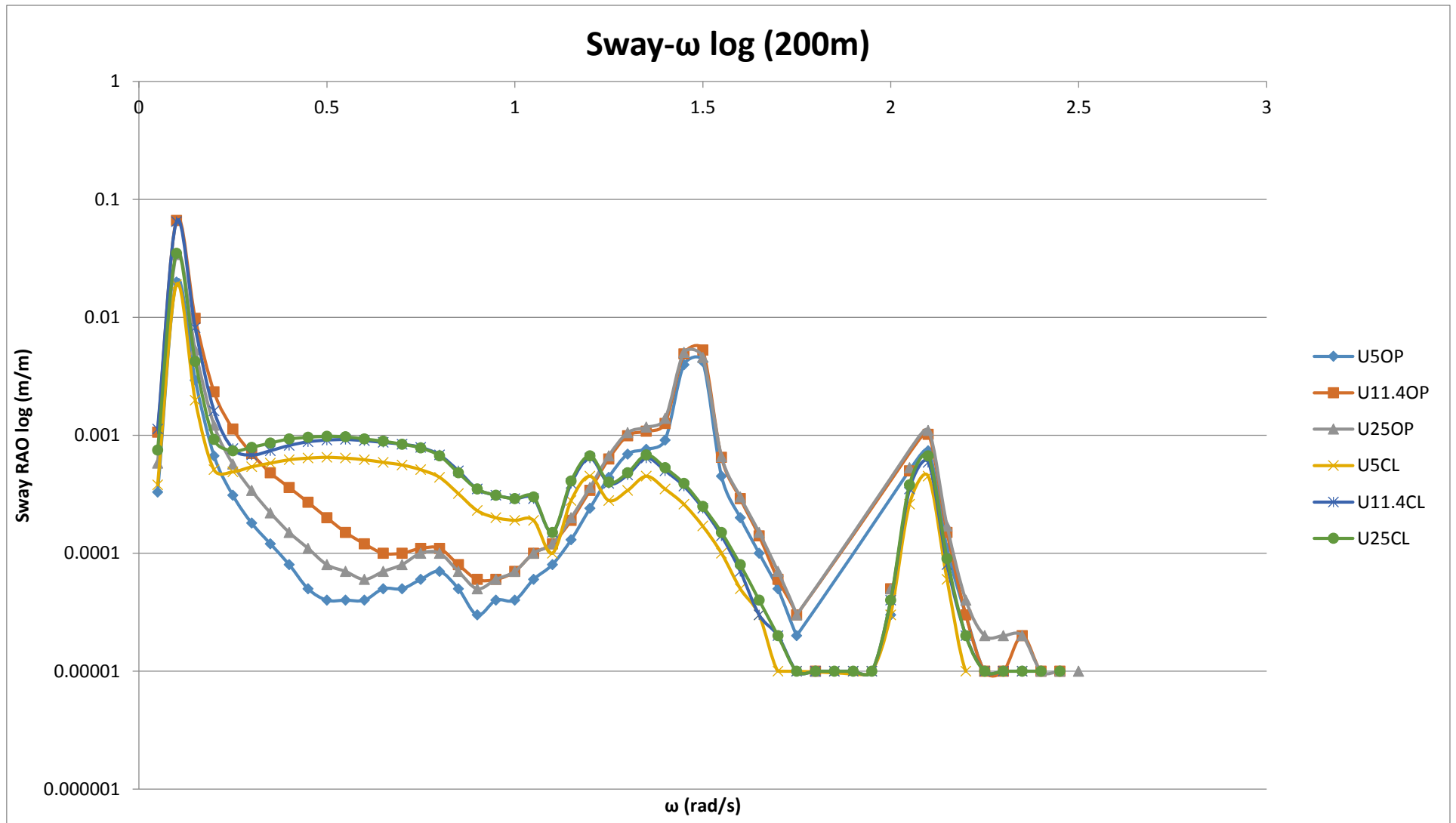
Εικόνα 6.5. RAO της απόκρισης-Sway για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



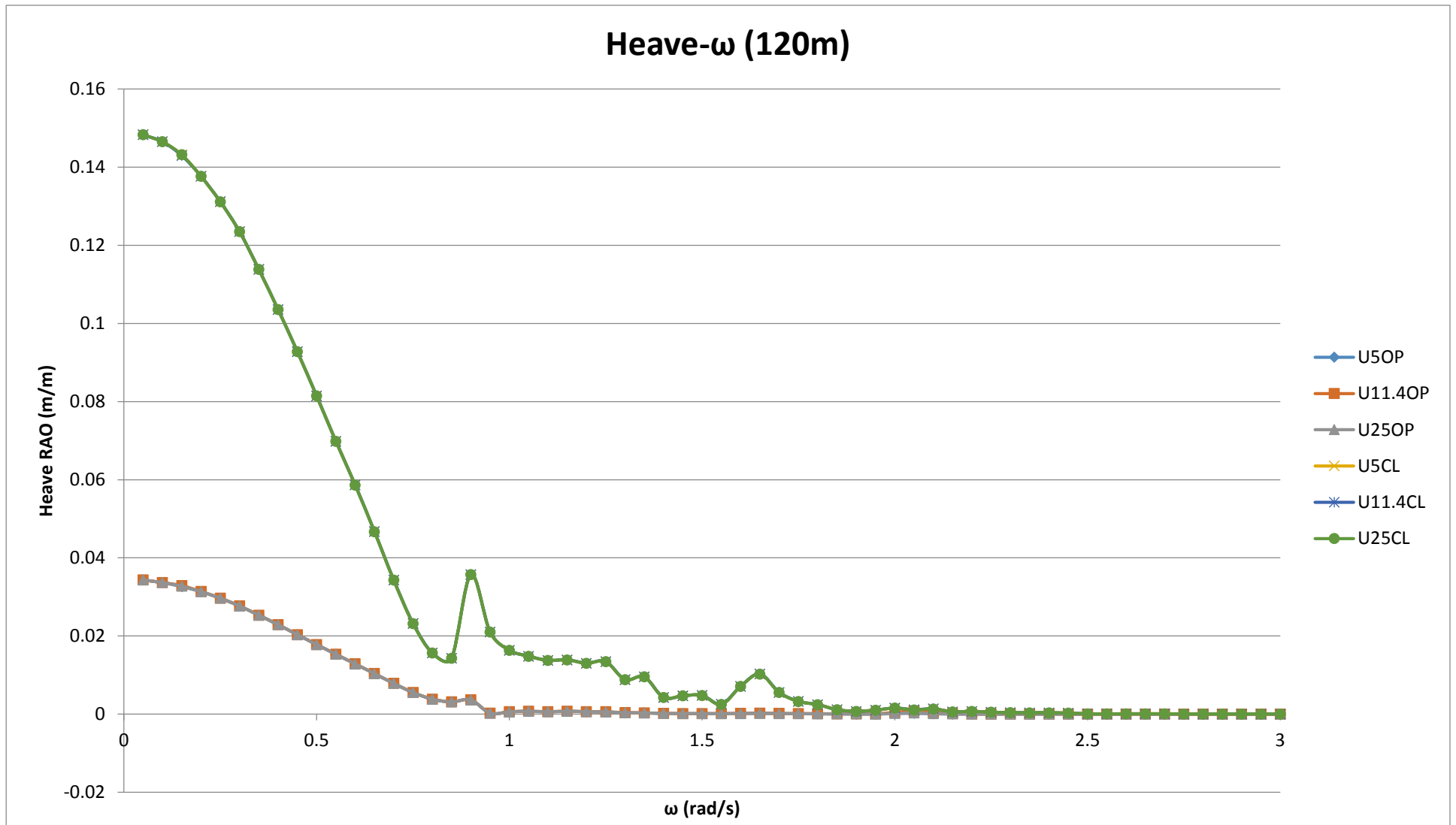
Εικόνα 6.6. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Sway για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



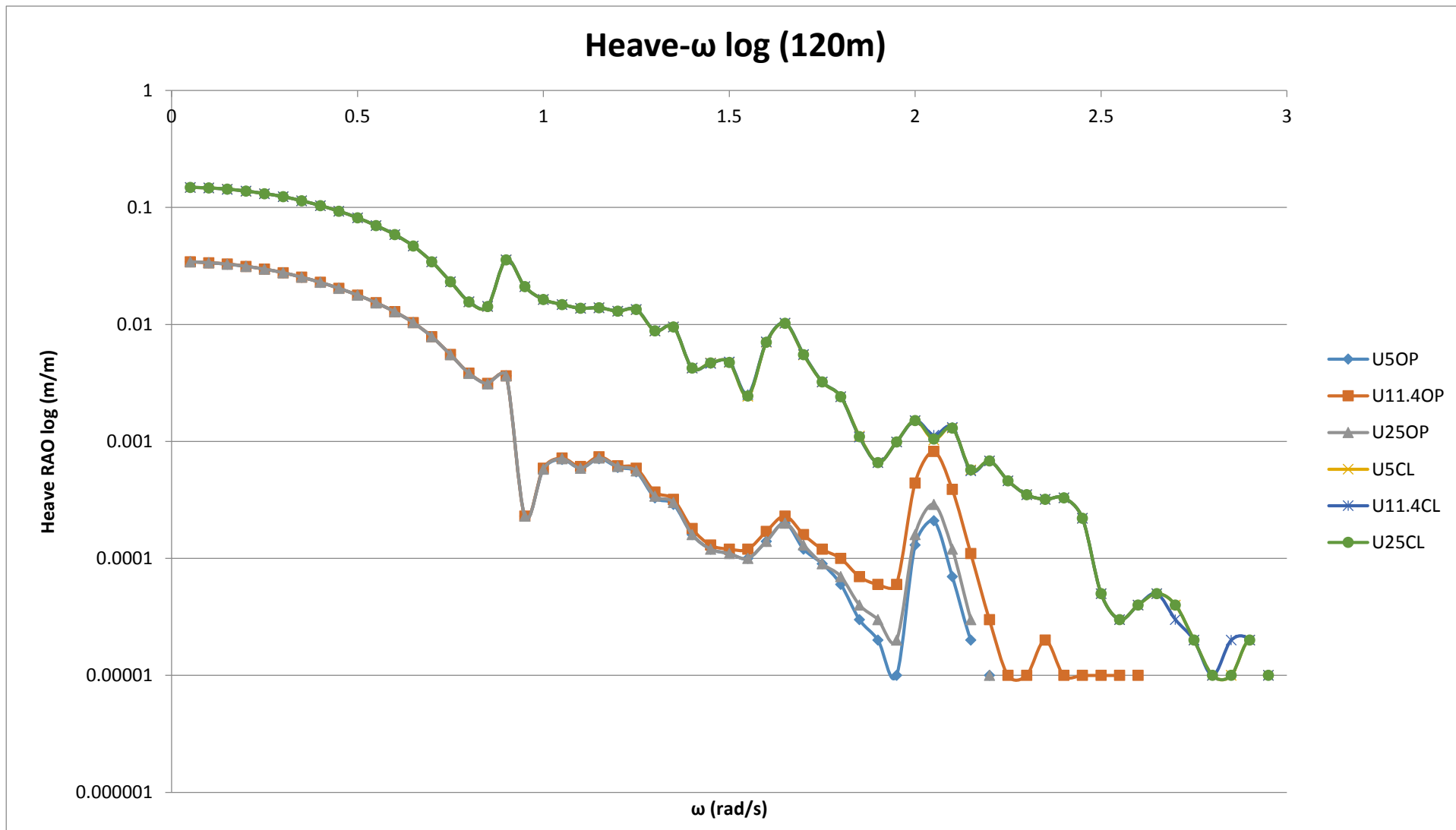
Εικόνα 6.7. RAO της απόκρισης-Sway για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



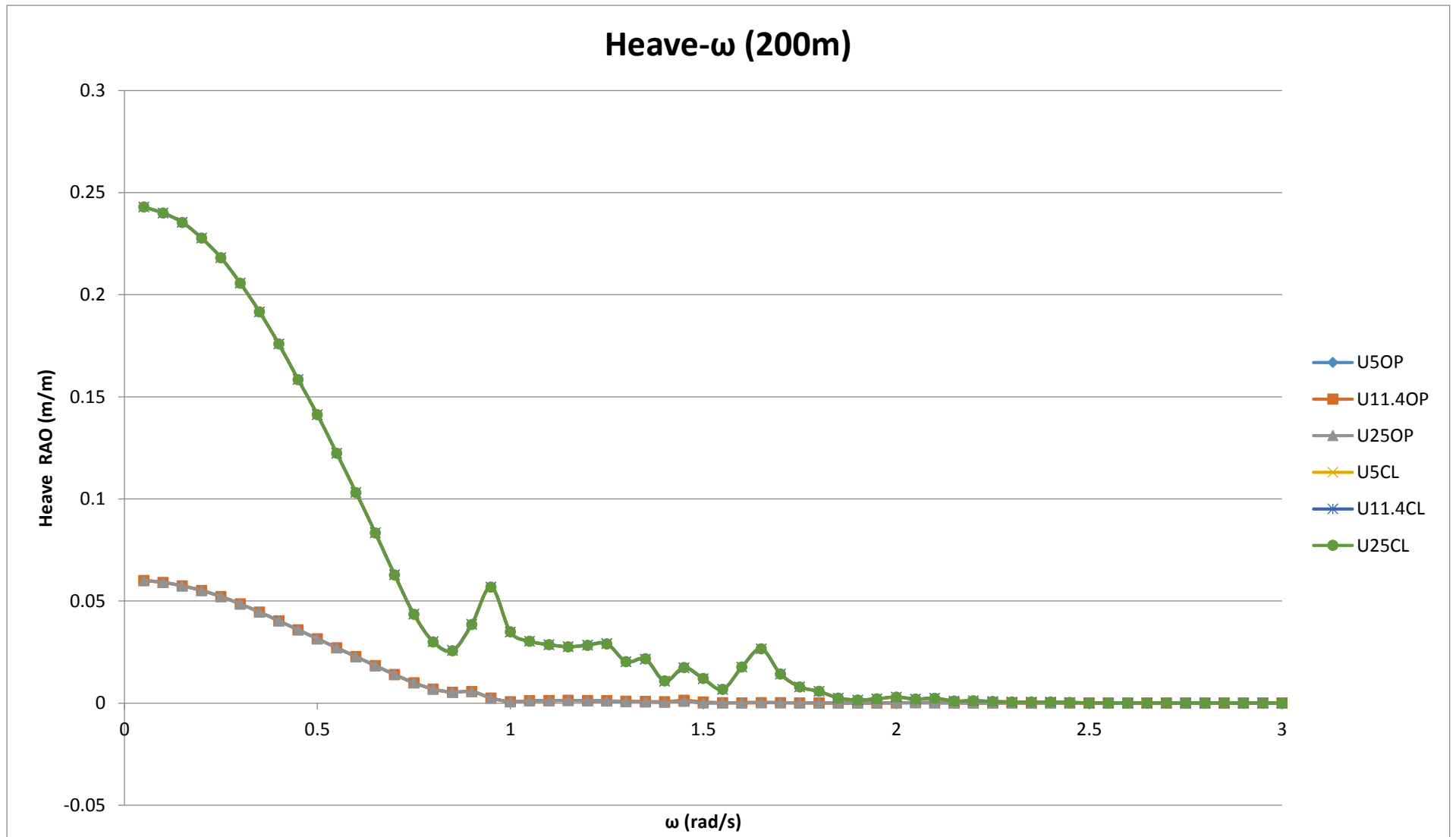
Εικόνα 6.8. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Sway για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



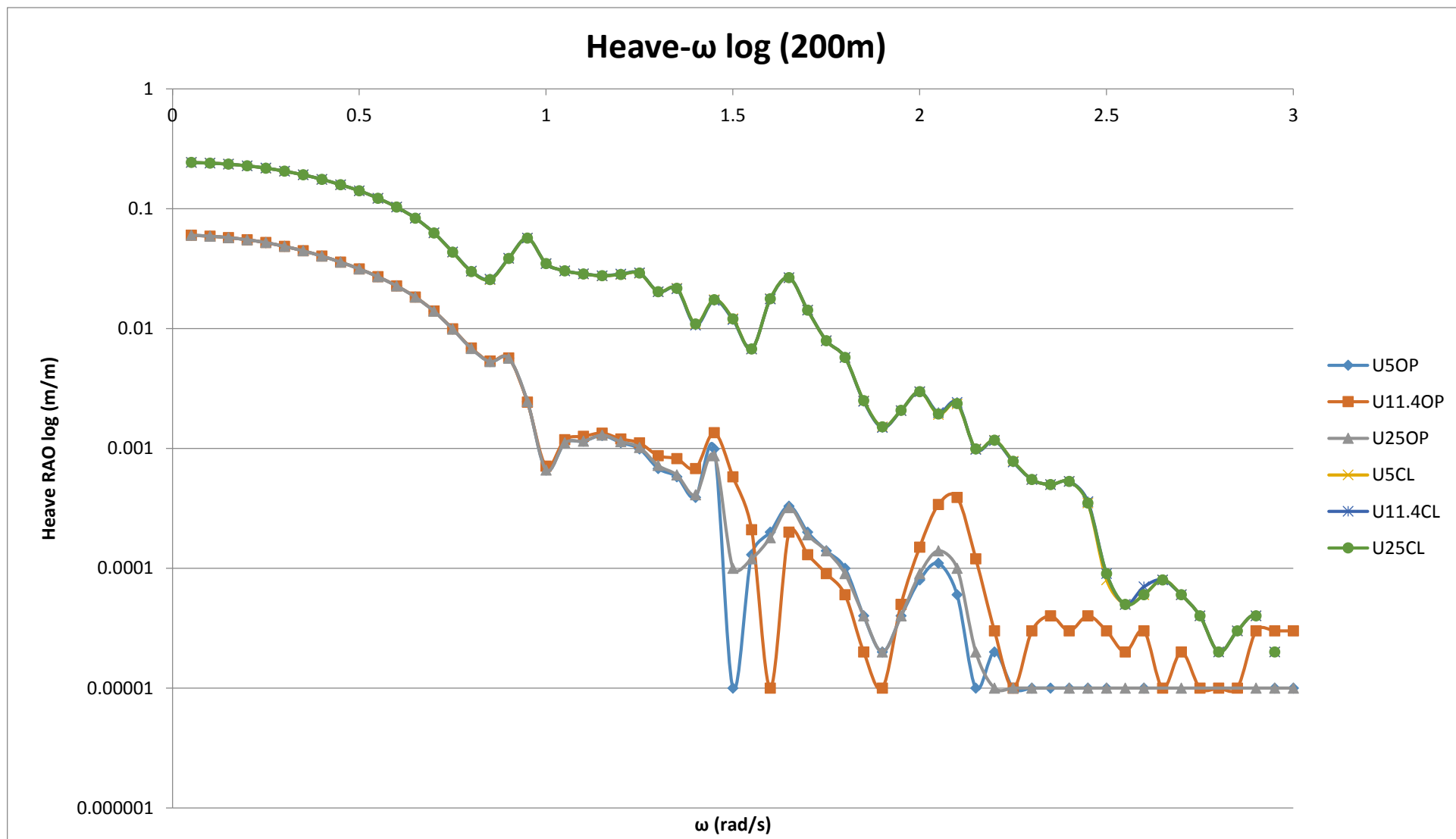
Εικόνα 6.9. RAO της απόκρισης-Heave για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



