



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**Κυματικές φορτίσεις σε πλωτές ανεμογεννήτριες σε χωροθετημένη
περιοχή της Κρήτης**



ΠΑΣΧΑΛΗΣ ΣΑΡΑΤΖΙΩΤΗΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 ΠΑΣΧΑΛΗΣ ΣΑΡΑΤΖΙΩΤΗΣ

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Βανέσσα Κατσαρδή
Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Χρήστος Δριτσέλης
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Βανέσσα Κατσαρδή, για την καταλυτική βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Χρήστο Δριτσέλη και Λάμπρο Βασιλειάδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις ουσιώδεις υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Σπηλιωτόπουλο και τις διδακτορικές φοιτήτριες Χριστίνα Τσιάρα και Μυρσίνη Ανεστίδη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν, σε κρίσιμα σημεία της εργασίας. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Πασχάλης Σαρατζιώτης

Κυματικές φορτίσεις σε πλωτές ανεμογεννήτριες σε χωροθετημένη περιοχή της Κρήτης

Πασχάλης Σαρατζιώτης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Βανέσσα Κατσαρδή, Επίκουρη Καθηγήτρια

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον υπολογισμό των κυματικών φορτίσεων που ασκούνται σε πλωτή πλατφόρμα έδρασης ανεμογεννήτριας, δυνητικά εγκατεστημένης σε χωροθετημένη περιοχή της Κρήτης. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των κυματικών συνθηκών της περιοχής, βάσει μακροχρόνιων κυματικών δεδομένων από τη βάση ERA5 της ευρωπαϊκής υπηρεσίας Copernicus, από την οποία προσδιορίστηκαν οι ακραίες κυματικές συνθήκες φόρτισης. Οι κυματικές φορτίσεις υπολογίστηκαν μέσω της εξίσωσης Morison, ενώ τα κινηματικά μεγέθη των κυματισμών προέκυψαν από την γραμμική θεωρία Airy και τις μη γραμμικές θεωρίες Stokes 2^{ης} και 5^{ης} τάξης, ώστε να εκτιμηθεί η θεωρία που περιγράφει κατά τον βέλτιστο τρόπο τις κυματικές συνθήκες της περιοχής και κατά συνέπεια αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φορτίσεις στην κατασκευή. Τόσο η ανάλυση των κυματικών συνθηκών, όσο και ο υπολογισμός των κυματικών φορτίσεων έλαβαν χώρα στο λογισμικό περιβάλλον MATLAB. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, επιχειρήθηκε, με την εφαρμογή μεθόδων και πρακτικών που ορίζουν τα πρότυπα σχεδιασμού, να προσδιορισθούν, για πρώτη φορά, οι κυματικές φορτίσεις που ασκούνται σε πλωτή ανεμογεννήτρια, υπό ρεαλιστικές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν θαλάσσιο τεμάχιο της Κρήτης.

Λέξεις Κλειδιά: Αιολική Ενέργεια, πλωτές ανεμογεννήτριες, Copernicus, κυματικές θεωρίες, MATLAB, κυματικές φορτίσεις, Εξίσωση Morison.

Wave loads on floating wind turbines in a designated area of Crete

Paschalis Saratziotis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Vanessa Katsardi, Assistant Professor

Abstract

This thesis concerns the calculation of wave loads exerted on a floating wind turbine foundation platform, potentially installed in a designated area of Crete. To achieve this goal, an analysis of the wave conditions in the area was carried out, based on long-term wave data from the ERA5 database of the European Copernicus service, from which the extreme wave loading conditions were determined. Wave loads were calculated using the Morison equation, while the kinematic parameters of the waves were derived from Airy's linear theory and the 2nd and 5th order Stokes nonlinear theories, in order to assess the theory that best describes the wave conditions in the area and, consequently, more accurately reflects the loads on the structure. Both the analysis of wave conditions and the calculation of wave loads were performed in the MATLAB software environment. As part of the thesis, an attempt was made, by applying methods and practices defined by design standards, to determine, for the first time, the wave loads exerted on a floating wind turbine under realistic conditions representing a sea area near Crete.

Keywords: *Wind Energy, floating wind turbines, Copernicus, wave theories, MATLAB, wave loads, Morison's Equation.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	15
1.1	Στόχος διπλωματικής	19
1.2	Δομή διπλωματικής	20
Κεφάλαιο 2	Περιοχή μελέτης	21
2.1	Συλλογιστική πορεία επιλογής της περιοχής μελέτης	21
2.1.1	Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΥΑΠ	21
2.1.2	Κόστος Κύκλου Ζωής & Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας ΠΟΑΥΑΠ.	24
2.1.3	Επιλογή περιοχής μελέτης	27
2.2	Περιβαλλοντικές συνθήκες	28
2.2.1	Μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των μεγεθών σχεδιασμού	32
Κεφάλαιο 3	Ημιβυθισμένη εξέδρα WindFloat	46
3.1	Κριτήριο για την επιλογή τύπου πλωτής υποδομής	46
3.2	Πλατφόρμα WindFloat	48
3.2.1	Δομή και γεωμετρία	49
3.2.2	Εγκατεστημένα και μελλοντικά έργα	51
3.2.3	Πλεονεκτήματα και καινοτομία	52
Κεφάλαιο 4	Κυματικές Θεωρίες	54
4.1	Κανονικοί κυματισμοί (Steady Waves)	55
4.1.1	Κυματική θεωρία Airy	56
4.1.2	Κυματική θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης (Stokes 2 nd)	59
4.1.3	Κυματική θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης (Stokes 5 th)	61
4.1.4	Διάγραμμα Le Mehaute	63
4.1.5	Καμπυλότητα και ενεργό βάθος	64
4.2	Αποτελέσματα κινηματικών μεγεθών	66
4.2.1	Αποτελέσματα κυματικής θεωρίας Airy	66
4.2.2	Αποτελέσματα κυματικής θεωρίας Stokes 2 ^{ης} τάξης	69

4.2.3	Αποτελέσματα κυματικής θεωρίας Stokes 5 ^{ης} τάξης	73
4.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων κυματικών θεωριών	77
Κεφάλαιο 5	Κυματικές φορτίσεις	82
5.1	Η εξίσωση Morison	82
5.2	Πεδίο εφαρμογής εξίσωσης Morison στην περιοχή μελέτης	85
5.3	Διαδικασία υπολογισμού των φορτίσεων	88
5.4	Αποτελέσματα κυματικών φορτίσεων	92
5.4.1	Κυματικές φορτίσεις με βάση την κινηματική της θεωρίας Airy	92
5.4.2	Κυματικές φορτίσεις με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 2 ^{ης} τάξης	100
5.4.3	Κυματικές φορτίσεις με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 5 ^{ης} τάξης	105
5.4.4	Σύγκριση των κυματικών φορτίσεων	110
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	117
Βιβλιογραφία	120	

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: τιμές σημαντικού ύψους κύματος με περίοδο επαναφοράς T_R	36
Πίνακας 2.2: Κυματικές συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2.....	45
Πίνακας 3.1: Κύριες διαστάσεις WindFloat.....	50
Πίνακας 4.1: καμπυλότητα κυματικού πεδίου	65
Πίνακας 4.2: ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Airy.	67
Πίνακας 4.3: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Airy.....	68
Πίνακας 4.4 Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης.	70
Πίνακας 4.5: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης	72
Πίνακας 4.6: Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Stokes 5 ^{ης} τάξης.	74
Πίνακας 4.7: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης	75
Πίνακας 4.8: Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των κυματισμών των συνθηκών φόρτισης LC1,LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2 ^{ης} τάξης και Stokes 5 ^{ης} τάξης.....	78
Πίνακας 4.9: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης των κυματισμών των συνθηκών φόρτισης LC1,LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2 ^{ης} τάξης και Stokes 5 ^{ης} τάξης.....	80
Πίνακας 5.1: Ο λόγος pd/λ , όπως προκύπτει για κάθε κατηγορία δομικών μελών και συνθήκη φόρτισης.	87
Πίνακας 5.2: Παράμετροι συρτικής και αδρανειακής δύναμης C_D, C_M	91
Πίνακας 5.3: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Airy.....	94
Πίνακας 5.4: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.	97
Πίνακας 5.5: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 2 ^{ης} τάξης.....	102
Πίνακας 5.6: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης.	104

Πίνακας 5.7: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 5 ^{ης} τάξης.	107
Πίνακας 5.8: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης.	109
Πίνακας 5.9: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις και μέγιστη συνολική φόρτιση στην κατασκευή, όπως προκύπτουν με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία και για κάθε συνθήκη φόρτισης.	115

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Χάρτης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας ανά χώρα στην Ευρώπη ((EurObserv'ER, 2025)).	16
Εικόνα 1.2: Τύποι σταθερής έδρασης((a)-(d)) και πλωτών (e) ανεμογεννητριών (Arvan et al., 2023).	17
Εικόνα 2.1: Εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ ανά κατηγορία έδρασης και ωρίμανση ανάπτυξης (ΕΔΕΥΕΠ, 2023).	24
Εικόνα 2.2: Χάρτης καταλληλότητας βάσει LCS για σενάριο 3 - 15MW (Tsiara et al., 2025)	26
Εικόνα 2.3: Χάρτης καταλληλότητας βάσει LCOE για σενάριο 3 - 15MW (Tsiara et al., 2025)	26
Εικόνα 2.4: Υπέρθωση των κατάλληλων περιοχών προς χωροθέτηση ΥΑΠ (μελέτη Π.Θ.) με τις εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ (ΕΠΑ-ΥΑΠ). Βορειοανατολικά φαίνεται το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1 (Tsiara et al., 2025).	27
Εικόνα 2.5: Χάρτης όπου διαφαίνεται το σημείο με συντεταγμένες 35,1° N, 26,3° E, για το οποίο ελήφθησαν τα ωριαία δεδομένα H_s, T_p της περιοχής μελέτης από το ERA5.	30
Εικόνα 2.6: Χρονοϊστορία σημαντικού ύψους κύματος H_s της περιοχής μελέτης για την περίοδο 2001-2017.	31
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα ποσοστιαίας πιθανότητας κοινής εμφάνισης για ζεύγη κυματικών μεγεθών H_s-T_p της περιοχής μελέτης.	32
Εικόνα 2.8: Συναρτήσεις τριπαραμετρικής Weibull και εμπειρικής κατανομής.	37
Εικόνα 2.9: Μετασχηματισμένες συναρτήσεις Weibull και εμπειρικής κατανομής.	39
Εικόνα 2.10: Διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης H_s, T_p , από τα στοιχεία του οποίου προέκυψε συνάρτηση κατανομής της περιόδου κορυφής T_p για το $H_{s,1}$.	40
Εικόνα 2.11: Οι παράμετροι κατανομής μ και σ όπως προκύπτουν από τα δεδομένα T_p για την εκάστοτε τιμή του H_s και από τις συναρτήσεις Bitner-Gregersen.	43
Εικόνα 2.12: Η εμπειρική κατανομή της περιόδου κορυφής T_p για $H_{s,1}$ και οι λογαριθμοκανονικές κατανομές της περιόδου κορυφής T_p για $H_{s,1}$ και $H_{s,50}$ με σημειωμένες τις ενδιάμεσες τιμές τους.	44
Εικόνα 3.1: Τύποι υποδομών υπεράκτιας αιολικής ενέργειας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε λειτουργικά έργα έως το 2023 (McCoy et al., 2024).	46

Εικόνα 3.2: Τύποι υποδομών που θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά έργα (McCoy et al., 2024).....	47
εικόνα 3.3: Η ημιβυθισμένη πλατφόρμα WindFloat, κατά την ρυμούλκησης της στην θέση εγκατάστασης(https://www.power-technology.com/).....	49
Εικόνα 3.4: Η Εξέδρα WindFloat (https://www.mammoet.com/), όπου έχουν επισημανθεί τα κύρια δομικά μέλη της κατασκευής	51
Εικόνα 4.1: Χρονοϊστορία και φασματικό πεδίο κανονικού κυματισμού (Swan, 2007).	55
Εικόνα 4.2: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με την γραμμική θεωρία Airy.	58
Εικόνα 4.3: Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας κατά Airy-Stokes 2 nd σε διάστημα μίας περιόδου $T(x_0=0)$	60
Εικόνα 4.4: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας κατά Fenton (www.johndfenton.com).	62
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ισχύος κυματικών θεωριών (Le Mehaute, 1976)	64
Εικόνα 4.6: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.), κατά Airy.	67
Εικόνα 4.7: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{max}$), κατά Airy.	68
Εικόνα 4.8: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$), κατά Airy.	69
Εικόνα 4.9: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.), κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης.	70
Εικόνα 4.10: Χρονοϊστορία της ανύψωσης του κυματισμού της συνθήκης LC2, κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης, όπου απεικονίζονται και οι δύο όροι της συνάρτησης.	71
Εικόνα 4.11: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{max}$), κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης.	72
Εικόνα 4.12: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$), κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης.	73
Εικόνα 4.13: Χρονοϊστορία της ανύψωσης του κυματισμού της συνθήκης LC2, κατά Stokes 5 ^{ης} τάξης, όπου απεικονίζονται και οι δύο όροι της συνάρτησης.	74
Εικόνα 4.14: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.), κατά Stokes 2 ^{ης} τάξης.	75
εικόνα 4.15: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{max}$), κατά Stokes 5 ^{ης} τάξης.	76

εικόνα 4.16: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$), κατά Stokes 5 ^{ης} τάξης.	76
Εικόνα 4.17: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2 ^{ης} τάξης και Stokes 5 ^{ης} τάξης.	78
Εικόνα 4.18: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{max}$) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2 ^{ης} τάξης και Stokes 5 ^{ης} τάξης.	79
εικόνα 4.19 Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2 ^{ης} τάξης και Stokes 5 ^{ης} τάξης.	81
Εικόνα 5.1: Πεδία εφαρμογής των μεθόδων υπολογισμού κυματικών φορτίσεων (Chakrabarti, 1987).	86
εικόνα 5.2: Διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης H_s-T_p της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται τα πεδία για τα οποία η WindFloat συνολικά θεωρείται μεγάλης κλίμακας κατασκευή και πρέπει να ληφθούν οι επιδράσεις της περίθλασης στον υπολογισμό της συνολικής φόρτισης.	88
εικόνα 5.3: Κάτοψη WindFloat, όπου φαίνεται η διεύθυνση του κυματισμού και η θέση των κολόνων C1,C2 στον άξονα x.	89
Εικόνα 5.4: Η γωνία ανάμεσα στον άξονα του στοιχείου και το διάνυσμα διεύθυνσης του κυματισμού (DNV, 2025).	90
Εικόνα 5.5: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.	93
Εικόνα 5.6: Αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.	96
Εικόνα 5.7: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.	97
Εικόνα 5.8: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.	98

Εικόνα 5.9: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης. .	101
Εικόνα 5.10: Αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης.	103
Εικόνα 5.11: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης.	104
Εικόνα 5.12: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2 ^{ης} τάξης.	105
Εικόνα 5.13: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης. .	106
Εικόνα 5.14: Αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης.	108
Εικόνα 5.15: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης.	109
Εικόνα 5.16: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5 ^{ης} τάξης.	110
Εικόνα 5.17: Χρονοϊστορίες αδρανειακών δυνάμεων και μέγιστης επιτάχυνσης, στην κολόνα C1 από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.	111
Εικόνα 5.18: Χρονοϊστορίες συρτικών δυνάμεων και μέγιστης ταχύτητας, στην κολόνα C1 από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.	112
Εικόνα 5.19: Χρονοϊστορίες συνολικής κυματικής φόρτισης στην κατασκευή και συνιστωσών δυνάμεων, από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.	114
Εικόνα 5.20: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα σε κάθε μία από αυτές, όπως προκύπτουν με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία και για κάθε συνθήκη φόρτισης.	116

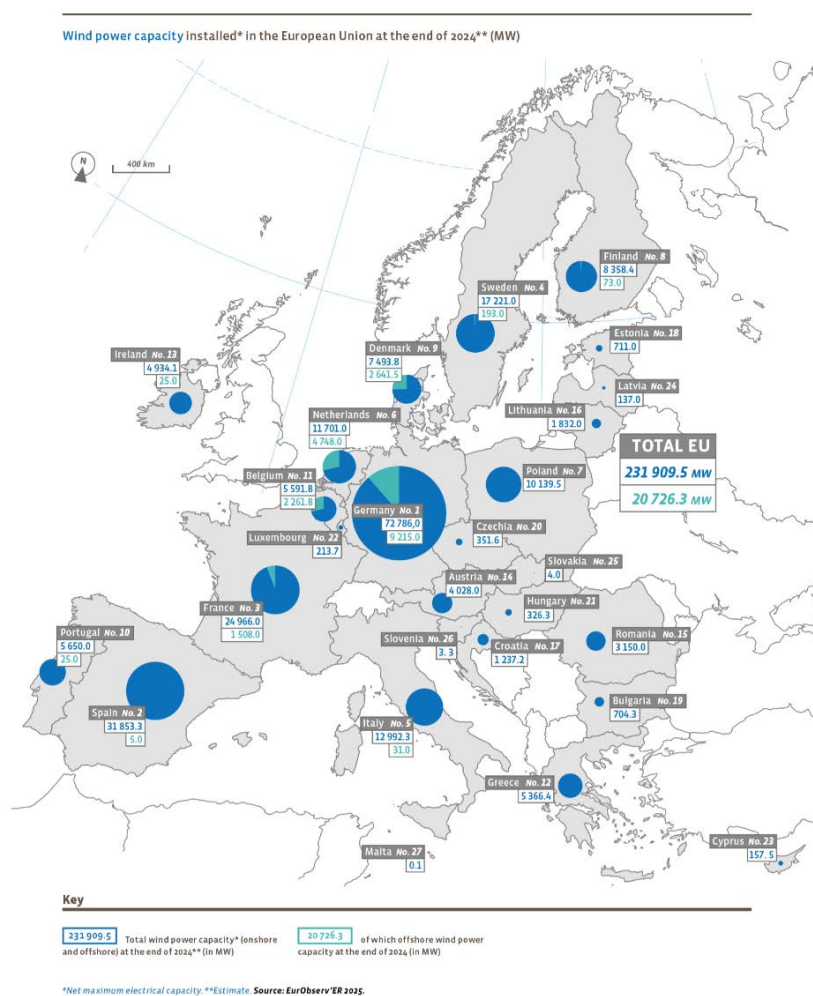
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αλλά και της ενεργειακής κρίσης γίνονται ολοένα και πιο ευδιάκριτες, καθιστώντας την βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) παγκόσμια και αναγκαία πρόκληση. Υπό αυτό το πρίσμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θέσει ως στόχο έως το 2030 τουλάχιστον το 42,5% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας να καλύπτεται από ΑΠΕ, με φιλοδοξία να φτάσει το 45% (European Parliament and Council, 2023), ενώ για το έτος 2024 το ποσοστό αυτό ανήλθε στο 24,5%(Eurostat, 2025).

Όσον αφορά την Αιολική ενέργεια, ήταν η αποδοτικότερη ΑΠΕ ως προς την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για το 2024, καθώς κατείχε το 39,1% της παραγωγής συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Επιπλέον, τα Αιολικά Πάρκα (χερσαία ή υπεράκτια) που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη έως το τέλος του 2024, υπολογίζονται ότι είναι συνολικής ισχύος 231,9 GW(εικόνα 1.1), ενώ ο στόχος της ΕΕ μέχρι το 2030 είναι 500 GW. Από τον χάρτη της εικόνας 1.1 διαφαίνεται επίσης ότι μόνο 20,7 GW προέρχονται από Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (ΥΑΠ) ((EurObserv'ER, 2025)). Ωστόσο, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διεθνή σχετική βιβλιογραφία (Hevia-Koch & Jacobsen, 2019, Kaldellis & Apostolou, 2017, Khan Afridi et al., 2024) καταλήγουν στο γεγονός ότι τα υπεράκτια πάρκα πλεονεκτούν έναντι των χερσαίων, ειδικά αν υπάρχουν αυστηρά περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Ενδεικτικώς, παρατίθενται τα κύρια πλεονεκτήματα των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων:

- Οι υπεράκτιες περιοχές χαρακτηρίζονται από υψηλότερο και πιο σταθερό αιολικό δυναμικό, αυξάνοντας την αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών.
- Η απόσταση από κατοικημένες περιοχές μειώνει την οπτική και ηχητική όχληση, διευκολύνοντας την κοινωνική αποδοχή των έργων.
- Ο ευρύς διαθέσιμος χώρος των θαλάσσιων τεμαχίων επιτρέπει την εγκατάσταση μεγαλύτερης ισχύος ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.
- Τα Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα είναι λιγότερο παρεμβατικά στο φυσικό περιβάλλον και την βιοποικιλότητα.

Τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν τα Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα, σχετίζονται κυρίως με το αυξημένο κόστος (κατασκευής, συντήρησης) έναντι των χερσαίων, αλλά και με τεχνικές δυσκολίες όπως η διασύνδεση με το δίκτυο (Ebenhoch et al., 2015, Barooni et al., 2022). Ωστόσο όλα τα παραπάνω δε φαίνεται να λειτουργούν αποτρεπτικά. Αντιθέτως η Βιομηχανία, με την βοήθεια επενδυτικών προγραμμάτων της ΕΕ, εστιάζει στην έρευνα και την ανάπτυξη τεχνολογιών που αφορούν την υπεράκτια αιολική ενέργεια καθώς αυτή αποτελεί πυλώνα για την πράσινη ενεργειακή μετάβαση της Ευρώπης. Μάλιστα, στόχο της ΕΕ αποτελεί η εγκατάσταση ΥΑΠ συνολικής ισχύος 60 GW μέχρι το 2030 και μακροπρόθεσμα να φτάνει τα 300 GW το 2050.

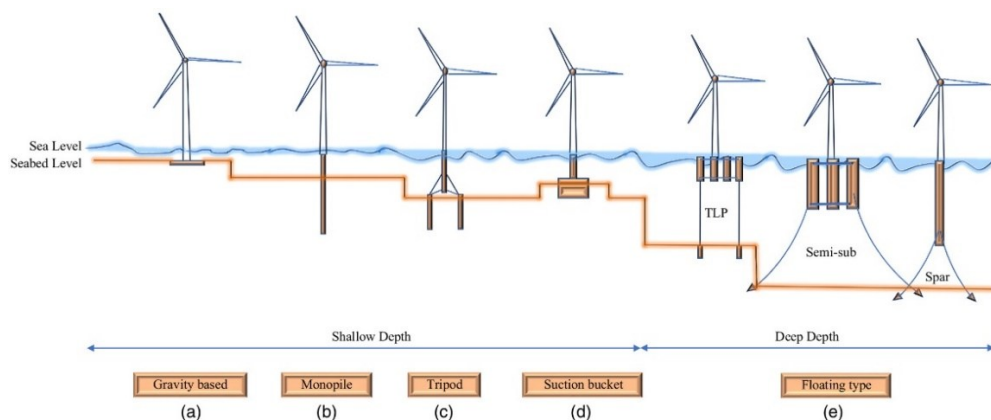


Εικόνα 1.1: Χάρτης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος αιολικής ενέργειας ανά χώρα στην Ευρώπη ((EurObserv'ER, 2025)).

Στην Ελλάδα η εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας προέρχεται εξ ολοκλήρου από χερσαία Αιολικά Πάρκα συνολικής ισχύος 5,36 GW, καθώς έως σήμερα δεν έχει

πραγματοποιηθεί εγκατάσταση ΥΑΠ στο θαλάσσιο χώρο. Ωστόσο, σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) έχει στοχοθετηθεί η εγκατάσταση Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων συνολικής ισχύος 1,9 GW έως το 2030. Για το σκοπό αυτό, η Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων (ΕΔΕΥΕΠ Α.Ε.) έχει αναλάβει την έρευνα και τον προσδιορισμό των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΠΟΑΥΑΠ).

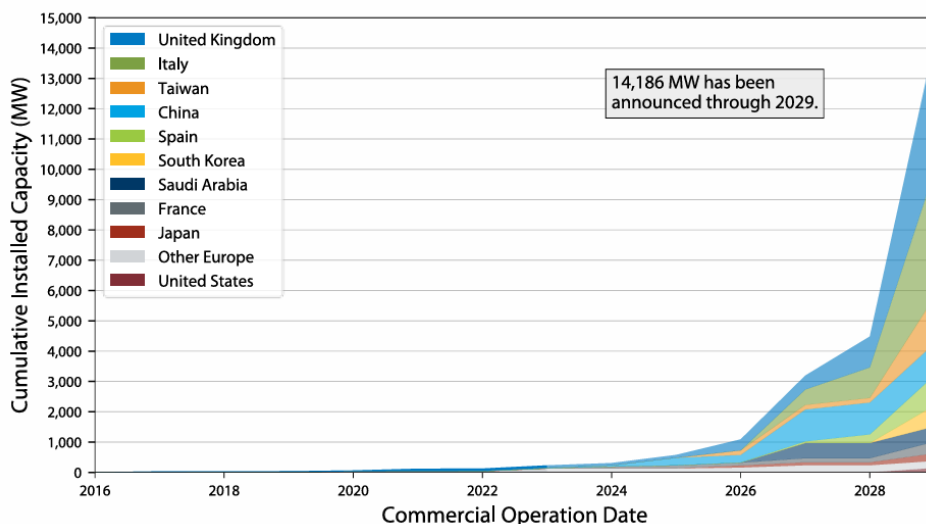
Οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις διακρίνονται σε σταθερής έδρασης (fixed-bottom) και πλωτές (floating). Το βάθος αλλά και οι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του πυθμένα καθορίζουν τον τρόπο έδρασης. Για βάθη περίπου έως και 60 μέτρα επικρατούν οι σταθερής έδρασης κατασκευές, ενώ για μεγαλύτερα βάθη η χρήση τους γίνεται απαγορευτικής εξ' αιτίας της κατακόρυφης αύξησης του κόστους και των τεχνικών δυσκολιών. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται πλωτές εξέδρες ανεμογεννητριών οι οποίες έχουν την δυνατότητα εγκατάστασης σε νερά βάθους έως και 1000 μέτρων.



Εικόνα 1.2: Τύποι σταθερής έδρασης((a)-(d)) και πλωτών (e) ανεμογεννητριών (Arvan et al., 2023).

Στη συντριπτική τους πλειοψηφία, τα εγκατεστημένα, τόσο στην Ευρώπη (Βόρεια θάλασσα) όσο και παγκοσμίως, Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα αφορούν κατασκευές σταθερής έδρασης και η συνολική τους ισχύ υπολογίζεται στα 68 GW. Η διαφορά ανάμεσα σε σταθερής έδραση και πλωτά έγκειται σε μία τάξη μεγέθους, αφού η συνολική ισχύς των πλωτών ΥΑΠ εγκατεστημένων έως τα τέλη του 2023, παγκοσμίως, ανήλθε σε 231,4 MW και προέρχεται από πιλοτικά έργα. Ωστόσο, χάρη στην αλματώδη ανάπτυξη των σχετικών τεχνολογιών σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους, τα πλωτά ΥΑΠ φαίνεται να μεταβαίνουν από πιλοτικής κλίμακας εγχειρήματα σε εμπορικής κλίμακας, πλήρως λειτουργικά έργα. Απόδειξη αποτελεί

το γεγονός ότι έχουν ανακοινωθεί έργα πλωτών ΥΑΠ συνολικής ισχύος 14 GW, ανά τον κόσμο, με χρονικό ορίζοντα λειτουργίας μέχρι το 2029 (McCoy et al., 2024).



Εικόνα 1.2: Εκτιμώμενη συνολική ισχύς πλωτών ΥΑΠ κατά χώρα με βάση τις ανακοινωθείσες ημερομηνίες έναρξης λειτουργίας μέχρι το 2029 (McCoy et al., 2024).

Τα νέα δεδομένα που διαμορφώνονται σχετικά με τα πλωτά ΥΑΠ είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικός καθώς η μεταφορά των παράκτιων ανεμογεννητριών, σε ακτίνα χιλιομέτρων από την ακτή θα έχει πολλαπλά οφέλη σε διάφορους τομείς. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα είναι ότι οι πλωτές πλατφόρμες απαιτούν λιγότερο επεμβατικές αγκυρώσεις σε σύγκριση με τις σταθερές βάσεις, μειώνοντας τις επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Επιπλέον, οι πλωτές εξέδρες μπορούν να κατασκευαστούν και να συναρμολογηθούν πλήρως στην στεριά και να ρυμουλκηθούν έτοιμες στη θέση εγκατάστασης. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το κόστος και οι κίνδυνοι εγκατάστασης. Σημαντικό πλεονέκτημα επίσης αποτελεί το γεγονός ότι, μπορούν να αποφευχθούν διάδρομοι μετανάστευσης πουλιών, η διαταραχή του βυθού και η όχληση της θαλάσσιας πανίδας κατά την εγκατάσταση, αφού δεν απαιτείται «πάκτωση» της ανεμογεννήτριας. Εξαιρετικής σημασίας είναι επίσης ότι χάρη στις πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παρουσιάζεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης ισχυρότερου αιολικού δυναμικού που συγκεντρώνεται σε περιοχές βαθέων υδάτων. Χαρακτηριστικά, το 65% των αιολικών πόρων προς εκμετάλλευση συναντάται σε περιοχές μακριά από την ακτή και με βάθη άνω των 60 μέτρων στην Αμερική, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό ανέρχεται στο 80% για τις Ευρωπαϊκές θάλασσες (Lopez et al., 2022, WindEurope, 2017). Εν κατακλείδι, τα πλωτά

υπεράκτια αιολικά πάρκα προσφέρουν ευελιξία, αυξημένη ενεργειακή απόδοση και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστώντας τα μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Όσον αφορά την θάλασσα της Μεσογείου, καταλληλότερη κρίνεται η εγκατάσταση πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων καθώς οι υψηλές ταχύτητες ανέμου συναντώνται σε περιοχές βαθέων υδάτων (Guidehouse, 2020). Στο πλαίσιο αυτό, χώρες όπως η Ιταλία, η Ισπανία και η Γαλλία φαίνεται να επενδύουν σημαντικά στην πλωτή υπεράκτια αιολική ενέργεια (εικόνα 1.2). Ειδικότερα, οι δυνατότητες ανάπτυξης πλωτών ΥΑΠ στις ελληνικές θάλασσες έχουν διερευνηθεί σε μελέτη για την ΕΔΕΥΕΠ, όπου έχουν αναδειχθεί οι επικρατέστερες περιοχές, ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται και το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1, το οποίο αποτελεί την περιοχή μελέτης στην παρούσα διπλωματική.

1.1 Στόχος διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός των κυματικών φορτίσεων που ασκούνται σε πλωτή πλατφόρμα έδρασης ανεμογεννητριών, δυνητικά χωροθετημένης στο θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1. Για τον σκοπό αυτό, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός και η ανάλυση των κυματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης, διαδικασία που αποτελεί το πρωτότυπο στοιχείο της εργασίας, καθώς βασίστηκε στην στατιστική επεξεργασία μακροχρόνιων κυματικών δεδομένων της περιοχής μελέτης από την βάση ERA5, της ευρωπαϊκής υπηρεσίας για το κλίμα Copernicus. Με βάση τα δεδομένα αυτά, καθορίστηκαν οι ακραίες κυματικές συνθήκες σχεδιασμού, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των φορτίσεων. Οι κυματικές φορτίσεις υπολογίστηκαν μέσω της εξίσωσης Morison, με βάση τα κινηματικά μεγέθη των κυματισμών που προκύπτουν από την γραμμική θεωρία Airy και τις μη γραμμικές θεωρίες Stokes 2^{ης} και 5^{ης} τάξης, ώστε να εκτιμηθεί η θεωρία που περιγράφει κατά τον βέλτιστο τρόπο τις κυματικές συνθήκες της περιοχής και κατά συνέπεια αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φορτίσεις στην κατασκευή. Συνοψίζοντας, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση, για πρώτη φορά, των κυματικών φορτίσεων που ασκούνται σε πλωτή ανεμογεννήτρια, υπό ρεαλιστικές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1.

1.2 Δομή διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι επιμέρους κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2, αρχικώς αναλύεται η συλλογιστική πορεία για την επιλογή του οικοπέδου Κρήτη 1 ως περιοχή μελέτης και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναφορικά με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν, αλλά και τις ακραίες συνθήκες που επιλέχθηκαν για να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό των φορτίσεων. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της ημιβυθισμένης πλατφόρμας WindFloat, για την οποία υπολογίζονται οι φορτίσεις που δέχεται από τις κυματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται σε θεωρητικό υπόβαθρο οι κυματικές θεωρίες που χρησιμοποιήθηκαν και επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κινηματικών μεγεθών που προέκυψαν για κάθε μία από αυτές. Στο πρώτο μέρος του Κεφαλαίου 5 αναλύεται η μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία προέκυψαν οι κυματικές φορτίσεις της πλατφόρμας WindFloat, ενώ στο δεύτερο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία. Εν τέλει, στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία και προτείνονται πεδία που χρήζουν περεταίρω επιστημονικής διερεύνησης.

Κεφάλαιο 2 Περιοχή μελέτης

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συλλογιστική πορεία για την επιλογή περιοχής μελέτης η οποία, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αλλά και δυνητικά στα επόμενα χρόνια, προσφέρεται για χωροθέτηση Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου. Επιπρόσθετα, αναλύονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής με ιδιαίτερη έμφαση στα κυματικά μεγέθη, τα οποία στην παρούσα εργασία καθορίζουν τις φορτίσεις της υπεράκτιας κατασκευής.

2.1 Συλλογιστική πορεία επιλογής της περιοχής μελέτης

Η επιλογή της περιοχής έγινε σύμφωνα με την μελέτη για τις εν δυνάμει Περιοχές Οργανωμένης ανάπτυξης ΥΑΠ στα πλαίσια του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης ΥΑΠ και της ερευνητικής μελέτης, που εκπονήθηκε από το τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σχετικά με την βέλτιστη χωροθέτηση ΥΑΠ.

2.1.1 ΕΘΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΑΠ

Κινούμενη στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής πολιτικής για την υπεράκτια αιολική ενέργεια, η Ελλάδα έχει θέσει ως στόχο την εγκατάσταση ΥΑΠ συνολικής ισχύος 1,9 GW έως το 2030. Για το σκοπό αυτό, η Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών πόρων (ΕΔΕΥΕΠ), ως δημόσιος αρμόδιος φορέας, εξέδωσε το 2023 το σχέδιο του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης ΥΑΠ (ΕΠΑ-ΥΑΠ) του οποίου αναμένεται η έγκριση με Κοινή Υπουργική Απόφαση για να τεθεί σε εφαρμογή. Στα πλαίσια του ΕΠΑ-ΥΑΠ, εντοπίστηκαν οι εν δυνάμει Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ (ΠΟΑΥΑΠ), δηλαδή οι κατάλληλες περιοχές που δυνητικά μπορούν να εγκατασταθούν Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα, αλλά και η εκτιμώμενη ισχύς τους εφόσον εγκατασταθούν εντός αυτών των περιοχών. Για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση των εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ ελήφθησαν υπόψη τρεις κατηγορίες κριτηρίων:

- Κατηγορία Α – Κριτήρια αποκλεισμού περιοχών: εφαρμόζονται για τον εντοπισμό των περιοχών αποκλεισμού και σχετίζονται με τεχνοοικονομικές συνθήκες, περιορισμούς και απαιτήσεις αρμόδιων φορέων της εκάστοτε περιοχής.
- Κατηγορία Β – Κριτήρια αξιολόγησης για προτεραιοποίηση: εφαρμόζονται για την προτεραιοποίηση των εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα ανάπτυξης. Οι μεσοπρόθεσμης ανάπτυξης περιοχές κρίνονται αυτές που αναμένονται να αναπτυχθούν έως το 2030-2032 και οι συνθήκες τους επιτρέπουν την

εγκατάσταση και λειτουργία ΥΑΠ με συγκριτικά χαμηλότερο κόστος και αυξημένη απόδοση. Αντιθέτως οι μακροχρόνιες εν δυνάμει ΠΟΥΑΠ αναμένεται να αναπτυχθούν μετά το 2030-2032, καθώς οι πιθανές τεχνολογικές εξελίξεις θα επιτρέπουν την μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας ΥΑΠ, κυρίως για έργα πλωτής έδρασης.

- Κατηγορία Γ – Κριτήρια αξιολόγησης περιοχών σε επόμενα στάδια μελετών: αφορούν κανόνες που λαμβάνονται υπόψη σε επόμενα στάδια μελετών και σχετίζονται με τελική οριοθέτηση των ΠΟΥΑΠ, την βέλτιστη χωροθέτηση των έργων εντός αυτών και την προοπτικές βελτιστοποίησης της επενδυτικών αποφάσεων.

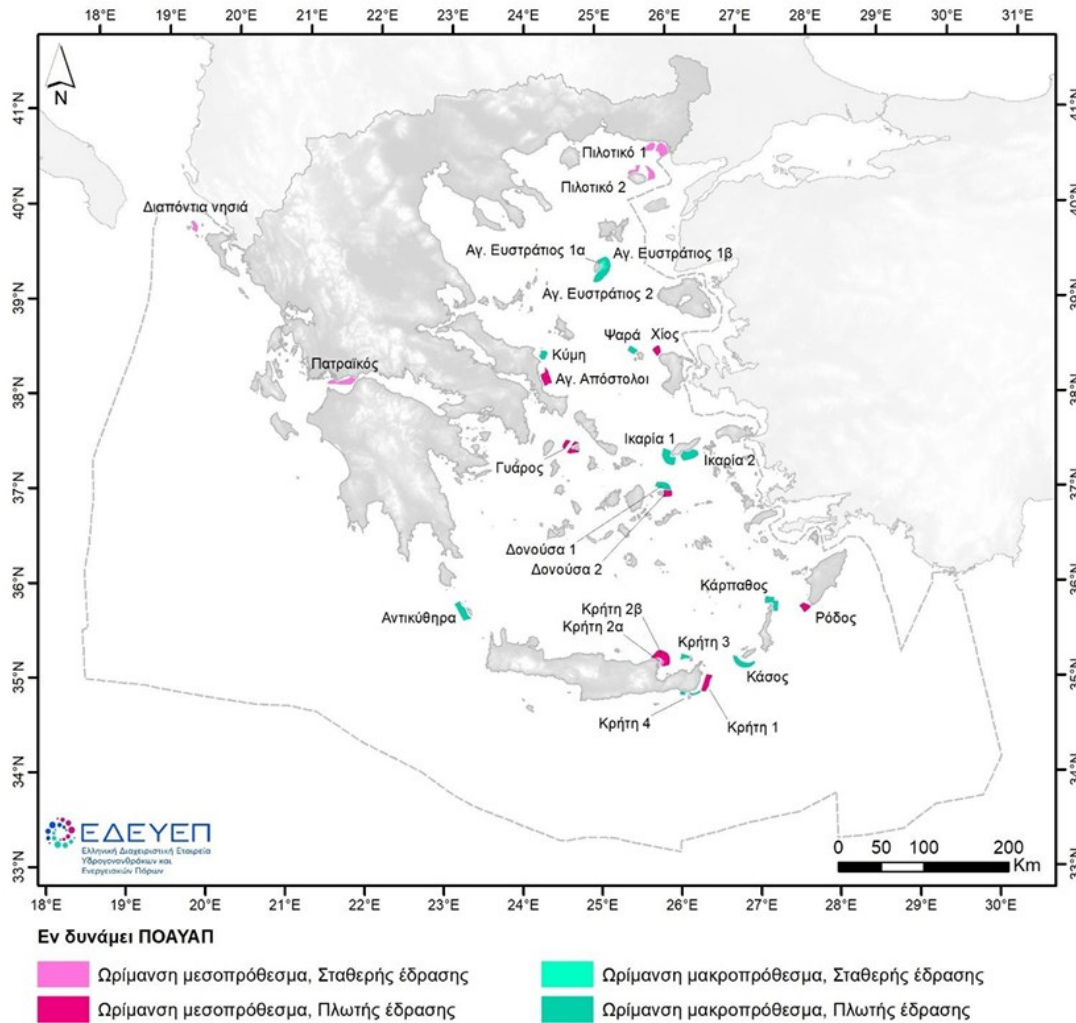
Τα ελληνικά χωρικά ύδατα και η ελάχιστη απόσταση από την ακτογραμμή καθόρισαν το πεδίο εφαρμογής των κριτηρίων, η οποία στα πλαίσια της μελέτης για την οριοθέτηση των εν δυνάμει ΠΟΥΑΠ έγινε διαδοχικά. Με την εφαρμογή των κριτηρίων αποκλεισμού προέκυψαν οι δυνητικά εκμεταλλεύσιμες ζώνες οριοθέτησης. Οι τεχνικές προδιαγραφές που συμπεριλήφθηκαν στον αποκλεισμό περιοχών σχετίζονται με την βαθυμετρία και την ταχύτητα ανέμου. Ειδικότερα, θαλάσσιες περιοχές με βάθος πυθμένα μεγαλύτερο των χιλίων μέτρων αποκλείστηκαν, καθώς τα επιτρεπτά όρια βαθυμετρίας για πλωτά αιολικά πάρκα με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια είναι τα 1.000 m. Επιπλέον, για περιοχές σταθερής έδρασης ΥΑΠ το κατώτατο όριο μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου (100 m από την επιφάνεια της θάλασσας) τέθηκε στα 6,5 m/s, ενώ για πλωτής έδρασης στα 8 m/s. Ο λόγος της διαφοροποίησης των κατώτατων ορίων ανάλογα το είδος έδρασης έγκειται στο γεγονός ότι, τα πλωτά αιολικά πάρκα απαιτούν μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό και κατ' επέκταση μεγαλύτερη απόδοση για να καταστούν οικονομικά βιώσιμα, εξαιτίας των μεγαλύτερων δαπανών σε σχέση με τα σταθερής έδρασης ΥΑΠ.

Από τις δυνητικά εκμεταλλεύσιμες ζώνες οριοθέτησης που προέκυψαν, για εγκατάσταση σταθερής έδρασης ΥΑΠ προσφέρεται έκταση 799 km², ενώ για πλωτής έδρασης έργα είναι διαθέσιμη έκταση 16.955 km². Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της μελέτης, περιοχές με βάθος πυθμένα μικρότερο των 70 μέτρων διατίθενται για σταθερής έδρασης έργα και για πλωτής έδρασης περιοχές με βάθος άνω των 60 μέτρων.

Έπειτα διεξήχθη ποιοτική αξιολόγηση των δυνητικά εκμεταλλεύσιμων ζωνών με αποτέλεσμα να προκύψει η οριοθέτηση είκοσι τριών εν δυνάμει ΠΟΥΑΠ με σχετικά υψηλό βαθμό βεβαιότητας ανάπτυξης. Η συνολική έκταση των εν δυνάμει Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ και η εκτιμώμενη συνολική ισχύς εντός αυτών ανέρχονται σε 2.359 km² και

11,8 GW, αντίστοιχα. Έκταση 2.076 km² καταλαμβάνουν οι προοριζόμενες για πλωτής έδρασης ΥΑΠ περιοχές με συνολική εκτιμώμενη ισχύ 10,4 GW, ενώ η έκταση των περιοχών που θα φιλοξενήσουν σταθερής έδρασης ΥΑΠ υπολογίζεται στα 283 km² με εκτιμώμενη ισχύ 1,4 GW. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των προτεινόμενων περιοχών αφορά πλωτής έδρασης ΥΑΠ, στα οποία δύναται να εγκατασταθεί η πλειονότητα της συνολικής ισχύος.

Ο χαρακτηρισμός των εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ ως μεσοπρόθεσμης ή μακροπρόθεσμης ωρίμανσης έγινε σύμφωνα με το βάθος πυθμένα, την ταχύτητα ανέμου, την διαθεσιμότητα διασύνδεσης/χωρητικότητας στο δίκτυο και την εκτίμηση ισχύος συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ανεμογεννητριών. Ως εκ τούτου, δέκα από τις είκοσι τρεις εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ χαρακτηρίστηκαν ως μεσοπρόθεσμης ωρίμανσης περιοχές, συνολικής έκτασης 978 km² και ισχύος 4,9 GW, ενώ οι υπόλοιπες δεκατρείς ως μακροπρόθεσμης ωρίμανσης, συνολικής έκτασης 1.381 km² και εκτιμώμενης ισχύος 6,9 GW. Τρεις από τις δέκα εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ μεσοπρόθεσμης ωρίμανσης προσφέρονται για χωροθέτηση σταθερής έδρασης ΥΑΠ (εκτιμώμενη συνολική ισχύς 1,16 GW) και οι υπόλοιπες επτά για πλωτής έδρασης ΥΑΠ (εκτιμώμενη συνολική ισχύς 3,71 GW). Σχετικά με τις μακροπρόθεσμης ωρίμανσης προτεινόμενες περιοχές, δώδεκα από τις δεκατρείς αφορούν πλωτής έδρασης έργα (εκτιμώμενη συνολική ισχύς 6,65 GW) και μόνο μία περιοχή προσφέρεται για σταθερής έδρασης ΥΑΠ (εκτιμώμενη συνολική ισχύς 250 MW).



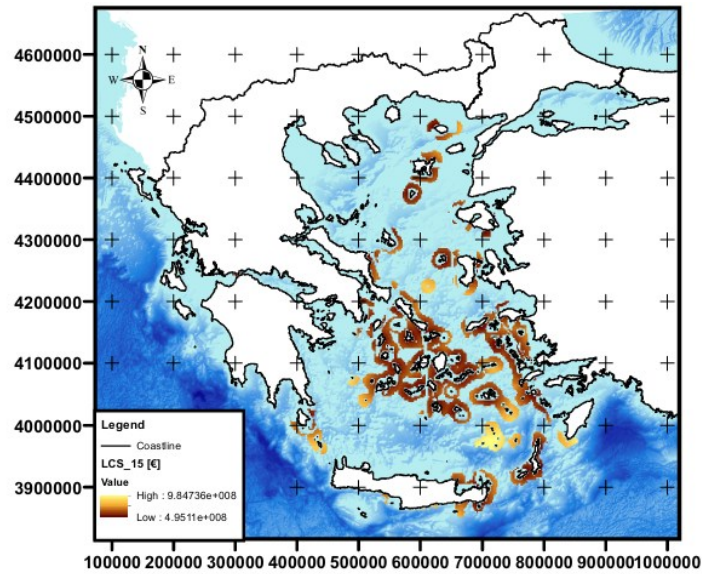
Εικόνα 2.1: Εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ ανά κατηγορία έδρασης και ωρίμανση ανάπτυξης (ΕΔΕΥΕΠ, 2023).

2.1.2 ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ & ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΑΥΑΠ.

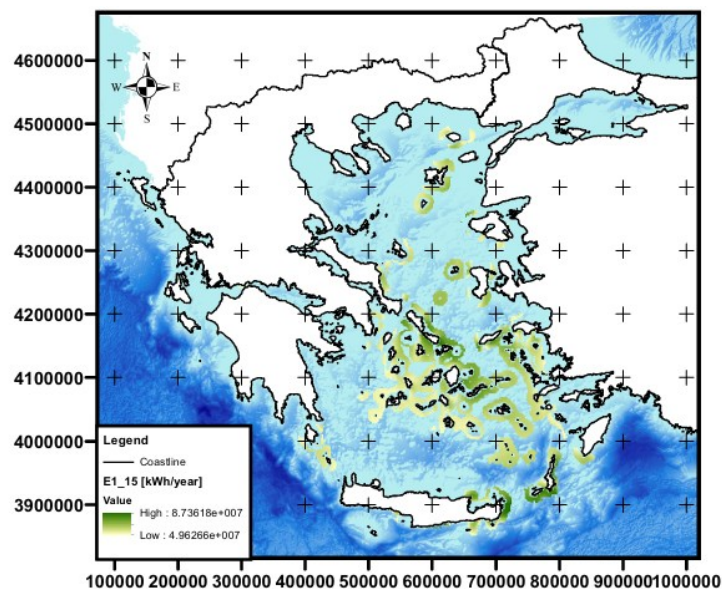
Αντίστοιχη μελέτη, αναφορικά με την βέλτιστη χωροθέτηση Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα, πραγματοποιήθηκε από ερευνητική ομάδα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Tsiara et al., 2025). Σε πρώτη φάση, για τον εντοπισμό των κατάλληλων περιοχών εφαρμόστηκαν κριτήρια, προερχόμενα από την σχετική νομοθεσία και την διεθνή βιβλιογραφία. Οι κατάλληλες περιοχές αξιολογήθηκαν βάσει κόστους υπολογίζοντας το Κόστος Κύκλου Ζωής LCS (Life-cycle Cost System), το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας LCOE (Levelized Cost of Energy). Τελικό στάδιο της μελέτης αποτέλεσε η σύγκριση των βέλτιστων θαλάσσιων τεμαχίων που προέκυψαν, με τις εν δυνάμει Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ.

Όσον αφορά τα κριτήρια που εφαρμόστηκαν, η πρώτη δέσμη είχε χαρακτήρα αποκλεισμού με σκοπό την εξαίρεση περιοχών όπου η ανάπτυξη ΥΑΠ είναι τεχνοοικονομικά ή περιβαλλοντικά μη βιώσιμη. Συνεπώς ο εντοπισμός των δυνητικά εκμεταλλεύσιμων ζωνών κατέστη εφικτός με την εφαρμογή τεχνοοικονομικών, περιβαλλοντικών κριτηρίων και κριτηρίων όχλησης. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι μερικά από τα περιβαλλοντικά κριτήρια αποκλεισμού που εφαρμόστηκαν στην σχετική έρευνα, στα πλαίσια του ΕΠΑ-ΥΑΠ λαμβάνονται υπόψη σε επόμενα στάδια μελετών, εφόσον η εκάστοτε περιοχή προέλθει σε φάση ανάπτυξης. Το συμπέρασμα που προέκυψε σε αυτό το στάδιο της μελέτης είναι ότι οι περισσότερες εκμεταλλεύσιμες ζώνες αφορούν την ανάπτυξη πλωτών ΥΑΠ, ενώ οι διαθέσιμες περιοχές για σταθερής έδρασης έργα είναι περιορισμένες εξαιτίας της μορφολογίας του πυθμένα και της βαθυμετρίας των ελληνικών θαλασσών.

Η ποιοτική αξιολόγηση των κατάλληλων, προς ανάπτυξη πλωτών ΥΑΠ, εκτάσεων έγινε μέσω του υπολογισμού του Κόστους Κύκλου Ζωής LCS [€] και του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας LCOE [€/MWh]. Ο δείκτης LCS αναφέρεται στο συνολικό κόστος που απαιτείται καθ' όλη την διάρκεια ζωής του έργου και ο δείκτης LCOE καταδεικνύει το μέσο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα. Ο υπολογισμός των προαναφερθέντων μεγεθών έγινε συναρτήσει του βάθους της περιοχής, της απόστασης από τον πλησιέστερο λιμένα και της ταχύτητας ανέμου στα 100 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον, οι οικονομικοί δείκτες προσδιορίστηκαν για τρία σενάρια, στο καθένα από τα οποία διαφέρει η ισχύς των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών και η οποία ανέρχεται σε 5, 10 και 15 MW, αντίστοιχα για κάθε σενάριο. Ωστόσο, η συνολική ισχύς του χωροθετημένου ΥΑΠ παραμένει σταθερή (210 MW) σε κάθε σενάριο, όπως και η πλωτή πλατφόρμα έδρασης των ανεμογεννητριών. Τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας διαδικασίας οπτικοποιήθηκαν μέσω Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) και εξήχθησαν οι χάρτες καταλληλότητας βάσει των οικονομικών δεικτών LCS και LCOE για κάθε σενάριο.



Εικόνα 2.2: Χάρτης καταλληλότητας βάσει LCS για σενάριο 3 - 15MW (Tsiara et al., 2025)



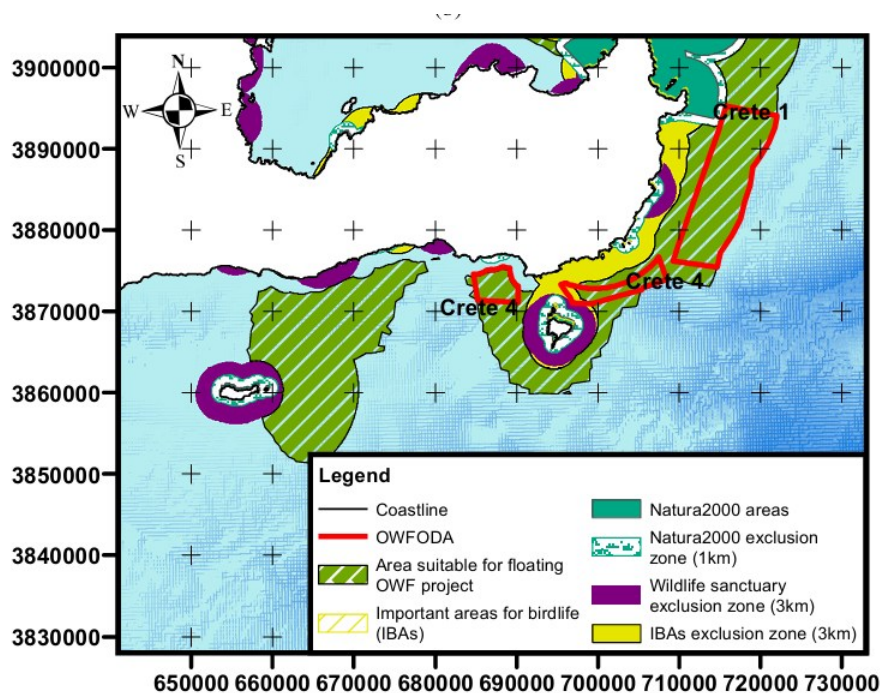
Εικόνα 2.3: Χάρτης καταλληλότητας βάσει LCOE για σενάριο 3 - 15MW (Tsiara et al., 2025)

Σε τελευταία φάση, έγινε συγκριτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τις εν δυνάμει Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης που προέκυψαν από την μελέτη του ΕΠΑ-ΥΑΠ. Ειδικότερα, έγινε υπέρθεση των χαρτών καταλληλότητας στις προτεινόμενες ΠΟΑΥΑΠ, με στόχο να παρασταθούν γραφικά οι διαφοροποιήσεις των δύο μελετών ως προς τις μεθοδολογίες και τα κριτήρια που ακολουθήθηκαν αλλά και να αξιολογηθούν οι προτεινόμενες περιοχές σύμφωνα με το ποσοστό συμφωνίας επί της έκτασης. Συγκεκριμένα, το ποσοστό συμφωνίας επί της έκτασης δεκατεσσάρων από τις είκοσι τρεις ΠΟΑΥΑΠ

ξεπέρασε το 75%, ενώ δύο εξ' αυτών ,τα τεμάχια Κρήτη 1 και Κρήτη 2β, επικαλύφθηκαν πλήρως με τους χάρτες καταλληλότητας, φτάνοντας σε 100% ποσοστό συμφωνίας. Το μειωμένο ποσοστό συμφωνίας επί της έκτασης των υπόλοιπων ΠΟΥΑΠ οφείλεται κυρίως σε περιβαλλοντικά κριτήρια.

2.1.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Από τα δεδομένα για τις εν δυνάμει ΠΟΥΑΠ που διατίθενται στο Σχέδιο ΕΠΑ-ΥΑΠ σε συνδυασμό με τους χάρτες καταλληλότητας και το ποσοστό συμφωνίας επί της έκτασης που προκύπτουν από την έρευνα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ., η καταλληλότερη περιοχή για ανάπτυξη ΥΑΠ φαίνεται να είναι το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1. Το εν λόγω τεμάχιο βρίσκεται ανατολικά της Κρήτης, απέχει 4,62 km από την ακτή και έκταση του ανέρχεται σε 118 km², εντός της οποίας η συνολική ισχύς που εκτιμάται ότι μπορεί εγκατασταθεί είναι 590 MW, ενώ προσφέρεται για πλωτής έδρασης ΥΑΠ αφού το μέσο βάθος της περιοχής είναι 400 μέτρα.



Εικόνα 2.4: Υπέρθεση των κατάλληλων περιοχών προς χωροθέτηση ΥΑΠ (μελέτη Π.Θ.) με τις εν δυνάμει ΠΟΥΑΠ (ΕΠΑ-ΥΑΠ). Βορειοανατολικά φαίνεται το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1 (Tsiara et al., 2025).

Καταρχάς, όσον αφορά τα πλεονεκτήματα μεμονωμένα από την μελέτη της ΕΔΕΥΕΠ, το θαλάσσιο οικόπεδο Κρήτη 1 έχει κριθεί ως μεσοπρόθεσμης ωρίμανσης εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ. Η μέση ταχύτητα ανέμου, η οποία ισούται με 9,9 m/s και πνέει στη συγκεκριμένη περιοχή, είναι η μεγαλύτερη ανάμεσα στις είκοσι τρεις προτεινόμενες ΠΟΑΥΑΠ και κατ' επέκταση η απόδοση των αιολικών εγκαταστάσεων ενδέχεται να είναι συγκριτικά αυξημένη. Αναφορικά με την απόσταση διασύνδεσης στο δίκτυο η οποία αποτελεί σημαντική παράμετρο ως προς το κόστος, το οικόπεδο Κρήτη 1 απέχει 14 km από το πλησιέστερο σημείο σύνδεσης και είναι η δεύτερη μικρότερη απόσταση σε σχέση με των υπολοίπων ΠΟΑΥΑΠ. Επιπλέον, η ανάπτυξη ΥΑΠ εντός του οικοπέδου Κρήτη 1 δεν εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες, καθώς από την αυστηρότερη ως προς τα περιβαλλοντικά κριτήρια έρευνα του Π.Θ. προκύπτει 100% ποσοστό συμφωνίας επί της έκτασης. Τέλος, ο δείκτης μέσου Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας LCOE (3^ο σενάριο) ο οποίος μπορεί να καθορίσει το επενδυτικό ενδιαφέρον, για την συγκεκριμένη περιοχή είναι ίσος 77,54 €/MWh και αποτελεί την τρίτη μικρότερη τιμή, με ελάχιστη διαφορά από τις υπόλοιπες δύο (χαμηλότερος LCOE=76,35 €/MWh).

Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω, επιλέχθηκε η εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ Κρήτη 1 ως η περιοχή χωροθέτησης ΥΑΠ. Κατά συνέπεια, οι περιβαλλοντικές συνθήκες της καθορίζουν τον τύπο έδρασης της υπεράκτιας κατασκευής αλλά και τις κυματικές φορτίσεις τις οποίες αυτή δέχεται.

2.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Με τον όρο περιβαλλοντικές συνθήκες εννοούνται τα φυσικά χαρακτηριστικά και φαινόμενα της εκάστοτε περιοχής όπως οι κυματισμοί, ο άνεμος, τα ρεύματα και οι παλίρροιες, τα οποία μετουσιώνονται σε περιβαλλοντικές φορτίσεις με τις οποίες καταπονούνται οι υπεράκτιες κατασκευές. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εφόσον δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ανέμου και των ρευμάτων, για τον υπολογισμό των κυματικών φορτίσεων, της χωροθετημένης εντός του θαλάσσιου οικοπέδου Κρήτη 1, υπεράκτιας κατασκευής απαιτούνται να είναι γνωστές οι κυματικές συνθήκες της περιοχής. Για το λόγο αυτό, κυματικά δεδομένα της περιοχής ελήφθησαν από την ευρωπαϊκή υπηρεσία για την κλίμα Copernicus Climate Change Service (C3S) και έπειτα από την επεξεργασία τους στο λογισμικό περιβάλλον MATLAB, προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες και διαγράμματα σχετικά με τις κυματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

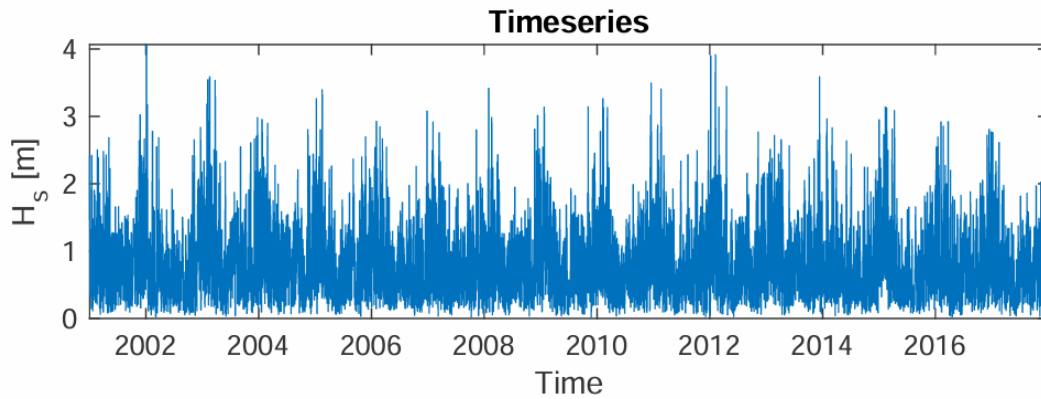
Αναλυτικότερα, για τον προσδιορισμό των κυματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης, αξιοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα που παρέχονται από την υπηρεσία από την υπηρεσία Copernicus Climate Data Store (CDS) και έχουν προκύψει από το σύστημα ανάλυσης ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων Καιρού (ECMWF). Το σύστημα ανάλυσης ERA5 χρησιμοποιώντας επιτόπιες παρατηρήσεις σε συνδυασμό με μεθόδους αριθμητικής πρόγνωσης παρέχει συνεπή και υψηλής ανάλυσης ωκεανογραφικά και ατμοσφαιρικά δεδομένα για παγκόσμια κάλυψη. Η χρονική ανάλυση των δεδομένων είναι ωριαία, ενώ η χωρική διακριτοποίηση ανέρχεται σε 30 km. Για τις περιοχές της Μεσογείου η βάση δεδομένων ERA5 καλύπτει την περίοδο 2001-2017.

Ως εκ τούτου, από τη βάση αυτή και για την περίοδο 2001-2017, αντλήθηκαν τα ωριαία δεδομένα του σημαντικού ύψους κύματος H_s και της περιόδου κορυφής T_p , για τις γεωγραφικές συντεταγμένες (35,1° N, 26,3° E) που ορίζουν σημείο περίπου στο μέσο της επιφάνειας του θαλάσσιου τεμαχίου Κρήτη 1. Ο πυθμένας στο συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται σε βάθος 185 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας της χωρικής ανάλυσης των 30 χιλιομέτρων των δεδομένων, για τους υπολογισμούς των κινηματικών μεγεθών και κατ' επέκταση των κυματικών φορτίσεων λαμβάνεται υπόψη το μέσο βάθος της περιοχής μελέτης ($d=400$ m), το οποίο δίνεται από το Σχέδιο ΕΠΑ-ΥΑΠ. Διευκρινίζεται επίσης, ότι το σημαντικό ύψος κύματος H_s ορίζεται ως ο μέσος όρος του ανώτερου τρίτου των υψών κύματος και αποτελεί καθιερωμένο δείκτη της κυματικής ενέργειας στο θαλάσσιο πεδίο, ενώ η περίοδος κορυφής T_p σχετίζεται με την συχνότητα στην οποία το φάσμα πυκνότητας κυματικής ενέργειας λαμβάνει την μέγιστη τιμή του, εκφράζοντας έτσι την κυρίαρχη φασματική συνιστώσα των κυματισμών. Τα δύο αυτά μεγέθη χρησιμοποιούνται ως θεμελιώδη χαρακτηριστικά στην περιγραφή και ανάλυση του κυματικού πεδίου.



Εικόνα 2.5: Χάρτης όπου διαφαίνεται το σημείο με συντεταγμένες $35,1^{\circ}$ N, $26,3^{\circ}$ E, για το οποίο ελήφθησαν τα ωριαία δεδομένα H_s , T_p της περιοχής μελέτης από το ERA5.

Η επεξεργασία των ωριαίων δεδομένων H_s και T_p από την βάση ERA5 έλαβε χώρα στο λογισμικό περιβάλλον MATLAB. Αρχικώς, δημιουργήθηκε το διάγραμμα της ιστορίας του σημαντικού ύψους κύματος H_s της περιοχής μελέτης (εικόνα 2.6) και επί της ουσίας αποτελεί μια ακολουθία χρονικών στιγμών στην οποία καταγράφεται η διακύμανση της κυματικής έντασης ως προς το σημαντικό ύψος κύματος. Κατά την διάρκεια των δεκαεπτά ετών, φαίνεται πως το μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος H_s προσέγγισε τα 4 μέτρα, ενώ η μέση τιμή αυτού δεν ξεπερνά τα 2 μέτρα. Η ιστορία του σημαντικού ύψους κύματος παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη χρονική μεταβλητότητα και τα ακραία γεγονότα εντός της περιόδου που καλύπτει, πάρα ταύτα δεν επαρκεί από μόνη της για την πλήρη περιγραφή των κυματικών συνθηκών και κατ' επέκταση για την επιλογή μεγεθών, που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των κατασκευών. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία διαγράμματος κοινής πιθανότητας εμφάνισης μεταξύ των μεγεθών H_s και T_p .



Εικόνα 2.6: Χρονοϊστορία σημαντικού ύψους κύματος H_s της περιοχής μελέτης για την περίοδο 2001-2017.