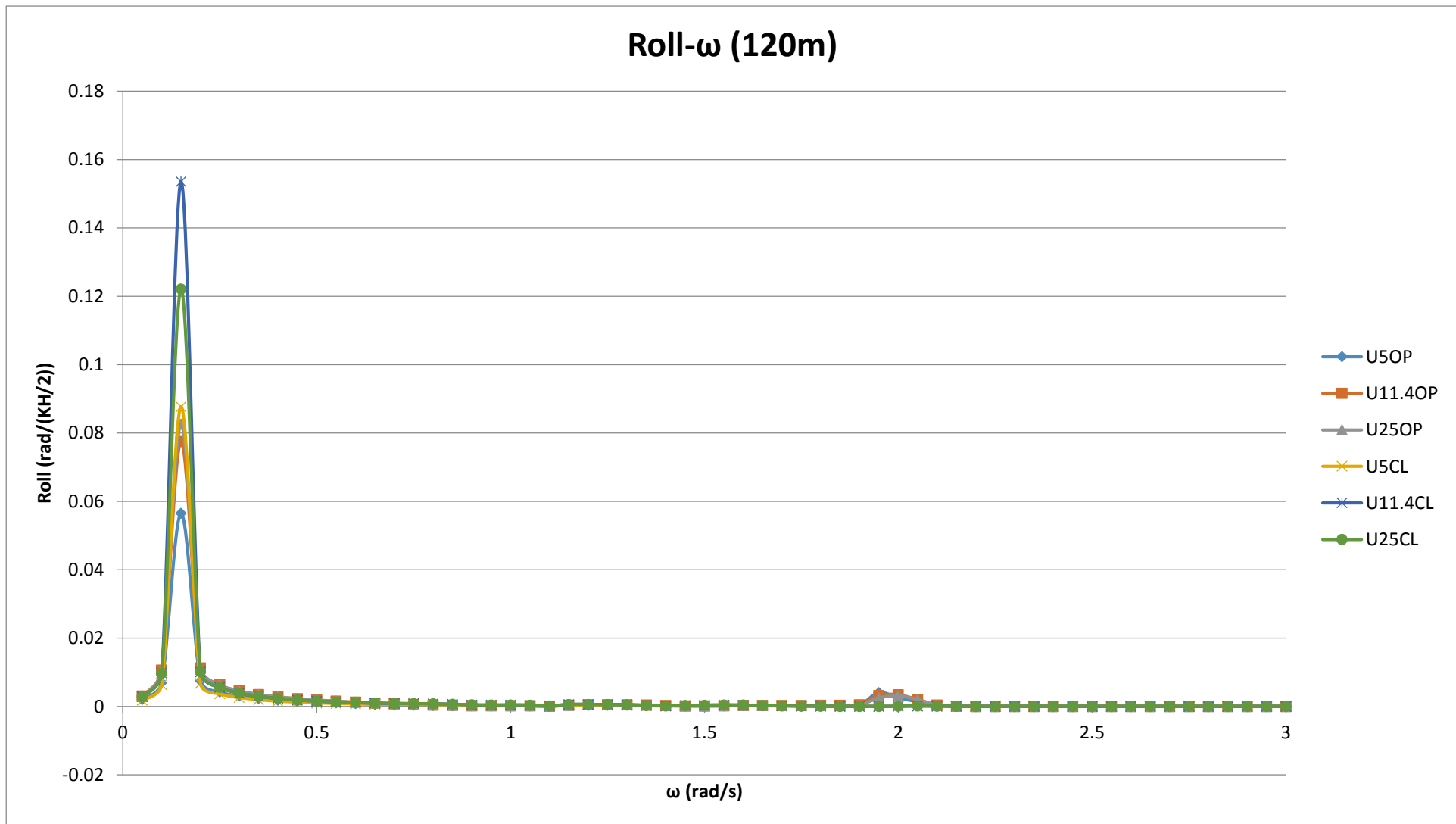
Εικόνα 6.10. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Heave για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



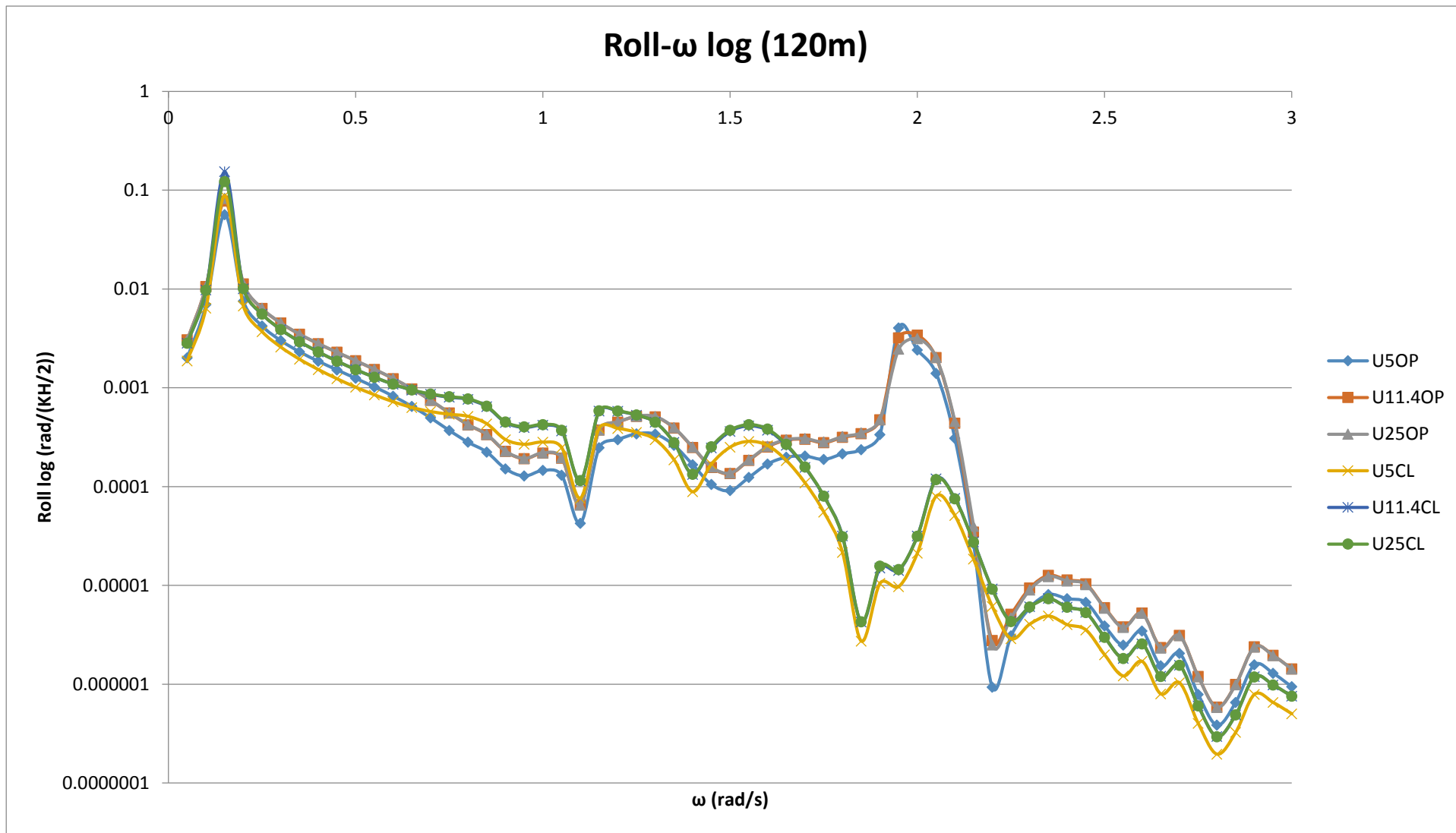
Εικόνα 6.11. RAO της απόκρισης-Heave για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



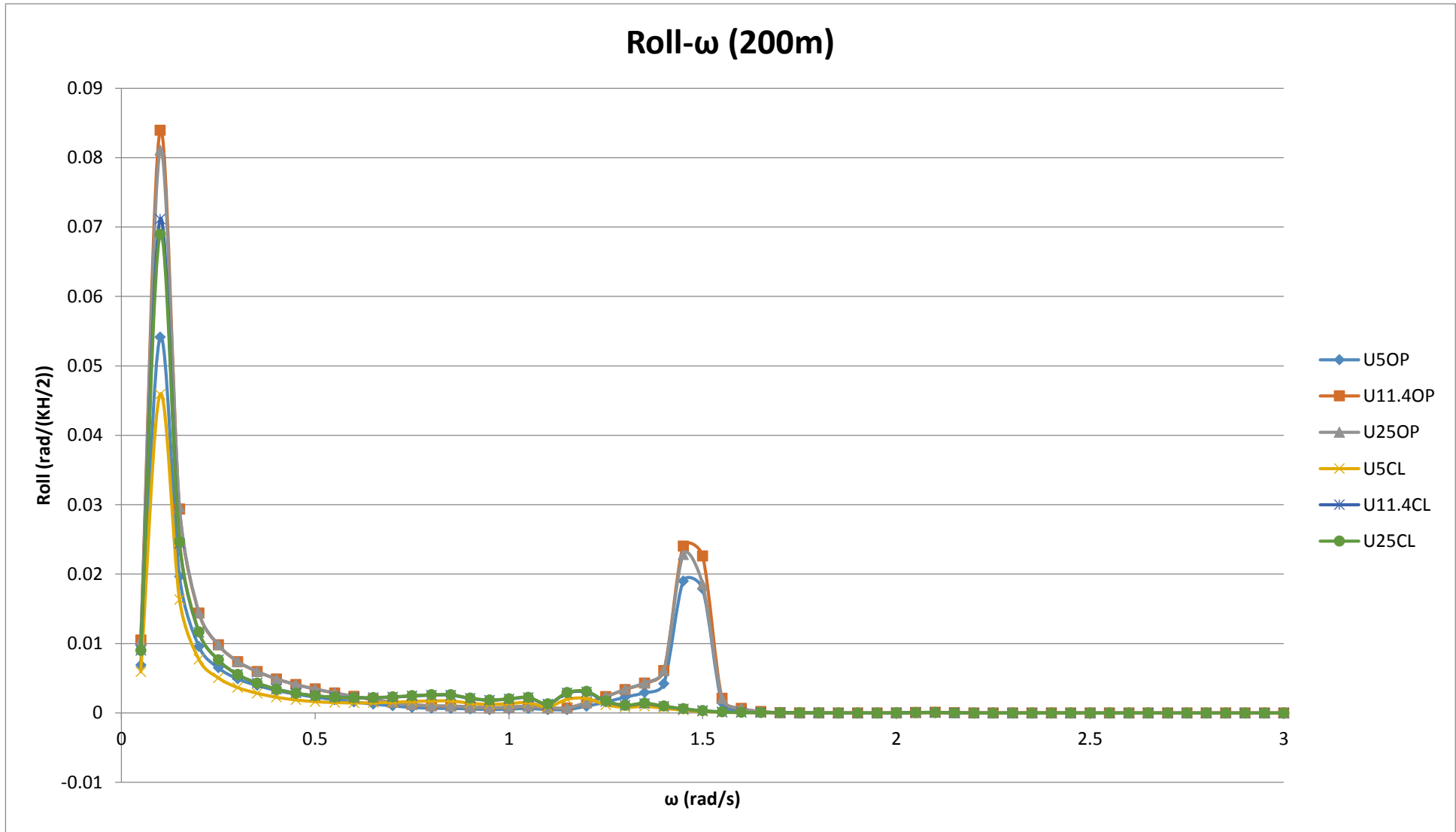
Εικόνα 6.12. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Heave για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



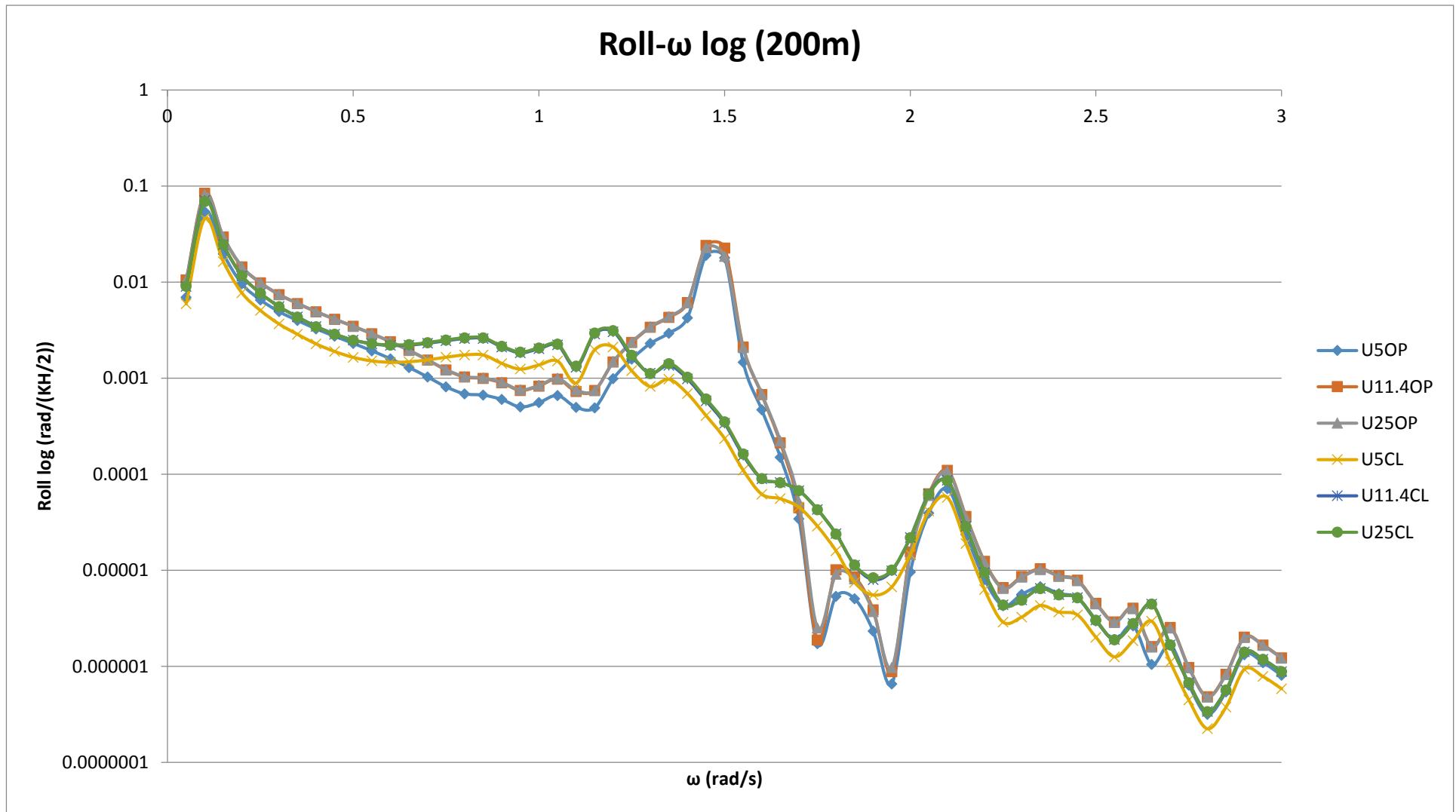
Εικόνα 6.13. RAO της απόκρισης-Roll για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