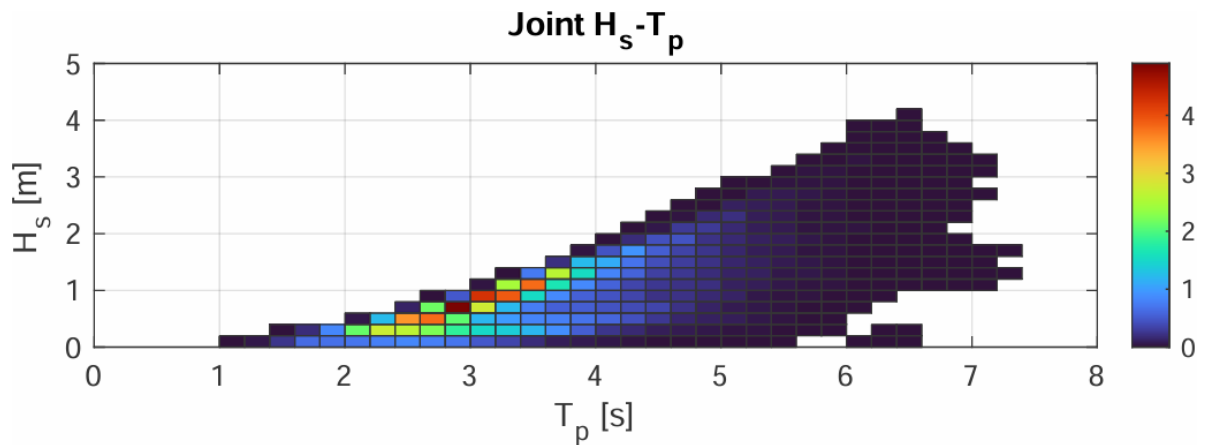
Το διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης (joint probability diagram) αποτυπώνει τη στατιστική κατανομή των συνδυασμών μεταξύ του σημαντικού ύψους κύματος H_s και της περιόδου κορυφής του φάσματος T_p στην περιοχή μελέτης. Ο δισδιάστατος χώρος των τιμών H_s, T_p χωρίζεται σε ισομεγέθη διαστήματα (bins) πλάτους ΔH_s και ΔT_p , αντίστοιχα. Σε κάθε ζεύγος διαστημάτων αντιστοιχεί κελί, στο οποίο περιέχεται αριθμός που εκφράζει το ποσοστό των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες τα δύο μεγέθη εμφανίζονται ταυτόχρονα εντός αυτών των διαστημάτων. Η εκτίμηση αυτής της πιθανότητας βασίζεται στα ακόλουθο εμπειρικό τύπο:

$$p_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_{total}} 100\% \quad (2.2.1)$$

- Όπου :

- $p_{i,j}$: Η εκτιμώμενη ποσοστιαία πιθανότητα κοινής εμφάνισης του συνδυασμού $H_s \in i$ διάστημα και $T_p \in j$ διάστημα .
- $N_{i,j}$: Ο αριθμός των χρονικών στιγμών (παρατηρήσεων), κατά τις οποίες οι τιμές των μεγεθών H_s, T_p εμπίπτουν ταυτόχρονα στα διαστήματα i και j .
- N_{total} : Το συνολικό πλήθος χρονικών στιγμών (παρατηρήσεων) του αρχείου δεδομένων (ωριαία δεδομένα ERA5).

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι το διάγραμμα της εικόνας 2.7, στο οποίο αποτυπώνεται υπό χρωματική κλίμακα η ποσοστιαία κοινή πιθανότητα εμφάνισης για τα ζεύγη τιμών H_s-T_p που ανήκουν στα αντίστοιχα διαστήματα. Το πλάτος των διαστημάτων $\Delta H_s, \Delta T_p$ είναι 0,2 μονάδες, ενώ επίσης εξήχθη και ο σχετικός πίνακας σε υπολογιστικό φύλλο excel, με τις ακριβείς τιμές πιθανότητας για κάθε κελί του διαγράμματος.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα ποσοστιαίας πιθανότητας κοινής εμφάνισης για ζεύγη κυματικών μεγεθών H_s - T_p της περιοχής μελέτης.

Το διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης, του οποίου η χρήση προτείνεται από το πρότυπο DNV-RP-C205, αποτελεί βασικό εργαλείο στατιστικής αποτύπωσης της θαλάσσιας κατάστασης και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η επιλογή αντιπροσωπευτικών κυματικών συνθηκών για σκοπούς σχεδιασμού, όπως η ανάλυση κόπωσης (fatigue analysis) και η αποτίμηση των δομικών αποκρίσεων της κατασκευής. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των κυματικών μεγεθών σχεδιασμού που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των κυματικών φορτίσεων της υπεράκτιας κατασκευής.

2.2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η επιλογή αντιπροσωπευτικών θαλάσσιων καταστάσεων (sea states) αποτελεί κρίσιμο βήμα στη διαδικασία σχεδιασμού υπεράκτιων κατασκευών και πραγματοποιείται με βάση την ανάλυση της κοινής κατανομής των χαρακτηριστικών του κυματισμού. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες και τα πρότυπα του DNV 2025 (Det Norske Veritas) - διεθνώς αναγνωρισμένου οργανισμού πιστοποίησης, εξειδικευμένου σε θέματα ασφαλείας και σχεδιασμού ενεργειακών και θαλάσσιων υποδομών - η επιλογή γίνεται ανάλογα με τον τύπο σχεδιαστικής αξιολόγησης. Για ανάλυση κόπωσης προτείνεται η χρήση πολλαπλών αντιπροσωπευτικών καταστάσεων που καλύπτουν στατιστικά το σύνολο των συνθηκών σε μακροχρόνια βάση. Αντίθετα για την αξιολόγηση οριακών καταστάσεων αστοχίας (Ultimate Limit States - ULS), επιλέγονται ακραίες θαλάσσιες καταστάσεις που αντιστοιχούν σε

προκαθορισμένη περίοδο επαναφοράς. Η μεθοδολογία αυτή διασφαλίζει ότι λαμβάνεται υπόψη τόσο η τυπική όσο και η ακραία συμπεριφορά του κυματικού περιβάλλοντος.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λαμβάνονται κυματικά μεγέθη ακραίων θαλάσσιων καταστάσεων, με αποτέλεσμα οι κυματικές φορτίσεις που προκύπτουν να ανταποκρίνονται στις συνθήκες φορτίσεων (load cases) οι οποίες συνεκτιμώνται κατά τον δομικό σχεδιασμό των υπεράκτιων κατασκευών έναντι οριακής κατάστασης αστοχίας (ULS). Ειδικότερα, σύμφωνα με τεχνικά πρότυπα του DNV (2019, 2021, 2024, 2025) για υπεράκτιες κατασκευές έδρασης ανεμογεννητριών, επιλέγονται κύματα με περίοδο επαναφοράς ενός και πενήντα ετών. Η περίοδος επαναφοράς εκφράζει το μέσο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο γεγονότων ίσης ή μεγαλύτερης έντασης. Ως εκ τούτου, προσδιορίζονται δύο συνθήκες φόρτισης. Η πρώτη συνθήκη φόρτισης (Load Case 1 – LC1) αφορά το μέγιστο ύψος κύματος με περίοδο επαναφοράς ενός έτους H_1 και την περίοδο κορυφής T_p που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο ύψος κύματος, ενώ η δεύτερη συνθήκη φόρτισης (Load Case 2 – LC2) καθορίζεται από το μέγιστο ύψος κύματος με 50 έτη περίοδο επαναφοράς H_{50} και την αντίστοιχη περίοδο κορυφής T_p .

Το μέγιστο ύψος κύματος (H_{max}) που παρατηρείται σε σταθερές θαλάσσιες καταστάσεις (stationary sea states), δηλαδή σε μικρής διάρκειας διαστήματα παρατηρήσεων, οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες, όπως για παράδειγμα, στην εστίαση κυματισμών διαφορετικών συχνοτήτων και προσεγγίζεται στοχαστικά μέσω στατιστικών εργαλείων. Ωστόσο, από τα πρότυπα του DNV (2019, 2025), ελλείψει στοιχείων, υποδεικνύεται ότι το μέγιστο ύψος κύματος H_{max} μπορεί να ληφθεί ως το διπλάσιο του σημαντικού ύψους κύματος H_s (2.1.1.1).

$$H_{max} = 2H_s \quad (2.1.1.1)$$

Η περίοδος κορυφής T_p ως χαρακτηριστικό του φάσματος των κυματισμών, παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη καθώς σχετίζεται με την κυρίαρχη κυματική συνιστώσα που καθορίζει τόσο το σημαντικό ύψος κύματος H_s όσο και το μέγιστο μεμονωμένο ύψος κύματος H_{max} . Συνεπώς για τον προσδιορισμό των κυματικών συνθηκών φόρτισης LC1 και LC2, αρκεί ο υπολογισμός του σημαντικού ύψους κύματος H_s για τις περιόδους επαναφοράς ενός και πενήντα ετών και της αντίστοιχης περιόδου κορυφής T_p με την οποία εμφανίζονται τα παραπάνω μεγέθη.

Συνήθως, οι ακραίες τιμές των κυματικών μεγεθών ενδέχεται να υπερβαίνουν το εύρος των παρατηρήσεων. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται η προσαρμογή θεωρητικής κατανομής στα διαθέσιμα δεδομένα, με στόχο τον προσδιορισμό των ακραίων κυματικών μεγεθών

(συνήθως του σημαντικού ύψους κύματος H_s) που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης. Ως εκ τούτου, στα ωριαία δεδομένα H_s του ERA5 προσαρμόστηκε η τριπαραμετρική κατανομή Weibull για τον προσδιορισμό του σημαντικού ύψους κύματος $H_{s,1}$ και $H_{s,50}$ με περίοδο επαναφοράς $T_R=1$ και $T_R=50$ [έτη], αντίστοιχα. Η τριπαραμετρική κατανομή Weibull χρησιμοποιείται ευρέως για την προσδιορισμό της στοχαστικής συμπεριφοράς του σημαντικού ύψους κύματος, ενώ προτείνεται και από τις κατευθυντήριες οδηγίες του DNV (2025). Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative Distribution function - CDF) Weibull περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση, εκ της οποίας προκύπτει η πιθανότητα το σημαντικό ύψος κύματος H_s να λαμβάνει τιμή μικρότερη ή ίση της καθορισμένης τιμής h (πιθανότητα μη υπέρβασης).

$$F_{H_s}(h) = Pr\{H_s \leq h\} = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{h-a}{b}\right)^c\right], & \text{για } h > a \text{ και } c > 0 \\ 0 & \text{για } h \leq a \end{cases} \quad (2.2.1.2)$$

- Όπου:

- a : παράμετρος θέσης, αντιπροσωπεύει το κατώτατο όριο του σημαντικού ύψους κύματος (μόνιμο ελάχιστο υπόβαθρο της θάλασσας).
- b : παράμετρος κλίμακας, καθορίζει το πλάτος της κατανομής.
- c : παράμετρος σχήματος, για $c = 1$ προκύπτει εκθετική κατανομή, ενώ για $c = 2$ κατανομή Rayleigh.

Βασική προϋπόθεση για την προσαρμογή της εκάστοτε θεωρητικής κατανομής σε πλήθος δεδομένων είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας μη υπέρβασης για κάθε δεδομένη τιμή H_s . Σε περίπτωση μεγάλου αριθμού δεδομένων όπως στην προκειμένη, τα δεδομένα H_s κατηγοριοποιούνται σε ισομεγέθη διαστήματα (bins) (Holthuijsen, 2007). Κατ' αυτό τον τρόπο, η πιθανότητα του σημαντικού ύψους κύματος H_s να μην υπερβαίνει τη δεδομένη τιμή $H_{s,i}$ (το κάτω όριο του διαστήματος i) είναι η ακόλουθη και αποτελεί την εμπειρική κατανομή πιθανότητας (empirical CDF):

$$F_{emp,H_s}(H_{s,i}) = Pr_{emp}\{H_s < H_{s,i}\} = \frac{n_i}{N} \quad (2.2.1.3)$$

- Όπου:

- n_i : ο αριθμός των δεδομένων H_s με μικρότερη τιμή από το κάτω όριο του διαστήματος i ($H_{s,i}$).

- N: Ο συνολικός αριθμός των δεδομένων (ωριαία δεδομένα H_s από ERA5).

Εφόσον έχουν καθοριστεί οι τιμές πιθανότητας των παρατηρήσεων, καθίσταται εφικτή η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Weibull μέσω του προσδιορισμού των παραμέτρων της. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι προσαρμογής κατανομής πιθανότητας σε δεδομένα είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Least Square Method – LS), μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation– MLE) και η μέθοδος των ροπών (Method of Moments – MOM). Για την εκτίμηση ακραίων τιμών, είναι σημαντικό η ουρά της θεωρητικής κατανομής να βρίσκεται σε βέλτιστη προσαρμογή με τα δεδομένα. Για την κατανομή Weibull 3 παραμέτρων, σύμφωνα με το DNV (2025) η χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων συχνά προσφέρει καλύτερη εφαρμογή στην ουρά, από τις υπόλοιπες τεχνικές. Η παρούσα μέθοδος βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ της εμπειρικής CDF των δεδομένων (2.2.1.2) και της συνάρτησης κατανομής Weibull (2.2.1.3) και ουσιαστικώς επιλύεται το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min\{J(a, b, c)\} = \min \left\{ \sum_{i=1}^M [F_{emp, H_s}(H_{s,i}) - F_{H_s}(H_{s,i}; a, b, c)]^2 \right\} \quad (2.2.1.4)$$

- Όπου:

- M : το πλήθος των διαστημάτων (bins) στα οποία έχει υπολογιστεί η εμπειρική συνάρτηση κατανομής.
- $H_{s,i}$: η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος στο κάτω όριο του διαστήματος i .
- F_{emp, H_s} : η εμπειρική συνάρτηση κατανομής.
- $F_{H_s}(H_{s,i}; a, b, c)$: η θεωρητική συνάρτηση κατανομής Weibull με τις παραμέτρους a, b, c υπό εκτίμηση.

Εν συνεχεία, αφού έχει προσαρμοστεί η θεωρητική κατανομή Weibull στα διαθέσιμα δεδομένα, δύναται να εκτιμηθεί η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος με την ζητούμενη περίοδο επαναφοράς. Αναλυτικότερα, το σημαντικό ύψος κύματος με περίοδο επαναφοράς T_R αντιστοιχεί στο $(1 - 1/(nT_R))$ ποσοστημόριο της θεωρητικής κατανομής πιθανότητας (όπου n ο αριθμός των δεδομένων σε ένα έτος, για ωριαία δεδομένα $n=8766$) και προκύπτει από την αντίστροφη συνάρτηση της κατανομής, με το συγκεκριμένο μέγεθος ως ανεξάρτητη μεταβλητή (2.2.1.5).

$$H_{s,T_R} = F_{H_s}^{-1} \left(1 - \frac{1}{nT_R} \right) \quad (2.2.1.5)$$

Το σύνολο της διαδικασίας που περιγράφεται ανωτέρω έλαβε χώρα στο λογισμικό περιβάλλον του MATLAB. Σημειώνεται ότι σχετικά με την εμπειρική CDF (2.2.1.4), το πλάτος των διαστημάτων ΔH_s ορίστηκε ίσο με 0,02 μονάδες, υποδεκαπλάσιο από εκείνο που χρησιμοποιήθηκε κατά την δημιουργία του διαγράμματος κοινής πιθανότητας εμφάνισης H_s - T_R , με στόχο το αυξημένο δείγμα δεδομένων και κατά συνέπεια την βέλτιστη προσαρμογή της κατανομής Weibull. Συνεπώς τα 149.016 δεδομένα σημαντικού ύψους κύματος H_s της περιόδου 2001-2017 από το ERA5 για την περιοχή μελέτης, κατηγοριοποιήθηκαν σε 203 ισομεγέθη διαστήματα πλάτους 0,02 μονάδων και υπολογίστηκε η πιθανότητα μη υπέρβασης (σχέση 2.2.1.3) για καθένα από αυτά. Έπειτα ορίστηκε η συνάρτηση κατανομής Weibull (σχέση 2.2.1.2) και εκτιμήθηκαν οι παράμετροι θέσης, κλίμακας και σχήματος με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (σχέση 2.2.1.4). Τελικώς, μέσω της αντίστροφης συνάρτησης κατανομής Weibull (σχέση 2.2.1.6), υπολογίσθηκαν οι ζητούμενες αλλά και επιπλέον χαρακτηριστικές τιμές του σημαντικού ύψους κύματος με $T_R = \{1, 50\}$ και $T_R = \{100, 500\}$ περιόδους επαναφοράς, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προς το H_s και η πιθανότητα μη υπέρβασή τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

$$H_{s,T_R} = a + b \sqrt[c]{-\ln \left(1 - Pr\{H_s \leq H_{s,T_R}\} \right)} = a + b \sqrt[c]{-\ln \left(\frac{1}{nT_R} \right)} \quad (2.2.1.6)$$

- Όπου:

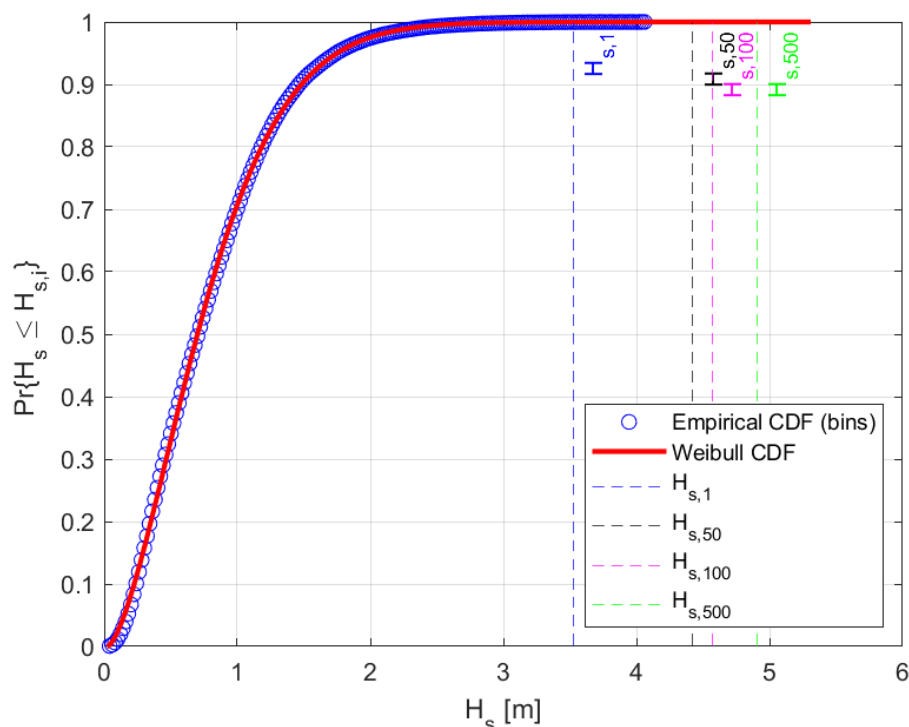
- $Pr\{H_s \leq H_{s,T_R}\}$: η πιθανότητα το σημαντικό ύψος κύματος να μην υπερβαίνει την τιμή του H_s με περίοδο επαναφοράς T_R έτη και ισχύει $Pr\{H_s \leq H_{s,T_R}\} = 1 - \frac{1}{nT_R}$.

Πίνακας 2.1: τιμές σημαντικού ύψους κύματος με περίοδο επαναφοράς T_R .

T_R [years]	$F_{T_R} = 1 - \frac{1}{nT_R}$	H_{s,T_R} [m]
1	0,99988	3,5
50	0,9999977	4,4
100	0,9999988	4,6
500	0,99999977	4,9

Για την οπτική αξιολόγηση της προσαρμογής της θεωρητικής κατανομής στα δεδομένα, δημιουργήθηκαν διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η πιθανότητα μη υπέρβασης

συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος, που προκύπτει τόσο από την εμπειρική συνάρτηση κατανομής όσο και από την συνάρτηση κατανομής Weibull (εικόνα 2.8 και εικόνα 2.9). Το πρώτο εκ των δύο διαγραμμάτων (εικόνα 2.8) παρατίθεται κυρίως για την παρουσίαση της μορφής και του σχήματος των καμπυλών αλλά και για την καλύτερη κατανόηση του μετασχηματισμού που υπέστησαν προς δημιουργία του διαγράμματος της εικόνας 2.9. Επιπλέον στο διάγραμμα της εικόνας 2.8 σημειώθηκαν ως ευθείες γραμμές οι υπολογισθείσες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος. Καθ' όπως φαίνεται, χωρίς την προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Weibull θα ήταν δυνατός ο προσδιορισμός μόνο του $H_{s,1}$, καθώς οι υπόλοιπες ακραίες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος ($H_{s,50}$, $H_{s,100}$, $H_{s,500}$) αντιστοιχούν σε πιθανότητες μη υπέρβασης μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από τα δεδομένα H_s του ERA5 (οι ευθείες τους προσπίπτουν στην προέκταση της κατανομής Weibull). Ως προς την ποιότητα της προσαρμογής, παρά τις θετικές ενδείξεις που προσφέρει το διάγραμμα της εικόνας 2.8, δεν επαρκεί για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων καθώς οι ενδεχόμενες αποκλίσεις στις ακραίες τιμές είναι δυσκολότερο να εντοπιστούν. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται υπό κλίμακα οι δύο κατανομές (εικόνα 2.9).



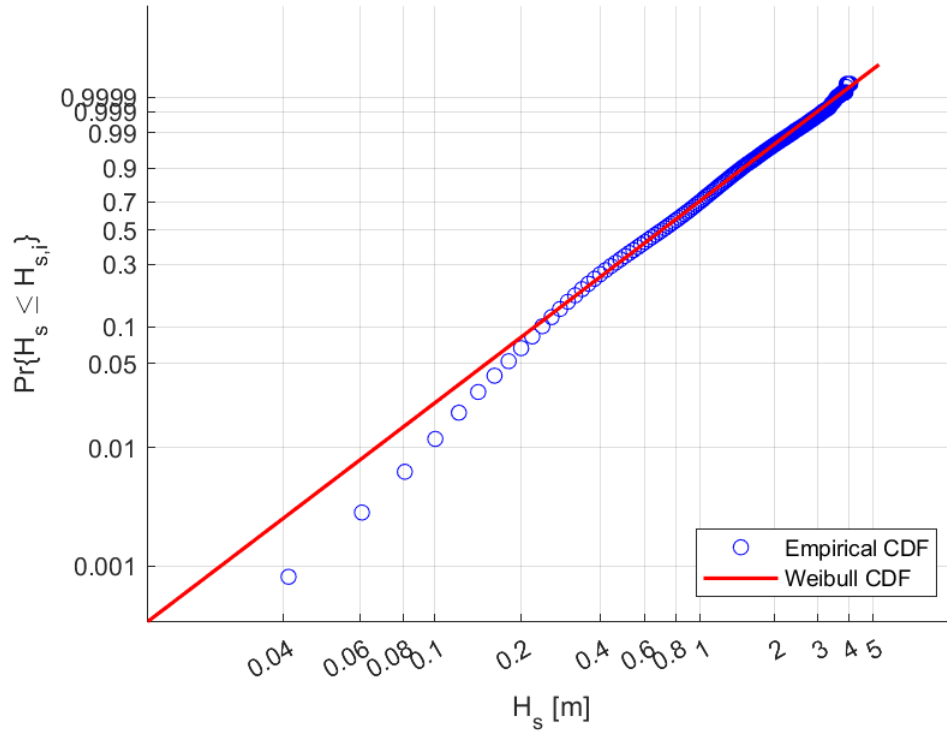
Εικόνα 2.8: Συναρτήσεις τριπαμετρικής Weibull και εμπειρικής κατανομής.

Ο απλούστερος και ταυτοχρόνως αξιόπιστος τρόπος για την οπτική αξιολόγηση της προσαρμογής, είναι ο μετασχηματισμός της καμπύλης Weibull σε ευθεία γραμμή. Αυτό επιτυγχάνεται από την διπλή επιβολή φυσικού λογάριθμου στην συνάρτηση της θεωρητικής κατανομής (2.2.1.2) και προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\ln \left(-\ln \left(1 - Pr\{H_s \leq H_{s,i}\} \right) \right) = c \ln \left(\frac{H_{s,i} - a}{b} \right) \quad (2.2.1.7)$$

Ο μετασχηματισμός της εμπειρικής καμπύλης πραγματοποιείται με την ίδια σχέση (2.2.1.7), με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται η πιθανότητα μη υπέρβασης που προκύπτει από την εμπειρική συνάρτηση κατανομής ($Pr_{emp}\{H_s \leq H_{s,i}\}$ αντί $Pr\{H_s \leq H_{s,i}\}$). Επομένως, η προσαρμογή αξιολογείται βάσει της απόκλισης των σημείων της μετασχηματισμένης εμπειρικής καμπύλης των δεδομένων από την ευθεία γραμμή της κατανομής Weibull.

Η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας είχε ως αποτέλεσμα το διάγραμμα της εικόνας 2.9, όπου παρουσιάζεται υπό κλίμακα η εμπειρική και η τριπαραμετρική κατανομή Weibull. Για χαμηλές τιμές του σημαντικού ύψους κύματος (περίπου έως 0,2 μέτρα) η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής δεν είναι ικανοποιητική. Παρά ταύτα, πέραν αυτού του διαστήματος τα σημεία της εμπειρικής κατανομής συμπεριλαμβανομένων και αυτών που αντιστοιχούν σε ακραίες τιμές H_s , φαίνεται να εμπίπτουν στην ευθεία γραμμή της Weibull. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αντίστροφη συνάρτηση της θεωρητικής κατανομής για τα ζητούμενα $H_{s,1}$, $H_{s,50}$ κρίθηκαν αξιόπιστα.



Εικόνα 2.9: Μετασχηματισμένες συναρτήσεις Weibull και εμπειρικής κατανομής.

Αφού υπολογίσθηκαν επιτυχώς τα σημαντικά ύψη κύματος $H_{s,1}$ και $H_{s,50}$ και κατ' επέκταση τα αντίστοιχα μέγιστα ύψη κύματος H_1 και H_{50} , για το πλήρη προσδιορισμό των συνθηκών φόρτισης LC1 και LC2 απομένει η εκτίμηση της περιόδου κορυφής του φάσματος T_p των ακραίων θαλάσσιων καταστάσεων με περίοδο επαναφοράς ενός και πενήντα ετών. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του DNV (2025), η περίοδος κορυφής T_p που συνδέεται με προκαθορισμένο σημαντικό ύψος κύματος $H_{s,i}$, μπορεί να ληφθεί ως η ενδιάμεση τιμή της κατανομής αθροιστικής πιθανότητας της περιόδου κορυφής T_p (CDF) για το δεδομένο $H_{s,i}$ (conditional median) (2.2.1.8).

$$F_{T_p|H_s}(t|H_{s,i}) = 0.5 \quad (2.2.1.8)$$

Σχετικά με την περίοδο κορυφής T_p που συνδέεται με το $H_{s,1}$, η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίζεται στο διάγραμμα κοινής πιθανότητας εμφάνισης των ζευγών H_s - T_p (εικόνα 2.5), αφού η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος με περίοδο επαναφοράς ενός έτους εντοπίζεται στα ωριαία δεδομένα H_s του ERA5 ($H_{s,1} \in \text{διάστημα } i = [3,4 ; 3,6]$). Κατ' αρχάς, οι πιθανότητες κοινής εμφάνισης του σημαντικού ύψους κύματος $H_{s,1}$ με τις n τιμές της περιόδου κορυφής T_p κανονικοποιήθηκαν ως εξής:

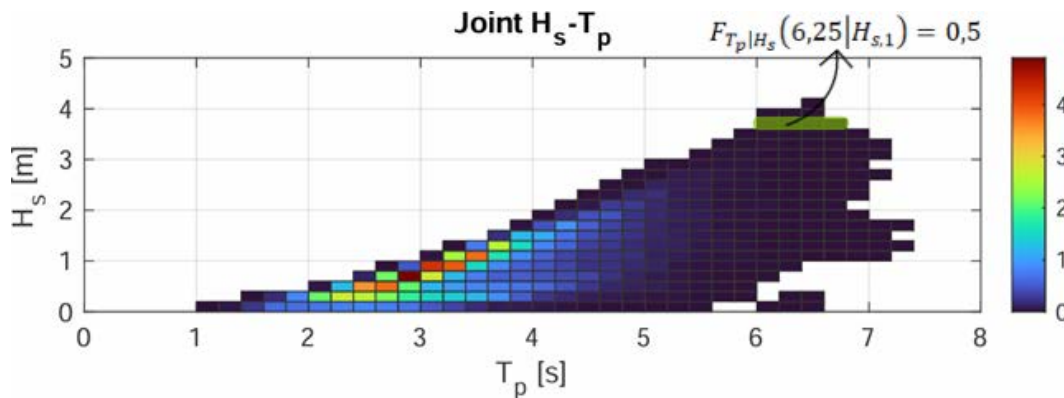
$$P_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{\sum_{j=1}^n p_{i,j}} \quad (2.2.1.9)$$

- Όπου:

- $p_{i,j}$: Η ποσοστιαία πιθανότητα κοινής εμφάνισης του συνδυασμού $H_{s,1} \in i$ διάστημα και $T_p \in j$ διάστημα που εκτιμήθηκε προηγουμένως από την σχέση (2.2.1).
- n : Ο αριθμός των διαστημάτων T_p που εμφανίζονται σε συνδυασμό με το διάστημα i όπου ανήκει το $H_{s,1}$ ($H_{s,1} \in i$ διάστημα).
- $P_{i,j}$: Κανονικοποιημένη πιθανότητα κοινής εμφάνισης του συνδυασμού $H_{s,1} \in i$ διάστημα και $T_p \in j$ διάστημα.

Έχοντας κανονικοποιήσει τις πιθανότητες κοινής εμφάνισης, ορίστηκε η εμπειρική συνάρτηση κατανομής της περιόδου κορυφής T_p για το $H_{s,1}$ (σχέση 2.2.1.10), μέσω της οποίας κατέστη εφικτός ο προσδιορισμός του διαστήματος, για το οποίο η συνάρτηση κατανομής της περιόδου κορυφής T_p είναι ίση ή υπερβαίνει την τιμή 0,5. Τελικώς, αφού έγινε γραμμική παρεμβολή εντός του διαστήματος, υπολογίστηκε ότι η ενδιάμεση τιμή της εμπειρικής συνάρτησης κατανομής αντιστοιχεί σε περίοδο κορυφής $T_{p,H_{s,1}} = 6.25 \text{ sec}$.

$$F_{T_p|H_s}(T_{p,j}|H_{s,1}) = \sum_{j=1}^n P_{i,j} \quad (2.2.1.10)$$



Εικόνα 2.10: Διαγράμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης H_s, T_p , από τα στοιχεία του οποίου προέκυψε συνάρτηση κατανομής της περιόδου κορυφής T_p για το $H_{s,1}$.

Εντός του διαγράμματος της εικόνας 2.10, φαίνονται τα διαστήματα της περιόδου T_p που εμφανίζονται σε συνδυασμό με τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος H_s που ανήκουν

στο διάστημα [3,4-3,6], όπως και το $H_{s,1}$ (3,5 m). Από τις τιμές των πιθανοτήτων εμφάνισης που αποδίδονται υπό χρωματική κλίμακα στα συγκεκριμένα διαστήματα προήλθε η εμπειρική κατανομή της περιόδου T_p για $H_{s,1}$, η ενδιάμεση τιμή της οποίας αντιστοιχεί στην περίοδο κορυφής ίση με 6,25 sec, που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Εις ότι αφορά την περίοδο κορυφής του φάσματος των κυματισμών με περίοδο επαναφοράς 50 έτη, η κατανομή αθροιστικής πιθανότητας δε μπορεί να προσδιορισθεί εμπειρικά από το διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης, καθώς η τιμή του σημαντικού ύψους κύματος $H_{s,50}$ δεν εμπεριέχεται στα δεδομένα H_s . Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η περίοδος κορυφής T_p για προκαθορισμένο H_s ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή (Lognormal Distribution) (DNV-RP-C205, 2025) και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{T_p|H_s}(T_{p,j}|H_{s,i}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{T_{p,j}} \frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (2.2.1.11)$$

- Όπου:

- σ : τυπική απόκλιση της $\ln(T_p)$ για δεδομένο $H_{s,i}$ ($\sigma = \text{std}[\ln(T_p)]$).
- μ : μέση τιμή της $\ln(T_p)$ για δεδομένο $H_{s,i}$ ($\mu = E[\ln(T_p)]$).

Οι παράμετροι κατανομής σ και μ θεωρούνται συναρτήσεις του $H_{s,i}$ (Bitner-Gregersen, 1988, 2005).