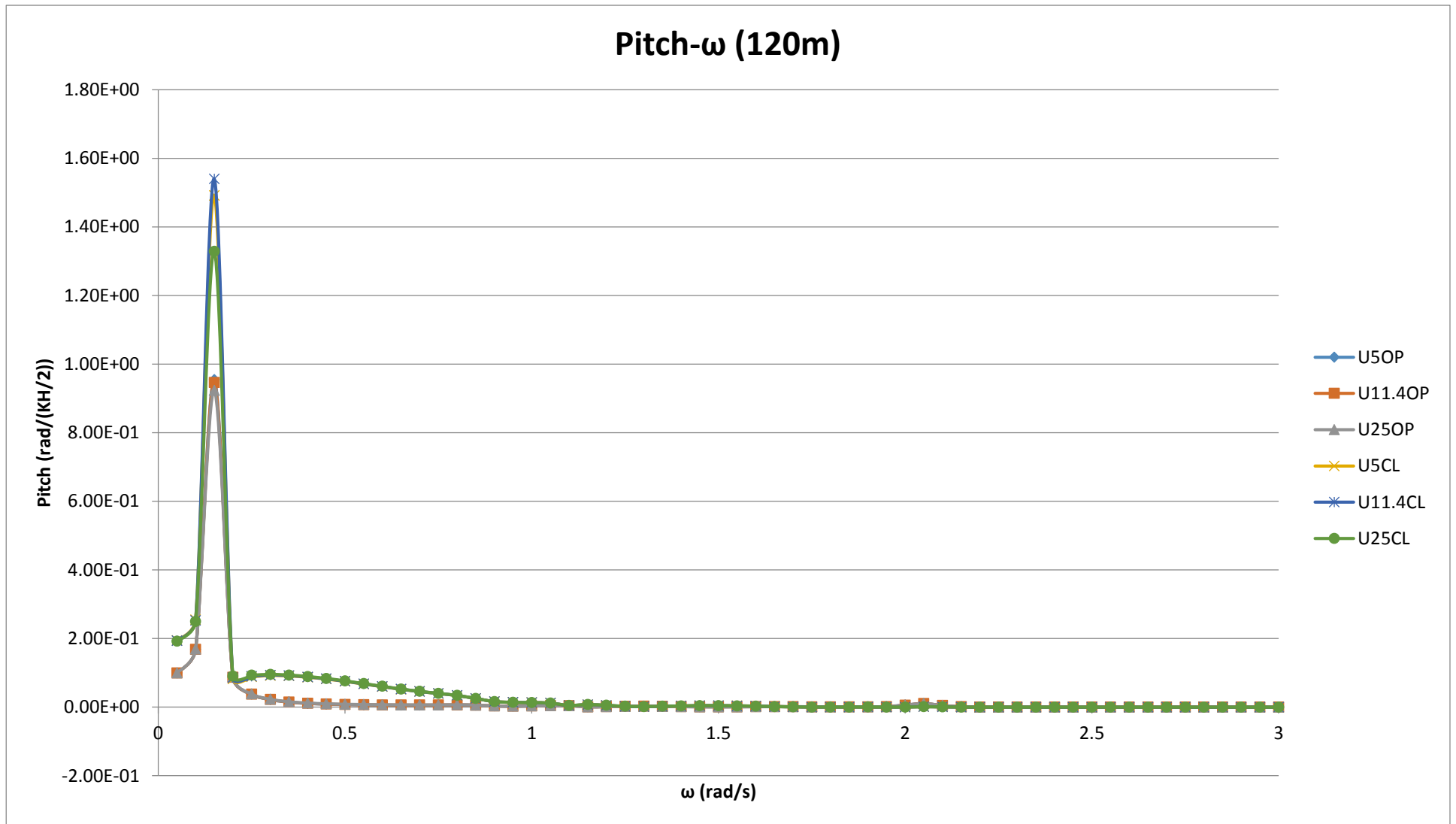
Εικόνα 6.14. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Roll για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



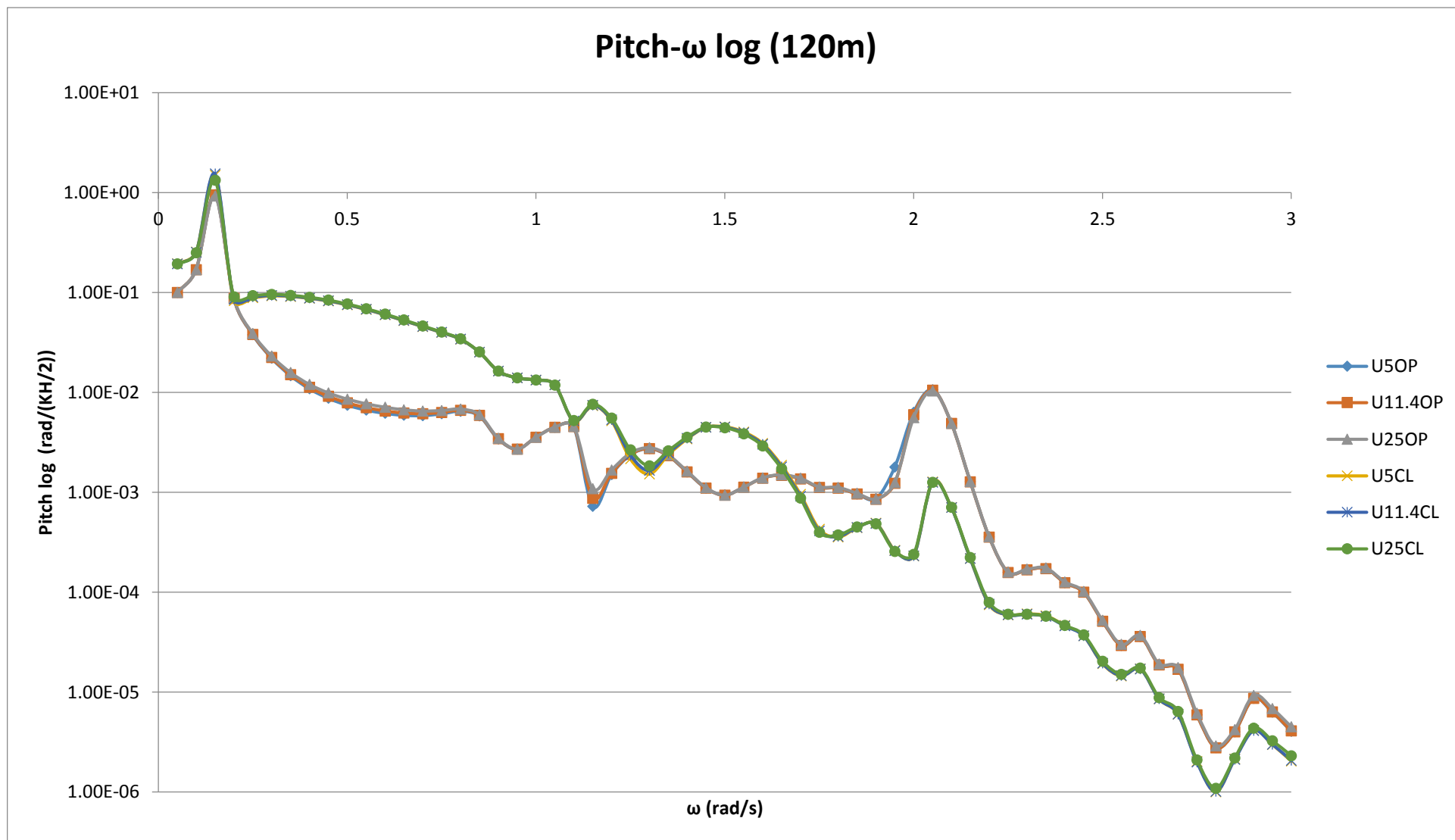
Εικόνα 6.15 RAO της απόκρισης-Roll για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



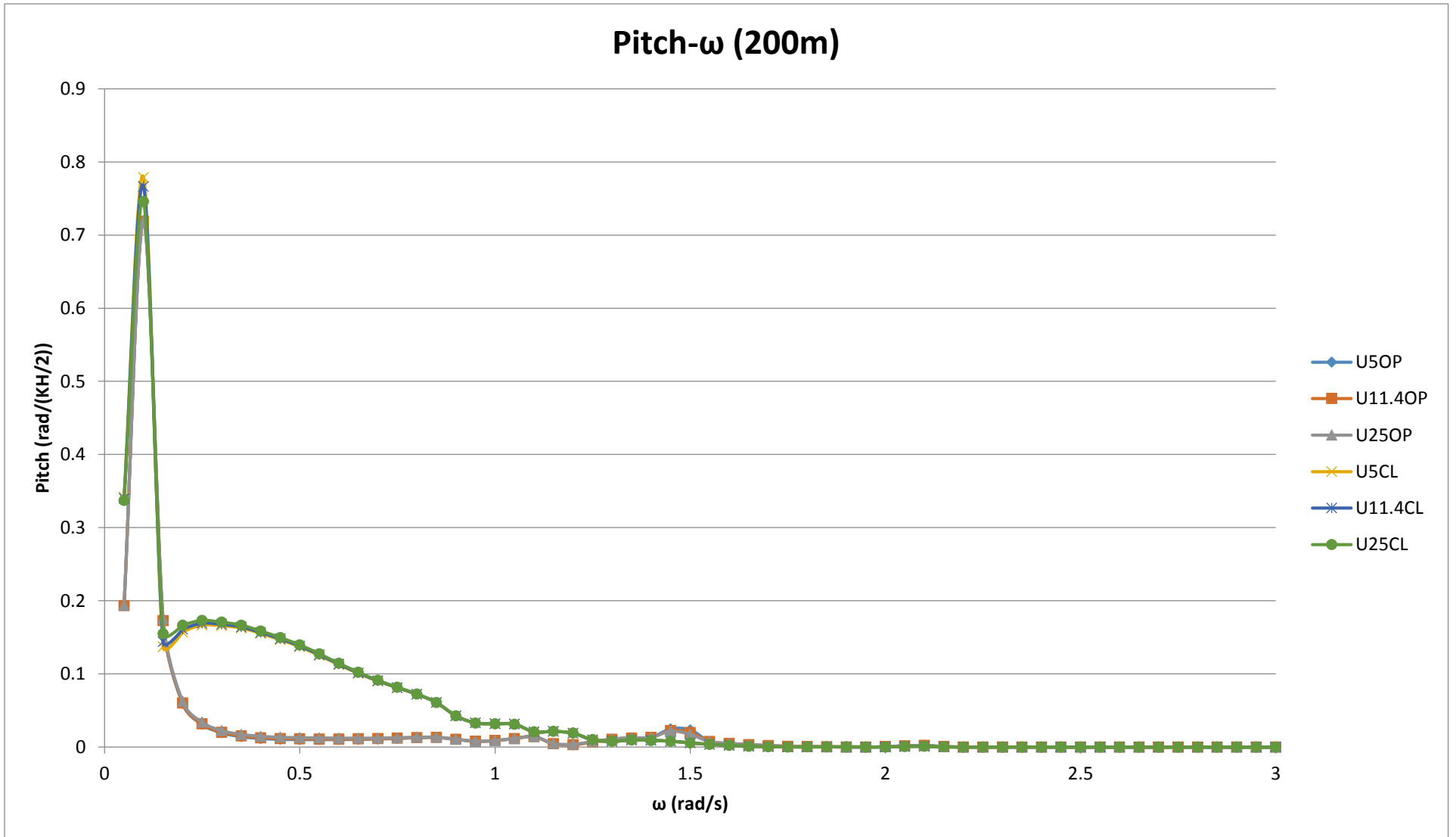
Εικόνα 6.16 RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Roll για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



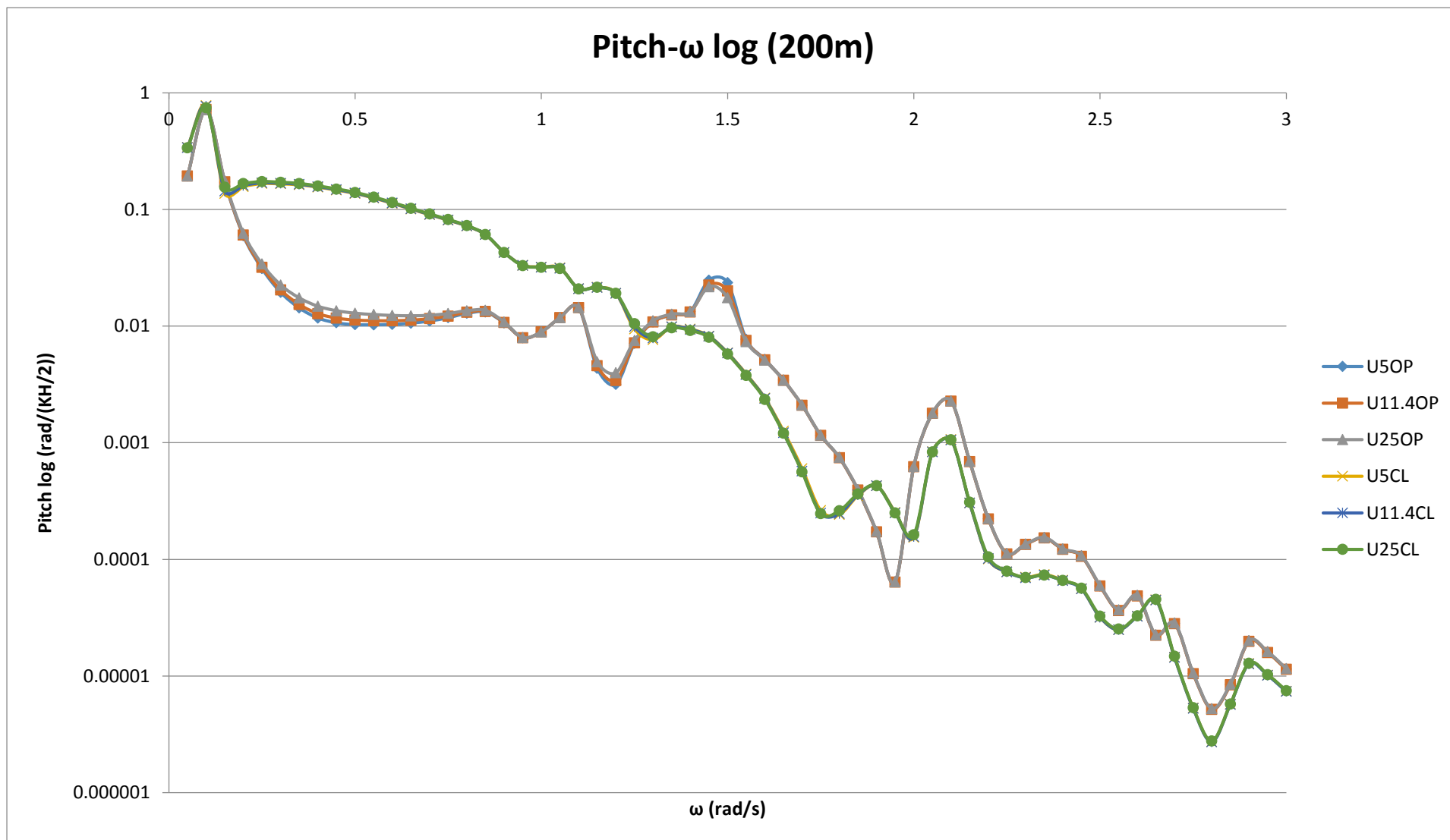
Εικόνα 6.17. RAO της απόκρισης-Pitch για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



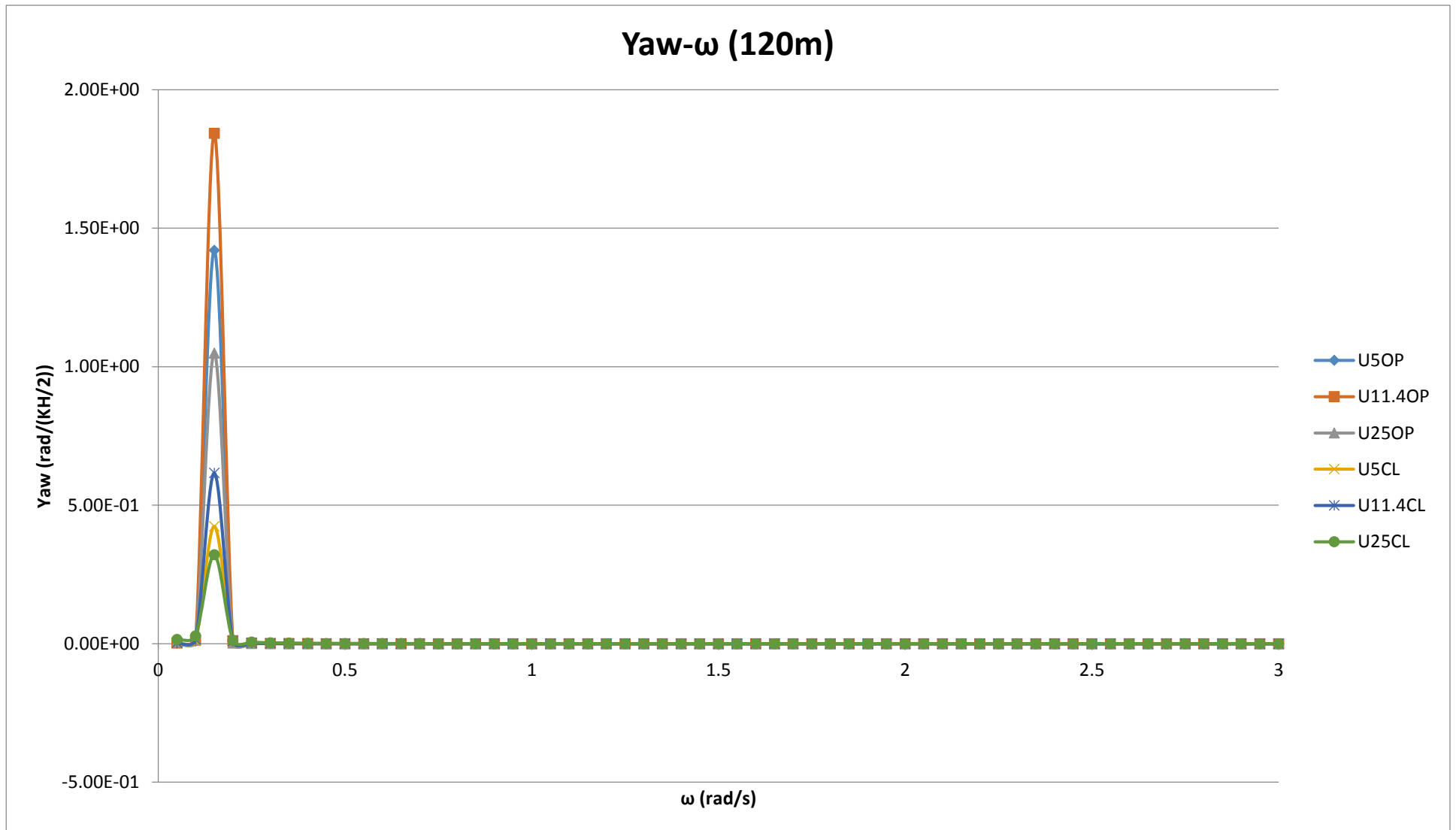
Εικόνα 6.18. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Pitch για βάθος ακύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