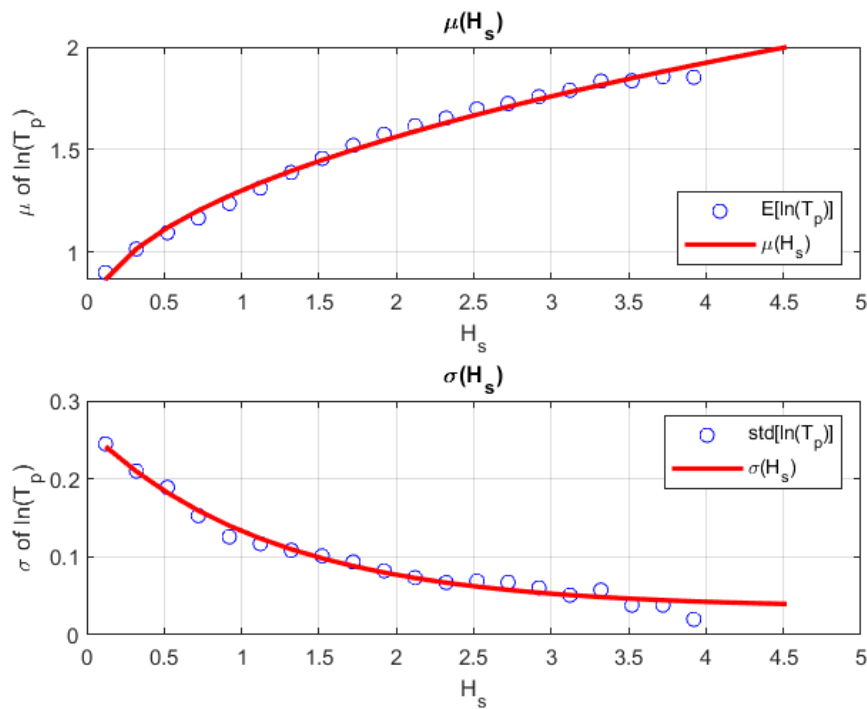
$$\sigma(H_s) = \text{std}[\ln(T_p)] = a_0 + a_1 H_{s,i}^{a_2} \quad (2.2.1.12)$$

$$\mu(H_s) = E[\ln(T_p)] = b_0 + b_1 e^{H_{s,i}b_2} \quad (2.2.1.13)$$

Συνεπώς, για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός της ενδιάμεσης τιμής της $F_{T_p|H_s}(T_{p,j}|H_{s,i})$ για ακραίο σημαντικό ύψος κύματος που ξεπερνά τα δεδομένα (όπως $H_{s,50}$), απαιτείται η εκτίμηση των παραμέτρων a_i, b_i με $i = 0,1,2$. Προς το σκοπό αυτό, καταρχάς τα δεδομένα H_s από το ERA5 χωρίστηκαν σε ισομεγέθη διαστήματα πλάτους $\Delta H_s = 0,2$ μονάδων (όπως κατά την δημιουργία του διαγράμματος πιθανότητας κοινής εμφάνισης). Έπειτα, αφού εντοπίστηκε το σύνολο των τιμών της περιόδου κορυφής T_p για κάθε διάστημα $H_{s,i}$, υπολογίστηκε η μέση τιμή μ και η τυπική απόκλιση σ του μεγέθους $\ln(T_p)$ για κάθε $H_{s,i}$. Για την προσαρμογή των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής εφαρμόστηκε μη γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη διότι οι

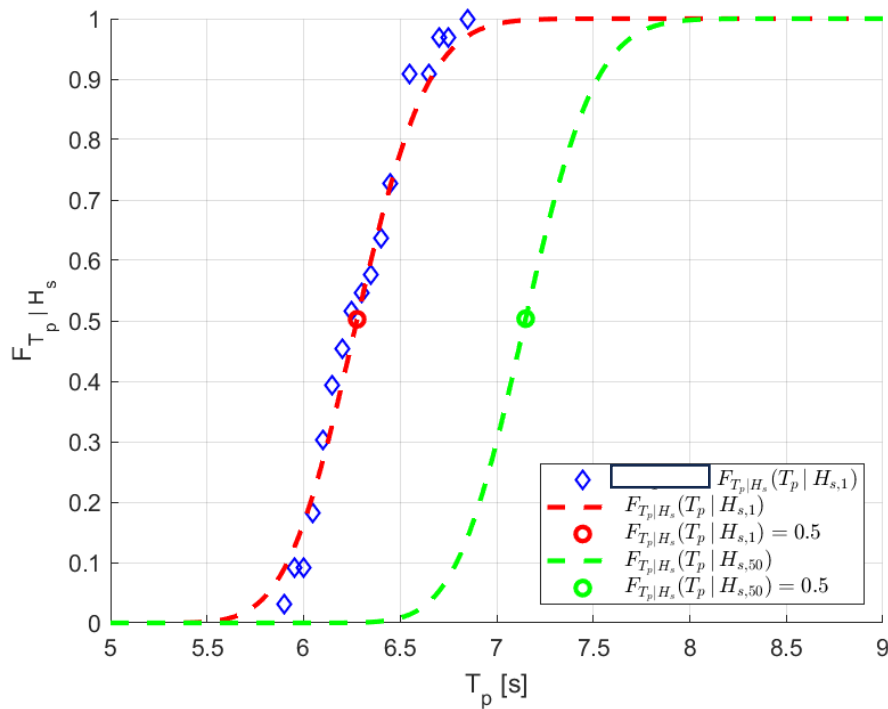
συναρτησιακές μορφές που συνδέουν τις παραμέτρους μ και σ με το σημαντικό ύψος κύματος H_s είναι μη γραμμικές (2.2.1.12 και 2.2.1.13). Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων a_i, b_i βασίζεται στη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των παρατηρούμενων και εκτιμώμενων τιμών. Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω μια επαναληπτικής διαδικασίας αριθμητικής αναζήτησης, η οποία ξεκινά από καθορισμένες αρχικές τιμές και οι οποίες αναπροσαρμόζονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση σε ένα ελάχιστο σφάλμα.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας διαφαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα, στα οποία παρουσιάζονται οι παράμετροι κατανομής που προέκυψαν, τόσο από το σύνολο των δεδομένων T_p για κάθε διάστημα του σημαντικού ύψους κύματος $H_{s,i}$, όσο και από τις σχέσεις Bitner – Gregersen (2.2.1.12 και 2.2.1.13). Στο πρώτο διάγραμμα η σχέση $\mu(H_s)$ αποδίδεται ομαλά και ακολουθεί με συνέπεια την τάση των δεδομένων, με μικρές μόνο αποκλίσεις σε μεμονωμένα σημεία. Στο δεύτερο διάγραμμα η εκτίμηση της $\sigma(H_s)$ περιγράφει ορθώς τη φθίνουσα συμπεριφορά της διασποράς με την αύξηση του ύψους κύματος, με ικανοποιητική προσαρμογή στο εύρος τιμών. Συνεπώς, η εκτίμηση των παραμέτρων a_i, b_i με $i = 0,1,2$ κρίθηκαν αξιόπιστες για την περαιτέρω χρήση του μοντέλου.



Εικόνα 2.11: Οι παράμετροι κατανομής μ και σ όπως προκύπτουν από τα δεδομένα T_p για την εκάστοτε τιμή του H_s και από τις συναρτήσεις Bitner-Gregersen.

Στο επόμενο στάδιο, εφόσον είχαν υπολογισθεί οι παραμέτρους a_i, b_i και κατ' επέκταση είχαν καθοριστεί οι συναρτήσεις κατανομής $\sigma(H_s)$ και $\mu(H_s)$, προσδιορίστηκε η λογαριθμοκανονική κατανομή της περιόδου κορυφής T_p σε συνάρτηση με το σημαντικό ύψος κύματος $H_{s,50}$, αλλά και με το $H_{s,1}$ προς σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενδιάμεσων τιμών. Επιπλέον, δημιουργήθηκε εμπειρική συνάρτηση κατανομής της περιόδου κορυφής T_p για το $H_{s,1}$ $F_{T_p|H_s}(T_{p,j}|H_{s,1})$ (σχέση 2.2.1.10), με μεγαλύτερη διακριτοποίηση (πλάτος διαστημάτων $\Delta T_p=0,5$), με σκοπό την οπτική αξιολόγηση της προσαρμογής της λογαριθμοκανονικής κατανομής της T_p στα δεδομένα. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 2.12.



Εικόνα 2.12: Η εμπειρική κατανομή της περιόδου κορυφής T_p για $H_{s,1}$ και οι λογαριθμοκανονικές κατανομές της περιόδου κορυφής T_p για $H_{s,1}$ και $H_{s,50}$ με σημειωμένες τις ενδιάμεσες τιμές τους.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, στο διάστημα ενδιαφέροντος, δηλαδή στο μέσο εύρος των πιθανοτήτων μη υπέρβασης ($0,2 < F_{T_p|H_s} < 0,7$), η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής της περιόδου κορυφής T_p για σημαντικό ύψος κύματος $H_{s,1}$ στα διαθέσιμα δεδομένα είναι ικανοποιητική. Αυτό αποδεικνύεται από την ενδιάμεση τιμή της θεωρητικής κατανομής που αντιστοιχεί σε περίοδο $T_{p,H_{s,1}} = 6,28 \text{ sec}$, η οποία διαφέρει μόλις 3 δέκατα του δευτερολέπτου από την περίοδο κορυφής που προέκυψε από την εμπειρική συνάρτηση κατανομής και διατυπώθηκε προηγουμένως. Σχετικά με την περίοδο κορυφής του φάσματος των κυματισμών με περίοδο επαναφοράς 50 έτη, προσδιορίστηκε από τη διάμεσο της λογαριθμοκανονικής κατανομής και προέκυψε $T_{p,H_{s,50}} = 7,15 \text{ sec}$.

Ανακεφαλαιώνοντας, οι κυματικές συνθήκες LC1 και LC2 που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των κυματικών φορτίσεων, αφορούν τα μέγιστα ύψη κύματος με περίοδο επαναφοράς ενός έτους H_1 και πενήντα ετών H_{50} και τις περιόδους κορυφής T_{p,H_1} , $T_{p,H_{50}}$ του φάσματος των κυματισμών με αντίστοιχες περιόδους επαναφοράς. Τα μεγέθη αυτά εκτιμήθηκαν με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα της περιοχής μελέτης (Κρήτη 1) από το ERA5 για την χρονική περίοδο 2001-2017, σε συνδυασμό με την χρήση στατιστικών θεωριών και παρουσιάζονται ολοκληρωμένα στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2.2: Κυματικές συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2.

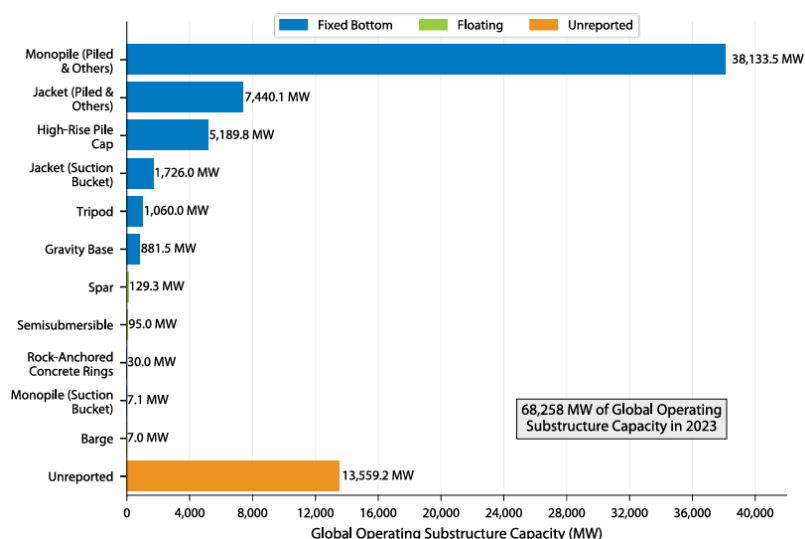
Load Case	$T_R[y]$	$H_{T_R} = 2H_{s,T_R}[m]$	$T_{p,H_{T_R}}[s]$
LC1	1	7	6,25
LC2	50	8,8	7,15

Κεφάλαιο 3 Ημιβυθισμένη εξέδρα WindFloat

Η περιοχή μελέτης που καθορίστηκε προηγουμένως, οδηγεί στην επιλογή πλωτής κατασκευής για την έδραση ανεμογεννητριών και συγκεκριμένα της ημιβυθισμένης εξέδρας WindFloat. Στο τρίτο κεφάλαιο, καταρχάς αναλύεται η τάση της αγοράς υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, η οποία απετέλεσε το βασικό κριτήριο επιλογής του τύπου ημιβυθισμένης πλωτής υποδομής (semi-submersible), έναντι των υπολοίπων. Το υπόλοιπο τμήμα του κεφαλαίου αφιερώνεται στην περιγραφή των λεπτομερειών της εξέδρας WindFloat, όπως η δομή και η γεωμετρία της αλλά και στα πλεονεκτήματα που διαθέτει η συγκεκριμένη τεχνολογία.

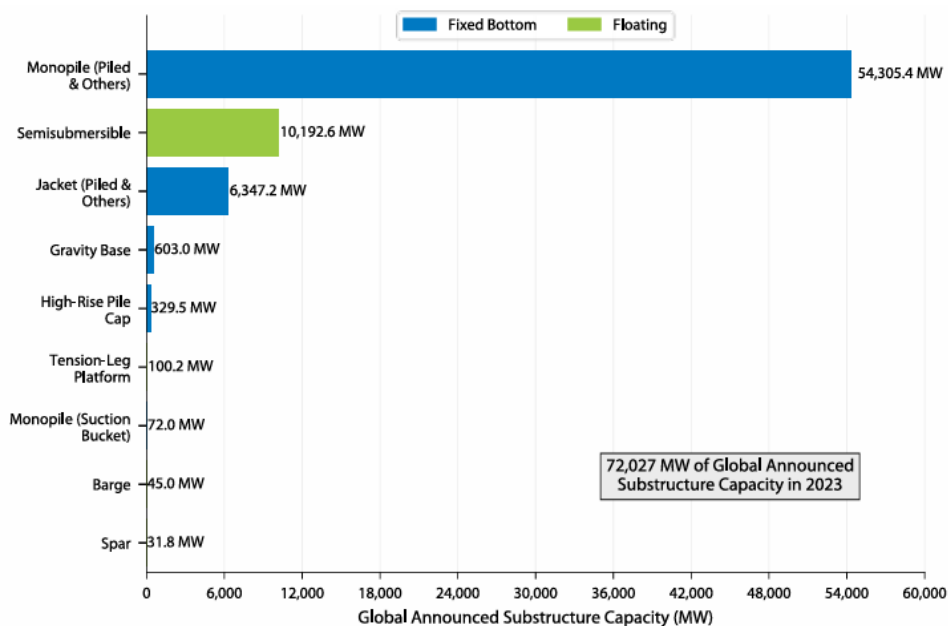
3.1 Κριτήριο για την επιλογή τύπου πλωτής υποδομής

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, σε παγκόσμιο επίπεδο, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες στην πλειονότητά τους είναι εγκατεστημένες σε σταθερής έδρασης υποδομές. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 2.1, μόνο 231,4 MW από τα 68,26 GW συνολικής λειτουργικής ισχύος, έως το 2023, έχουν εγκατασταθεί σε πλωτές υποδομές (spar, semi-submersible, barge), ενώ το υπόλοιπο μέγεθος αφορά σταθερής έδρασης εγκαταστάσεις. Τα παρακάτω στοιχεία προέρχονται από τεχνική έκθεση για την αγορά υπεράκτιας αιολικής ενέργειας από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) για λογαριασμό του υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (McCoy et al., 2024).



Εικόνα 3.1: Τύποι υποδομών υπεράκτιας αιολικής ενέργειας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε λειτουργικά έργα έως το 2023 (McCoy et al., 2024).

Η επικράτηση του τύπου monopile σε σχέση με τις υπόλοιπες σταθερές έδρασης κατασκευές οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στον απλό σχεδιασμό και τη βιομηχανοποίηση της διαδικασίας κατασκευής. Η εφοδιαστική αλυσίδα για την κατασκευή των υποδομών monopile είναι η πιο ώριμη, καθιστώντας τις πιο ανταγωνιστικές ως προς το κόστος μέσω τυποποιημένων διαδικασιών. Ο συγκεκριμένος τύπος υποδομής φαίνεται πως αποτελεί την κυρίαρχη επιλογή και για μελλοντικά έργα. Πιο συγκεκριμένα, στο γράφημα της εικόνας 3.2 παρουσιάζονται οι υποδομές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά έργα που έχουν ανακοινωθεί, συνολικής ισχύος 72 GW και η ποσότητα ισχύος που θα εδράζεται σε κάθε τύπο υποδομής. Γίνεται σαφές πως τα μελλοντικά έργα υπεράκτια αιολικής ενέργειας που πρόκειται να εγκατασταθούν, αφορούν σταθερές έδρασης κατασκευές, αφού το 75,4% (54,3 GW) της συνολικής ισχύος θα εδράζεται σε τύπο monopile και το 8,8% (6.35 GW) σε τύπο jacket.



Εικόνα 3.2: Τύποι υποδομών που θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά έργα (McCoy et al., 2024).

Αναφορικά με τις πλωτές υποδομές, φαίνεται από το γράφημα της εικόνας 3.2 ότι πλέον ξεπερνούν το πιλοτικό στάδιο και εντάσσονται κανονικά στην βιομηχανία υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, δεδομένου ότι σε πλωτές ημιβυθισμένες (semi-submersible) πλατφόρμες θα εδράζονται ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 10,19 GW (14,2% της συνολικής ισχύος).

Οι ημιβυθισμένες εξέδρες είναι η επικρατέστερη επιλογή τόσο στα λειτουργικά όσο και στα ανακοινωθέντα πλωτά υπεράκτια αιολικά έργα, λόγω του σχετικά μικρού βυθίσματος και

της καλής σταθερότητας κατόπιν εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας στην εξέδρα. Επιπλέον, μπορούν να συναρμολογηθούν σε λιμένα και να ρυμουλκηθούν στη θέση του έργου χωρίς να βασίζονται σε βαριά ανυψωτικά σκάφη εγκατάστασης, γεγονός που μειώνει το κόστος σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους πλωτής έδρασης.

Οι υποδομές τύπου spar είναι επίσης υδροδυναμικά σταθερές μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας, συγκριτικά ευκολότερες στην κατασκευή τους σε σχέση με τις ημιβυθισμένες πλατφόρμες και η τεχνολογία τους έχει δοκιμασθεί σε λειτουργικά έργα συνολικής ισχύος 129,3 MW. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του αυξημένου μεγέθους και βάρους τους, απαιτούνται βαθιές αποβάθρες και εξειδικευμένα ανυψωτικά σκάφη-γερανοί για την ρυμούλκηση και εγκατάστασή τους.

Οι πλωτές κατασκευές τύπου Barge και TLP βρίσκονται προς το παρόν σε πρώιμο τεχνολογικό επίπεδο, δεν έχουν δοκιμασθεί σε πιλοτικά έργα παρόμοιας κλίμακας με των semi-submersible και spar υποδομών και χρίζουν περεταίρω βελτιστοποίησης σε πολλά στάδια (Edwards et al., 2023).

Συνοψίζοντας, οι ημιβυθισμένες πλατφόρμες έχουν προβάδισμα κατά την επιλογή πλωτών υποδομών από την βιομηχανία και την αγορά υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, λόγω της ισορροπίας ανάμεσα στο κόστος, την σταθερότητα που προσφέρουν και τις τεχνικές απαιτήσεις από την κατασκευή έως την εγκατάσταση και τη συντήρηση. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε η πλωτή ημιβυθισμένη εξέδρα WindFloat προς δυνητική χωροθέτηση στην περιοχή μελέτης (Κρήτη1), δεδομένου έχει δοκιμασθεί σε υφιστάμενα λειτουργικά έργα ισχύος 75MW από το σύνολο των 95 MW που εδράζονται σε υποδομές τύπου semi-submersible.

3.2 Πλατφόρμα WindFloat

Η τεχνολογία WindFloat αναπτύχθηκε από την εταιρεία Principal Power και αφορά ημιβυθισμένη πλατφόρμα κατασκευασμένη από χάλυβα, η οποία βασίζεται σε τρεις κολώνες-πλωτήρες προς σταθεροποίηση ενώ αγκυρώνεται με ασύμμετρο σύστημα πρόσδεσης. Η διάταξη των κολόνων είναι τριγωνική και στη μια εκ των τριών εγκαθίσταται η ανεμογεννήτρια (Rodier et al., 2010). Η τεχνολογία WindFloat έχει χρησιμοποιηθεί σε πιλοτικά έργα συνολικής ισχύος 75 MW στην Πορτογαλία (WindFloat Atlantic 25MW) και την Σκωτία (Kincardine

50MW), ενώ στο χαρτοφυλάκιο της Principal Power υπάρχουν υπεράκτια αιολικά έργα που η συνολική τους ισχύς υπερβαίνει το 1GW.



εικόνα 3.3: Η ημιβυθισμένη πλατφόρμα WindFloat, κατά την ρυμούλκησή της στην θέση εγκατάστασης(<https://www.power-technology.com/>).

3.2.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται η εξέδρα WindFloat είναι τα εξής:

- Τρεις κατακόρυφες κολόνες (columns) οι οποίες συνεισφέρουν στην άνωση και στην σταθερότητα της πλατφόρμας. Η διάταξη τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζεται ισόπλευρο τρίγωνο μεταξύ των κέντρων τους. Οι κολόνες συνδέονται με οριζόντιες δοκούς-πλωτήρες (pontoons) ενώ για την ενίσχυση της αντοχής της κατασκευής έχουν συμπεριληφθεί και διαγώνιες συνδετήριες δοκοί (braces). Εντός των μεταλλικών κολόνων προστίθεται μόνιμος υδάτινος όγκος με σκοπό να διατηρείται η πλατφόρμα στο κατάλληλο λειτουργικό βάθος. Επιπλέον είναι εγκατεστημένο σύστημα έρματος που μετακινεί νερό από κολόνα σε κολόνα για να αντισταθμίζει τις αλλαγές στη μέση ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, αποσκοπώντας στη διατήρηση του πύργου της ανεμογεννήτριας σε κατακόρυφη θέση για την βέλτιστη απόδοση της τουρμπίνας.
- Οριζόντιες πλάκες εγκλωβισμού νερού, τοποθετούμενες κάτω από κάθε κολόνα, οι οποίες αυξάνουν την προστιθέμενη μάζα της κατασκευής και συνεισφέρουν στην απόσβεση των στροφικών και ανυψωτικών κινήσεων της πλατφόρμας (roll, pitch, heave). Επίσης, οι

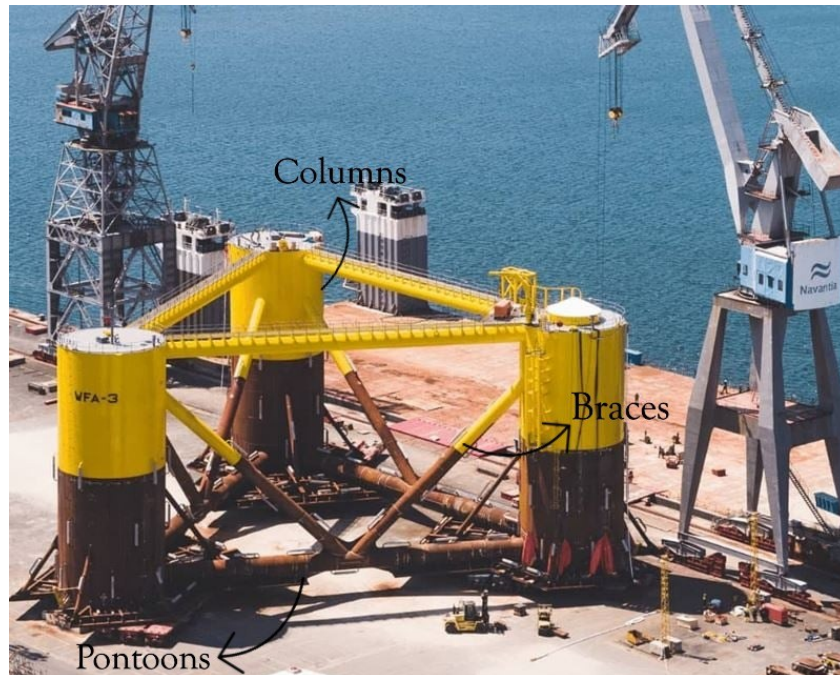
οριζόντιες πλάκες παρέχουν πρόσθετη υδροδυναμική αδράνεια στην δομή λόγω της μεγάλης ποσότητας νερού που εκτοπίζεται όταν η πλατφόρμα μετακινείται.

- Ασύμμετρο σύστημα πρόσδεσης, το οποίο περιλαμβάνει συμβατικά, εύκολα στην εγκατάσταση τους εξαρτήματα. Πρόκειται για διάταξη αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιείται σε πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου. Οι άγκυρες που χρησιμοποιούνται, είναι τύπου drag-embedment οι οποίες διαταράσσουν το πυθμένα λιγότερο, συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις της ημιβυθισμένης εξέδρας WindFloat. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις δεν είναι σταθερές και ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τις κυματικές και αιολικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης αλλά και το μέγεθος της ανεμογεννήτριας προς έδραση. Για τους ίδιους λόγους και η συνολική μάζα της πλατφόρμα δεν είναι προκαθορισμένη. Οι παρούσες διαστάσεις αφορούν πλατφόρμα στην οποία μπορεί να εδραστεί ανεμογεννήτρια ισχύος έως και 10 MW και η συνολική μάζα της ανέρχεται σε 7.105 τόνους.

Πίνακας 3.1: Κύριες διαστάσεις WindFloat.

Διαστάσεις	[m]
Διάμετρος κολόνων (columns)	10,7
Απόσταση μεταξύ των κέντρων των κολόνων	56,4
Διάμετρος οριζόντιων δοκών (pontoons)	1,8
Διάμετρος διαγώνιων δοκών (braces)	1,2
Λειτουργικό βύθισμα της πλατφόρμας (operational draft)	22,9
Μη βρεχόμενο ύψος της πλατφόρμας (από Στάθμη Ηρεμίας) (Air gap)	10,7
Συνολικό ύψος κολόνων	33,6



Εικόνα 3.4: Η Εξέδρα WindFloat (<https://www.mammoet.com/>), όπου έχουν επισημανθεί τα κύρια δομικά μέλη της κατασκευής .

3.2.2 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Στις ακτές της βόρειας Πορτογαλίας το 2011, τέθηκε σε εφαρμογή έργο επίδειξης κατά το οποίο ανεμογεννήτρια τύπου VESTAS και ισχύος 2MW θα εδράζονταν στην πλωτή εξέδρα WindFloat 1. Το έργο εγκαταστάθηκε σε ακτίνα 6 χιλιομέτρων από την ακτή και σε νερά βάθους 49 μέτρων ενώ λειτούργησε για 5 χρόνια. Τα σημαντικά ύψη κύματος με περίοδο επαναφοράς 1 έτους $H_s=7\text{m}$ και 50 ετών $H_s=11\text{m}$ χρησιμοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό της πλατφόρμας σε συνθήκες λειτουργίας της τουρμπίνας και αστοχία, αντίστοιχα. Τα κυματικά μεγέθη προήλθαν από μοντέλο υψηλής ανάλυσης της λεκάνης του Βόρειου Ατλαντικού. Κατά την διάρκεια λειτουργίας του έργου, η πλατφόρμα WindFloat 1 άντεξε σε ακραίες καιρικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένων κυμάτων ύψους άνω των 17 μέτρων, ενώ η ανεμογεννήτρια παρήγαγε ενέργεια σε καταστάσεις θάλασσας με σημαντικό ύψος κύματος H_s έως και 7 μέτρα (Peiffer et al., 2013, Roddier et al., 2017).

Το WindFloat Atlantic είναι το πρώτο πλωτό αιολικό πάρκο που χρησιμοποίησε semi-submersible τεχνολογία. Σε απόσταση 20 χιλιομέτρων από την ακτή της Βορειοδυτικής Πορτογαλίας και σε περιοχή βάθους 100 μέτρων, έχουν εγκατασταθεί τρεις πλατφόρμες WindFloat-T στις οποίες εδράζονται ανεμογεννήτριες Vestas ισχύος 8,4 MW. Η λειτουργία

του έργου ξεκίνησε το 2020 και η διάρκεια σχεδιασμού του είναι τα 25 χρόνια ενώ η συνολική ισχύς του ανέρχεται σε 25MW.

Το αιολικό πάρκο Kincardine Offshore βρίσκεται σε λειτουργία από το 2021 και απέχει 15 χιλιόμετρα από την ακτή Aberdeenshire της Σκωτίας, όπου πέντε ημιβυθισμένες πλατφόρμες WindFloat είναι αγκυροβολημένες σε περιοχή με βάθος βάθους 80 μέτρων και καθεμιά στηρίζει ανεμογεννήτρια Vestas 9,5MW. Η συνολική ισχύς του έργου φτάνει τα 50MW, αφού μετά την λήξη της λειτουργίας του έργου επίδειξης στην Πορτογαλία, η πλατφόρμα WindFloat 1 με την ανεμογεννήτρια των 2MW μεταφέρθηκε και συμπεριελήφθη στο Kincardine Offshore. Τα σχέδια των εξεδρών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάθε έργο δεν παρουσιάζουν αισθητές διαφοροποιήσεις.

Οι ημιβυθισμένες πλατφόρμες WindFloat θα χρησιμοποιηθούν σε Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα όπως το Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion (Γαλλία, 30MW) το οποίο αναμένεται να ολοκληρωθεί εντός του 2025, το Erebus στην Κελτική θάλασσα (Ηνωμένο Βασίλειο, 96MW, 2027) και Korea Floating Wind στην Ανατολική Θάλασσα της Κορέας. Το εγχείρημα Korea Floating Wind θα έχει συνολική ισχύ 1,3GW και αποτελεί το πρώτο έργο κλίμακας GW που συμπεριλαμβάνεται η τεχνολογία WindFloat. Εκτός από το Erebus για το οποίο δεν έχει γνωστοποιηθεί η ισχύς των ανεμογεννητριών, στα υπόλοιπα δύο έργα οι εξέδρες WindFloat πρόκειται να στηρίζουν ανεμογεννήτριες ισχύος ίσης ή και μεγαλύτερης των 10 MW.

3.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

Η σχεδιαστική φιλοσοφία της πλατφόρμας WindFloat επιτρέπει την εγκατάσταση οιασδήποτε συμβατικής εμπορικής ανεμογεννήτριας, ενώ η δυνατότητα ευέλικτης κλιμακοποίησης της καθιστά εφικτή την έδραση ανεμογεννητριών μεγαλύτερης των 10MW ισχύος, χωρίς παράλληλα να αυξάνεται σημαντικά το βάρος της πλατφόρμας.

Αναφορικά με την συναρμολόγηση των δομικών στοιχείων της πλατφόρμας, αυτή γίνεται στην προκυμαία του εκάστοτε λιμένα και η ανύψωση βαρέων φορτίων πραγματοποιείται με συμβατικά διαθέσιμους γερανούς. Η ενσωμάτωση της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα γίνεται είτε στην ξηρά είτε όταν η πλατφόρμα έχει βυθιστεί εντός του λιμένα. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγονται οι αποκλίσεις στο χρονοδιάγραμμα και τον προϋπολογισμό του έργου καθώς εάν οι ανυψώσεις γίνονταν υπερακτίως θα απαιτούνταν εξειδικευμένα πλοία-γερανοί των οποίων η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη.

Για την εγκατάσταση του συστήματος πρόσδεσης χρησιμοποιούνται διαπιστευμένες μέθοδοι από την βιομηχανία ορυκτών καυσίμων. Το σύστημα πρόσδεσης μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορα βάθη και διαφορετικών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών πυθμένα με αποτέλεσμα να μην αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την χωροθέτηση του έργου.

Κατά την διάρκεια ζωής του έργου μπορούν να προκύψουν σημαντικές διορθωτικές ενέργειες συντήρησης των ανεμογεννητριών οι οποίες σε σταθερής έδρασης κατασκευές διεξάγονται υπεράκτια. Η σημαντική διαφοροποίηση της πλατφόρμας WindFloat είναι ότι παρέχει την δυνατότητα της αποσύνδεσης και της μεταφοράς ολόκληρής της μονάδας πίσω στο λιμένα ώστε να ακολουθηθούν οι απαραίτητες ενέργειες συντήρησης (www.principlepower.com).

Κεφάλαιο 4 Κυματικές Θεωρίες

Ως κυματισμός μπορεί να χαρακτηριστεί η κάθε περιοδική ή τυχαία διαταραχή της επιφάνειας του νερού προς μια ή πολλές κατευθύνσεις. Κύρια γενεσιουργός αιτία των κυματισμών είναι η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας (ανεμογενείς κυματισμοί). Επιπλέον, αιτίες πρόκλησης κυματισμών αποτελούν φαινόμενα όπως οι σεισμικές δονήσεις (τσουνάμι), η ελκτική δύναμη της Σελήνης και Ηλίου προς την υδρόσφαιρα (παλιρροιακά κύματα) και οι βαρομετρικές μεταβολές κατά την διάρκεια καταιγίδων. Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των κυματισμών είναι τα εξής:

- Ύψος κύματος $H[m]$: η κατακόρυφη απόσταση από την κοιλία ως την κορυφή του κυματισμού.
- Περίοδος κύματος $T[s]$: Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην εμφάνιση δύο διαδοχικών κορυφών σε μία θέση. Η γωνιακή συχνότητα ω σχετίζεται με την περίοδο αφού $\omega = \frac{2\pi}{T}$ [rad/s]
- Μήκος κύματος $\lambda [m]$: Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοιλιών ή κορυφών. Σχετικό και αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος με το μήκος κύματος λ είναι ο αριθμός κύματος k , όπου $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ [rad/m]
- Ταχύτητα διάδοσης κυματισμού $c [m/s]$: Για κάθε κυματισμό ισχύει η εξίσωση $c = \frac{\lambda}{T}$.

Εν γένει, οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή των κυματισμών κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, στις θεωρίες κανονικών κυματισμών (μονοχρωματικοί, μόνιμοι ή μη τυχαίοι - Steady Waves) και στις θεωρίες μη κανονικών κυματισμών (φασματικοί, μη μόνιμοι ή τυχαίοι - Random Waves). Στην πρώτη κατηγορία (κανονικοί κυματισμοί) εντάσσεται η εκάστοτε θεωρία κατά την οποία, η ενέργεια του κυματικού πεδίου συγκεντρώνεται εξολοκλήρου σε μια μόνο συχνότητα. Αντιθέτως, αν η κυματική ενέργεια κατανέμεται σε πλήθος διαφορετικών συχνοτήτων τότε οι κυματισμοί χαρακτηρίζονται μη κανονικοί. Αυτή είναι η ειδοποιός διαφορά των δύο κατηγοριών.