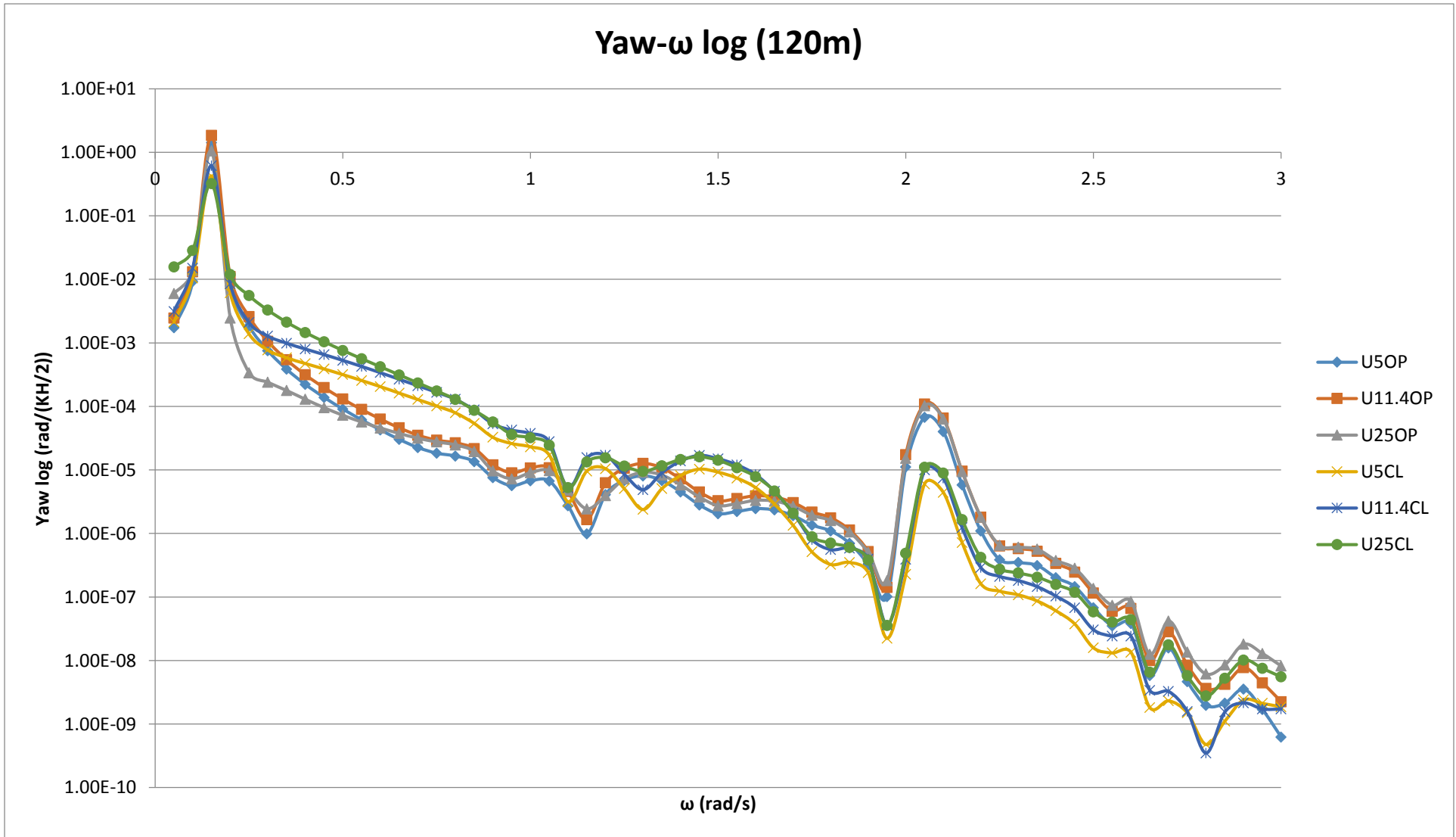
Εικόνα 6.19. RAO της απόκρισης-Pitchγια βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



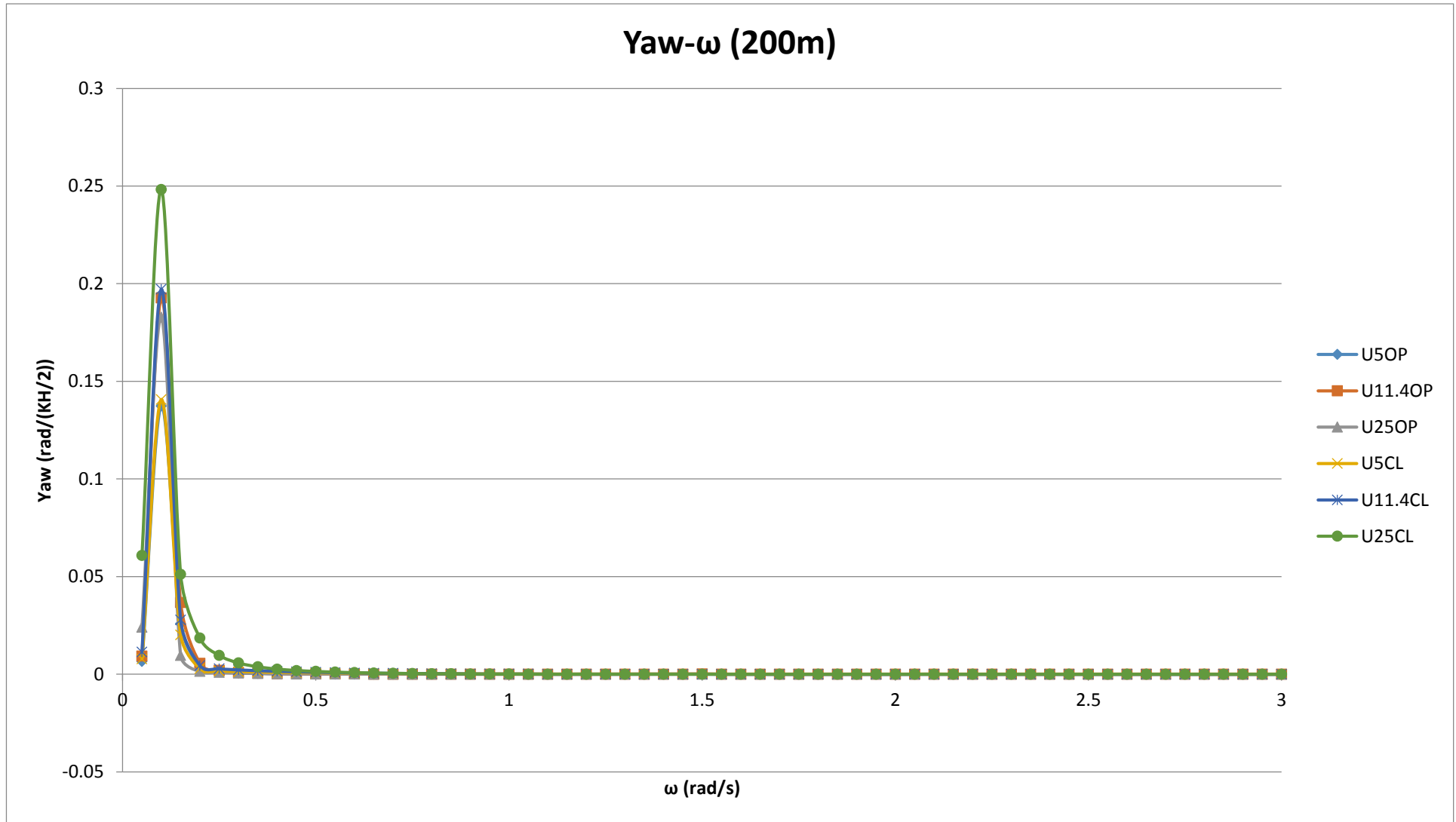
Εικόνα 6.20. RAO της λογαριθμικής απόκρισης-Pitch για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



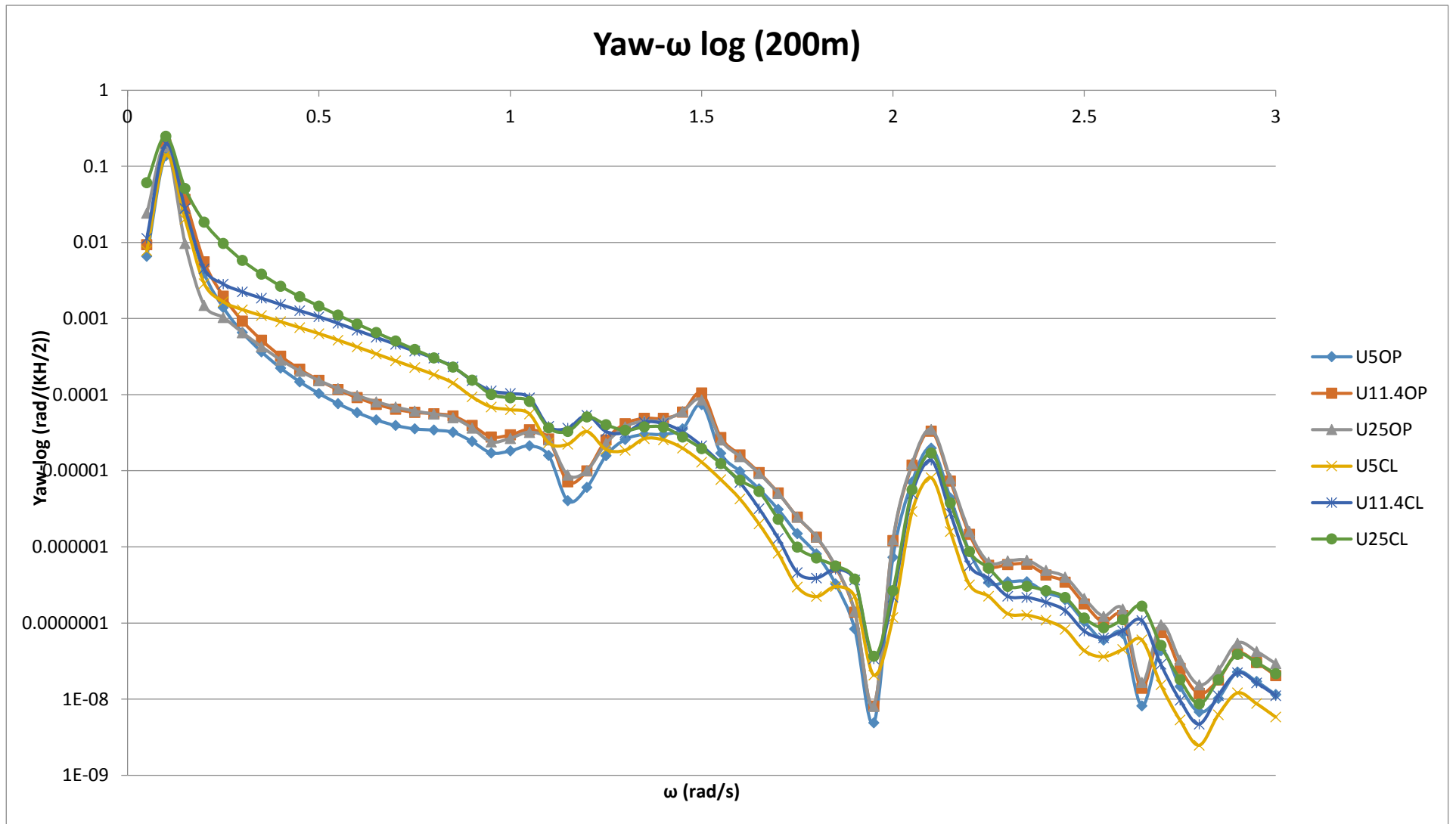
Εικόνα 6.21. RAO της απόκρισης-Yaw για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



Εικόνα 6.22. RAO της λογαριθμικής απόκρισης–Yaw για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



Εικόνα 6.23. RAO της απόκρισης $-\text{Yaw}$ για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.



Εικόνα 6.24. RAO της λογαριθμικής απόκρισης –Yaw για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's

6.2.2 Συμπεράσματα διαγραμμάτων μετακινήσεων

Από τα διαγράμματα των εικόνων 6.1-6.24 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Στην περίπτωση της υπολογισμένης ταλάντωσης στη Surge διεύθυνση παρατηρούμε ότι εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές στις χαμηλές συχνότητες απόκρισης. Οι σχετικές μέγιστες τιμές αντιστοιχούν με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος ($\omega=0.15\text{rad/s}$ στα 120m και $\omega=0.1\text{rad/s}$ στα 200m). Η ευρύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ομοιομορφία στο υπόλοιπο φάσμα συχνοτήτων. Το ίδιο ισχύει και για τα λογαριθμικά πλάτη απόκρισης, των οποίων όμως η μεταβλητότητα είναι εμφανέστερη. Γενικότερα η συμπεριφορά της κατασκευής στην Surge διεύθυνση είναι ομοιόμορφη για όλες τις ταχύτητες ανέμου καθώς και για τις περιπτώσεις λειτουργίας OWC (CL) ή μη (OP). Στην περίπτωση του μεγαλύτερου βάθους (200m) το μέγιστο πλάτος που συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος είναι σαφώς μικρότερο (25%) εν σχέσει με το αντίστοιχο στα 120m. Η ευρύτερη συμπεριφορά όμως είναι παρόμοια και στις δυο περιπτώσεις σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων απόκρισης.

Η απόκριση κατά Sway παρουσιάζει σαφώς μικρότερο μέγεθος από την απόκριση κατά Surge, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της διεύθυνσης των φορτίσεων (ανέμου και κύματος). Ομοίως με Surge, οι μέγιστες τιμές της εμφανίζονται σε μια περιοχή του φάσματος συχνοτήτων πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή κατά Sway. Εδώ παρατηρούνται μεγαλύτερα RAO's αποκρίσεων για ταχύτητες ανέμου 11.4m/s. Επιπλέον για την περίπτωση βάθους αγκύρωσης 120m η μέγιστη απόκριση παρουσιάζεται σε κατάσταση λειτουργίας OWC (CL), ενώ για βάθος 200m η μέγιστη απόκριση εμφανίζεται τόσο σε κατάσταση CL όσο και σε OP.

Οι περιστροφικές ταλαντώσεις Roll, Pitch και Yaw, μεγιστοποιούνται εκεί που η συχνότητα απόκρισης τείνει στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής (ίδια με τις υπόλοιπες κινήσεις). Οι μικρότερες τιμές περιστροφής παρουσιάζονται στην περίπτωση της Roll (σχεδόν 10 φορές μικρότερη από Pitch και Yaw), κάτι που αναμένεται λόγω της διεύθυνσης φόρτισης της κατασκευής (κατά Surge τόσο κυματικά όσο και από τον άνεμο). Μεγιστοποίηση των αποκρίσεων στα 120m βάθους παρατηρείται για τις Roll και Pitch σε κατάσταση CL, ενώ για την Yaw σε περίπτωση μη λειτουργίας των ανωστικών σωμάτων ως OWC's. Για βάθος αγκύρωσης στα 200m έχουμε μεγιστοποίηση των αποκρίσεων για Roll σε κατάσταση OP, για Yaw σε κατάσταση CL, ενώ στη Pitch περιστροφική μετακίνηση παρατηρούμε παρόμοια αποτελέσματα για όλες τις ταχύτητες και όλες της καταστάσεις των ανωστικών σωμάτων. Για ταχύτητα ανέμου 11.4m/s η κατασκευή παρουσιάζει μεγάλες περιστροφικές ταλαντώσεις και σε μερικές περιπτώσεις τις μεγαλύτερες. Οι αποκρίσεις στα 200m είναι πολύ μικρότερες από αυτές στα 120m και στις τρεις περιπτώσεις (Roll, Pitch, Yaw) με υπερδιπλάσια αποτελέσματα κατά την αγκύρωση στο μικρότερο βάθος.

Η απόκριση κατά Heave είναι αμελητέα σε σχέση με την Surge και σημαντικά μικρότερη της Sway (10%). Η μεγάλη ακαμψία του συστήματος στη Heave διεύθυνση λόγω των τενόντων είναι ο

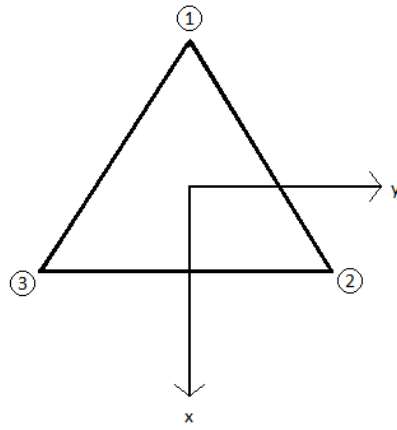
βασικός παράγοντας για την ανωτέρω μικρή απόκριση. Επιπλέον η μεγαλύτερη ακαμψία του συστήματος που βρίσκεται εγκατεστημένο σε βάθος 120m έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη Heave απόκρισή του εν σχέσει με αυτό στα 200m. Από την τελευταία διαπίστωση και σε σχέση με τα στοιχεία που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα των υπόλοιπων κινήσεων, προκύπτει το συμπέρασμα πως η μεγάλη ακαμψία κατά την κατακόρυφη διεύθυνση δεν περιορίζει την εμφάνιση μικρών μετατοπίσεων στις υπόλοιπες διευθύνσεις, ενώ ιδιαίτερα κατά τη Surge διεύθυνση η μείωση της ακαμψίας κατά Heave έχει αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων ακραίων μετατοπίσεων, όπως τελικά προκύπτει από την συνδυασμένη δυναμική ανάλυση. Το σύστημα όντας περισσότερο περιορισμένο να ταλαντωθεί κατά τον Heave άξονα στην περίπτωση των τενόντων μεγαλύτερης ακαμψίας (120m), εκτονώνει την φόρτιση περισσότερο στις άλλες 5 μετακινήσεις σε σχέση με αυτό με την μικρότερη ακαμψία (200m). Έτσι στα 120m βάθους αγκύρωσης έχουμε μεγαλύτερες Surge, Sway, Roll, Pitch και Yaw αποκρίσεις σε σχέση με αυτές στα 200m, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στις κινήσεις κατά Heave.

Η παρουσία των μεγίστων μετατοπίσεων κατά τη Surge διεύθυνση είναι εύλογη καθώς η κυματική διέγερση ασκείται αποκλειστικά κατ' αυτήν. Αντίστοιχα μεγάλη είναι και περιστροφική απόκριση Pitch λόγω της συμμετρικής φόρτισης κατά διεύθυνσης Surge. Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι εμφανέστερη στην κίνηση Pitch καθώς παρατηρείται η απότομη μείωση του πλάτους της στην ιδιοσυχνότητά της. Ακόμη οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιπτώσεων OP και CL είναι ιδιαίτερος εμφανείς. Συγκεκριμένα η ταλάντωση του CL συστήματος είναι συνήθως μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν σε κατάσταση OP στα ανωτέρω διαγράμματα και ειδικά κατά τις διευθύνσεις Surge, Sway και Heave. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στην μετακίνηση κατά την Heave διεύθυνση, όπου η μετακίνηση κατά την CL κατάσταση είναι σχεδόν 4πλασια σε σχέση με την OP. Έτσι μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η λειτουργία των ανωστικών σωμάτων ως OWC's συνεισφέρει στην μείωση της απόσβεσης της κίνησης του συστήματος. Τέλος σε κάθε διάγραμμα παρατηρούμε ομοιομορφία στην συμπεριφορά της κατασκευής για κάθε ταχύτητα ανέμου και κατάσταση των ανωστικών σωμάτων.

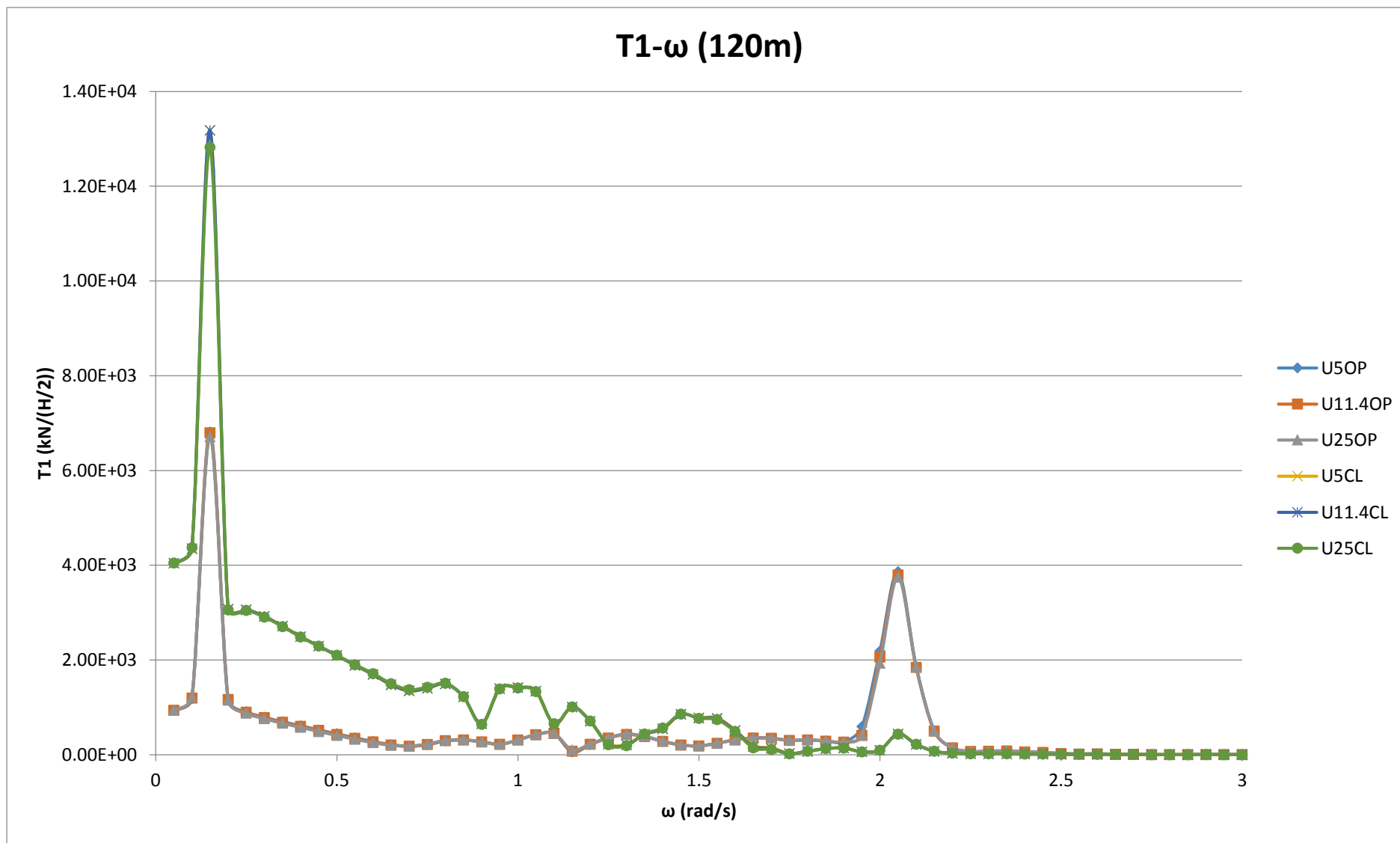
6.2.3 Διαγράμματα τάσεων

Κατόπιν παρατίθενται στις εικόνες 6.26-6.37 διαγράμματα που περιγράφουν την μεταβολή των αξονικών εντατικών δυνάμεων (τάσεων) που ασκούνται στους τένοντες του συστήματος αγκύρωσης-TLP, στο πεδίο των συχνοτήτων.

Ο συμβολισμός T1, T2, T3 περιγράφει την ολική ασκούμενη τάση σε κάθε τένοντα-κλάδο αγκύρωσης, που αντιστοιχεί στο ανωστικό σώμα-κύλινδρο 1, 2, 3 στις συντεταγμένες xy : (-28.84, 0), (14.43, 25) και (14.43, -25) αντίστοιχα. Εικόνα 6.25.



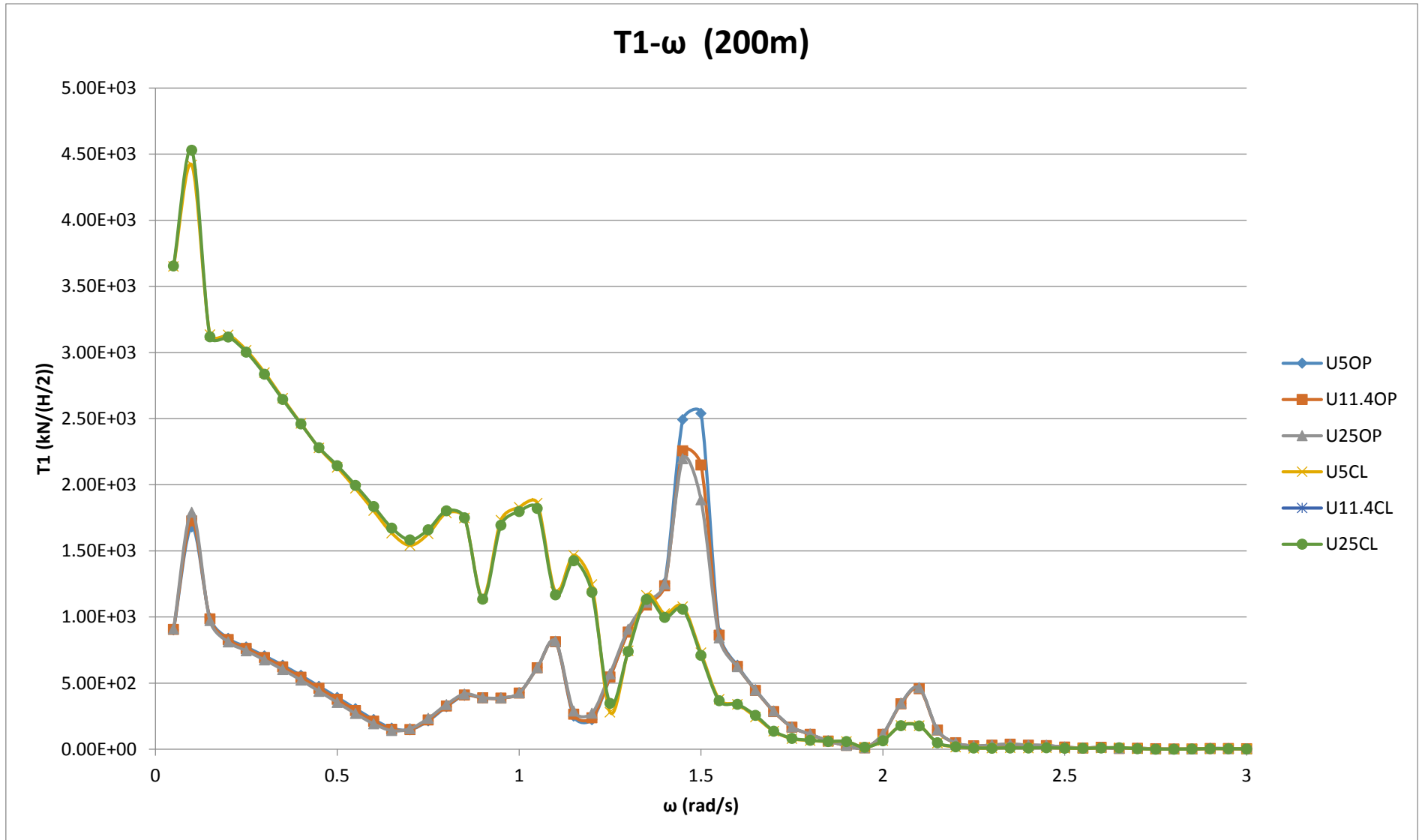
Εικόνα 6.25 Θέση και προσανατολισμός ανωστικών σωμάτων 1, 2 και 3.



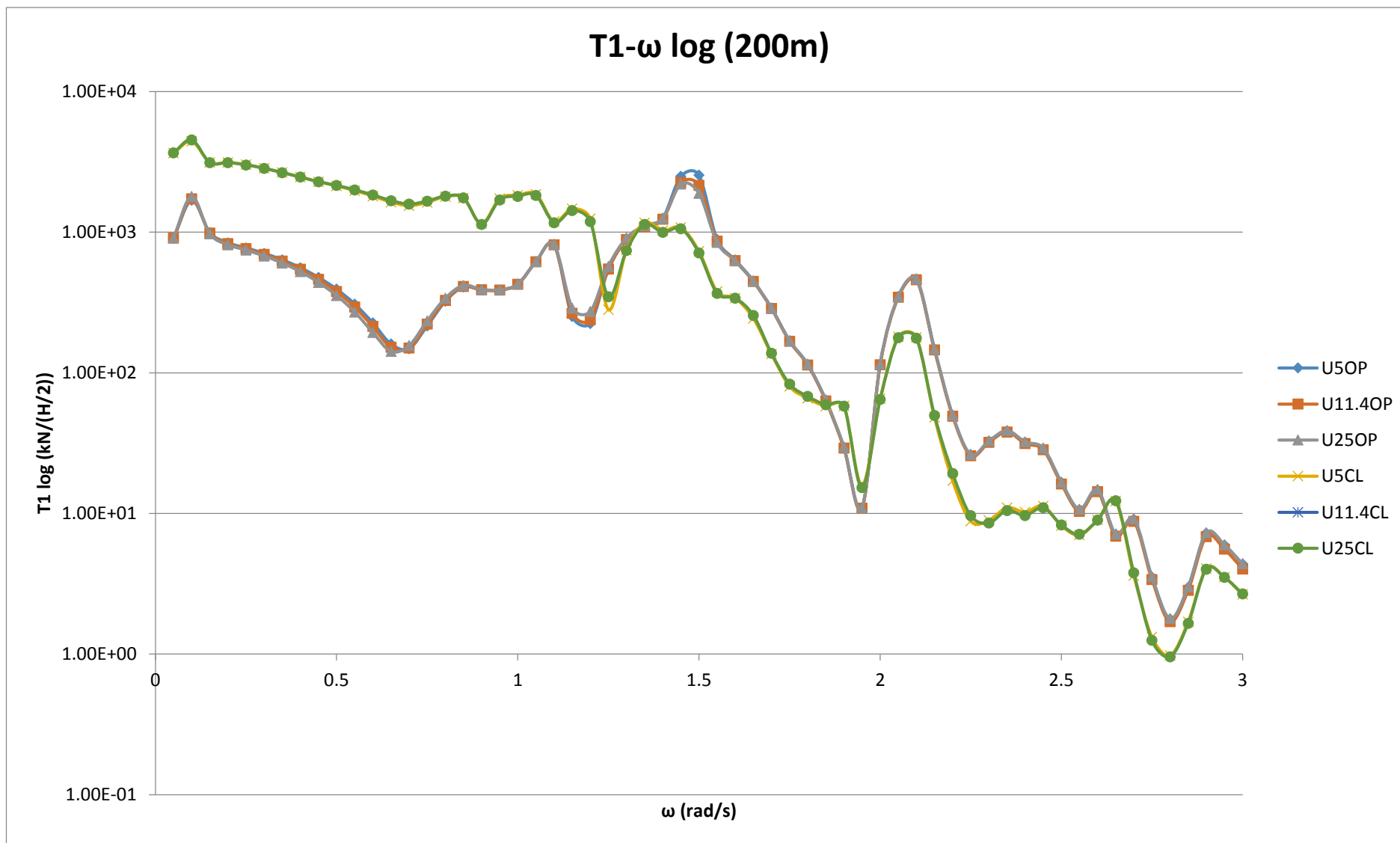
Εικόνα 6.26. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 1 (T_1) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m, για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



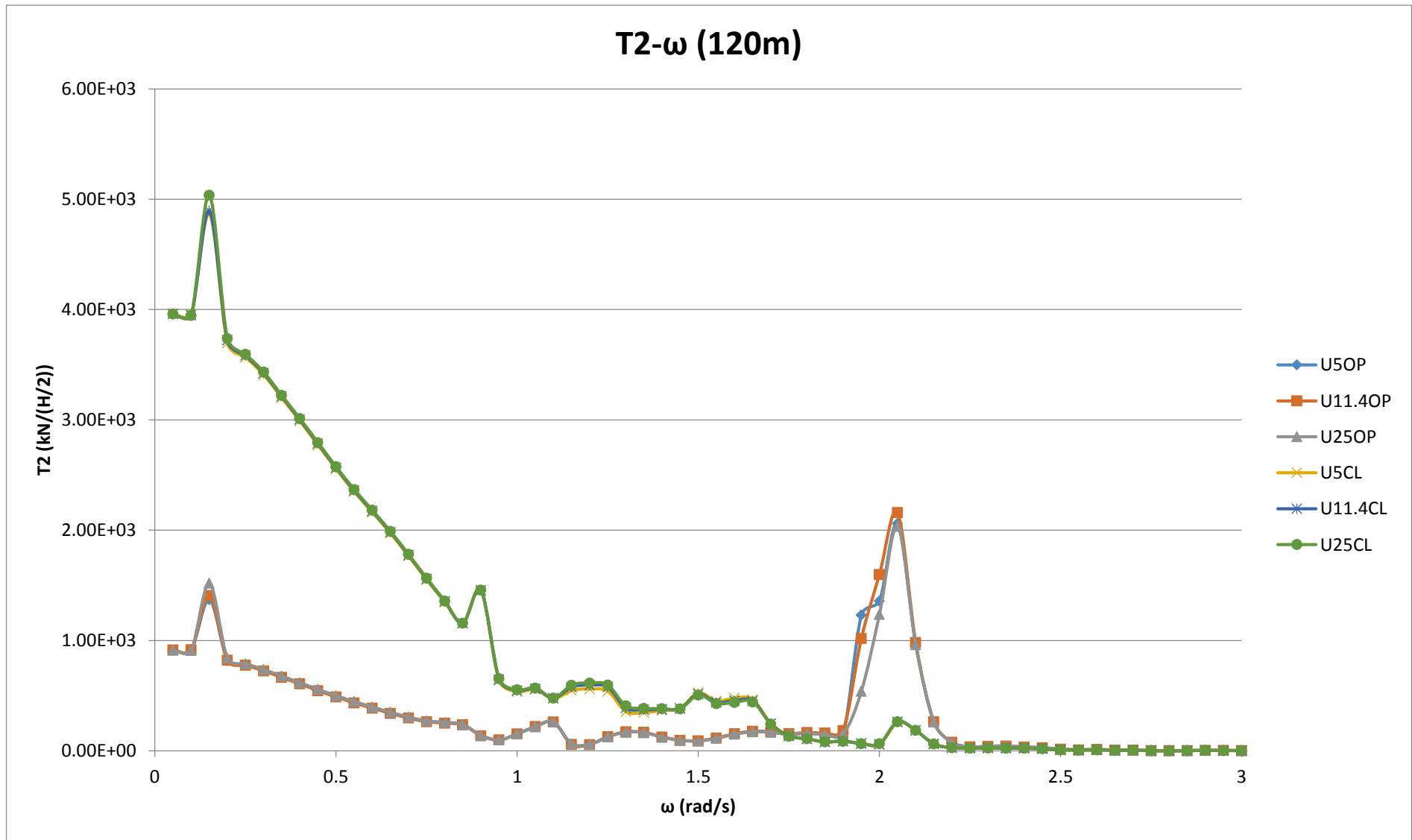
Εικόνα 6.27. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 1 (T_1) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