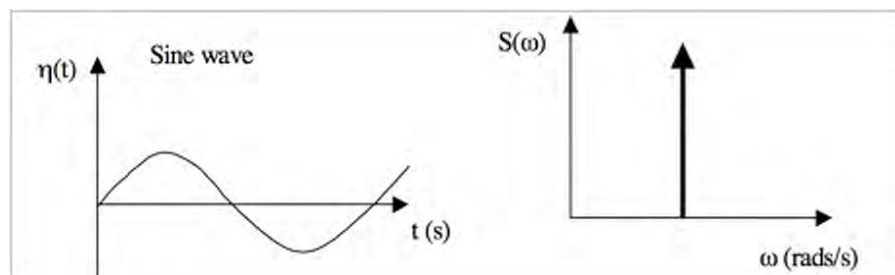
Όσον αφορά την μη γραμμικότητα, θεωρίες και των δύο κατηγοριών την λαμβάνουν υπόψη. Η μη γραμμικότητα αποτελεί βασική ιδιότητα των κυματισμών στο πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον και σχετίζεται με την αλληλεπίδραση είτε μεταξύ τους, είτε με τον πυθμένα σε πολύ ρηχά νερά. Η ασυμμετρία μεταξύ κορυφής και κοιλίας (στενότερη, υψηλότερη

κορυφή- πλατύτερη, ρηχότερη κοιλία) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μη γραμμικότητας. Παράμετρος μη γραμμικότητας είναι η καμπυλότητα των κυματισμών ε (wave steepness) και επί της ουσίας δείχνει πόσο απότομο είναι ένα κύμα. Μεγάλες τιμές καμπυλότητας αναδεικνύουν την ανάγκη περισσότερων μη γραμμικών όρων για την περιγραφή του κυματικού πεδίου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας και της κινηματικής (ταχύτητες και επιταχύνσεις των σωματιδίων του νερού) χρησιμοποιήθηκαν γνωστές θεωρίες κανονικών κυματισμών, γραμμικές και μη γραμμικές.

4.1 Κανονικοί κυματισμοί (Steady Waves)

Οι θεωρίες που ανήκουν στην συγκεκριμένη κατηγορία, βασίζονται σε ένα σύνολο παραδοχών εκ του οποίου προκύπτουν αναλυτικές λύσεις-εξισώσεις. Κύριο χαρακτηριστικό των λύσεων αυτών είναι η περιοδικότητα, με την οποία περιγράφουν το κυματικό πεδίο. Κάθε κυματισμός διατηρεί αναλλοίωτα τα χαρακτηριστικά του και την μορφή του ανά περίοδο. Έτσι, ενώ η ροή δεν είναι μόνιμη, καταχρηστικά χρησιμοποιείται ο όρος steady wave. Σε αντίθεση με τους μη κανονικούς κυματισμούς, οι εν λόγω θεωρίες αμελούν το κυματικό φάσμα, δηλαδή τη διασπορά ενέργειας στο πεδίο των συχνοτήτων. Βασικό γνώρισμα κάθε θεωρίας κανονικών κυματισμών είναι ότι η ενέργεια συγκεντρώνεται γύρω από μία και μοναδική συχνότητα, αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος του κυματισμού.



Εικόνα 4.1: Χρονοϊστορία και φασματικό πεδίο κανονικού κυματισμού (Swan, 2007).

Οι θεωρίες κανονικών κυματισμών που εφαρμόστηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας είναι οι εξής:

- Κυματική θεωρία Airy
- Κυματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

- Κυματική θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης

4.1.1 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ AIRY

Η κυματική θεωρία Airy ή αλλιώς γραμμική θεωρία κυματισμών εκδόθηκε από τον George Biddell Airy το 1842 (Airy, 1842) και ουσιαστικώς αποτελεί την απλούστερη προσέγγιση του κυματικού πεδίου. Χρήση της θεωρίας Airy γίνεται μέχρι σήμερα, σε πλήθος εφαρμογών Κυματομηχανικής και Ακτομηχανικής, είτε αυτούσιας για τον προκαταρκτικό υπολογισμό κυματικών μεγεθών, είτε μερικώς ενσωματωμένης σε μεταγενέστερες θεωρίες.

Σύμφωνα με την θεωρία Airy, η διάδοση των κυματισμών βαρύτητας σε ομογενές στρώμα ρευστού γίνεται περιοδικά. Το στρώμα ρευστού θεωρείται απείρου πλάτους, συνεπώς οι κυματισμοί είναι μονοκατευθυντικοί και η ροή αναλύεται σε δύο συνιστώσες.

Η περιοδικότητα έγκειται στην εμφάνιση τριγωνομετρικών όρων στις αναλυτικές λύσεις οι οποίες προκύπτουν από τις ακόλουθες παραδοχές :

- Το ρευστό είναι ομοιογενές και ασυμπίεστο. Συνεπώς ισχύει η εξίσωση συνέχειας της μάζας:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2D) \quad (4.1.1.1)$$

- Όπου u, w : οι συνιστώσες της ταχύτητας των σωματιδίων.

- Η ροή είναι αστρόβιλη. Επομένως οι διατμητικές τάσεις στην διεπιφάνεια του ρευστού-αέρα και στο πυθμένα είναι μηδενικές και ισχύει η εξίσωση της αστρόβιλης ροής:

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2D) \quad (4.1.1.2)$$

Η υπόθεση της μηδενικής στροβιλότητας επιτρέπει την περιγραφή της ροής με όρους δυναμικού φ όπου $\varphi(x, z, t) = \int u \, dx = \int w \, dz$.

- Το ρευστό είναι ιδανικό ($\mu = 0$) και σε συνδυασμό με την παραδοχή της αστρόβιλης ροής, από τις γενικές εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes προκύπτει η εξίσωση Bernoulli :

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho g z + \rho \frac{u^2 + w^2}{2} + p_o = c t \quad (4.1.1.3)$$

- Το εύρος κυματισμού είναι πολύ μικρότερο του μήκους κύματος ($\alpha \ll \lambda$) και του βάθους πυθμένα ($\alpha \ll d$). Μέσω αυτής της παραδοχής, η θεωρία Airy τίθεται σε ισχύ για μικρούς κυματισμούς σε βαθειά, ενδιάμεσα και ρηχά νερά ενώ δεν εφαρμόζεται σε πολύ ρηχά.

Από τον συνδυασμό των δύο πρώτων παραδοχών που προαναφέρθηκαν (4.1.1.1 και 4.1.1.2) προκύπτει η διαφορική εξίσωση Laplace με όρους ταχυτήτων (4.1.1.4) και με όρους δυναμικού (4.1.1.5).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad (2D) \quad (4.1.1.4)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2D) \quad (4.1.1.5)$$

Για να καταστούν προς επίλυση οι εξισώσεις Laplace, προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες του πυθμένα και της επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η υπόθεση των μικρών κυματισμών, συγκριτικά με το μήκος κύματος και το βάθος πυθμένα, έχει ως αποτέλεσμα την γραμμικοποίηση των οριακών συνθηκών και την απαλοιφή των δεύτερης τάξης όρων από τις λύσεις που προκύπτουν, καθώς οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται στη στάθμη ηρεμίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η θεωρία Airy δύναται να υπολογίσει το δυναμικό ροής, την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και την κινηματική των σωματιδίων του νερού. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυματικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και τα οποία είναι η ανύψωση της επιφάνειας, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις των σωματιδίων του ρευστού.

Καταρχάς, επισημαίνεται ότι από την εν λόγω θεωρία προκύπτει η άμεση συσχέτιση της γωνιακής συχνότητας ω με τον κυματαριθμό k και περιγράφεται από την γραμμική εξίσωση διασποράς (4.1.1.6):

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (4.1.1.6)$$

- Όπου:

- $\omega = \frac{2\pi}{T}$ [rad/s]: γωνιακή συχνότητα.
- g [m/s²]: η επιτάχυνση της βαρύτητας.
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ [rad/m]: αριθμός κύματος.

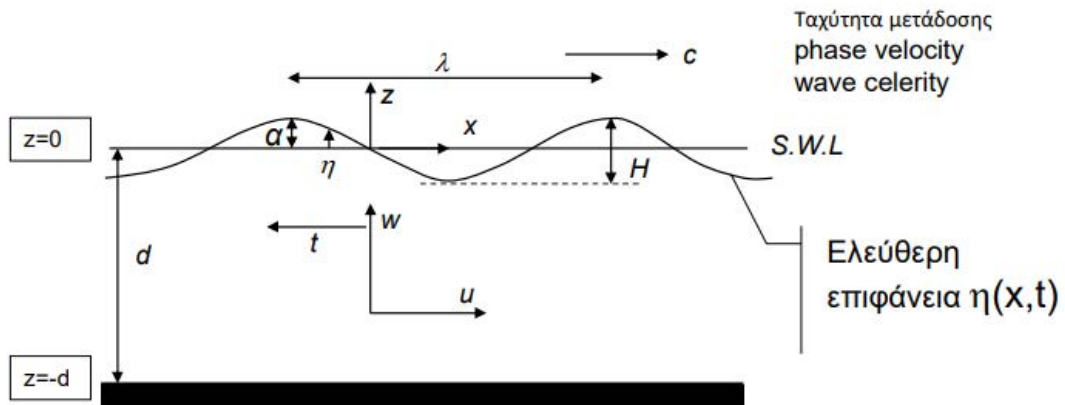
- d [m]: Βάθος πυθμένα.

Σχετικά με το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά Airy, η εξίσωση που προκύπτει (4.1.1.6) περιγράφει την ανύψωση η [m] κάθε σωματιδίου από την στάθμη ηρεμίας, συναρτήσει της θέσης του x [m] στον άξονα διάδοσης του κυματισμού και ως προς το χρόνο t [s].

$$\eta(x, t) = \alpha \cos(kx - \omega t) \quad (4.1.1.7)$$

- Όπου:

- $\alpha = \frac{H}{2}$ [m]: εύρος κυματισμού, ισούται με το μισό του ύψους κύματος.



Εικόνα 4.2: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας σύμφωνα με την γραμμική θεωρία Airy.

Το διάγραμμα της εικόνας 4.2 αποτελεί στιγμιότυπο της ελεύθερης επιφάνειας, για τυχαία χρονική στιγμή t_0 και καταδεικνύει την αρμονική κίνηση των σωματιδίων της, η ανύψωση των οποίων λαμβάνει τιμές από $-H/2$ έως $H/2$. Στο σημείο αυτό, διευκρινίζεται ότι για το σύστημα συντεταγμένων XZ , ο άξονας X ταυτίζεται με την στάθμη ηρεμίας (Still Water Level-SWL) εν τη απουσία κυμάτων, ενώ ο άξονας Z είναι κάθετος στην στάθμη ηρεμίας και λαμβάνει θετικές τιμές άνωθεν αυτής.

Όσον αφορά την ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού, αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες u και w ως προς X και Z άξονα, αντιστοίχως. Μέσω των εξισώσεων (4.1.1.7) και (4.1.1.8) που ακολουθούν, υπολογίζεται η οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα των σωματιδίων σε συνάρτηση με το βάθος τους z [m] ($d \leq z \leq \eta$) ως προς την στάθμη ηρεμίας, την θέση τους x [m] στον άξονα διεύθυνσης του κυματισμού και την χρονική στιγμή t [s].

Παραγωγίζοντας μερικώς ως προς t τις ταχύτητες u και w προκύπτουν οι επιταχύνσεις των σωματιδίων α_x και α_z .

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.1.1.8)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4.1.1.9)$$

$$\alpha_x(x, z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4.1.1.10)$$

$$\alpha_z(x, z, t) = \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{H}{2} \omega^2 \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.1.1.11)$$

4.1.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ STOKES 2^{ΗΞ} ΤΑΞΗΣ (STOKES 2ND)

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα που διέπει την πραγματική θάλασσα, ο George Stokes (Stokes 1847) επέκτεινε την γραμμική θεωρία σε λύσεις δεύτερης τάξης. Για την περιγραφή των κυμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των διαταραχών (perturbation method), σύμφωνα με την οποία, κάθε εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζεται με σειρές Fourier και βασική παράμετρος αναπτύγματος είναι η καμπυλότητα του κυματισμού (wave steepness). Η καμπυλότητα ορίζεται ως $\varepsilon = \alpha k$, όπου α το εύρος κυματισμού ($\alpha = \frac{H}{2}$ [m]) και k ο αριθμός κύματος. Η κυματική θεωρία Stokes 2nd κατατάσσεται και αυτή στις θεωρίες κανονικών κυματισμών και τα αποτελέσματα της είναι ακριβέστερα όταν οι κυματισμοί προελαύνουν σε βαθιά νερά.

Οι παραδοχές της θεωρίας Stokes 2nd παρέμειναν ίδιες με αυτές της γραμμικής θεωρίας κυματισμών, όπως και οι οριακές συνθήκες πυθμένα και επιφάνειας. Παρά ταύτα οι οριακές συνθήκες της επιφάνειας, κατά Stokes, εφαρμόζονται στην ελεύθερη επιφάνεια και όχι στην στάθμη ηρεμίας όπως στην θεωρία Airy. Επομένως δεύτερης τάξης όροι -προηγουμένως αμελούνταν- εμφανίζονται στις σχέσεις που προκύπτουν από το συνδυασμό των παραδοχών και κατ' επέκταση στις αναλυτικές λύσεις.

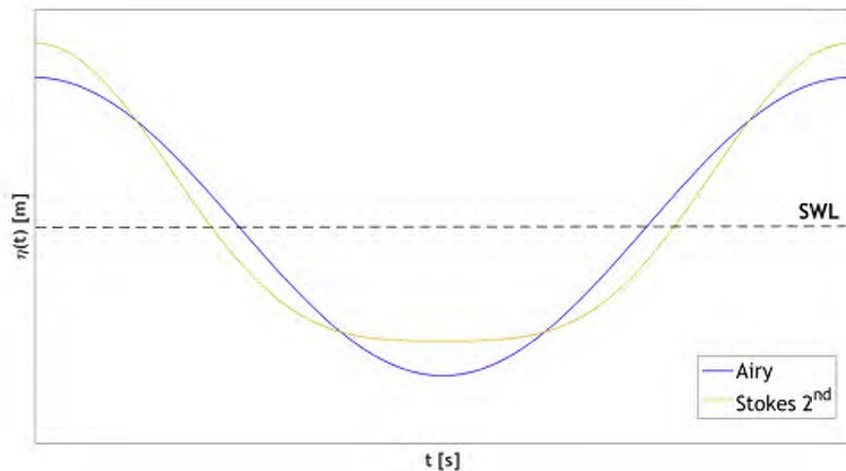
Σύμφωνα με την θεωρία Stokes 2nd, η ανύψωση της επιφάνειας $\eta(x,t)$ (4.1.2.1) περιγράφεται ως άθροισμα δύο περιοδικών όρων η_1 και η_2 , εκ των οποίων ο ένας (η_1) αποτελεί την ανύψωση επιφάνειας κατά Airy.

$$\eta(x,t) = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cos(\theta) + \frac{(H^2 k \cosh(kd))(2 + \cosh(2kd)) \cos(2\theta)}{16 \sinh^3(kd)} \quad (4.1.2.1)$$

Όπου:

- $\theta = kx - \omega t$ [rad]: φάση κυματισμού

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.3 παρουσιάζεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας κατά Airy και Stokes 2nd, σε χρονικό διάστημα μίας περιόδου για σταθερή θέση x . Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η συνεισφορά του δεύτερου όρου στην συνάρτηση $\eta_{\text{Stokes 2nd}}$ διαφοροποιεί τα αποτελέσματα. Αναλυτικότερα, το ανώτερο όριο της $\eta_{\text{Stokes 2nd}}$ είναι μεγαλύτερο του εύρους κυματισμού a κατ' επέκταση και της η_{Airy} , ενώ κατ' απόλυτη τιμή το ελάχιστο όριο είναι μικρότερο του εύρους και της η_{Airy} . Εντούτοις, η κατακόρυφη απόσταση από την κοιλία έως την κορυφή ισούται με το ύψος του κυματισμού H .



Εικόνα 4.3: Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας κατά Airy-Stokes 2nd σε διάστημα μίας περιόδου T ($x_0=0$).

Ομοίως με την ανύψωση επιφάνειας η , οι συναρτήσεις που προκύπτουν για τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις των σωματιδίων αποτελούνται από δύο όρους, εκ των οποίων ο πρώτος είναι ίσος με το αντίστοιχο κινηματικό μέγεθος της θεωρίας Airy.

$$u(x,z,t) = \frac{H\omega \cosh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \cos(\theta) + \frac{3H^2\omega k \cosh(2k(z+d))}{16 \sinh^4(kd)} \cos(2\theta) \quad (4.1.2.2)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H\omega \sinh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \sin(\theta) + \frac{3H^2\omega k \sinh(2k(z+d))}{16 \sinh^4(kd)} \sin(2\theta) \quad (4.1.2.3)$$

$$\alpha_x(x, z, t) = \frac{H\omega^2 \cosh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \sin(\theta) + \frac{6H^2\omega^2 k \cosh(2k(z+d))}{16 \sinh^4(kd)} \sin(2\theta) \quad (4.1.2.4)$$

$$\alpha_z(x, z, t) = -\frac{H\omega^2 \sinh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)} \cos(\theta) - \frac{6H^2\omega^2 k \sinh(2k(z+d))}{16 \sinh^4(kd)} \cos(2\theta) \quad (4.1.2.5)$$

Όπου:

- $\theta = kx - \omega t$ [rad]: φάση κυματισμού

4.1.3 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ STOKES 5^{HS} ΤΑΞΗΣ (STOKES 5TH)

Η κυματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, η οποία αποτελεί μη γραμμική θεωρία κανονικών κυματισμών, επεκτάθηκε από τον ίδιο (1980) σε ανώτερης τάξης λύσεις, συγκεκριμένα έως και πέμπτης τάξης (Stokes 5^{ης} τάξης), με στόχο την ακριβέστερη προσέγγιση των κυματισμών. Ειδικότερα, η καμπυλότητα $\varepsilon = ak$ (wave steepness) εξακολουθεί να είναι η βασική παράμετρος αναπτύγματος των σειρών Fourier που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των κυματισμών, ενώ παράλληλα δεν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς τις παραδοχές και τις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες της θεωρίας, που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Μια εναλλακτική εκδοχή της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης για κανονικούς κυματισμούς που προελαύνουν σε νερά πεπερασμένου βάθους παρουσίασε ο John Fenton το 1985 (Fenton, 1985). Η ιδιαιτερότητα της εκδοχής Fenton σχετίζεται με τα κυματικά μεγέθη που απαιτούνται να είναι γνωστά για την εφαρμογή της θεωρίας. Πιο αναλυτικά, εκτός τους ύψους κύματος H , της περιόδου T και τους βάθους πυθμένα d , πρέπει να έχουν προσδιορισθεί η μέση ταχύτητα ρεύματος c_E ή η ταχύτητα ροής μάζας c_S . Ο λόγος για τον οποίο τα προηγούμενα μεγέθη είναι απαραίτητα, βασίζεται στην υπόθεση ότι η κυματισμοί ταξιδεύουν πάνω σε πεπερασμένη ροή ή ρεύμα και τα οποία εξαρτώνται από τις ωκεανογραφικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν οι αναλυτικές λύσεις Fenton για την κυματική θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης, εκ των οποίων προέκυψαν οι συναρτήσεις της ανύψωσης επιφάνειας και της κινηματικής των σωματιδίων του νερού.

Σύμφωνα με τον Fenton, για την ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού $c = \frac{\lambda}{T}$ [m/s] ισχύει ότι:

$$c = \bar{u} + c_E \quad (4.1.3.1)$$

Όπου:

- $\bar{u}$: η μέση οριζόντια ταχύτητα νερού και ισχύει $\bar{u}(\frac{k}{g})^{1/2} = C_0 + \varepsilon^2 C_2 + \varepsilon^4 C_4$.
- C_0, C_2, C_4 : συντελεστές κατά Fenton
- c_E : μέση ταχύτητα του ρευστού. Απουσία ρεύματος, η ταχύτητα ρεύματος υποτίθεται μηδενική και ισχύει $|c| = |\bar{u}|$.

Πρωταρχικό βήμα για την εφαρμογή της εκδοχής Fenton είναι ο υπολογισμός του κυματαριθμού k , ο οποίος εν προκειμένω δεν προκύπτει από την γραμμική εξίσωση διασποράς αλλά από την ακόλουθη(μη γραμμική εξίσωση διασποράς):

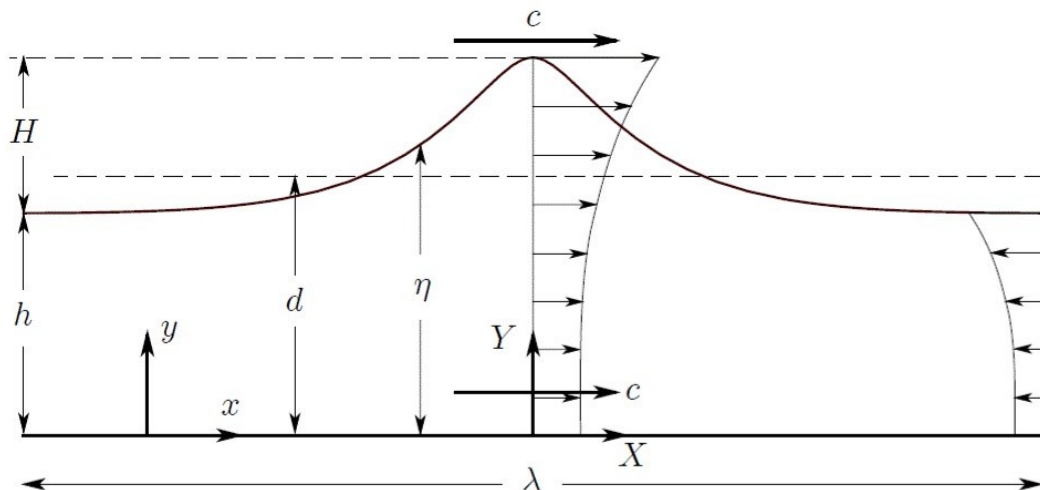
$$\sqrt{\frac{k}{g}} c_E - \frac{2\pi}{T\sqrt{gk}} + C_0(kd) + \varepsilon_2 C_2(kd) + \varepsilon_4 C_4(kd) = 0 \quad (4.1.3.2)$$

Έπειτα, με γνωστό τον κυματαριθμό k , η ανύψωση επιφάνειας αλλά και η κινηματική των σωματιδίων καθίστανται προς υπολογισμό μέσω των αναλυτικών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$k \eta(x, t) = kd + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^i \varepsilon^i B_{ij} \cos(jk(x - cT)) \quad (4.1.3.3)$$

Όπου:

- B_{ij} : Συντελεστές κατά Fenton



Εικόνα 4.4: Προφίλ ελεύθερης επιφάνειας κατά Fenton (www.johndfenton.com).

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.4 παρουσιάζεται το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος κύματος για συγκεκριμένη χρονική στιγμή t_0 . Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι, στην παρούσα θεωρία οριζόντιος άξονας x ταυτίζεται πλέον με το πυθμένα ενώ ο κατακόρυφος y λαμβάνει θετικές τιμές από τον πυθμένα με ανώτερη τιμή $y=\eta$. Συνεπώς ισχύει $y = z + d$ και $\partial y = \partial z$.

Επιπρόσθετα, μέσω των αναλυτικών λύσεων προέκυψαν και οι συναρτήσεις των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων και είναι οι εξής:

$$u(x, y, t) = (c - \bar{u}) + C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh(jky) \cos(jk(x - cT)) jk \quad (4.1.3.4)$$

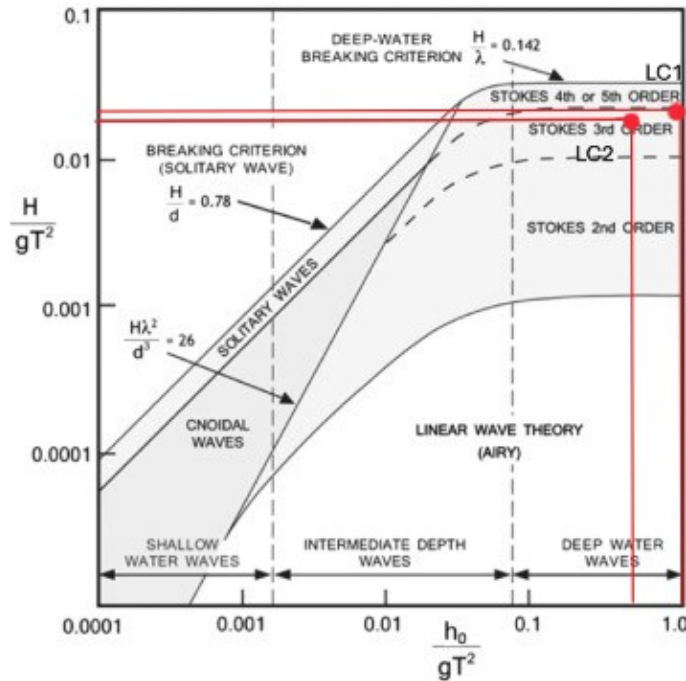
$$w(x, y, t) = C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \sinh(jky) \sin(jk(x - cT)) jk \quad (4.1.3.5)$$

$$a_x(x, y, t) = C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh(jky) \sin(jk(x - cT)) j^2 k \omega \quad (4.1.3.6)$$

$$a_y(x, y, t) = -C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \sinh(jky) \cos(jk(x - cT)) j^2 k \omega \quad (4.1.3.7)$$

4.1.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ LE MEHAUTE

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Le Mehaute, 1976) παρουσιάζονται τα όρια ισχύος για τις διάφορες θεωρίες κανονικών κυματισμών, τα οποία καθορίζονται βάσει του ύψους κύματος και του βάθους πυθμένα. Πιο συγκεκριμένα, στον οριζόντιο άξονα εκτείνονται οι τιμές του αδιάστατου βάθους $\frac{d}{gT^2}$ και στον κατακόρυφο άξονα οι τιμές του αδιάστατου ύψους κύματος $\frac{H}{gT^2}$. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, η χρήση του διαγράμματος έγινε προς εκτίμηση της ορθότητας των κυματικών θεωριών, που εφαρμόστηκαν για την περιγραφή του πεδίου υπό τις κυματικές συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για την βέλτιστη προσέγγιση του κυματικού πεδίου με χαρακτηριστικά μεγέθη είτε αυτά της συνθήκης φόρτισης LC1, είτε της LC2, απαιτείται η εφαρμογή της θεωρίας Stokes με χρήση τριών ή περισσότερων μη γραμμικών όρων.



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ισχύος κυματικών θεωριών (Le Mehaute, 1976)

- Συνθήκη φόρτισης LC1 $\{H_{s,1}, T_{p,H_{s,1}}\}$:

- Υ άξονας: $\frac{H}{gT^2} = \frac{7}{9,81 \cdot 6,25^2} = 0,018$

- Χ άξονας: $\frac{d}{gT^2} = \frac{400}{9,81 \cdot 6,25^2} = 1,04$

- Συνθήκη φόρτισης LC2 $\{H_{s,50}, T_{p,H_{s,50}}\}$:

- Υ άξονας: $\frac{H}{gT^2} = \frac{8,8}{9,81 \cdot 7,15^2} = 0,017$

- Χ άξονας: $\frac{d}{gT^2} = \frac{400}{9,81 \cdot 7,15^2} = 0,77$

4.1.5 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟ ΒΑΘΟΣ

Η επιλογή της κατάλληλης κυματικής θεωρίας για την περιγραφή του θαλάσσιου πεδίου εξαρτάται από 2 βασικά μεγέθη, την καμπυλότητα ε (wave steepness) και το σχετικό βάθος kd (relative depth). Όπως προαναφέρθηκε, η καμπυλότητα ($\varepsilon = \frac{H}{2}k$) αποτελεί δείκτη μη γραμμικότητας και κατ' επέκταση, για αυξημένες τιμές της απαιτούνται μεγαλύτερης τάξης αναλυτικές λύσεις για την περιγραφή του κυματικού πεδίου. Επιπλέον χρησιμοποιείται και ως κριτήριο για τα όρια θραύσης των κυματισμών. Για αυξημένες τιμές καμπυλότητας, όπου $\varepsilon \geq$

0,44 (κριτήριο Miche - όριο θραύσης), ο ιδιαίτερα απότομος κυματισμός καθίσταται ασταθής και θραύεται. Η καμπυλότητα πεδίου σε συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2 υπολογίσθηκε για την κυματική θεωρία Airy και την κυματική θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: καμπυλότητα κυματικού πεδίου

Load case	wave steepness ϵ	
	Airy	Stokes 5th
LC1 { H_1, T_{p,H_1} }	0,361	0,325
LC2 { $H_{50}, T_{p,H_{50}}$ }	0,346	0,314

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα, η καμπυλότητα του πεδίου και για τις δύο κυματικές συνθήκες προκύπτει μεγαλύτερη κατά Airy, σε σχέση με αυτή που προκύπτει από την εφαρμογή της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς στη μη γραμμική θεωρία η αυξημένη ταχύτητα διάδοσης συνεπάγεται μεγαλύτερο μήκος κύματος και επομένως μικρότερο κυματικό αριθμό, εφόσον η περίοδος του κυματισμού παραμένει σταθερή. Πρέπει ωστόσο να διευκρινιστεί ότι το μέγεθος αυτό εκφράζει μια μέση τιμή του κυματικού πεδίου και δεν σημαίνει πως η πραγματική μορφή του κυματισμού που προκύπτει από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης είναι λιγότερο απότομη. Ο ισχυρισμός αυτός αποδεικνύεται στο επόμενο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζεται το προφίλ ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά Stokes 5th. Ωστόσο, η σύγκριση μεταξύ των τιμών της καμπυλότητας που προέκυψαν από τα πεδία με κυματικές συνθήκες τις συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2, έχει ιδιαίτερη αξία. Όπως παρατηρείται από τις τιμές καμπυλότητας και των δύο κυματικών θεωριών, ο κυματισμός του οποίου το μέγιστος ύψος έχει περίοδο επαναφοράς ενός έτους, είναι πιο απότομος εν συγκρίσει με τον κυματισμό του οποίου το αντίστοιχο μέγεθος επανεμφανίζεται, κατά μέσο όρο, ανά πενήντα χρόνια. Αυτή η διαπίστωση αποτελεί προοικονομία για τις μεγαλύτερες τιμές της επιτάχυνσης του κυματικού πεδίου σε συνθήκη φόρτισης LC1, σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν για κυματικό πεδίο σε συνθήκη LC2, παρά το μεγαλύτερο ύψος κύματος της δεύτερης συνθήκης. Σε κάθε περίπτωση, εφόσον όλες οι τιμές της καμπυλότητας που εκτιμήθηκαν, παρότι δεν ξεπερνούν το όριο θραύσης, είναι ιδιαίτερος υψηλές, οι κυματισμοί

παρουσιάζουν έντονη κλίση και για την περιγραφή τους απαιτείται η εφαρμογή μη γραμμικών θεωριών.

Αναφορικά με το σχετικό βάθος, αυτό εκφράζεται μέσω του αδιάστατου γινομένου kd , λαμβάνοντας υπόψη και το μήκος κύματος εκτός του απόλυτου βάθους d , και καθορίζει αν το πεδίο θεωρείται ρηχό ενδιάμεσο ή βαθύ. Πιο συγκεκριμένα, σε ρηχά νερά ($kd < 0,1\pi$) και ενδιάμεσα νερά ($0,1 < kd < \pi$) η μεταφορά ενέργειας και η κινηματική των σωματιδίων επηρεάζονται από το βάθος. Αντιθέτως σε βαθιά νερά ($kd > \pi$), η ενέργεια μεταφέρεται χωρίς να επηρεάζεται από τον πυθμένα.

Η τιμή του σχετικού βάθους και στις δύο συνθήκες φόρτισης (LC1 και LC2) ξεπερνάει κατά πολύ τον αριθμό π , επομένως το θαλάσσιο πεδίο που μελετάται, θεωρείται βαθύ καθώς η κινηματική των σωματιδίων δεν επηρεάζεται από τον πυθμένα.

4.2 Αποτελέσματα κινηματικών μεγεθών

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και των κινηματικών μεγεθών, που προέκυψαν από την εφαρμογή των κυματικών θεωριών για τις συνθήκες φόρτισης LC1, LC2 με βάθος $d=400$ m (μέσο βάθος τεμαχίου Κρήτη 1). Επισημαίνεται πως πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός μόνο των οριζόντιων συνιστωσών των κινηματικών μεγεθών (u και a_x), καθώς ο υπολογισμός των κατακόρυφων φορτίσεων της υπεράκτιας κατασκευής WindFloat δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

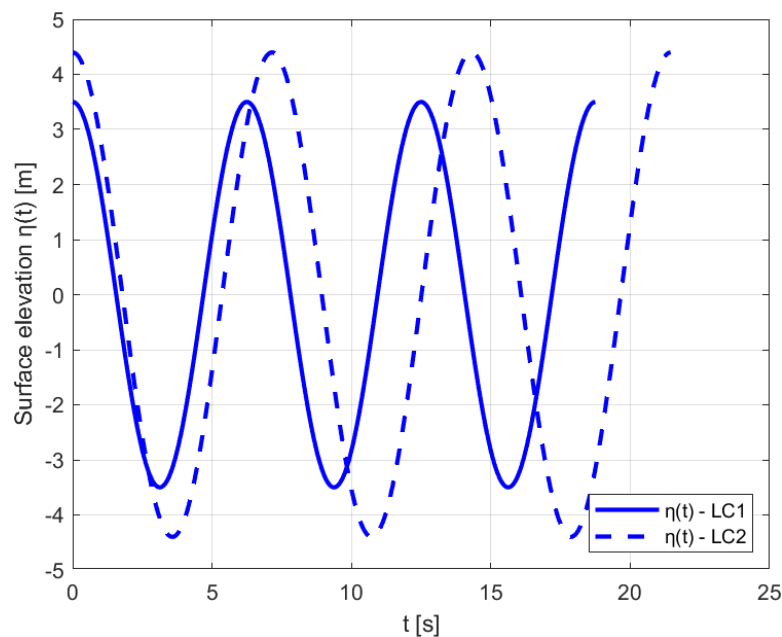
4.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ AIRY

Έπειτα από την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων της θεωρίας Airy για τους 2 συνδυασμούς ύψους-περιόδου κύματος των συνθηκών φόρτισης, εκτιμήθηκε το προφίλ ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και παρατίθεται στο ακόλουθο διάγραμμα. Στο διάγραμμα γίνεται καταφανές το βασικό χαρακτηριστικό των κανονικών κυματισμών που είναι η περιοδικότητα, καθώς η μορφή των κυματισμών μένει σταθερή ανά περίοδο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι λόγω της συνημιτονοειδούς περιγραφής της ανύψωσης $\eta[m]$ από την γραμμική θεωρία, το προφίλ της είναι συμμετρικό ως προς τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα και κατά συνέπεια οι ακραίες τιμές της ανύψωσης είναι κατ' απόλυτω ίσες, $\eta_{\min} = -\eta_{\max}$ (πίνακας 5.1). Αναμενόμενο επίσης το γεγονός ότι, οι κορυφές και οι κοιλίες της χρονοϊστορίας της ανύψωσης $\eta [m]$ για την συνθήκη φόρτισης LC1 είναι στενότερες, δηλαδή παρουσιάζονται εντονότερες κλίσεις,

αφού καμπυλότητα ε για την κυματική συνθήκη φόρτισης LC1, όπως αναφέρθηκε σε παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου, είναι μεγαλύτερη από την καμπυλότητα για LC2.