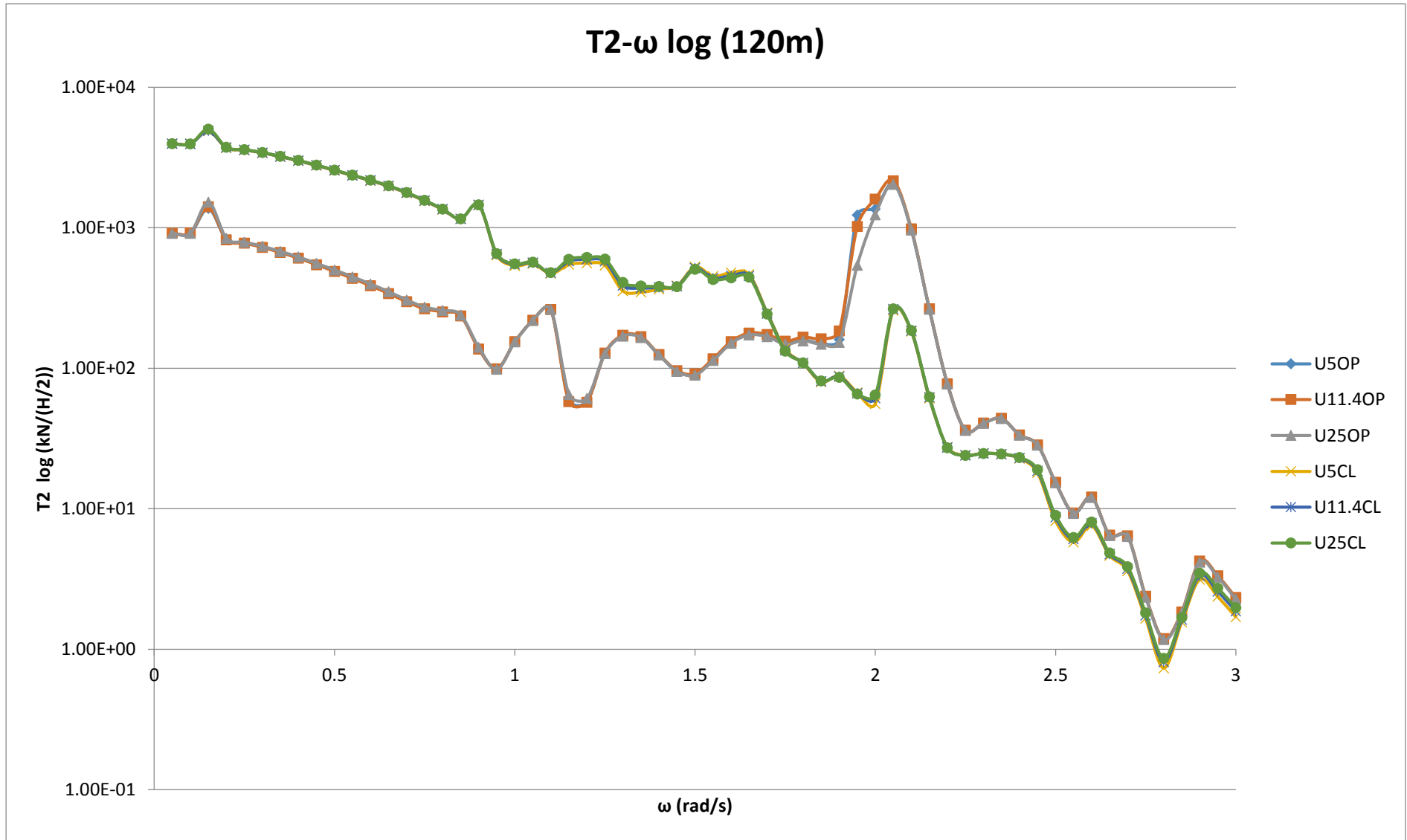
Εικόνα 6.28. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 1 (T1) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



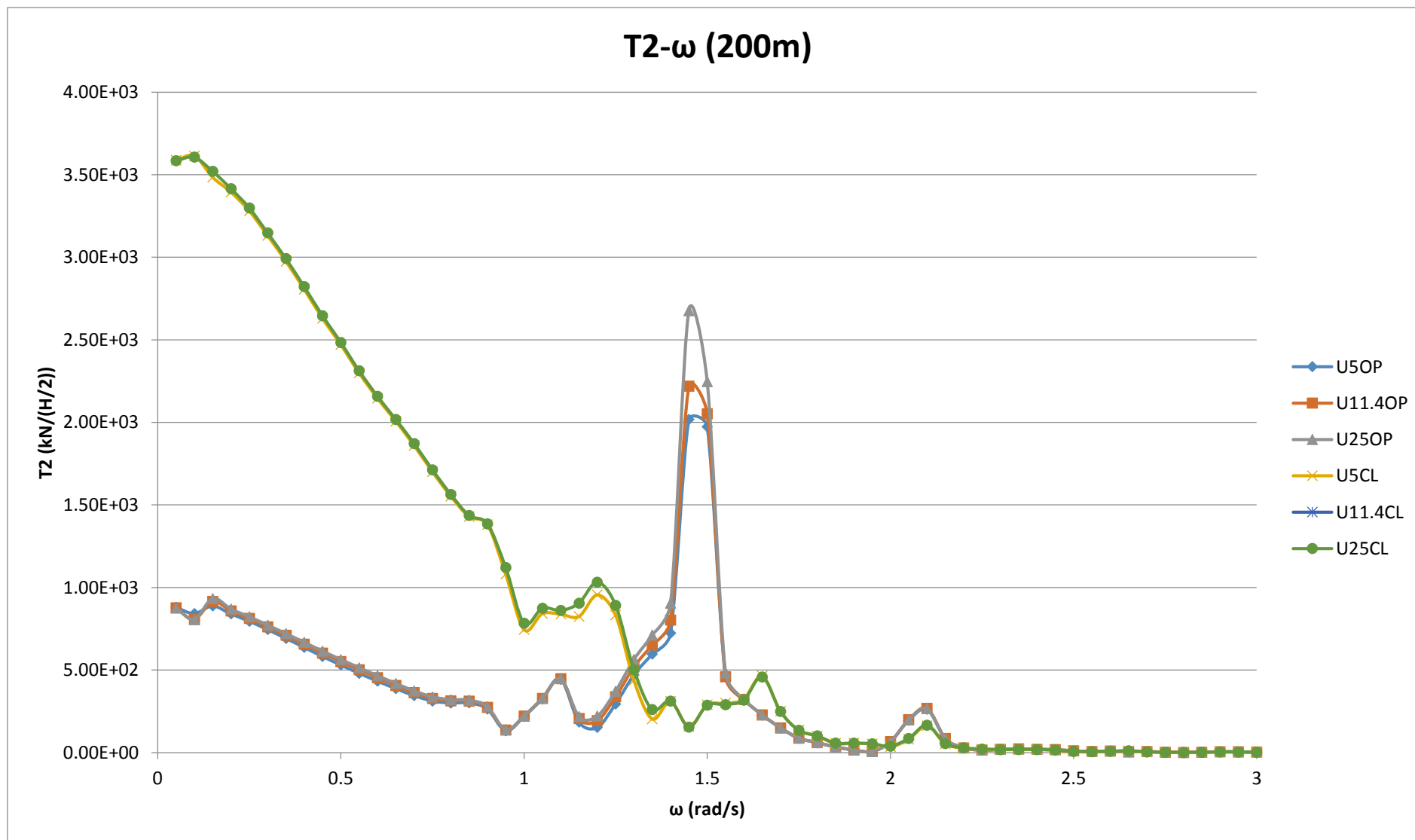
Εικόνα 6.29. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 1 (T_1) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



Εικόνα 6.30. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 2 (T_2) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



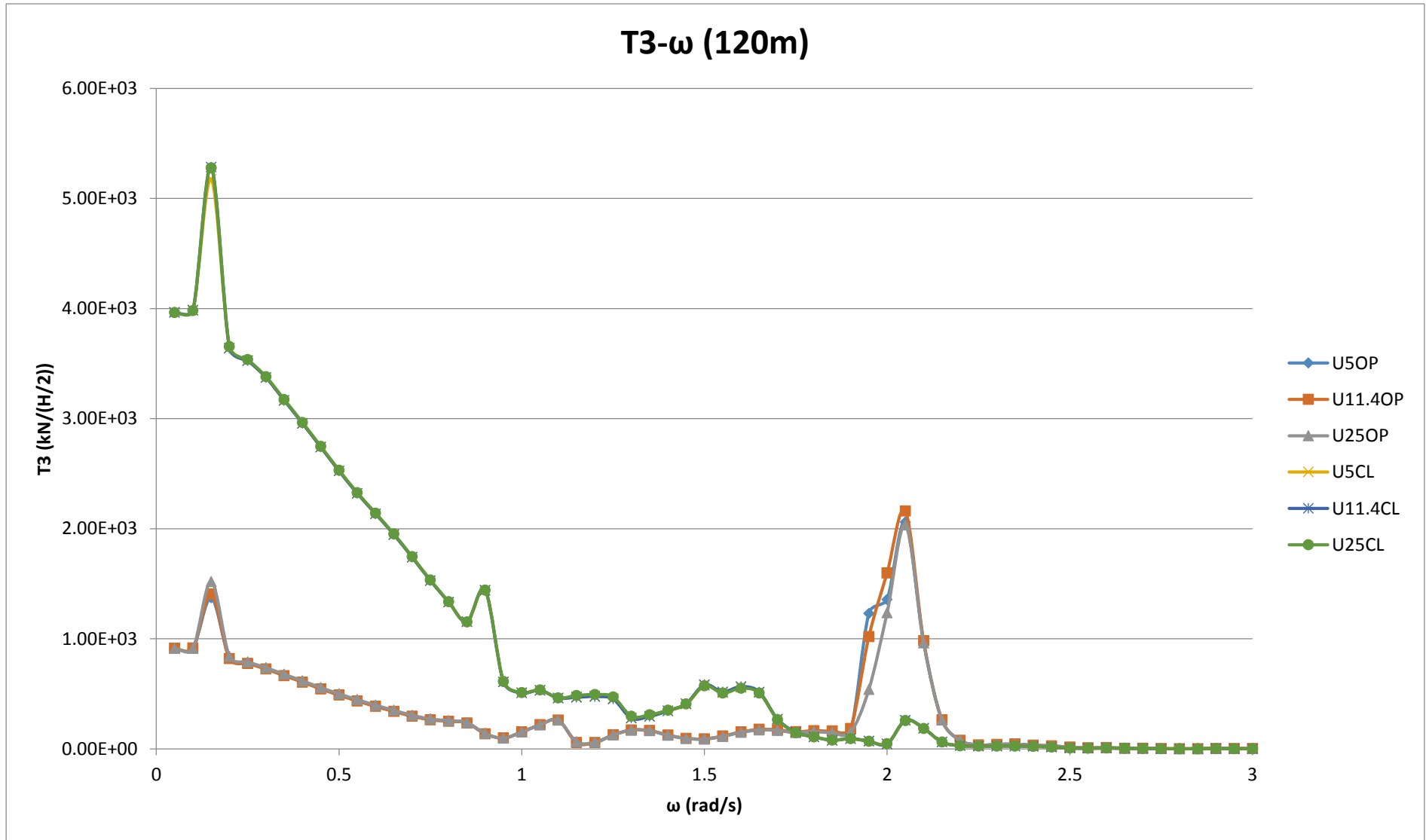
Εικόνα 6.31. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 2 (T2) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



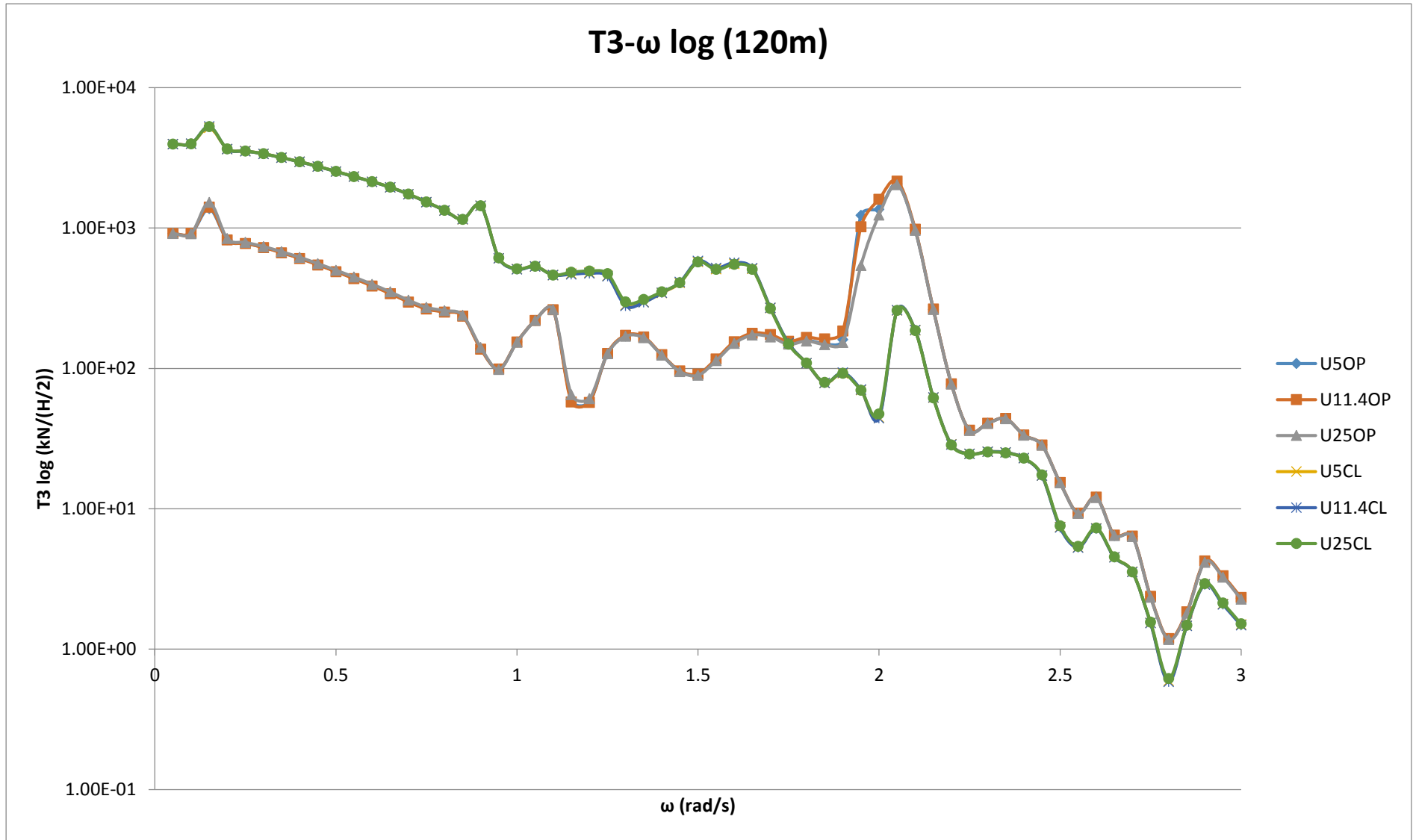
Εικόνα 6.32. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 2 (T_2) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου $5, 11.4, 25\text{ m/s}$ και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



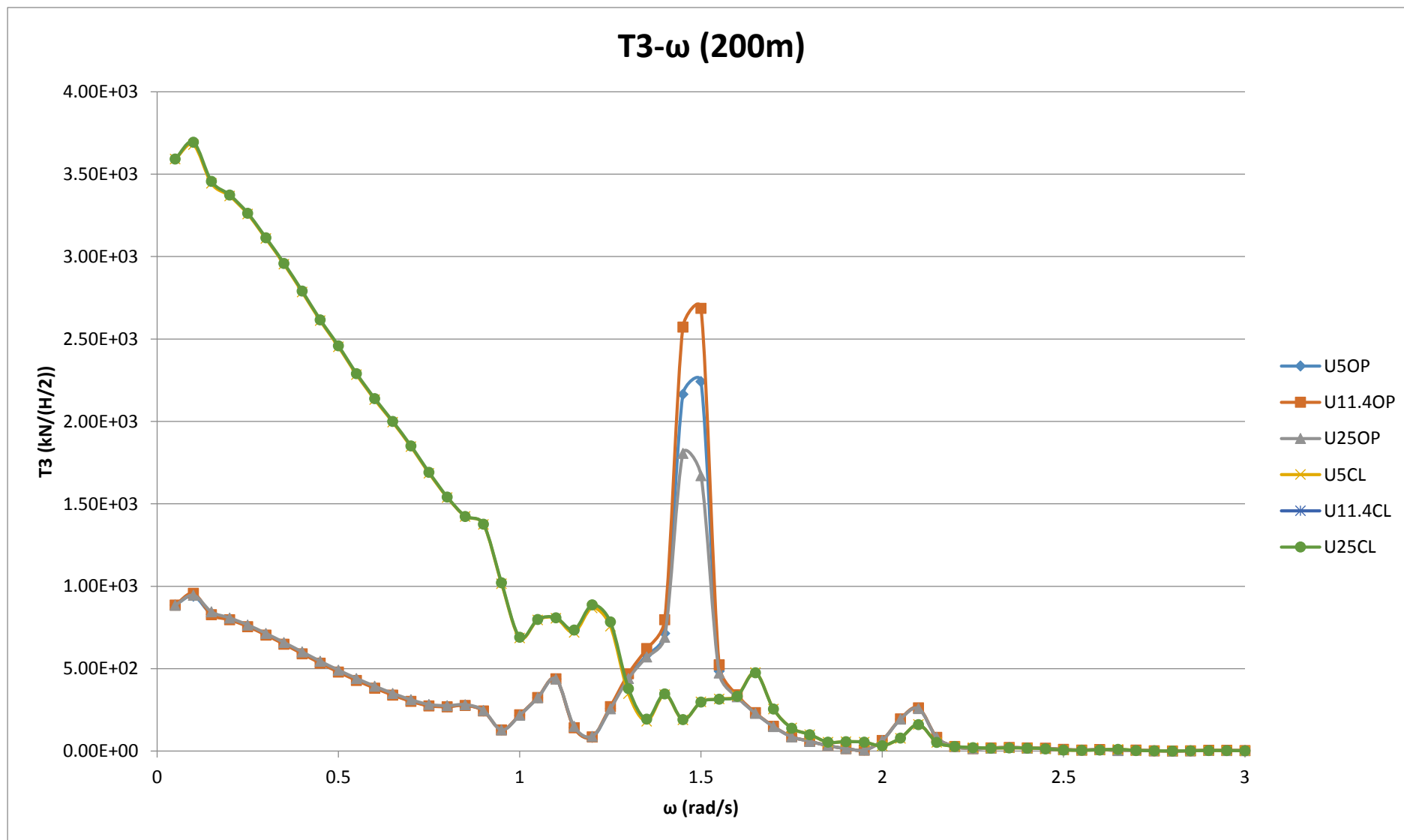
Εικόνα 6.33. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 2 ($T2$) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



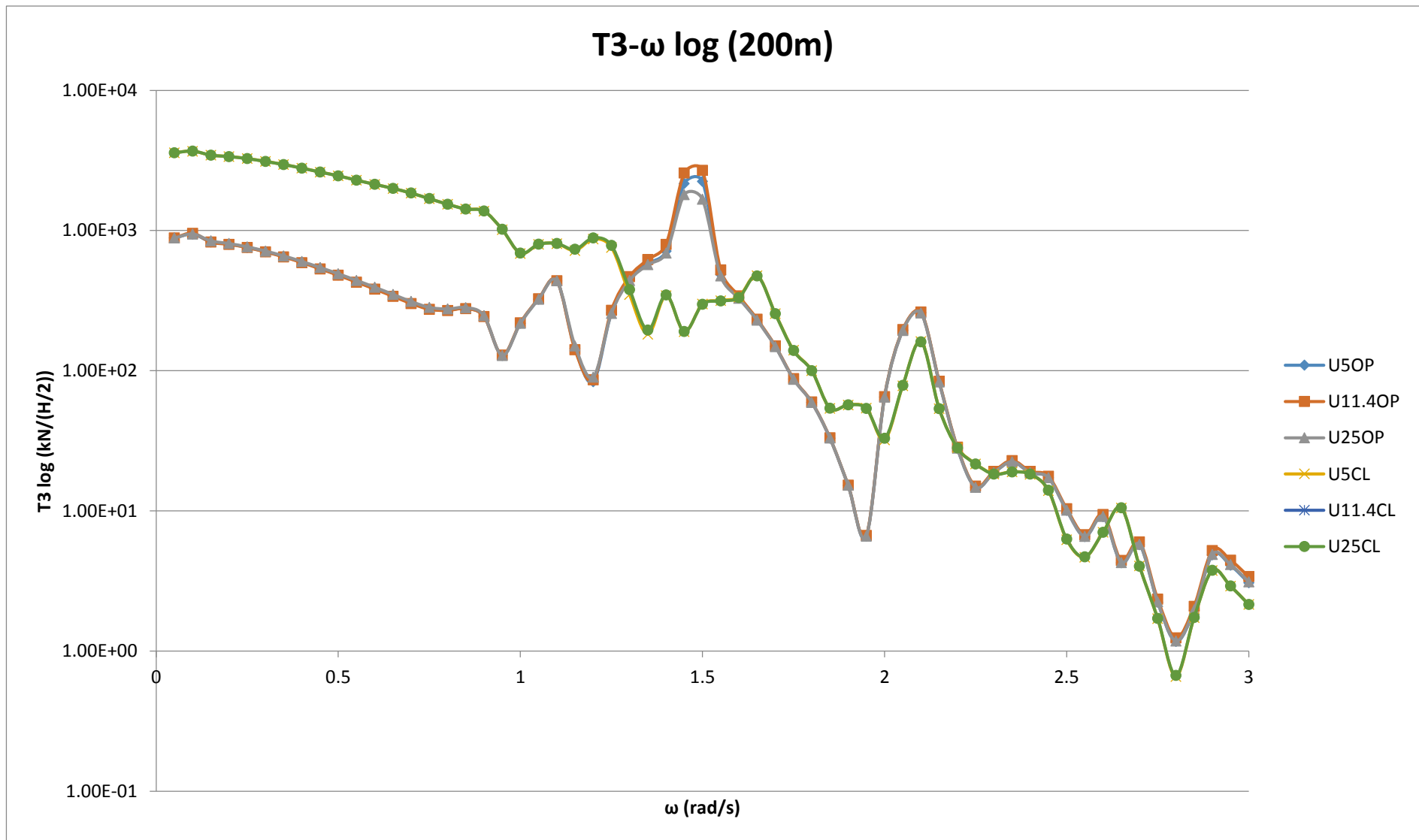
Εικόνα 6.34. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 3 (T3) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



Εικόνα 6.35. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 3(T3) σε kN για βάθος αγκύρωσης 120m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



Εικόνα 6.36. Τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 3(T3) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's



Εικόνα 6.37. Λογαριθμική τάση στον κλάδο αγκύρωσης του ανωστικού σώματος 3(T3) σε kN για βάθος αγκύρωσης 200m , για ταχύτητες ανέμου 5, 11.4, 25 m/s και για περιπτώσεις λειτουργίας-Closed (CL) και μη λειτουργίας-Opened (OP) των ανωστικών σωμάτων ως OWC's

6.2.4 Συμπεράσματα διαγραμμάτων τάσεων

Για την τάση που ασκείται στον τένοντα 1 (T1) στην περίπτωση βάθους αγκύρωσης 120m, παρατηρούμε ότι το ολικό μέγιστο εμφανίζεται για την περίπτωση λειτουργίας OWC (CL) και τοποθετείται κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος ($\omega=0.1\text{rad/s}$). Η συγκεκριμένη μέγιστη τιμή είναι 13000 (kN/(H/2)). Επίσης παρατηρείται ένα μικρότερο τοπικό μέγιστο στην τιμή συχνότητας 2.05rad/sec. Η μέγιστη τιμή της τάσης T1 σε κατάσταση OP, εμφανίζεται στην ίδια ιδιοσυχνότητα με το CL και είναι 7000 (kN/(H/2)) δηλαδή σχεδόν υποδιπλάσια της περίπτωσης CL. Επιπλέον ένα δεύτερο μέγιστο στην ίδια θέση του φάσματος συχνοτήτων με το αντίστοιχο τοπικό μέγιστο της CL, δηλαδή για $\omega=2.05\text{rad/sec}$ εμφανίζεται και στην OP. Παρατηρείται γενικότερα φθίνουσα μεταβολή του γραφήματος των τάσεων μετά το δεύτερο τοπικό μέγιστο σε όλες τις περιπτώσεις της T1. Το γεγονός αυτό γίνεται πιο διακριτό με την βοήθεια των λογαριθμικών τιμών της T1.

Το ολικό μέγιστο που αντιστοιχεί στην περίπτωση T1 (CL) είναι το μόνο που υπερβαίνει την εφαρμοσμένη προένταση στους τένοντες που είναι 10800 (kN/(H/2)). Λόγω αυτής της υπέρβασης υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης του τένοντα 1. Αντιθέτως στην περίπτωση OP δεν παρατηρείται κάποια τιμή που να υπερβαίνει την προένταση. Συνεπώς η περίπτωση T1 (CL) μπορεί να παρουσιάσει σημαντική παραμόρφωση στον τένοντα για την περίπτωση που η συχνότητα της ασκούμενης διέγερσης συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα Surge, ενώ η περίπτωση T1 (OP) δεν διατρέχει κάποιον τέτοιο κίνδυνο αφού η ασκούμενη τάση σε όλο το φάσμα συχνοτήτων παραμένει αισθητά μικρότερη (<70%) της εφαρμοσμένης προέντασης. Έτσι για να αποφευχθεί ο ανωτέρω κίνδυνος για τον τένοντα 1, θέτουμε σε αυτήν την περίπτωση τα ανωστικά σώματα σε κατάσταση OP. Με βάση την διάταξη που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.25 αλλά και τα προρρηθέντα από την εξέταση των διαγραμμάτων των μετακινήσεων (εικόνες 6.1-6.24) υποθέτουμε ότι για την περίπτωση CL αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη κίνηση Surge και Pitch.

Στην περίπτωση του βάθους αγκύρωσης στα 200m η εξέλιξη της τάσης T1 είναι γενικότερα παρόμοια με την περίπτωση του μικρού βάθους. Και πάλι η περίπτωση CL λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή, τάξεως 4500 (kN/(H/2)) κοντά στην ιδιοσυχνότητα Surge ενώ εμφανίζεται δεύτερο τοπικό μέγιστο στην τιμή 1.5rad/sec. Στις ίδιες ακριβώς τιμές του φάσματος συχνοτήτων λαμβάνονται τα μέγιστα και της περίπτωσης OP. Γενικότερα οι τιμές της τάσης είναι πολύ μικρότερες (<50%) της ασκούμενης προέντασης, επομένως δεν παρουσιάζονται τα φαινόμενα παραμόρφωσης που είδαμε πως ισχύουν στο μικρότερο βάθος αγκύρωσης (120m). Και πάλι το δεύτερο τοπικό μέγιστο δηλαδή αυτό που

εμφανίζεται στην μεγαλύτερη τιμή συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερο για την περίπτωση OP.

Ακόμη ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι δεν διαφοροποιούνται οι ασκούμενες τάσεις από τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Επομένως κυρίως η κυματική διέγερση είναι αυτή που επηρεάζει την ακαμψία του συστήματος.

Επίσης καθοριστική συνιστώσα στο πρόβλημα είναι η μεταβολή του βάθους. Παρά την μεγαλύτερη ακαμψία των τενόντων για το μικρότερο μήκος σύστημα αγκύρωσης, στο μικρότερο βάθος έχουμε μεγαλύτερο βαθμό επιρροής της κυματικής διέγερσης σε σχέση με την περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης σε βάθος 200m. Έτσι η μεγαλύτερη παραμόρφωση που παρατηρήσαμε στην T1 (CL) φαίνεται να έρχεται σε συμφωνία με την μεγαλύτερη μετατόπιση κατά Surge που είδαμε προηγουμένως για βάθος 120m. Ακόμη από την εξέταση των διαγραμμάτων των τάσεων επαληθεύεται η υποψία της καθοριστικής αρνητικής επιρροής της λειτουργίας των ανωστικών σωμάτων ως OWC's στην ακαμψία/ευστάθεια του συστήματος.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα των T2 και T3 τάσεων στους κλάδους αγκύρωσης 2 και 3 αντίστοιχα βλ. εικόνα 6.25 παρατηρούμε πως είναι ίδιας τάξης μεγέθους και σχεδόν ίσες μεταξύ τους. Η παρατήρηση αυτή ήταν αναμενόμενη, καθώς οι δυνάμεις που ασκούνται τόσο από το κύμα όσο και από τον άνεμο (με τις πρώτες να είναι οι πιο καθοριστικές όπως και στην T1) κατά τη Surge διεύθυνση ισομοιράζονται στα δυο ανωστικά σώματα λόγω συμμετρίας.

Επιπροσθέτως η μεταβολή των τάσεων T2 και T3 είναι παρόμοια με της T1. Έτσι παρουσιάζουν μέγιστα στην ιδιοσυχνότητα της Surge διεύθυνσης ($\omega=0.15\text{rad/s}$) και τοπικό μέγιστο στη συχνότητα $\omega=2.05\text{rad/sec}$, σε βάθος αγκύρωσης 120m. Το ολικό μέγιστο για την περίπτωση OP εμφανίζεται σε αυτή τη συχνότητα του φάσματος συχνοτήτων. Οι γραφικές παραστάσεις γενικότερα και εδώ φθίνουν με την αύξηση της συχνότητας απόκρισης.

Ακόμη δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφοροποίηση λόγω μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι η κυματική διέγερση είναι αυτή που επηρεάζει κυριότερα την ακαμψία του συστήματος.

Η συνολική μέγιστη τιμή της κατάστασης CL για 120m βάθος αγκύρωσης φτάνει τα 5000 (kN/(H/2)) και είναι υποδιπλάσια της προέντασης (10800 (kN/(H/2))). Επομένως δεν παρατηρείται το ενδεχόμενο σημαντικής μεταβολής του μήκους των τενόντων 2 και 3. Η μέγιστη τιμή της των τάσεων T2, T3 στην κατάσταση OP (σε $\omega=2\text{rad/sec}$) φτάνει τα 1500 (kN/(H/2)). Για την περίπτωση 200m βάθους αγκύρωσης η μέγιστη τιμή της κατάστασης CL

είναι 3600 (kN/(H/2)) ενώ της OP είναι 2600 (kN/(H/2)). Στην τελευταία περίπτωση παρουσιάζονται μικρές διαφοροποιήσεις για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, οι οποίες όμως είναι της τάξεως των 500 (kN/(H/2)) που είναι μικρό ποσοστό της προέντασης. Επομένως οι τένοντες 2 και 3 δεν παρουσιάζουν καμία αισθητή παραμόρφωση. Τέλος παρατηρούμε και εδώ την αισθητή διαφοροποίηση μεταξύ των καταστάσεων CL και OP, όπου όταν οι OWC's βρίσκονται σε λειτουργία επηρεάζουν αρνητικά την ευστάθεια/ακαμψία του συστήματος. Σε καταστάσεις CL προκαλούνται υπερδιπλάσιες μέγιστες τάσεις στους τένοντες εν σχέσει με καταστάσεις OP.

7 Συμπεράσματα-προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Από την μέχρι τώρα εφαρμογή των υπεράκτιων κατασκευών Α.Π.Ε., τόσο των ανεμογεννητριών όσο και των μηχανισμών ανάκτησης κυματικής ενέργειας (βλ. Κεφάλαια 1, 2 και 3), αντιλαμβανόμαστε τον καθοριστικό ρόλο που δύνανται να αναλάβουν στον τομέα της παραγωγής 'πράσινης' ενέργειας. Μια πολλά υποσχόμενη κατασκευή μπορεί να αποτελέσει ο συγκερασμός των ανωτέρω, ώστε να γίνεται ταυτόχρονη εκμετάλλευση του ανέμου και του κύματος, κάτι που μελετάται στην παρούσα διπλωματική (τριγωνική πλατφόρμα που αποτελείται από 3 μηχανισμούς ανάκτησης κυματικής ενέργειας OWC και μια ανεμογεννήτρια).

Από τις επιλογές που έχουμε στα συστήματα αγκύρωσης προτιμήθηκε η αγκύρωση με προεντεταμένους τένοντες TLP (Tension Leg Platform). Όπως έχει λεχθεί και στην παράγραφο 2.6.3.1 οι εν λόγω τένοντες βρίσκονται στην κάθε γωνία της πλωτής κατασκευής, όπου μέσω της προέντασης που έχουν δεχτεί περιορίζουν τις αξονικές κινήσεις (heave). Ακόμη προσφέρουν αρκετά καλή ευστάθεια στην κατασκευή, λόγω της σημαντικής ροπής επαναφοράς σε pitch και roll που προσδίδουν. Ωστόσο σημαντική επιρροή στην κατασκευή έχει το βάθος αγκύρωσης, η ταχύτητα των ανέμων και η λειτουργία των ανωστικών σωμάτων ως μηχανισμοί ανάκτησης κυματικής ενέργειας ή μη.

Έτσι από τα διαγράμματα του κεφαλαίου 6 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματά για την επιρροή των ανωτέρω παραμέτρων στην ευστάθειά της προς μελέτη κατασκευής:

- Τα μέγιστα πλάτη των μετακινήσεων Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch και Yaw εντοπίζονται όταν οι τιμές της συχνότητας απόκρισης της κατασκευής τείνει στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος.
- Η μετακίνηση κατά την διεύθυνση Surge είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες, καθώς τόσο ο άνεμος όσο και το κύμα προσπίπτουν στην κατασκευή κατά αυτή τη διεύθυνση.
- Σημαντική επίδραση ωστόσο υπάρχει και κατά την Pitch περιστροφική απόκριση, για τους ίδιους λόγους με Surge, κυρίως εκεί που μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα απόκρισης τείνει στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Στο φάσμα των υπόλοιπων συχνοτήτων διατηρείται σε χαμηλές τιμές η περιστροφή αυτή, λόγω του περιορισμού της από τους προεντεταμένους τένοντες.