Πίνακας 4.2: ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Airy.

συνθήκη φόρτισης	μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\max}[\text{m}]$	ελάχιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\min}[\text{m}]$
LC1 $H_1=7\text{m}$ $T_{p,H1}=6,25\text{s}$	3,5	-3,5
LC2 $H_{50}=8,8\text{m}$ $T_{p,H50}=7,15\text{s}$	4,4	-4,4



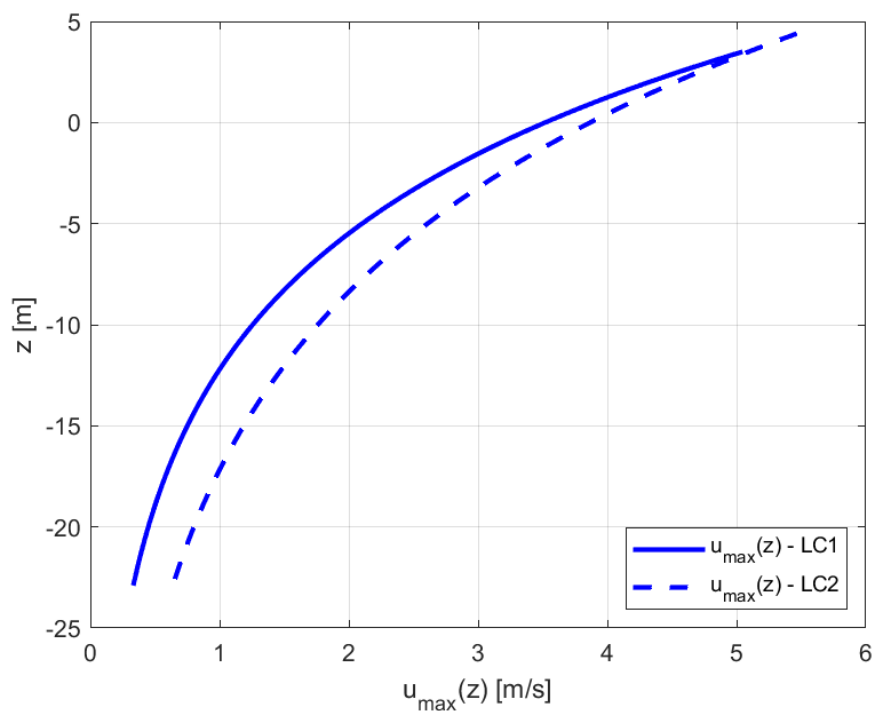
Εικόνα 4.6: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_o=\text{σταθ.}$), κατά Airy.

Αναφορικά με την οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού, επειδή και αυτή περιγράφεται με την χρήση συνημίτονου, η μέγιστες κατ' απόλυτω τιμές της εμφανίζονται τις χρονικές στιγμές, κατά τις οποίες και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας βρίσκεται στην μέγιστη θέση. Το διάγραμμα της εικόνας 4.7 αποτυπώνει την κατανομή της μέγιστης ταχύτητας κατά βάθος, το οποίο παρεμπιπτόντως στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος φτάνει έως τα 22,5 μέτρα, όσο είναι και το βύθισμα της πλατφόρμας WindFloat. Από το διάγραμμα της

εικόνας 4.7 διαπιστώνεται ότι, λόγω της διαφοράς μεταξύ του ύψους κύματος με περίοδο επαναφοράς 50 έτη και του ύψους κύματος με περίοδο επαναφοράς ενός έτους, η μέγιστη ταχύτητα για τη κυματική συνθήκη φόρτισης LC2 λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές καθ' όλο το βάθος όπου εκτείνεται η πλατφόρμα. Οι μέγιστες τιμές της οριζόντιας μέγιστης ταχύτητας, οι οποίες εμφανίζονται για $z=\eta_{\max}$, καταγράφονται στον πίνακα 4.3, όπως επίσης και της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης.

Πίνακας 4.3: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Airy.

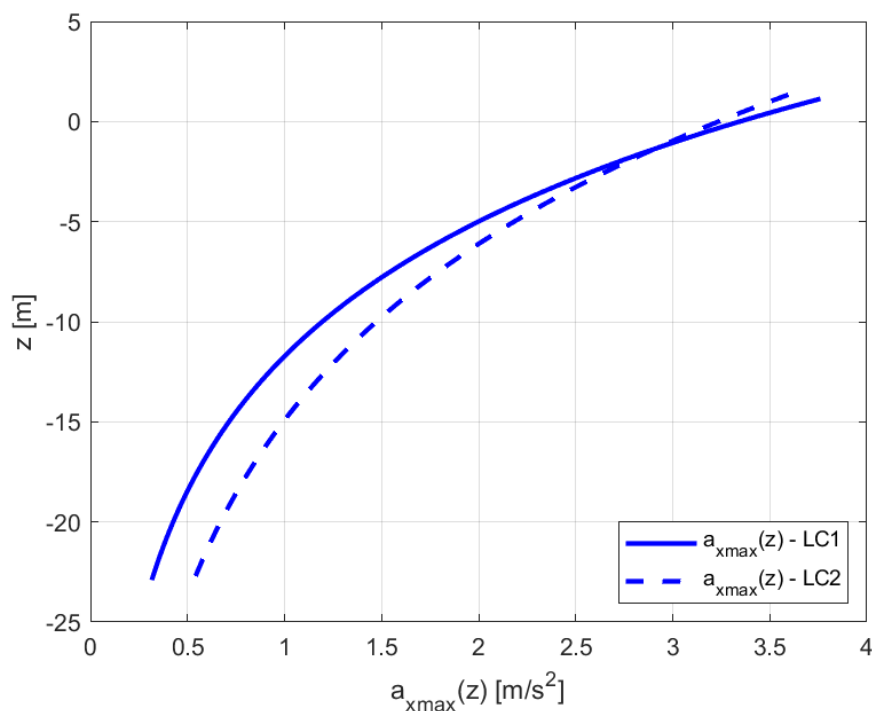
συνθήκη φόρτισης		μέγιστη οριζόντια ταχύτητα $u_{\max}$ [m/s]	μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση $a_{x,\max}$ [m/s ²]
LC1	$H_1=7\text{m}$ $T_{p,H1}=6,25\text{s}$	5,05	3,76
LC2	$H_{50}=8,8\text{m}$ $T_{p,H50}=7,15\text{s}$	5,46	3,60



Εικόνα 4.7: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{\max}$), κατά Airy.

Σχετικά με την οριζόντια επιτάχυνση σε σταθερό σημείο $x=x_0$, αυτή μεγιστοποιείται όταν η πρώτη παράγωγος ως προς την φάση θ είναι μηδενική ($\frac{\partial a_x}{\partial \theta} = 0$). Η φάση θ που προκύπτει από την προηγούμενη σχέση, καθορίζει την χρονική στιγμή κατά την οποία

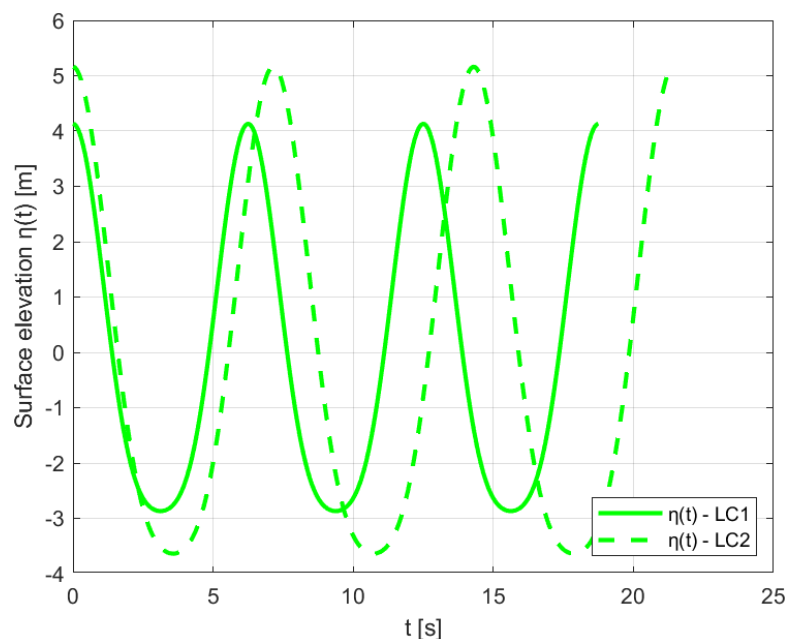
μεγιστοποιείται η επιτάχυνση, αλλά και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας εκείνη την χρονική στιγμή. Στο διάγραμμα της εικόνας 4.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες επιταχύνσεις σε συνάρτηση με το βάθος, για τους δύο συνδυασμούς ύψους-περιόδου των συνθηκών φόρτισης. Παρατηρείται ότι, κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια οι επιταχύνσεις του κυματισμού της συνθήκης LC1 είναι μεγαλύτερες σε σχέση τις επιταχύνσεις του κυματισμού της συνθήκης LC2. Αυτό συμβαίνει καθώς ο κυματισμός της συνθήκης LC1, παρά το μικρότερο ύψος κύματος, είναι ιδιαίτερα υψηλής συχνότητας και κατά συνέπεια πιο απότομος από τον κυματισμό της συνθήκης LC2. Οι τιμές της καμπυλότητας που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και σε αυτή την περίπτωση απετέλεσαν ένδειξη για το αποτέλεσμα αυτό.



Εικόνα 4.8: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,\max}$), κατά Airy.

4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ STOKES 2^{ΗΣ} ΤΑΞΗΣ

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.9 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της ανύψωσης $\eta(t)$ [m] που προέκυψαν από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, για τους συνδυασμούς των συνθηκών φόρτισης. Παρατηρείται ότι, και σε αυτή την περίπτωση, ο υψηλότερης συχνότητας κυματισμός (συνθήκη LC1) παρουσιάζει εντονότερες κλίσεις.

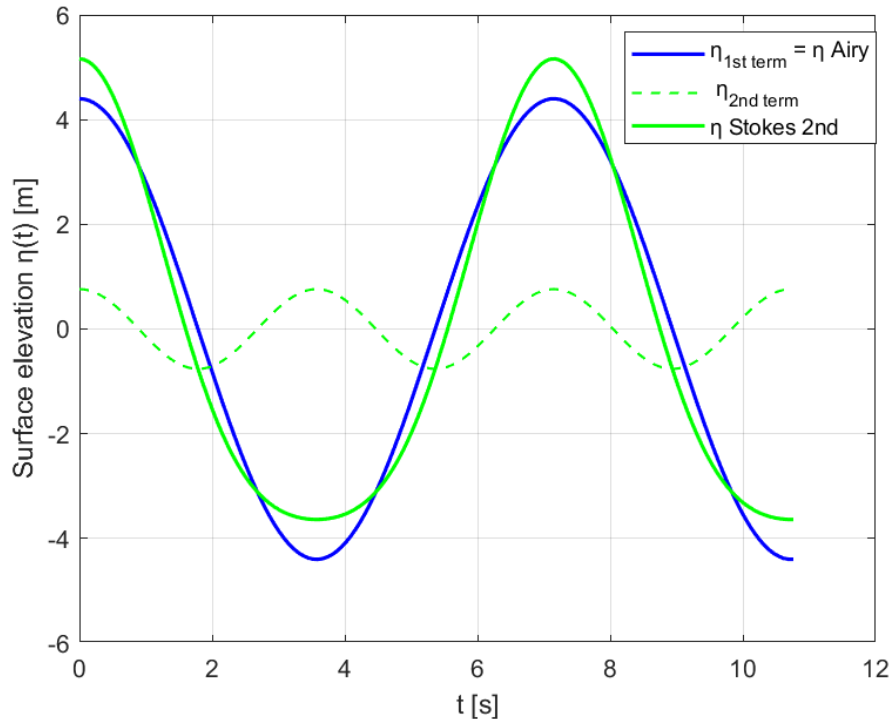


Εικόνα 4.9: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.), κατά Stokes 2^{ης} τάξης.

Σύμφωνα με την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, η ελεύθερη επιφάνεια περιγράφεται περιοδικώς αλλά παρουσιάζει ασυμμετρία ως προς την στάθμη ηρεμίας (οριζόντιος άξονας). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην συμβολή του δεύτερου αρμονικού όρου στην αναλυτική σχέση της ανύψωσης η [m]. Κατά συνέπεια, συγκριτικά με την θεωρία Airy, οι κορυφές των κυματισμών κατά Stokes 2^{ης} τάξης προκύπτουν ψηλότερες και πιο στενές, ενώ οι κοιλίες πλατύτερες και ρηχότερες, παρόλο που η απόσταση της κορυφής από κοιλία παραμένει ίση με το ύψος κύματος. Τα προαναφερθέντα αποτυπώνονται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα της εικόνας 4.10, ενώ στον πίνακα 4.4 παρατίθενται οι αποστάσεις της κορυφής ($\eta_{\max}$) και της κοιλίας ($\eta_{\min}$) από την στάθμη ηρεμίας και για τους δύο κυματισμούς των συνθηκών φόρτισης.

Πίνακας 4.4 Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Stokes 2^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης		μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\max}$ [m]	ελάχιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\min}$ [m]
LC1	$H_1=7\text{m}$	4,13	-2,87
	$T_{p,H1}=6,25\text{s}$		
LC2	$H_{50}=8,8\text{m}$	5,16	-3,64
	$T_{p,H50}=7,15\text{s}$		



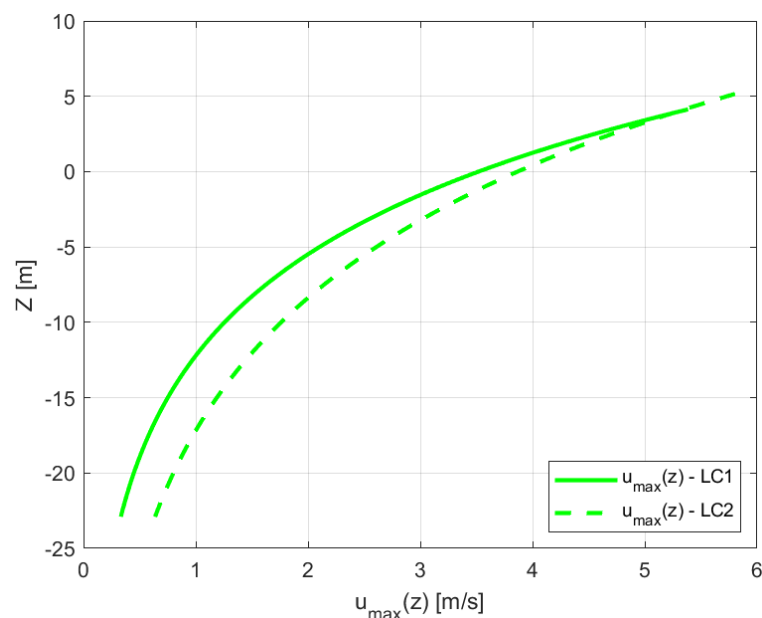
Εικόνα 4.10: Χρονοϊστορία της ανύψωσης του κυματισμού της συνθήκης LC2, κατά Stokes 2^{ης} τάξης, όπου απεικονίζονται και οι δύο όροι της συνάρτησης.

Οι μέγιστες τιμές των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5. Επιπλέον στα διαγράμματα των εικόνων 4.11 και 4.12, παρουσιάζονται, η μέγιστη ταχύτητα και επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους. Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι, για βαθιά νερά ($kd > \pi$), ο δεύτερος όρος στην αναλυτική σχέση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης μηδενίζεται και κατά συνέπεια τα κινηματικά μεγέθη περιγράφονται μόνο από τον πρώτο όρο, δηλαδή από τις αναλυτικές σχέσεις Airy. Ως εκ τούτου, οι διαφορές στις μέγιστες τιμές των κινηματικών μεγεθών κατά Stokes 2^{ης} τάξης, σε σχέση με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από γραμμική θεωρία, οφείλεται στην διαφορετική περιγραφή της ελεύθερης επιφάνειας.

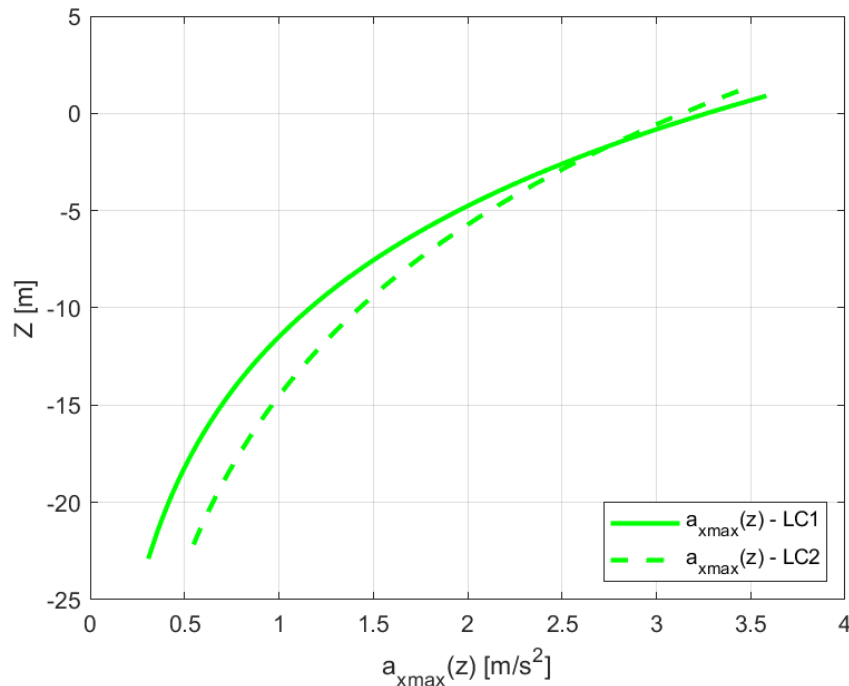
Πίνακας 4.5: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης .

συνθήκη φόρτισης	μέγιστη οριζόντια ταχύτητα $u_{\max}$ [m/s]	μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση $a_{x,\max}$ [m/s ²]
LC1 $H_1=7\text{m}$ $T_{p,H1}=6,25\text{s}$	5,38	3,58
LC2 $H_{50}=8,8\text{m}$ $T_{p,H50}=7,15\text{s}$	5,80	3,43

Σχετικά με τα διαγράμματα των μέγιστων κινηματικών μεγεθών συναρτήσει του βάθους, στα οποία επί της ουσίας συγκρίνονται οι κυματισμοί των συνθηκών φόρτισης, προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που διεξήχθησαν από την αντίστοιχη εξέταση για την γραμμική θεωρία. Δηλαδή ότι, ο κυματισμός της συνθήκης LC2, λόγω μεγαλύτερου ύψους κύματος (H_{50}) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας καθ' όλο το βάθος, ενώ ο υψηλής συχνότητας κυματισμός της συνθήκης LC1, εξαιτίας της μεγαλύτερης τιμής καμπυλότητας, παρουσιάζει μεγαλύτερες μέγιστες επιταχύνσεις.



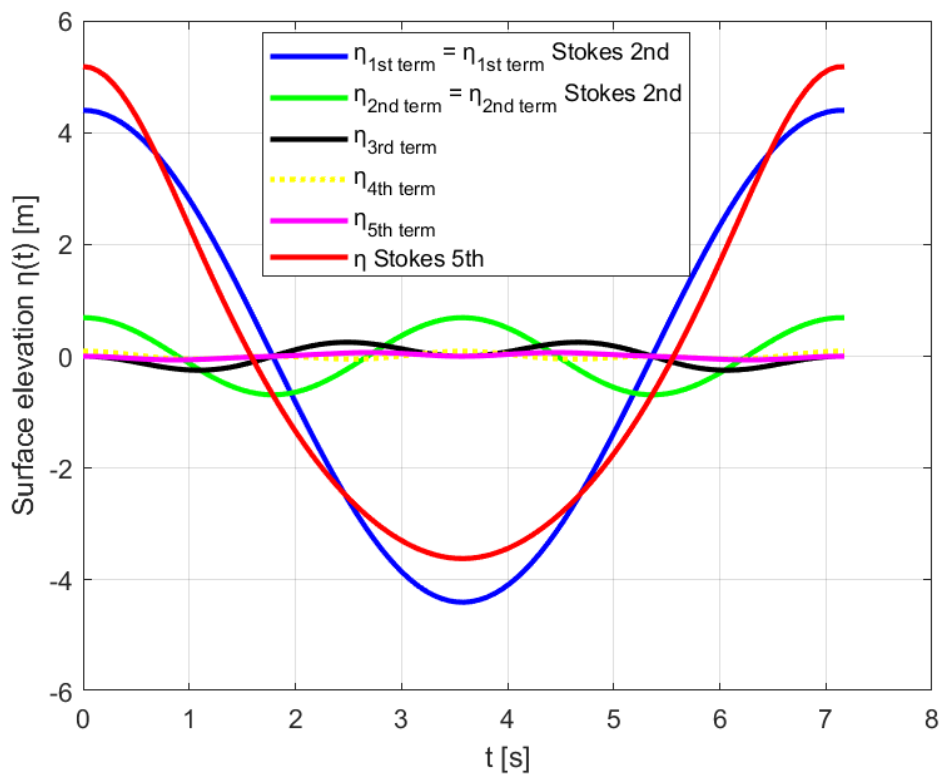
Εικόνα 4.11: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0=\text{σταθ. και } t=t_0 \text{ όπου } u=u_{\max}$), κατά Stokes 2^{ης} τάξης.



Εικόνα 4.12: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$), κατά Stokes 2^{ης} τάξης.

4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ STOKES 5^{ΗΣ} ΤΑΞΗΣ

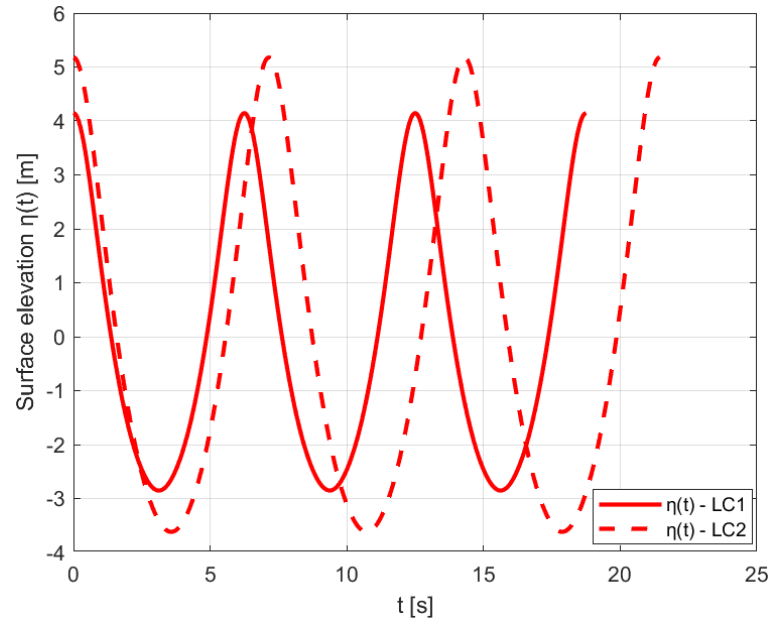
Το τελικό προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά Stokes 5^{ης} τάξης προκύπτει ως άθροισμα πέντε επιμέρους όρων, όπως αυτοί παρουσιάζονται στην διάγραμμα της εικόνας 4.13. Κάθε όρος συμβάλλει σε διαφορετικό βαθμό στη διαμόρφωση της τελικής ανύψωσης, με τους δύο πρώτους όρους οι οποίοι αποτελούν την ανύψωση κατά Stokes 2^{ης} τάξης (αλλά με διαφορετικό κυματαριθμό k), να έχουν καθοριστική συμβολή στο τελικό αποτέλεσμα. Επιπροσθέτως, η χρονοϊστορία της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για τους κυματισμούς των δύο συνθηκών φόρτισης αποτυπώνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.14, ενώ οι μέγιστες τιμές της ανύψωσης παρατίθενται στον πίνακα 4.6.



Εικόνα 4.13: Χρονοϊστορία της ανύψωσης του κυματισμού της συνθήκης LC2, κατά Stokes 5^{ης} τάξης, όπου απεικονίζονται και οι δύο όροι της συνάρτησης.

Πίνακας 4.6: Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, κατά Stokes 5^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης		μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\max}[\text{m}]$	ελάχιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\min}[\text{m}]$
LC1	$H_1=7\text{m}$	4,15	-2,85
	$T_{p,H1}=6,25\text{s}$		
LC2	$H_{50}=8,8\text{m}$	5,18	-3,62
	$T_{p,H50}=7,15\text{s}$		

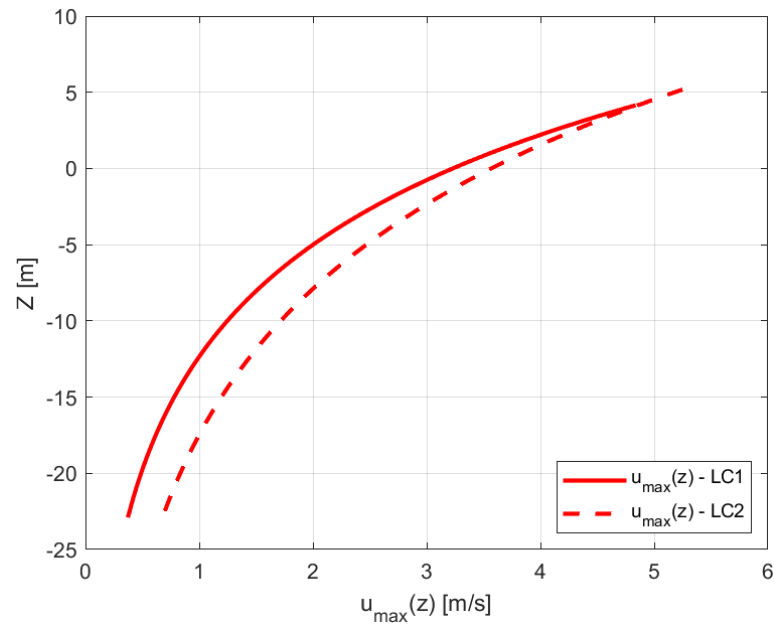


Εικόνα 4.14: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0=\text{σταθ.}$), κατά Stokes 2^{ης} τάξης.

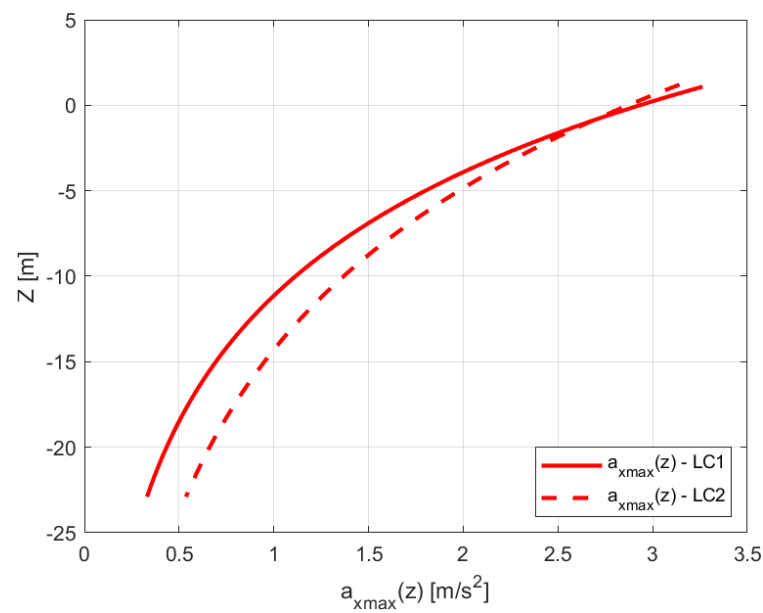
Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα, ο κυματισμός της συνθήκης LC1 χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη τιμή καμπυλότητας ε , παρουσιάζει στενότερες κορυφές και κοιλίες από τον κυματισμό της συνθήκης LC2. Εξαιτίας αυτού, η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης των σωματιδίων του εν λόγω κυματισμού είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής του κυματισμού της συνθήκης LC2, παρά το συγκριτικά μεγαλύτερο ύψος κύματος κατά την δεύτερη συνθήκη. Ωστόσο, το πλεονέκτημα ως προς το ύψος κύματος της συνθήκης LC2 οδηγεί σε μεγαλύτερη μέγιστη ταχύτητα, εν συγκρίσει με την μέγιστη ταχύτητα που προκύπτει από την κυματική συνθήκη LC1. Τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7 και στα διαγράμματα της κατανομής των μέγιστων κινηματικών μεγεθών κατά το βάθος (εικόνα 4.15 και εικόνα 4.16).

Πίνακας 4.7: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σύμφωνα με την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης .

συνθήκη φόρτισης		μέγιστη οριζόντια ταχύτητα $u_{\max}$ [m/s]	μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση $a_{x,\max}$ [m/s ²]
LC1	$H_1=7\text{m}$	4,84	3,26
	$T_{p,H1}=6,25\text{s}$		
LC2	$H_{50}=8,8\text{m}$	5,25	3,14
	$T_{p,H50}=7,15\text{s}$		



εικόνα 4.15: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{\max}$), κατά Stokes 5^{ης} τάξης.

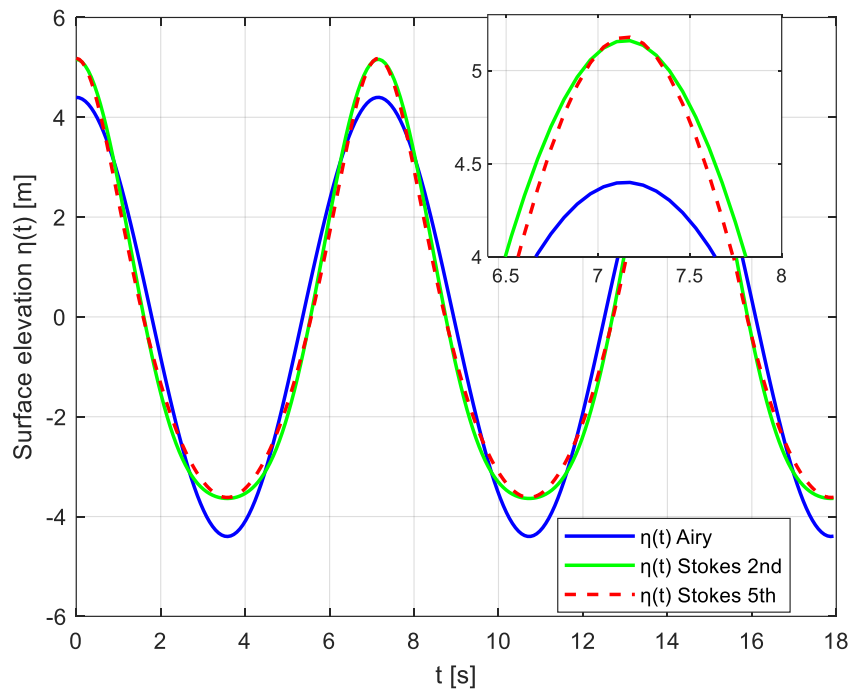


εικόνα 4.16: Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,\max}$), κατά Stokes 5^{ης} τάξης.

4.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΘΕΩΡΙΩΝ

Στην παρούσα παράγραφο συγκρίνονται τα κινηματικά μεγέθη που υπολογίσθηκαν από κάθε κυματική θεωρία. Κρίθηκε σκόπιμο, για την αποφυγή σύγχυσης του αναγνώστη, να παρουσιαστούν συγκριτικά διαγράμματα των κυματικών θεωριών που αφορούν μόνο τον κυματισμό της συνθήκης φόρτισης LC2, καθώς δεν υπάρχουν ποιοτικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν την συνθήκη LC1. Ωστόσο στους πίνακες της παραγράφου, αποτυπώνονται συνολικά οι μέγιστες τιμές των κινηματικών μεγεθών και των δύο κυματισμών των συνθηκών φόρτισης, για κάθε κυματική θεωρία.