- Η μετακίνηση κατά Heave λογίζεται ως πολύ μικρή και ειδικά εν συγκρίσει με την κίνηση κατά Surge. Αυτό οφείλεται στην ακαμψία των τενόντων (TLP) κατά αυτή την διεύθυνση που αποσβένουν την επίδραση των φορτίσεων.
- Η μετακίνηση κατά Heave στα 120m βάθους αγκύρωσης είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή στα 200m (σχεδόν υποτετραπλάσια), λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας kzz στο πρώτο. Ωστόσο οι άλλες 5 μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες για το βάθος αγκύρωσης στα 120m, κάτι που οφείλεται στην αποφόρτιση της κατασκευής μέσω των υπόλοιπων μετακινήσεων αφού κατά Heave υπάρχει μεγαλύτερη ακαμψία.
- Οι μετακινήσεις υπό την επίδραση της ταχύτητας που επέφερε τις μεγαλύτερες δυνάμεις στο στοιχείο της ανεμογεννήτριας, δηλαδή της $U=11.4\text{m/s}$, ήταν ιδιαίτερα επαυξημένες και ειδικά κατά τη Sway διεύθυνση είναι σχεδόν διπλάσιο το πλάτος απόκρισης σε σχέση με το δεύτερο υπό την επίδραση των άλλων ταχυτήτων.
- Η μετακινησιακή συμπεριφορά της κατασκευής παρουσιάζει ομοιομορφία τόσο για διαφορετικές ταχύτητες, όσο και για κατάσταση λειτουργίας ή μη των ανωστικών σωμάτων ως OWC's.
- Κατά την λειτουργία των ανωστικών σωμάτων ως OWC's παρατηρείται αύξηση των πλατών απόκρισης της κατασκευής, κυρίως κατά Surge, Sway και Heave. Ειδικά κατά τη Heave διεύθυνση η απόκριση είναι τετραπλάσια σχεδόν στην CL κατάσταση σε σχέση με την OP. Έτσι η λειτουργία των ανωστικών σωμάτων ως OWC's συνεισφέρει στην μείωση της απόσβεσης της κίνησης του συστήματος.

Ακόμη από τα διαγράμματα 6.26-6.37 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα για την επιρροή των ανωτέρω παραμέτρων (ταχύτητα ανέμου, κατάσταση OP ή CL, βάθος αγκύρωσης) στην ακαμψία του συστήματος:

- Η μέγιστη τάση και η μόνη που ξεπερνά την προένταση των 10800 (kN/(H/2)) παρουσιάζεται στον κλάδο αγκύρωσης '1' για βάθος 120m και σε κατάσταση CL. Η τάση σε αυτήν την περίπτωση είναι: $T1=13000$ (kN/(H/2)) και ξεπερνά αρκετά την προένταση, ώστε να υπάρχει κίνδυνος παραμόρφωσης του τένοντα. Επομένως για να μην υπάρξει τέτοια πιθανότητα, θα πρέπει τα ανωστικά σώματα στην προκειμένη περίπτωση να μην λειτουργούν ως OWC's και να είναι σε κατάσταση OP.
- Οι τάσεις στους τένοντες για τις καταστάσεις λειτουργίας των ανωστικών σωμάτων ως OWC's είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στην κατάσταση CL

(σχεδόν διπλάσιες). Έτσι διαφαίνεται η αρνητική επιρροή των OWC's στην ακαμψία /ευστάθεια της κατασκευής.

- Παρατηρείται γενικότερα φθίνουσα μεταβολή του γραφήματος των τάσεων μετά το δεύτερο τοπικό μέγιστο σε όλες τις περιπτώσεις των T1,T2,T3. Το γεγονός αυτό γίνεται πιο διακριτό με την βοήθεια των λογαριθμικών τιμών τους.
- Στο μικρότερο βάθος έχουμε μεγαλύτερο βαθμό επιρροής της κυματικής διέγερσης σε σχέση με την περίπτωση του συστήματος αγκύρωσης σε βάθος 200m, παρά την μεγαλύτερη ακαμψία των τενόντων για το μικρότερου μήκους σύστημα αγκύρωσης.
- Παρατηρούμε πως η κυματική διέγερση είναι αυτή που επηρεάζει κυριότερα την ακαμψία του συστήματος αφού δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφοροποίηση λόγω μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου.
- Οι τάσεις στους κλάδους αγκύρωσης 2 και 3 (T2 και T3) είναι ίδιας τάξης μεγέθους και σχεδόν ίσες μεταξύ τους, αφού η φορτίσεις από τον άνεμο και το κύμα ασκούνται κατά την διεύθυνση Surge συμμετρικά στα δυο ανωστικά σώματα.

7.2 Προτάσεις

Έπειτα από την ανωτέρω μελέτη της κατασκευής υπό διάφορες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την ευστάθεια και την ακαμψίας της, ενδεχομένως κρίνεται σημαντική και η διερεύνησή της υπό διάφορες άλλες συνθήκες όπως:

- Για διαφορετικό τύπο και υλικό κλάδων αγκύρωσης.
- Για πληθώρα άλλων βαθών αγκύρωσης

Ακόμα σημαντική κρίνεται η σύγκριση των αριθμητικών με πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειράματα έχουν γίνει ήδη στη δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και τα αποτελέσματά τους βρίσκονται υπό επεξεργασία.

Έτσι έπειτα από τα ανωτέρω θα μπορούμε να έχουμε πληρέστερη άποψη για τις ιδανικότερη δυνατή παραμετροποίηση της κατασκευής και καλύτερη εκτίμηση της συμπεριφοράς της σε πραγματικές υπεράκτιες συνθήκες.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ

- [1] <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
Available at www.ren21.net [accessed 5 December 2014]
- [2] <http://www.ewea.org/publications/reports/ewea-annual-report-2013/>. Available
online at www.ewea.org [accessed 5 December 2014].
- [3] <http://www.bp.com/en/global/corporate/press/speeches/international-petroleum-week-2014.html>.
Available at www.bp.com [accessed 5 December 2014]
- [4] http://www.nrel.gov/analysis/sustain_lca_results.html.
Available online at www.nrel.gov [accessed 5 December 2014].
- [5] http://www.zeroenergybuildings.org/2012/03/blog-post_17.html.
Available at www.zeroenergybuildings.org [accessed 18 December 2014].
- [6] <http://www.altaaerosenergies.com/wind.html>.
Available at www.altaaerosenergies.com [accessed 18 December 2014].
- [7] <http://vortexbladeless.com/news.php>.
Available at <http://www.vortexbladeless.com> [accessed 4 January 2015].
- [8] <http://www.riverviewconsultinginc.com/innovators-gallery>.
Available at www.riverviewconsultinginc.com [accessed 4 January 2015].
- [9] Ε. Μπινόπουλος, Π. Χαβιαρόπουλος, “Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων”, “Μύθοι και πραγματικότητα”, ΚΑΠΕ 2006.
- [10] <http://seatwirl.com/technology/the-principle>
Available at <http://seatwirl.com> [accessed 6 May 2015].
- [11] <http://martech.gr/downloads/008.html>. Available at www.martech.gr [accessed 4 January 2015].
- [12] <http://www.aquaticbiosystems.org/content/pdf/2046-9063-10-8.pdf>.
Available at <http://www.aquaticbiosystems.org> [accessed 10 January 2015].
- [13] <http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid269.html>. Available at www.4coffshore.com [accessed 4 January 2015]
- [14] <http://subseaworldnews.com/2011/10/19/forewind-to-use-innovative-met-masts-foundation-design-for-dogger-bank-uk/>.
Available at www.subseaworldnews.com [accessed 10 January 2015]

- [15] <http://www.renewablegreenenergypower.com/offshore-wind-turbines-substructures/>. Available at www.renewablegreenenergypower.com [accessed 4 January 2015]
- [16] <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2014-annual-market-update/>. Available at www.gwec.net [accessed 15 January 2015]
- [17] <http://concretesubmarine.activeboard.com/t46150854/oceanic-wind-turbines-spar-design/>. Available at www.concretesubmarine.com [accessed 3 February 2015]
- [18] <http://breakingenergy.com/2014/05/07/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy/>.
Available at www.breakingenergy.com [accessed 3 February 2015]
- [19] <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>.
Available at www.principlepowerinc.com [accessed 3 February 2015]
- [20] <http://composites.umaine.edu/our-research/offshore-wind/deepcwind-consortium/>. Available at www.deepcwind.org [accessed 9 February 2015]
- [21] *Floating Offshore Wind Foundations: Industry Consortia and Projects in the United States, Europe and Japan—Main(e) International Consulting LLC* May 2013.
- [22] <http://www.renewableenergymagazine.com/article/wave-hub-to-install-and-operate-pelastar-20130909>. Available at www.renewableenergymagazine.com [accessed 9 February 2015]
- [23] <http://www.nauticawindpower.com/engineering/>.
Available at www.nauticawindpower.com [accessed 9 February 2015]
- [24] <http://www.fukushima-forward.jp/english/photo/index.html>.
Available at www.fukushima-forward.jp [accessed 9 February 2015]
- [25] <http://www.fukushima-forward.jp/english/photo/index.html>.
Available at www.maine-intl-consulting.com [accessed 16 February 2015]
- [26] <https://www.nmri.go.jp/main/overview>. Available at www.nmri.go.jp [accessed 16 February 2015]
- [27] http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/en_aboutus_detail04.html.

- Available at www.riam.kyushu-u.ac.jp [accessed 16 February 2015]
- [28] <http://www.modec.com/fps/skwid/>. Available at www.modec.com [accessed 16 February 2015]
- [29] <http://www.mes.co.jp/english/press/2013/pdf/20130628.pdf>.
Available at www.mes.co.jp [accessed 16 February 2015]
- [30] <http://www.mitsubishicorp.com/jp/en/pr/archive/2014/html/0000024897.html>.
Available at <http://www.mitsubishicorp.com/jp> [accessed 18 February 2015]
- [31] <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/e/>.
Available at <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ish> [accessed 18 February 2015]
- [32] <http://www.statoil.com/en/NewsAndMedia/News/2010/Pages/09NovVindTurbin.es.aspx>. Available at www.statoil.com [accessed 18 February 2015]
- [33] <http://floatingpowerplant.com/?pageid=274>
Available at www.floatingpowerplant.com [accessed 18 February 2015]
- [34] <http://www.windsea.no/sfiles/07/1/file/windsea.pdf>.
Available at www.windsea.no [accessed 3 March 2015]
- [35] <http://www.gustomsc.com/index.php/production-semis>.
Available at www.gustomsc.com [accessed 3 March 2015]
- [36] http://www.dvfu.ru/documents/41440/1807051/WEMU_project.pdf/47adbf5d-ad6a-4a91-9b05-a76276274dc5?version=1.0.
Available at www.dvfu.ru/en [accessed 3 March 2015]
- [37] <http://www.blueengineering.com/tablet/technology.html>.
Available at <http://www.blueengineering.com> [accessed 3 March 2015]
- [38] <http://www.gicon-sof.de/sof1.html>. Available at www.gicon.de
[accessed 3 March 2015]
- [39] <http://www.iberdrolaingenieria.com/ibding/noticias.do?op=det&id=133>.
Available at <http://www.iberdrola.com> [accessed 3 March 2015]
- [40] <http://www.xanthusenergy.com/products/downloads/ocean-breeze.pdf>.
Available at www.xanthusenergy.com [accessed 3 March 2015]
- [41] <http://www.sway.no/?page=166>. Available at www.sway.no [accessed 3 March 2015]
- [42] http://nassetwind.com/wp-content/uploads/2013/04/130410_PressRelease_ThetisMREWinfloConsortiumPre

- sentsFloatingWindTurbineTechnology.pdf*. Available at www.nass-et-wind.com [accessed 3 March 2015]
- [43] <http://earthtechling.com/2013/04/french-floater-wind-demo-project-moving-forward/>. Available at www.earthtechling.com [accessed 3 March 2015]
- [44] <http://www.energybrokers.co.uk/news/edf/wind-turbines-are-conquering-the-sea>. Available at www.energybrokers.co.uk [accessed 3 March 2015]
- [45] http://www.ideol-offshore.com/en/floater_overview. Available at www.ideol-offshore.com [accessed 3 March 2015]
- [46] <http://www.pelagicpower.no/about.html>. Available at www.pelagicpower.no [accessed 7 March 2015]
- [47] <http://www.hexicon.eu/offshore-platform/hexicon-platform.html>. Available at www.hexicon.eu [accessed 7 March 2015]
- [48] www.cres.gr/waveplam/downloads/1.%20Soukisian%2021.10.1010.pdf Available at www.cres.gr [accessed 7 March 2015]
- [49] Καθηγητής Σ.Α. Μαυράκος, “Συστήματα Εκμετάλλευσης Θαλάσσιας Ενέργειας”, *Waveplam*, Αθήνα 3 Μαρτίου 2010.
- [50] <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/salters-duck1.htm>. Available at www.science.howstuffworks.com [accessed 20 March 2015]
- [51] <http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/ocean-energy-generating-technologies/wave-energy/>. Available at www.coastalenergyandenvironment.web.unc.edu [accessed 20 March 2015]
- [52] <http://www.waveplam.eu/files/downloads/waveplam.pdf>. Available at www.waveplam.eu [accessed 20 March 2015]
- [53] <http://www.engadget.com/2010/05/23/inhabitats-week-in-green-surfing-renewable-energy-hexagonal-l/>. Available at www.engadget.com [accessed 20 March 2015]
- [54] <http://www.langleewavepower.com/?q=langlee-technology>. Available at www.langleewavepower.com [accessed 14 April 2015]
- [55] http://www.rechargenews.com/news/wave_tidal_hydro/article1282011.ece. Available at www.rechargenews.com [accessed 22 April 2015]

- [56] http://en.openei.org/wiki/MHK_Technologies/Sea_wave_Slot_cone_Generator_SG. Available at en.openei.org [accessed 24 April 2015]
- [57] https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon. Available at en.wikipedia.org [accessed 24 April 2015]
- [58] <http://buildipedia.com/aec-pros/public-infrastructure/pelamis-wave-energy-converter-renewable-energy-from-ocean-waves>. Available at www.buildipedia.com [accessed 24 April 2015]
- [59] http://www.maritimejournal.com/news101/marine-renewable-energy/investment_boost_for_wave_energy. Available at www.maritimejournal.com [accessed 29 April 2015]
- [60] Παναγιωτόπουλος Μιχαήλ, "Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις συστημάτων αξιοποίησης κυματικής ενέργειας. Προώθηση της εισαγωγής από θαλάσσιο κυματισμό στην Ευρωπαϊκή αγορά Α.Π.Ε.", ΚΑΠΕ 2010.
- [61] <http://rsta.royalsocietypublishing.org./content/370/1959/235>. Available at rsta.royalsocietypublishing.org [accessed 29 April 2015]
- [62] <http://cleantechnica.com/2013/10/29/oceanlinx-launches-worlds-first-1-mw-wave-energy-machine-south-australia/>. Available at www.cleantechnica.com [accessed 29 April 2015]
- [63] <http://www.offshorewind.biz/2012/10/29/uk-ocean-energy-plans-to-deploy-ocean-buoy-wave-energy-converter-at-wave-hub/>. Available at www.offshorewind.biz [accessed 6 May 2015]
- [64] <http://www.power-technology.com/projects/pelamis/>. Available at www.power-technology.com [accessed 6 May 2015]
- [65] <http://www.act-us.info/sensordetail.php?ID=13905&cat=&type=>. Available at <http://www.act-us.info> [accessed 6 May 2015]
- [66] L. Skjelbreia "Gravity Waves, Stokes Third-Order Approximation. Tables and Functions" Council on Wave Research, Engineering Foundation, University of California, Berkley 1959.
- [67] Μαυράκος, Σ. Α., Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών 1999. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [68] L. Skjelbreia, J.A.Hendrickson "Fifth Order Gravity Wave Theory". Proceedings 7th Conference on Coastal Engineering, chapter 10, 1961.

- [69] F. Ursell "Mass Transport in Gravity Waves". *Proc. Cambridge Philosophical Society*. 49, Part 1, 1953.
- [70] Det Norske Veritas "Rules for the design, construction and inspection of Offshore Structures", 1979.
- [71] Μαυράκος, Σ. Α., Χατζηγεωργίου, Ι. Κ., Αγκυρώσεις πλωτών κατασκευών, Νοέμβριος, 2007. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [72] D.N. Konispoliatis, S.A. Mavrakos. "Hydrodynamics of arrays of OWC's devices consisting of concentric cylinders restrained in waves," *Proceedings, 10th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2013), International Conference Ocean, Aalborg, Denmark, 2013*.
- [73] J.R. Nader, S.P. Zhu, P. Cooper, B. Steppenbelt, "A finite element study of the efficiency of arrays of oscillating water column wave energy converters," *Ocean Engineering* 43, pp. 72-81, 2012.
- [74] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott. "Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," *Technical Report, NREL/TP-500-38060, USA, 2009*.
- [75] J. Jonkman. "Definition of the Floating System for Phase IV of OC3", *Technical Report NREL/TP-500-47535, USA, 2010*.
- [76] T.P. Mazarakos, D.N. Konispoliatis, D. Manolas, S.G. Voutsinas, S.A. Mavrakos. "Modelling of an offshore multi-purpose floating structure supporting a wind turbine including second-order wave loads", *Proceedings, 12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2015)*.
- [77] J. Falnes. *Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction; Cambridge University Press, 2002*.
- [78] S.A. Mavrakos & P. Koumoutsakos. "Hydrodynamic interaction among vertical axisymmetric bodies restrained in waves," *Applied Ocean Research*, Vol. 9, No. 3, 1987.
- [79] V. Twersky, V. "Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders," *J. Acoustical Soc. of America*, 24 (1), 1952.
- [80] M. Okhusu. "Hydrodynamic forces on multiple cylinders in waves," *Int. Symp. on the Dynamics of Marine Vehicles and structures in Waves, University College London, London, 1974*.

- [81] S.A. Mavrakos. "Hydrodynamic coefficients for groups of interacting vertical axisymmetric bodies," *Ocean Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 485–515, 1991.
- [82] D.V. Evans, R. Porter. "Efficient calculation of hydrodynamic properties of OWC type devices," *OMAE–Volume I – Part B*, pp. 123–132, 1996.
- [83] G. Papadakis, V. Riziotis, S. Voutsinas, S.A. Mavrakos. *W/T's reduced order aeroelastic models (in Greek)*. Technical Report No. D3.2, Program POSEIDON (2014), Greek General Secretariat for Research and Technology, 2014.
- [84] T.P. Mazarakos, S.A. Mavrakos, D.N. Konispoliatis, S.G. Voutsinas, D. Manolas. "Multi- purpose floating structures for offshore wind and wave energy sources exploitation," *COCONET Workshop for Offshore Wind Farms in the Mediterranean and Black Seas, Anavyssos- Greece, 9- 10 June 2014*.