Καταρχάς, στο διάγραμμα της εικόνας 4.17 παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της ελεύθερης επιφάνειας όπως προέκυψε από κάθε κυματική θεωρία. Όπως αναμένονταν, για τις μη γραμμικές θεωρίες Stokes προέκυψαν υψηλότερες και στενότερες κορυφές ενώ οι κοιλίες ρηχότερες και πλατύτερες, εν συγκρίσει με την συμμετρική ως προς την στάθμη ηρεμίας ανύψωση, κατά την γραμμική θεωρία. Παρά ταύτα, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των ανυψώσεων των μη γραμμικών θεωριών Stokes. Η αιτία για το φαινόμενο αυτό είναι το μεγάλο βάθος στο οποίο βρίσκεται ο πυθμένας, καθώς όταν το πεδίο θεωρείται βαθύ ($kd \gg \pi$) οι επιπλέον όροι στην εξίσωση της ανύψωσης κατά Fenton ελαχιστοποιούνται ή μηδενίζονται (εξαρτάται από την φάση). Κατά συνέπεια, οι δύο πρώτοι όροι των αναλυτικών σχέσεων της εκάστοτε μη γραμμικής θεωρίας, είναι αυτοί που κατά κύριο λόγο διαμορφώνουν την χρονοϊστορία της ελεύθερης επιφάνειας. Επομένως, οι μικρής κλίμακας διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας κατά Stokes 2^{ης} και κατά Stokes 5^{ης} τάξης, σχετίζονται άμεσα με την συμβολή των επιπλέον όρων κατά Fenton και την διαφορετική καμπυλότητα του κυματισμού αναλόγως την κυματική θεωρία με την οποία περιγράφεται (διαφορετικός κυματαριθμός k για Stokes 2^{ης} και 5^{ης} τάξης). Οι μέγιστες τιμές της ανύψωσης $\eta[m]$ για τους κυματισμούς των συνθηκών φόρτισης LC1 και LC2 που προκύπτουν από κάθε κυματική θεωρία, αποτυπώνονται στο πίνακα 4.8.

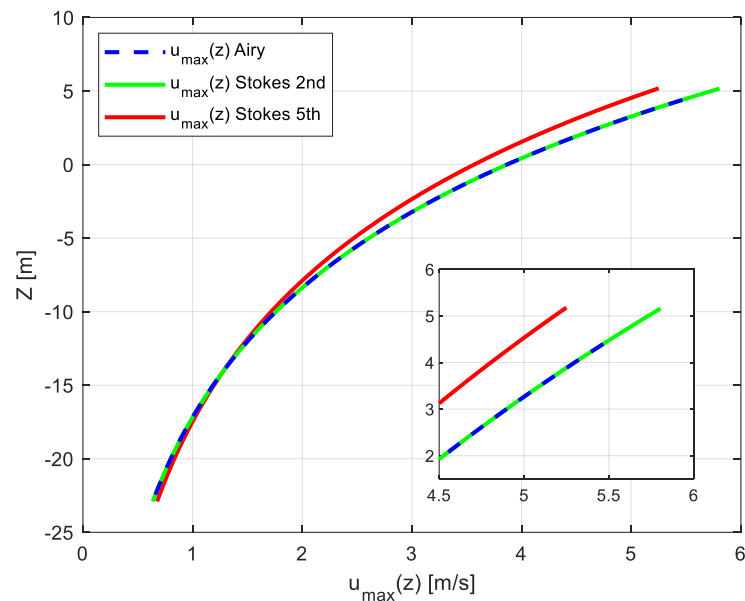


Εικόνα 4.17: Χρονοϊστορία ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας $\eta(t)$ [m] ($x=x_0$ =σταθ.) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης και Stokes 5^{ης} τάξης.

Πίνακας 4.8: Ακραίες τιμές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας των κυματισμών των συνθηκών φόρτισης LC1, LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης και Stokes 5^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\max}[\text{m}]$	ελάχιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $\eta_{\min}[\text{m}]$
LC1	Airy	3,50	-3,50
	Stokes 2 ^{ης}	4,13	-2,87
	Stokes 5 ^{ης}	4,15	-2,85
LC2	Airy	4,40	-4,40
	Stokes 2 ^{ης}	5,16	-3,64
	Stokes 5 ^{ης}	5,18	-3,62

Ακολουθώντας, στο διάγραμμα της εικόνας 4.18 παρουσιάζονται οι κατανομές των μέγιστων ταχυτήτων κατά βάθος, όπως αυτές προέκυψαν από τις εφαρμοζόμενες κυματικές θεωρίες. Εξαιτίας της απαλοιφής του δεύτερου όρου της αναλυτικής σχέσης της ταχύτητας κατά Stokes 2^{ης} τάξης λόγω του βάθους πυθμένα ($kd \gg \pi$), οι κατανομές της ταχύτητας σύμφωνα με την θεωρία Airy και Stokes 2^{ης} τάξης συμπίπτουν. Ωστόσο, οι μέγιστες τιμές τους επειδή απαντώνται στα σωματίδια της ελεύθερης επιφάνειας, διαφέρουν και συνεπώς η μέγιστη ταχύτητα προκύπτει από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης. Σύμφωνα με την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης, η σωματιδιακή ταχύτητα μεγιστοποιείται την ίδια χρονική στιγμή με την ελεύθερη επιφάνεια. Παρα ταύτα, η συγκριτικά μικρότερη καμπυλότητα του κυματισμού σύμφωνα με την εν λόγω θεωρία (μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης c , μικρότερος κυματαριθμός k), σε συνδυασμό με την μηδενική επιρροή του πυθμένα (ελαχιστοποίηση των επιπλέον όρων), οδηγεί σε μικρότερες τιμές ταχύτητας καθ' όλο το εκτιμώμενο βάθος, σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τις προηγούμενες δύο θεωρίες. Σημειώνεται ότι κατόπιν του διαγράμματος, παρατίθεται πίνακας (πίνακας 4.9) με τις μέγιστες τιμές των κινηματικών που προέκυψαν από κάθε θεωρία, για τους κυματισμούς των συνθηκών φόρτισης LC1 και LC2.



Εικόνα 4.18: Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $u=u_{\max}$) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης και Stokes 5^{ης} τάξης.

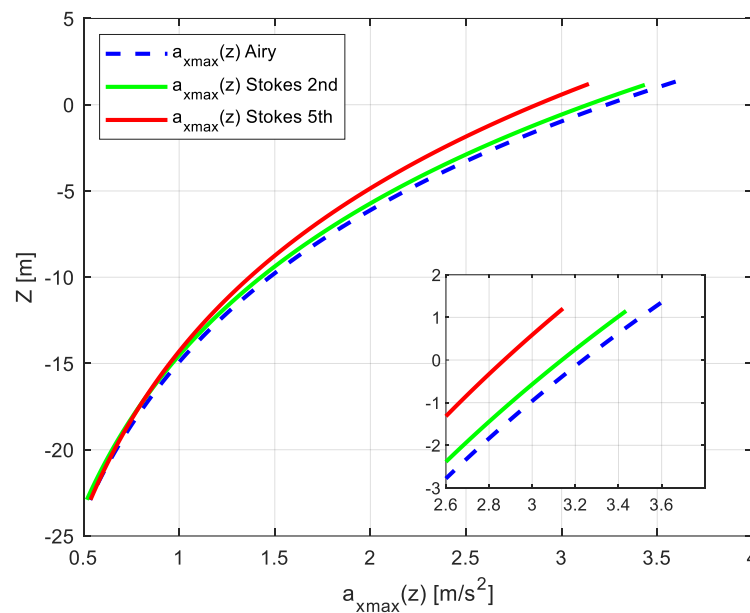
Πίνακας 4.9: Μέγιστες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης των κυματισμών των συνθηκών φόρτισης LC1, LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης και Stokes 5^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	μέγιστη οριζόντια ταχύτητα $u_{\max}$ [m/s]	μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση $a_{x,\max}$ [m/s ²]	Ανύψωση η [m] κατά την μέγιστη επιτάχυνση $a_{x,\max}$
LC1	Airy	5,05	3,76	1,14
	Stokes 2 ^{ης}	5,38	3,58	0,90
	Stokes 5 ^{ης}	4,84	3,26	1,08
LC2	Airy	5,47	3,60	1,34
	Stokes 2 ^{ης}	5,80	3,44	1,15
	Stokes 5 ^{ης}	5,25	3,14	1,21

Τελικώς, οι κατανομές κατά βάθος των μέγιστων επιταχύνσεων όπως προέκυψαν από κάθε κυματική θεωρία, παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 4.19. Καταρχάς παρατηρείται ότι, οι κατανομές των επιταχύνσεων που προκύπτουν από τις θεωρίες Airy και Stokes 2^{ης} τάξης, παρουσιάζουν ελάχιστη απόκλιση και για μεγάλο βάθος τείνουν να ταυτιστούν. Όπως στην αντίστοιχη σύγκριση για τις κατανομές των ταχυτήτων, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, η αιτία που παρουσιάζεται αυτό το αποτέλεσμα έγκειται στο βάθος του πυθμένα ($kd \gg \pi$), αφού η επιτάχυνση κατά Stokes 2^{ης} τάξης καταλήγει να περιγράφεται μόνο από τον πρώτο όρο, ο οποίος ισούται με την αναλυτική σχέση της επιτάχυνσης, σύμφωνα με την γραμμική θεωρία.

Ωστόσο οι κατανομές των μέγιστων επιταχύνσεων κατά Airy και Stokes 2^{ης} τάξης, σε αντίθεση με τις κατανομές ταχυτήτων, δεν ταυτίζονται πλήρως, διότι ανταποκρίνονται σε διαφορετική χρονική στιγμή. Αναλυτικότερα, η επιτάχυνση σύμφωνα με την θεωρία Airy και Stokes 2^{ης} τάξης στα βαθιά, λαμβάνει την μέγιστη τιμή της όταν μεγιστοποιείται ο συνδυασμός της φάσης της με τη φάση της ελεύθερης επιφάνειας, εφόσον η μέγιστη τιμή της θέσης z στον κατακόρυφο άξονα λαμβάνεται από την ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή ισχύει $a_x = \max$, για $t = t_o$ τέτοιο ώστε $e^{k \cdot \eta(\theta(t_o))} \cdot \sin(\theta(t_o)) = \max$. Όμως, επειδή η θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης περιγράφει με έναν επιπλέον όρο την ανύψωση $\eta[m]$, η επιτάχυνση μεγιστοποιείται σε διαφορετική χρονική στιγμή και σε διαφορετικό ύψος της ελεύθερης

επιφάνειας, σε σχέση με την γραμμική θεωρία. Για τους κυματισμούς των συνθηκών φόρτισης, καθώς η συμβολή του δευτέρου όρου της ανύψωσης κατά Stokes έχει ελαχιστοποιηθεί λόγω μη επιρροής του πυθμένα, η ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζει ομαλό ρυθμό μεταβολής ως προς τον χρόνο, σε σχέση με τα αποτελέσματα σε μη βαθύ πεδίο όπου θα επηρέαζε ο πυθμένας την κινηματική. Ως εκ τούτου, η μέγιστη επιτάχυνση κατά Stokes 2^{ης} τάξης προκύπτει σε χαμηλότερο επίπεδο της ελεύθερης επιφάνειας από ότι η μέγιστη επιτάχυνση κατά Airy και κατ' επέκταση λαμβάνει μικρότερη τιμή.



εικόνα 4.19 Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση συναρτήσει του βάθους ($x=x_0$ =σταθ. και $t=t_0$ όπου $a_x=a_{x,max}$) για τον κυματισμό της συνθήκης LC2, σύμφωνα με τις κυματικές θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης και Stokes 5^{ης} τάξης.

Για τους ίδιους ακριβώς λόγους της προηγούμενης παραγράφου, η μέγιστη επιτάχυνση κατά Stokes 5^{ης} τάξης προκύπτει και αυτή σε χαμηλότερο επίπεδο ελεύθερης επιφάνειας από την μέγιστη κατά Airy επιτάχυνση. Παρόλα αυτά, το σημείο αυτό βρίσκεται ελαφρώς ψηλότερα από το αντίστοιχο για την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, λόγω της ύπαρξης των ανώτερων όρων στην εξίσωση Fenton της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Εξαιτίας, όμως, της μειωμένης τιμής του κυματαριθμού k και κατά συνέπεια της μέση τιμής καμπυλότητας ε , η μέγιστη επιτάχυνση κατά Stokes 5^{ης} τάξης υπολογίζεται μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή κατά Stokes 2^{ης} τάξης και κατά Airy.

Κεφάλαιο 5 Κυματικές φορτίσεις

Η επίδραση των κυματισμών και του ανέμου αποτελούν τις κύριες περιβαλλοντικές φορτίσεις και κατά συνέπεια συνεκτιμώνται κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό των υπεράκτιων κατασκευών. Σχετικά με τις πλωτές κατασκευές έδρασης ανεμογεννητριών, τα πρότυπα του DNV(2024) υποδεικνύουν συνδυασμούς περιβαλλοντικών μεγεθών, όπως ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα, με συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς και σε συγκεκριμένες συνθήκες, που απαιτούνται να ληφθούν υπόψη στην κατά περίπτωση ανάλυση. Ειδικότερα, στην αρχική δημοσίευση όπου παρουσιάστηκε η πλατφόρμα WindFloat (Roddier et al., 2010), αναφέρεται πως για τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος (πύργος, πλατφόρμα) έγινε συνδυαστική δυναμική ανάλυση κατά την οποία ελήφθησαν υπόψη τόσο η επίδραση του ανέμου όσο και των κυματισμών.

Ωστόσο, για την προκαταρκτική δομική αξιολόγηση της WindFloat ως προς τα εντατικά μεγέθη, υποτέθηκε ότι η φόρτιση της κατασκευής οφείλεται κυρίως στην επίδραση των κυματισμών. Το γεγονός αυτό, ειδικά στα πλαίσια προκαταρκτικής έρευνας, δεν αποτελεί αυθαιρεσία ή παράλειψη, καθώς σύμφωνα και με τα πρότυπα DNV (2024) οι κυματισμοί αποτελούν την κύρια πηγή φόρτισης των μελών της κατασκευής, που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ως εκ τούτου, η επιλογή της κατάλληλης θεωρίας για την περιγραφή του κυματικού πεδίου είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού αναλόγως την εφαρμοζόμενη κυματική θεωρία διαφοροποιούνται οι φορτίσεις και κατ' επέκταση και τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Chatziioannou et al., 2017). Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίσθηκαν οι κυματικές φορτίσεις της πλατφόρμας WindFloat, που προκύπτουν υπό τις συνθήκες φόρτισης LC1, LC2 της περιοχής μελέτης (εν δυνάμει ΠΟΑΥΑΠ Κρήτη 1) (Πίνακας 2.2), για κάθε κυματική θεωρία του τέταρτου κεφαλαίου.

5.1 Η εξίσωση Morison

Ο υπολογισμός των κυματικών φορτίσεων των δομικών μελών της κατασκευής έγινε δυνατός μέσω της εξίσωσης Morison (Morison et al., 1950) (σχέση 5.1). Η εφαρμογή της βασίζεται στην παραδοχή ότι, η παρουσία του μέλους δεν επιδρά ουσιαστικά στη ροή και κατά συνέπεια οι επιδράσεις των μετασχηματισμών του κυματισμού, όπως η περίθλαση και η ανάκλαση, αμελούνται. Συνεπώς, το πεδίο εγκυρότητας της εξίσωσης καθορίζεται από το λόγο του

χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου (διάμετρος D για κυλινδρικά στοιχεία) προς το μήκος κύματος λ , αφού πρέπει να ισχύει $D/\lambda < 0,2$. Σχετικά με τα μέλη της πλατφόρμας WindFloat, η συγκεκριμένη ανισότητα ισχύει για κάθε μήκος κύματος που προκύπτει από τις κυματικές θεωρίες.

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho D u |u| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5.1)$$

- Όπου:

- F : η δύναμη ανά μονάδα μήκους [N/m].
- C_D : συντελεστής συρτικής δύναμης.
- C_M : συντελεστής αδρανειακής δύναμης.
- ρ : πυκνότητα υγρού [kg/m³] ($\rho=1025$ για θαλασσινό νερό).
- D : Η διάμετρος του κυλίνδρου [m].
- u : Η οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων [m/s].

Η εξίσωση Morison (σχέση 5.1) περιλαμβάνει δύο όρους, οι οποίοι συνεισφέρουν με διαφορετικό τρόπο στην διαμόρφωση της συνολικής δύναμης. Ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην συρτική συνιστώσα της δύναμης ή αλλιώς οπισθέλκουσα F_D (drag force) και εξαρτάται κυρίως από τις διαφορές πίεσης που αναπτύσσονται γύρω από το μέλος, ως αποτέλεσμα της αποκόλλησης της ροής ανάντη και κατόντη, λόγω ιξώδους. Ο δεύτερος όρος εκφράζει την αδρανειακή συνιστώσα F_M (inertia force), η οποία σχετίζεται με την επιτάχυνση των σωματιδίων και αποδίδεται στη μη μόνιμη κατανομή της πίεσης γύρω από το μέλος. Η αδρανειακή δύναμη αποκτά μεγαλύτερη σημασία σε χαμηλές ταχύτητες ωστόσο υπολογίζεται σε όλες τις περιπτώσεις ροής. Οι 2 συνιστώσες εξαρτώνται από την πυκνότητα του ρευστού καθώς και από την εκτεθειμένη επιφάνεια του μέλους.

Η σχετική συμβολή κάθε συνιστώσας δύναμης καθορίζεται από τους αντίστοιχους συντελεστές (C_D, C_M). Οι συντελεστές αυτοί δεν είναι σταθεροί, αλλά εξαρτώνται από την τιμή 3 αδιάστατων παραμέτρων: Τον αριθμό Reynolds (Re), τον αριθμό Keulegan-Carpenter (KC) και την τραχύτητα (Δ). Η τιμή του του αριθμού Reynolds (Re) αποτελεί βασικό κριτήριο για το χαρακτηρισμό της φύσης των ασκούμενων φορτίων. Όπως προκύπτει από την εξίσωση, για μεγάλες τιμές του αριθμού καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι αδρανειακές δυνάμεις.

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{\text{viscous forces}}{\text{inertia forces}} \quad (5.2)$$

- Όπου:
- U: Η μέγιστη ταχύτητα σωματιδίου του ρευστού[m/s].
- ν : Το κινηματικό ιξώδες του ρευστού [m²/s].
- D: Η διάμετρος του κυλίνδρου [m].

Αντίστοιχα, ο αριθμός Keulegan-Carpenter (KC) ο οποίος ορίζεται από την σχέση 5.3, αποτελεί δείκτη για την επικρατέστερη συνιστώσα της δύναμης. Πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι η επικράτηση της μίας ή της άλλης συνιστώσας εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του αριθμού KC. Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές (KC<5) η ταχύτητα της ροής είναι περιορισμένη σε σχέση με το χαρακτηριστικό μήκος του σώματος, με αποτέλεσμα η ροή να μην αποκολλάται πλήρως και οι αδρανειακές δυνάμεις να είναι κυρίαρχες. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές (KC>20), η ροή χαρακτηρίζεται από υψηλές ταχύτητες και κυρίαρχες είναι οι συρτικές δυνάμεις. Για ενδιάμεσες τιμές του αριθμού KC, η συμβολή και των δύο συνιστωσών είναι ουσιαστική.

$$KC = \frac{UT}{D} \quad (5.3)$$

- Όπου:
- U: Η μέγιστη ταχύτητα σωματιδίου του ρευστού[m/s].
- T: Η περίοδος του κυματισμού [s].
- D: Η διάμετρος του κυλίνδρου [m].

Τέλος, η τραχύτητας Δ εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του σώματος και το χαρακτηριστικό του μήκος, όπως εκφράζεται στην εξίσωση 5.4. Ακραίες περιπτώσεις αφορούν σε λείο σώμα (smooth) για $\Delta < 10^{-4}$ και σε τραχύ σώμα (rough) για $\Delta > 10^{-2}$. Γενικά, η αύξηση της τραχύτητας ενισχύει την επίδραση του σώματος στη ροή, οδηγώντας στην επικράτηση του συρτικών δυνάμεων.

$$\Delta = \frac{k}{D} \quad (5.4)$$

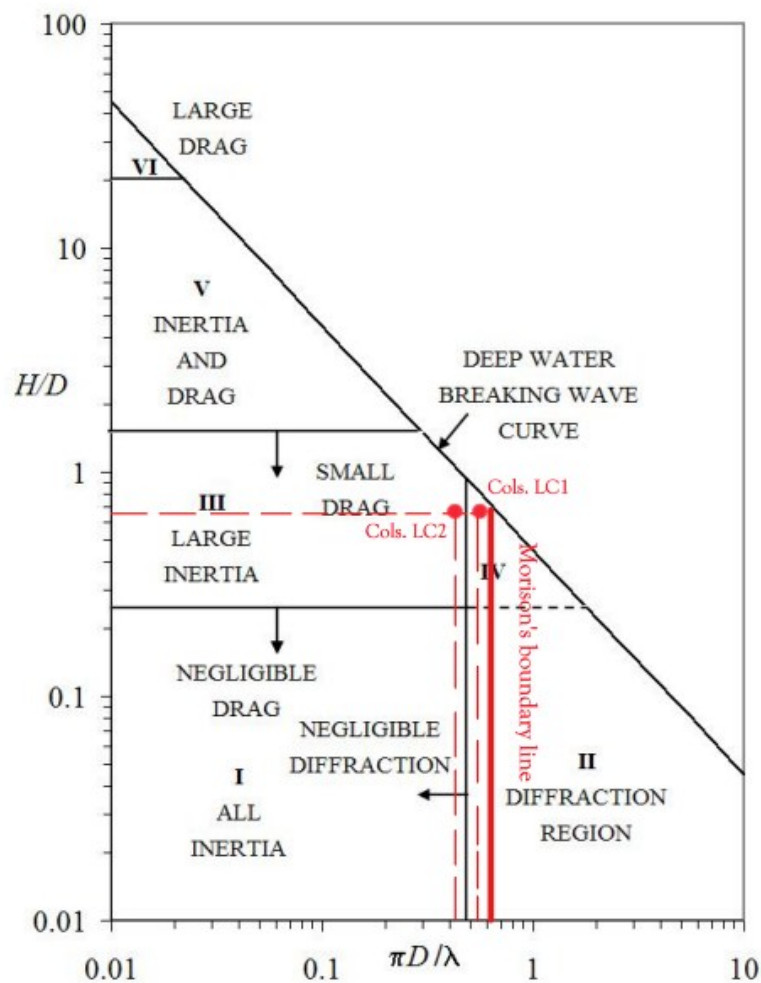
- Όπου:
- k: το ύψος της τραχύτητας του μέλους, που εξαρτάται από το υλικό [m].
- D: Η διάμετρος του κυλίνδρου [m].

5.2 Πεδίο εφαρμογής εξίσωσης Morison στην περιοχή μελέτης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προηγουμένως, για την εφαρμογή της εξίσωσης Morison, αποτελεί βασική προϋπόθεση το εκάστοτε μέλος να θεωρείται λεπτό (slender structure) σε σχέση με το μήκος κύματος του κυματισμού και να ισχύει η ανισότητα $D/\lambda < 0,2$. Σε αυτήν την περίπτωση, η αλληλεπίδραση κύματος - κατασκευής δεν προκαλεί σημαντική περίθλαση ή ανάκλαση και η φόρτιση του στοιχείου μπορεί να προσεγγιστεί ως άθροισμα της δύναμης αδρανείας και της συρτικής δύναμης. Αντιθέτως, όταν η βασική διάσταση του εκάστοτε στοιχείου είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος (large volume structure) η εφαρμογή της εξίσωσης Morison δεν είναι πλέον ορθή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ροή γύρω από το στοιχείο υφίσταται έντονα φαινόμενα περίθλασης (diffraction), με αποτέλεσμα οι κυματικές φορτίσεις να πρέπει να υπολογιστούν με την μέθοδο περίθλασης (diffraction method), ή σε συνδυασμό με μεθόδους δυναμικού (potential flow theory), όπως η θεωρία Froude – Krylov.

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Chakrabarti, 1987) αποτυπώνονται τα πεδία εφαρμογής των μεθόδων υπολογισμού κυματικών φορτίσεων (εικόνα 5.1). Ο οριζόντιος άξονας αφορά τον αδιάστατο λόγο $\pi D/\lambda$, όπου D η διάμετρος κατακόρυφου κυλινδρικού μέλους και λ το μήκος κύματος, όπως προκύπτει από την γραμμική θεωρία. Όταν ο λόγος $\pi D/\lambda$ είναι μεγαλύτερος του 0,5, τότε για τον υπολογισμό των δυνάμεων του στοιχείου πρέπει να ληφθεί υπόψη η περίθλαση του κυματισμού. Διευκρινίζεται ότι, επι του διαγράμματος έχει σημειωθεί η ευθεία $x=0,0628$, η οποία αντιστοιχεί στον λόγο $D/\lambda=0,2$. Ο κατακόρυφος άξονας ταυτίζεται με τον αδιάστατο λόγο H/D , όπου H το ύψος κύματος.

Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα, η εξίσωση του Morison ισχύει στις περιοχές I, III, V και VI, καθώς ο λόγος $\pi D/\lambda$ είναι μικρότερος του 0,5. Ωστόσο μπορεί να παραμείνει εφαρμόσιμη και σε ένα περιορισμένο τμήμα της περιοχής II και IV, όταν ο λόγος $\pi D/\lambda$ βρίσκεται κοντά στο κατώφλι της μετάβασης ($0,5 < \pi D/\lambda < 0,628$). Σε αυτή τη ζώνη, τα φαινόμενα περίθλασης δεν είναι ακόμα πλήρως κυρίαρχα, και η χρήση της εξίσωσης Morison μπορεί να δώσει αποδεκτά αποτελέσματα σε επίπεδο μηχανικής προσέγγισης. Αντίθετα, όταν το στοιχείο υπάγεται πλήρως στην περιοχή II και IV ($\pi D/\lambda \gg 0,5$), η αλληλεπίδραση κύματος - κατασκευής χαρακτηρίζεται από έντονα φαινόμενα περίθλασης και ανάκλασης και οι δυνάμεις πρέπει να υπολογίζονται στα πλαίσια της θεωρίας δυναμικού, με χρήση θεωρίας Froude-Krylov, σε συνδυασμό με ανάλυση περίθλασης.



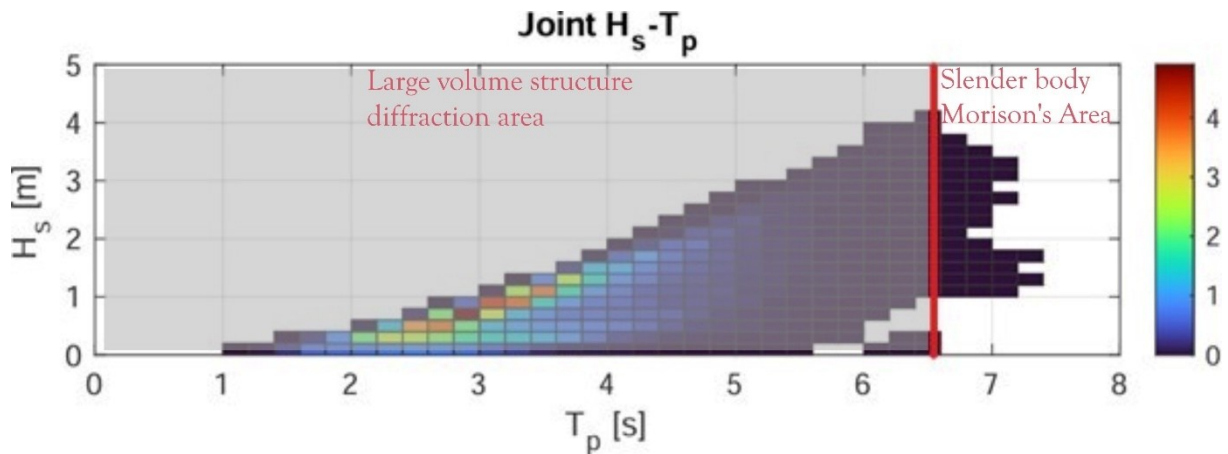
Εικόνα 5.1: Πεδία εφαρμογής των μεθόδων υπολογισμού κυματικών φορτίσεων (Chakrabarti, 1987).

Σχετικά με τα δομικά μέλη της πλατφόρμας WindFloat, για να υπολογιστούν οι φορτίσεις που δέχονται από τους κυματισμούς των συνθηκών φόρτισης LC1, LC2, εφαρμόζεται η εξίσωση Morison, καθώς ο προκύπτων λόγος $\pi D/\lambda$, για κάθε κατηγορία δομικών μελών από τις κυματικές συνθήκες φόρτισης, το επιτρέπει (πίνακας 5.1). Παρατηρείται, ωστόσο, ότι, εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου των κολόνων, ο λόγος $\pi D/\lambda$ είναι ιδιαίτερα αυξημένος και ειδικά για την συνθήκη LC1 ξεπερνάει την τιμή 0,5. Παρα ταύτα, επειδή ο λόγος $\pi D/\lambda$ για οι κολόνες στην κυματική συνθήκη LC1, παραμένει στην οριακή ζώνη μετάβασης (αφού $\pi D_{col.}/\lambda_{LC2}=0,55 < 0,628$), οι επιδράσεις της περίθλασης αμελούνται. Επιπλέον επισημαίνεται ότι, στο διάγραμμα της εικόνας 5.1 έχουν σημειωθεί οι περιοχές, στις οποίες υπάγεται ο υπολογισμός των φορτίσεων των κολόνων από κάθε κυματική συνθήκη.

Πίνακας 5.1: Ο λόγος $\pi d/\lambda$, όπως προκύπτει για κάθε κατηγορία δομικών μελών και συνθήκη φόρτισης.

συνθήκη φόρτισης	Κατηγορία δομικών μελών	$\pi D/\lambda$
LC1	Κολόνες (columns)	0,55
	Κύριες δοκοί (pontoons)	0,09
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	0,06
LC2	Κολόνες (columns)	0,42
	Κύριες δοκοί (pontoons)	0,07
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	0,04

Για τον προσδιορισμό του πεδίου εφαρμογής της εξίσωσης Morison στην περιοχή μελέτης, γενικότερα, αρκεί ο υπολογισμός της περιόδου κορυφής T_p του κυματισμού, τέτοιας ώστε για το εκάστοτε μέλος να ισχύει $\pi D/\lambda \geq 0,5$, εφόσον ληφθεί υπόψη το αυστηρότερο κριτήριο, από το διάγραμμα Chakrabarti. Επομένως, ο υπολογισμός των φορτίσεων με την χρήση της εξίσωσης Morison μπορεί να πραγματοποιηθεί, στις κολόνες από την επιρροή κυματισμών με $T_p \geq 6,56$ sec, στις κύριες συνδετήριες δοκούς από την επιρροή κυματισμών με $T_p \geq 2,70$ sec και στις διαγώνιες συνδετήριες δοκούς από την επιρροή κυματισμών με $T_p \geq 2,20$ sec. Εφόσον τα προαναφερθέντα συμπεράσματα για τις περιόδους κορυφής αποτυπωθούν στο διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης (εικόνα 5.2), γίνεται αντιληπτό ότι, για τον υπολογισμό των συνολικών φορτίσεων της εξέδρας WindFloat που προκύπτουν από τις συνήθεις κυματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση Morison και πρέπει να ληφθούν, οπωσδήποτε, υπόψη οι επιδράσεις της περίθλασης και της ανάκλασης.

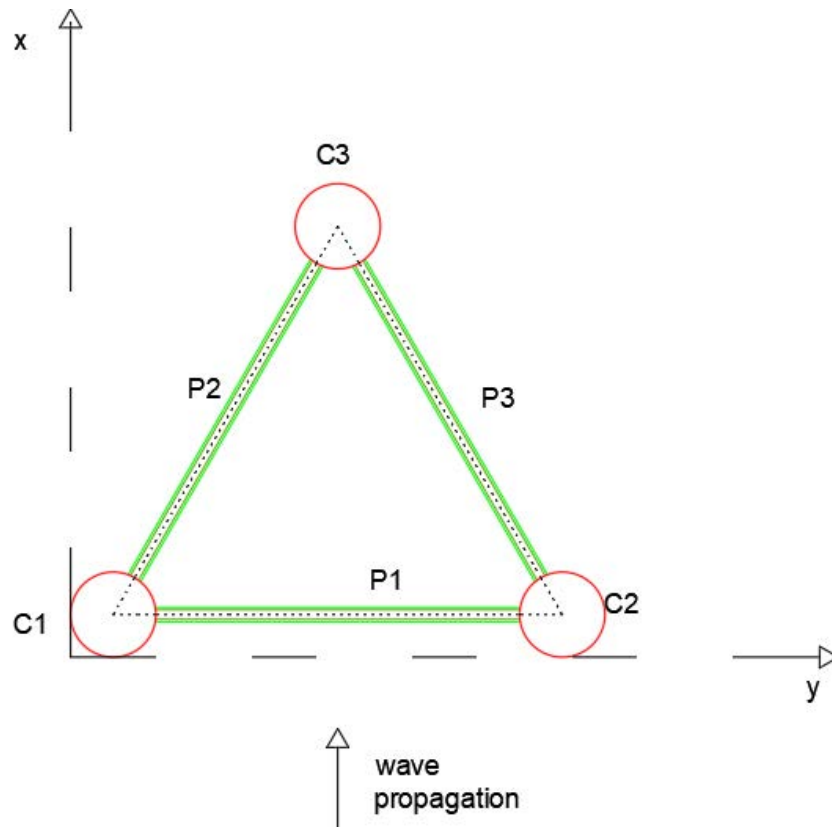


εικόνα 5.2: Διάγραμμα πιθανότητας κοινής εμφάνισης H_s - T_p της περιοχής μελέτης, όπου παρουσιάζονται τα πεδία για τα οποία η WindFloat συνολικά θεωρείται μεγάλης κλίμακας κατασκευή και πρέπει να ληφθούν οι επιδράσεις της περιθλάσης στον υπολογισμό της συνολικής φόρτισης.

5.3 Διαδικασία υπολογισμού των φορτίσεων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι υπολογισμοί αρκέστηκαν στις οριζόντιες συνιστώσες των κυματικών φορτίσεων, ενώ οι κατακόρυφες αμελήθηκαν. Η παραδοχή αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι, οι ημιβυθισμένες πλατφόρμες εξαιτίας της γεωμετρίας τους παρουσιάζουν μικρότερες κατακόρυφες μετακινήσεις και στροφές σε σχέση με άλλου τύπου πλωτές υποδομές (DNV, 2021). Για το λόγο αυτό, στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν μόνο οι οριζόντιες συνιστώσες των κινηματικών μεγεθών, καθώς αυτές είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των οριζόντιων κυματικών φορτίσεων, μέσω της εξίσωσης Morison. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι οι κυματισμοί προελαύνουν κατά μέτωπο της κολόνας η οποία φέρει την ανεμογεννήτρια (κολόνα C3), όπως φαίνεται στην κάτοψη της εικόνας 5.3, καθώς για αυτή την διεύθυνση προκύπτουν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη της πλατφόρμας WindFloat (Roddier et al., 2010).

Διευκρινίζεται ότι από τον υπολογισμό των φορτίσεων εξαιρέθηκαν, οι συνδετήριες δοκοί (braces) στο άνω μέρος της κατασκευής, αφού όπως προκύπτει από τις μέγιστες τιμές της ανύψωσης αυτές δεν βρέχονται από τους κυματισμούς, όπως επίσης και οι πλάκες παγίδευσης νερού (water entrapment plates) εξαιτίας του μεγάλου βάθους στο οποίο βρίσκονται σε συνδυασμό με το ελάχιστο ύψος τους.

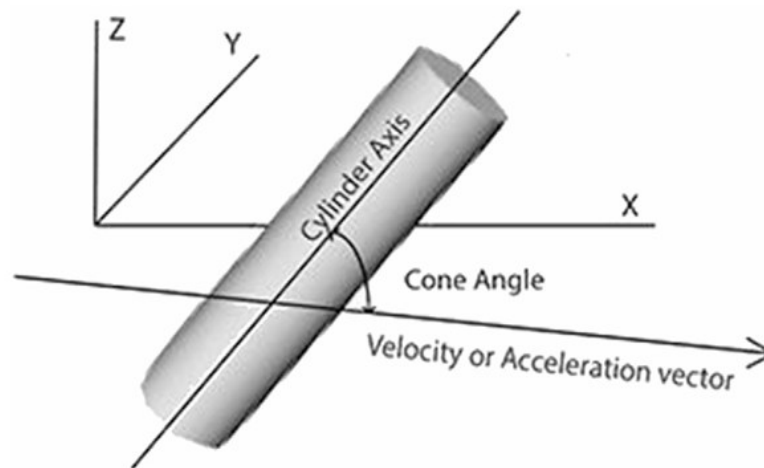


εικόνα 5.3: Κάτοψη WindFloat, όπου φαίνεται η διεύθυνση του κυματισμού και η θέση των κολόνων C1,C2 στον άξονα x.

Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των φορτίσεων της πλατφόρμας WindFloat, εφαρμόστηκε μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου κώδικα στο λογισμικό περιβάλλον του MATLAB. Αρχικώς ορίστηκε σύστημα συντεταγμένων xyz , όπου ο άξονας x αντιστοιχεί στην διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, ο άξονας y κάθετος στην διεύθυνση των κυματισμών, ενώ ο κατακόρυφος άξονας z αντιστοιχεί στο βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια έως το λειτουργικό βύθισμα της κατασκευής (operational draft = -22,9 m) και η μηδενική τιμή του ισοδυναμεί με την στάθμη ηρεμίας (Still Water Level). Επιπλέον θεωρήθηκε ότι, η μηδενική τιμή του άξονα x αντιστοιχεί στην θέση στην οποία οι κυματισμοί προσπίπτουν στις κολόνες C1 και C2 (όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3). Έπειτα από την θεώρηση αυτή και λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία και τις διαστάσεις της κατασκευής, κάθε σημείο της δύναται να προσδιοριστεί από τις συντεταγμένες x,y,z .

Στην συνέχεια, αφού τα μέλη της κατασκευής διακριτοποιήθηκαν ως προς το μήκος τους, καθίσταται εφικτός ο προσδιορισμός της κατανομής της ταχύτητας και της επιτάχυνσης ως προς το μήκος των μελών για κάθε κυματική θεωρία. Για τον υπολογισμό της συρτικής και

της αδρανειακής δύναμης σε κάθε στοιχείο, οι κατανομές των αντίστοιχων κυματικών μεγεθών ολοκληρώνονται αριθμητικά με την μέθοδο των τραπεζίων. Σημειώνεται ότι, για τις συνδετήριες δοκούς προσδιορίστηκε η γωνία που σχηματίζει ο άξονάς τους με το διάνυσμα της διεύθυνσης του κυματισμού (εικόνα 5.4), με σκοπό τον υπολογισμό της συνιστώσας των κυματικών μεγεθών που είναι κάθετη στον άξονα τους, καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα προκύπταν λανθασμένα αποτελέσματα από την εξίσωση Morison. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται για διακριτοποιημένες χρονικές στιγμές του διαστήματος τριών περιόδων του κυματισμού ($t \in [0, 3T_p]$), με αποτέλεσμα να προκύπτουν οι χρονοϊστορίες των κυματικών φορτίσεων των δομικών μελών της κατασκευής.



Εικόνα 5.4: Η γωνία ανάμεσα στον άξονα του στοιχείου και το διάνυσμα διεύθυνσης του κυματισμού (DNV, 2025).

Σχετικά με τις παραμέτρους συρτικής και αδρανειακής δύναμης C_D, C_M που απαιτούνται για τον υπολογισμό των φορτίσεων σε κάθε δομικό μέλος, οι τιμές τους υπολογίστηκαν όπως υποδεικνύουν οι κατευθυντήριες οδηγίες DNV-RP-C205. Στον πίνακα 5.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε κυματική θεωρία για τις συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της τραχύτητας, υποτέθηκε πως στις επιφάνειες του εκάστοτε στοιχείου έχουν αναπτυχθεί ή προσκολληθεί θαλάσσιοι οργανισμοί (όστρακα, σπόγγοι, φύκια κλπ.). Το φαινόμενο αυτό το οποίο στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο *marine growth*, αυξάνει την τραχύτητα των μελών των υπεράκτιων κατασκευών και πολλές φορές οδηγεί σε αυξημένα φορτία.

Πίνακας 5.2: Παράμετροι συρτικής και αδρανειακής δύναμης C_D, C_M .

συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	Κολόνες (columns)			
		Re	KC	C_D	C_M
LC1	Airy	$3,7 \cdot 10^6$	2,95	0,41	2,00
	Stokes 2ης	$4,0 \cdot 10^6$	3,14	0,43	1,99
	Stokes 5ης	$3,6 \cdot 10^6$	2,83	0,40	2,00
LC2	Airy	$4,0 \cdot 10^6$	3,65	0,47	1,97
	Stokes 2ης	$4,3 \cdot 10^6$	3,87	0,49	1,96
	Stokes 5ης	$3,9 \cdot 10^6$	3,50	0,46	1,98
συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	Κύριες συνδετήριες δοκοί (Pontoons)			
		Re	KC	C_D	C_M
LC1	Airy	$5,6 \cdot 10^4$	1,55	0,45	2,00
	Stokes 2ης	$6 \cdot 10^4$	1,55	0,45	2,00
	Stokes 5ης	$5,6 \cdot 10^4$	1,69	0,45	2,00
LC2	Airy	$9,9 \cdot 10^4$	3,18	0,56	1,99
	Stokes 2ης	$9,9 \cdot 10^4$	3,18	0,56	1,99
	Stokes 5ης	$1,0 \cdot 10^5$	3,31	0,58	1,99
συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	Διαγώνιες συνδετήριες δοκοί (Braces)			
		Re	KC	C_D	C_M
LC1	Airy	$3,9 \cdot 10^5$	24,70	1,03	1,20
	Stokes 2ης	$3,9 \cdot 10^5$	24,70	1,03	1,20
	Stokes 5ης	$3,5 \cdot 10^5$	22,28	1,03	1,20
LC2	Airy	$4,0 \cdot 10^5$	28,94	1,03	1,20
	Stokes 2ης	$4,0 \cdot 10^5$	28,94	1,03	1,20
	Stokes 5ης	$3,7 \cdot 10^5$	26,36	1,03	1,20

5.4 Αποτελέσματα κυματικών φορτίσεων

Στην παρούσα παράγραφο του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα των κυματικών φορτίσεων που προέκυψαν για τις συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2, βάσει της κινηματικής από κάθε μονοχρωματική θεωρία που ελήφθη υπόψη.

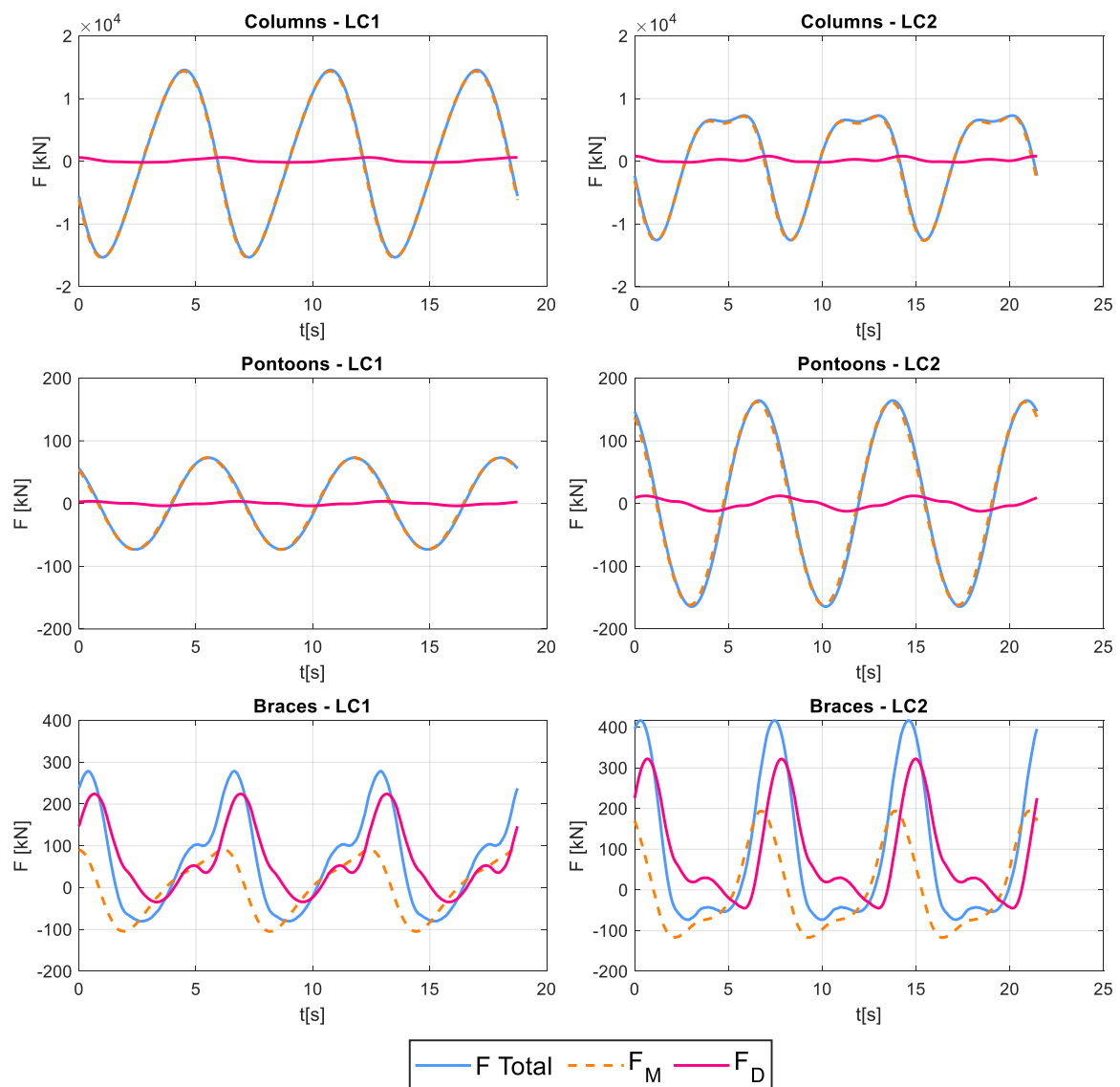
5.4.1 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ AIRY

Καταρχάς, στα διαγράμματα της εικόνας 5.5 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες συνολικής φόρτισης στις κολόνες, στις κύριες και στις διαγώνιες δοκούς, σε συνδυασμό με τις συνιστώσες της συρτικής και αδρανειακής δύναμης, όπως προέκυψαν από την κυματική θεωρία Airy για τις συνθήκες φόρτισης LC1 και LC2. Οι μέγιστες κατά απόλυτω τιμές των συνολικών φορτίσεων αλλά και των συρτικών και αδρανειακών δυνάμεων παρατίθενται στον πίνακα 5.3.

Σκοπός της παρουσίασης των εν λόγω διαγραμμάτων είναι η ανάδειξη της κυρίαρχης συνιστώσας των φορτίσεων σε κάθε κατηγορία των δομικών μελών, η οποία βέβαια μπορεί να προβλεφθεί και από τους συντελεστές C_D και C_M του πίνακα 5.2. Ειδικότερα, όπως φαίνεται από την πρώτη σειρά των διαγραμμάτων, οι κυματικές φορτίσεις που δέχονται συνολικά οι κολόνες είναι κυρίως αποτέλεσμα της συνιστώσας των αδρανειακών δυνάμεων F_M , αφού συγκριτικά με τις συρτικές δυνάμεις F_D διαφέρουν ως προς τάξη μεγέθους. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις φορτίσεις των κύριων συνδετήριων δοκών (pontoon) παραμένουν τα ίδια καθώς και σε αυτή την περίπτωση η συνολική φόρτιση φαίνεται σχεδόν να ταυτίζεται με τις αδρανειακές δυνάμεις F_M . Κοινό παρονομαστή και στις δύο περιπτώσεις αποτελεί ο μικρός αριθμός KC ($KC < 3$) για τον οποίο η παράμετρος αδρανειακής δύναμης C_M λαμβάνει την μέγιστη τιμή της. Η μικρή τιμή του αριθμού KC , στην πρώτη περίπτωση προκύπτει εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου της κάθε κολόνας, ενώ σχετικά με τις κύριες συνδετήριες δοκούς, λόγω του μεγάλου βάθους στο οποίο βρίσκονται η ταχύτητα στη συγκεκριμένη θέση λαμβάνει μικρές τιμές.

Αντίθετα, στην διαμόρφωση των κυματικών φορτίσεων που δέχονται συνολικά οι διαγώνιες συνδετήριες δοκοί (braces), μετέχουν σημαντικά και οι δύο συνιστώσες δυνάμεων. Ωστόσο, οι συρτικές δυνάμεις F_D φαίνεται να προκύπτουν μεγαλύτερες σε σχέση με τις αδρανειακές δυνάμεις F_M . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού KC ($KC > 20$), ο συντελεστής C_D είναι αυξημένος συγκριτικά με τους αντίστοιχους για τις άλλες

κατηγορίες δομικών μελών, ενώ ο συντελεστής αδρανειακής δύναμης C_M μειώνεται. Οι αυξημένες τιμές του αριθμού KC για την συγκεκριμένη κατηγορία δομικών μελών προκύπτουν εξαιτίας του συνδυασμού της μικρής διαμέτρου με τις μεγάλες τιμές μέγιστης ταχύτητας. Διευκρινίζεται ότι, οι παραπάνω διαπιστώσεις σχετικά με τις κυρίαρχες δυνάμεις σε κάθε κατηγορία των δομικών μελών, αφορούν και τις δύο συνθήκες φόρτισης, καθώς οι ελάχιστες διαφορές μεταξύ των παραμέτρων C_D, C_M αναλόγως την συνθήκη φόρτισης, δεν διαφοροποίησαν ποιοτικά τα διαγράμματα ως προς την συμβολή των συνιστωσών.



Εικόνα 5.5: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.

Πίνακας 5.3: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Airy.

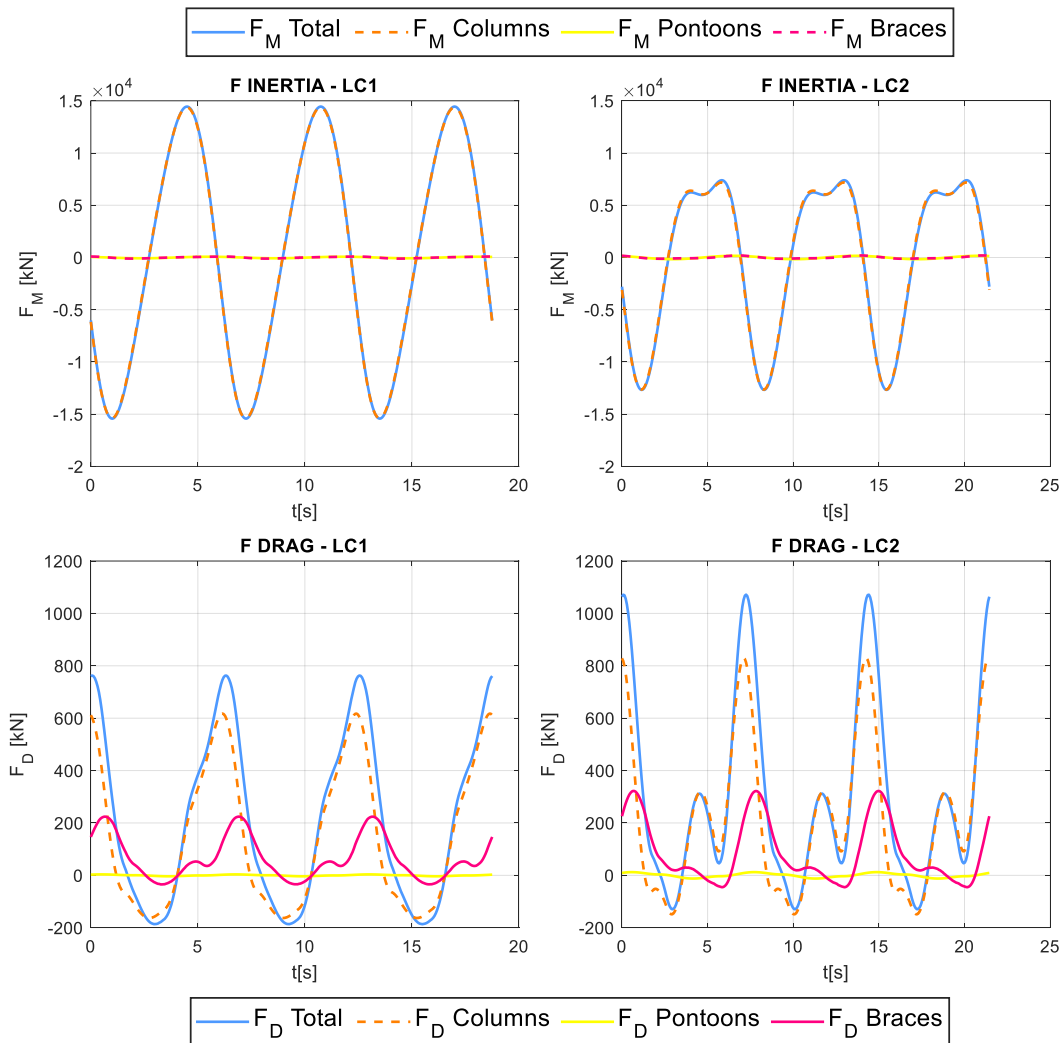
συνθήκη φόρτισης	Κατηγορία δομικών μελών	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	Κολόνες (columns)	15391	617	15305
	Κύριες δοκοί (pontoons)	73	3	73
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	105	224	279
LC2	Κολόνες (columns)	12651	830	12568
	Κύριες δοκοί (pontoons)	162	12	164
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	194	322	416

Ακολούθως, στην εικόνα 5.6 παρουσιάζονται οι συρτικές και αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, από την επαλληλία των οποίων προκύπτουν οι αντίστοιχες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή (F_M Total, F_D Total). Αναφορικά με τις συνολικές δυνάμεις αδρανείας, γίνεται σαφές ότι το συντριπτικό ποσοστό αυτών παραλαμβάνουν οι κολόνες C1,C2,C3. Για αυτό το αποτέλεσμα υπεύθυνη είναι η δεκαπλάσια διάμετρος των κολόνων έναντι των συνδετήριων δοκών ($D_C=10,7\text{ m} \gg \{D_B=1,2\text{ m}, D_P=1,8\text{ m}\}$), καθώς οδηγεί σε αυξημένη συνολική μάζα η οποία πολλαπλασιαζόμενη με την επιτάχυνση ισούται με την δύναμη αδρανείας ανά μονάδα μήκους βάσει της εξίσωσης Morison.

Ωστόσο, αυτή η χαρακτηριστική διαφορά ανάμεσα στις διαμέτρους των κολόνων και συνδετήριων δοκών έχει ως αποτέλεσμα η σχετική ταχύτητα για οι κολόνες να προκύπτει αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη για τις διαγώνιες δοκούς και κατ' επέκταση η παράμετρος C_D της δεύτερης κατηγορίας μελών να είναι αυξημένη έναντι της πρώτης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στην δεύτερη σειρά διαγραμμάτων της εικόνας 5.6, φαίνεται πως

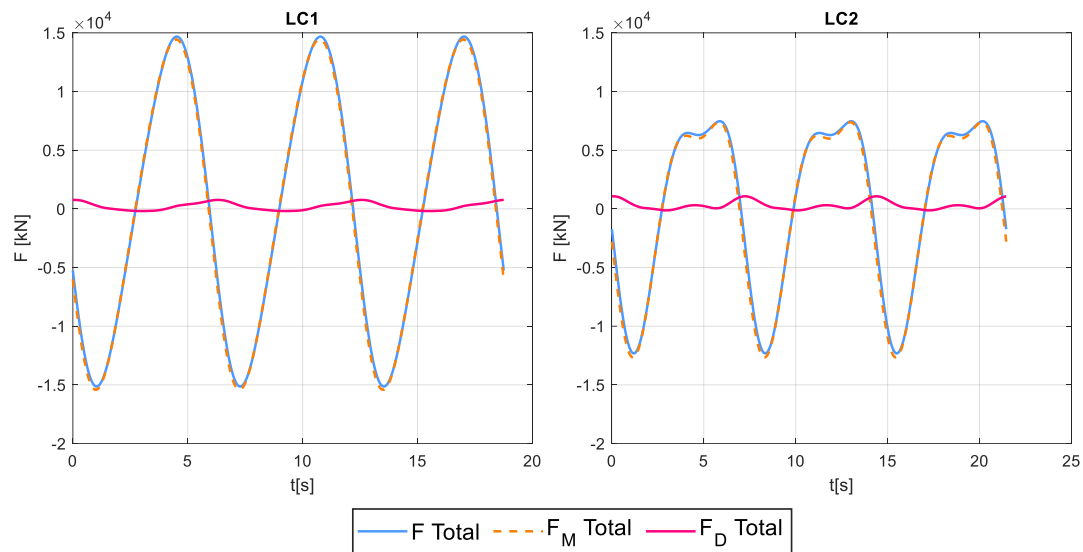
οι συρτικές δυνάμεις που ασκούνται στις συνδετήριες δοκούς δεν είναι αμελητέες, αντιθέτως, αποτελούν σημαντικό ποσοστό των συνολικών συρτικών δυνάμεων που ασκούνται στην κατασκευή. Παρόλα αυτά, οι μέγιστες συρτικές δυνάμεις αναπτύσσονται στις κολόνες. Κύρια αιτία για το αποτέλεσμα αυτό αποτελεί η συγκριτικώς μεγαλύτερη περιφέρεια των κολόνων, η οποία συνεπάγεται μεγαλύτερη επιφάνεια όπου αναπτύσσεται η διαφορά πίεσης. Ένας ακόμη λόγος είναι ότι, λόγω της διεύθυνσης του κυματισμού που έχει επιλεγεί στην παρούσα εργασία, κατά τον υπολογισμό των συρτικών δυνάμεων στις κολόνες το μέτρο της ταχύτητας λαμβάνεται αυτούσιο, καθώς το διάνυσμα της είναι κάθετο στον άξονα της εκάστοτε κολόνας. Αυτό δεν ισχύει κατά τον υπολογισμό των δυνάμεων στις διαγώνιες δοκούς, αφού λαμβάνεται το μέτρο της κάθετης στην δοκό, συνιστώσας της ταχύτητας το οποίο ασφαλώς είναι μικρότερο.

Σχετικά με συρτικές και αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις κύριες συνδετήριες δοκούς (prontoons), είναι απολύτως λογικό να προκύπτουν τόσο μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες στις υπόλοιπες κατηγορίες μελών. Αυτό συμβαίνει διότι, τα κινηματικά μεγέθη που λαμβάνονται στον υπολογισμό των δυνάμεων παρουσιάζουν πολύ χαμηλές τιμές κατά μήκος των κύριων δοκών, αφού αυτές εκτείνονται οριζοντίως σε, σταθερά, μεγάλο βάθος.



Εικόνα 5.6: Αδραμειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.

Η συνολική κυματική φόρτιση της κατασκευής παρουσιάζεται στα διαγράμματα της εικόνας 5.7, όπως επίσης και οι συνιστώσες δυνάμεις από το άθροισμα των οποίων αυτή προκύπτει. Παρατηρείται ότι, η φόρτιση της κατασκευής διαμορφώνεται, επί το πλείστον, από τις αδραμειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά σε αυτή. Το αποτέλεσμα θεωρείται αναμενόμενο καθώς, όπως διαπιστώθηκε προηγουμένως από τα διαγράμματα της εικόνας 5.6, το μεγαλύτερο μέρος των κυματικών φορτίων ασκείται στις κολόνες, στα οποία, από τα διαγράμματα της εικόνας 5.5, κατέστη σαφές ότι κυριαρχούν οι αδραμειακές δυνάμεις. Επισημαίνεται ότι, οι μέγιστες τιμές των συρτικών και αδραμειακών δυνάμεων αλλά και της συνολικής φόρτισης που προκύπτουν από τους κυματισμούς των συνθηκών LC1 και LC2, παρατίθενται στον πίνακα 5.4.



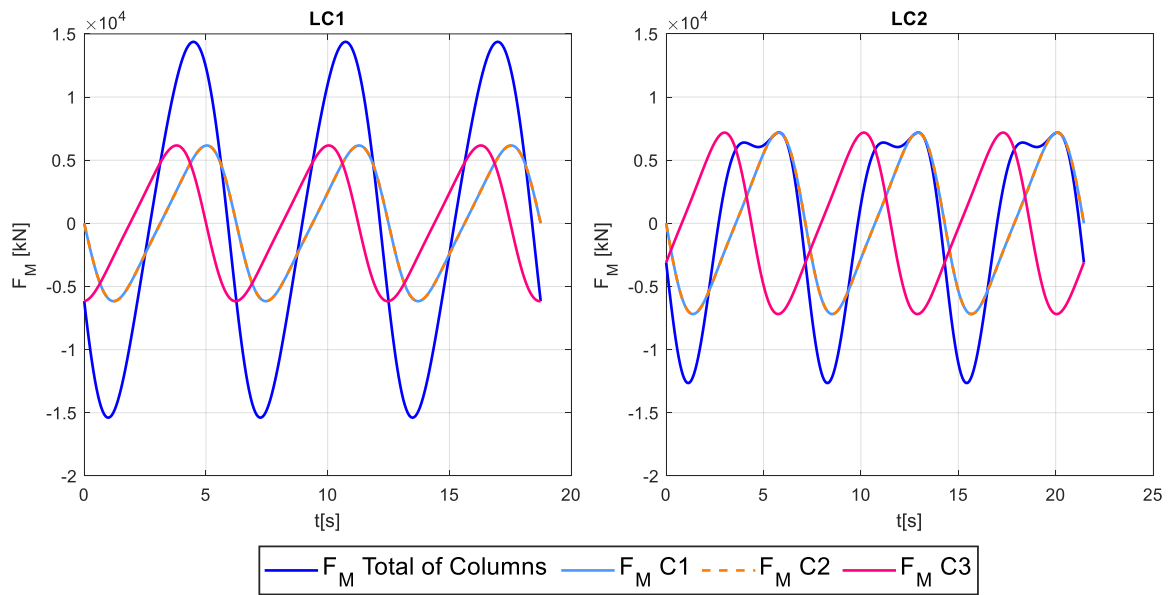
Εικόνα 5.7: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.

Πίνακας 5.4: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.

συνθήκη φόρτισης	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	15427	763	15145
LC2	12675	1071	12325

Από τον πίνακα 5.4 και τα διαγράμματα της εικόνας 5.7 διαπιστώνεται ότι, η συνολική φόρτιση που προκύπτει από τον κυματισμό της συνθήκης LC1 λαμβάνει αρκετά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές, σχεδόν διπλάσιες από τις μέγιστες τιμές της φόρτισης που διαμορφώνονται από την κυματική συνθήκη LC2. Η αιτία της κρίσιμης αυτής διαφοράς απαντάται στα διαγράμματα της εικόνας 5.8, όπου παρουσιάζονται οι αδρανειακές δυνάμεις που δέχεται κάθε κολόνα και το άθροισμα αυτών που αποτελεί τις συνολικές αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες δρουν στην συγκεκριμένη κατηγορία δομικών μελών. Ο λόγος που εξετάζεται η διαμόρφωση των αδρανειακών δυνάμεων στις κολόνες είναι το γεγονός ότι η χρονοϊστορία αυτών σχεδόν ταυτίζεται με την συνολική φόρτιση της κατασκευής.

Καταρχάς, από τα εν λόγω διαγράμματα παρατηρείται ότι, οι μέγιστες αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κολόνα ξεχωριστά προκύπτουν μεγαλύτερες για την κυματική συνθήκη φόρτισης LC2 ($F_{M_{max,C,LC2}} = 7184 \text{ kN}$), συγκριτικά με αυτές της συνθήκης LC1 ($F_{M_{max,LC1}} = 6166 \text{ kN}$). Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται λογικό, καθώς συμβαδίζει με την κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης κατά βάθος, όπως παρουσιάστηκε στο 4ο κεφάλαιο (εικόνα 4.3), όπου οι τιμές της επιτάχυνσης για τον κυματισμό της συνθήκης LC2 προέκυπταν μεγαλύτερες καθ' όλο το βάθος, εκτός μόνο από την περιοχή κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια.



Εικόνα 5.8: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy.

Επιπλέον, και στα δυο διαγράμματα παρατηρείται ότι, για κάθε χρονική στιγμή, οι αδρανειακές δυνάμεις στις κολόνες C1, C2 είναι ίσες, ενώ διαφέρουν από τις τιμές των αδρανειακών δυνάμεων στην κολόνα C3. Η αιτία του φαινομένου αυτού είναι η διαφορά φάσης, που παρουσιάζεται τόσο στην ελεύθερη επιφάνεια όσο και στην επιτάχυνση. Αναλυτικότερα, αφού οι κολόνες C1,C2 βρίσκονται στην ίδια θέση στον άξονα διεύθυνσης του κυματισμού ($x_{C1} = x_{C2}$) και η κολόνα C3 σε απόσταση B [m] από αυτά ($x_{C3} = x_{C1} + B$), τότε η φάση του προσπίπτοντος στην κολόνα C3 κυματισμού Θ_{C3} σε μία τυχαία χρονική στιγμή t , διαφέρει από τη φάση του προσπίπτοντος κυματισμού στα πρώτες κολόνες $\Theta_{C1,2}$ κατά $2\pi \frac{B}{\lambda} \text{ rad}$ (6.4.1.1). Συνεπώς, εφόσον οι αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες, είναι αποτέλεσμα της επαλληλίας των αδρανειακών δυνάμεων σε κάθε κολόνα

ξεχωριστά, τότε η συνολική φόρτιση της κατασκευής, στη διαμόρφωση της οποίας συντελούν στο μέγιστο βαθμό οι συνολικές αδρανειακές δυνάμεις στις κολόνες, εξαρτάται άμεσα από την διαφορά φάσης που αναδεικνύεται στην ακόλουθη σχέση.

$$\theta_{C3} = (kx_{C3} - \omega t) = (k(x_{C1} + B) - \omega t) = \left(\theta_{C1} + 2\pi \frac{B}{\lambda} \right) \quad (5.4.1.1)$$

Σχετικά με τον κυματισμό της συνθήκης φόρτισης LC1, εξαιτίας του μήκους κύματός του και κατ' επέκταση της διαφοράς φάσης που προκύπτει, η συνολική αδρανειακή φόρτιση μεγιστοποιείται όταν οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κολόνα είναι ομόρροπες και σχετικά κοντά στην μέγιστη τιμή τους. Αυτό ισχύει τόσο για την θετική φορά των δυνάμεων, δηλαδή ίδια με την κατεύθυνση του κυματισμού, όσο και για την αρνητική (αντίθετη της διεύθυνσης). Οι αρνητικές αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες λαμβάνουν μεγαλύτερη μέγιστη τιμή απ' ότι οι αντίστοιχες θετικές, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζονται έντονες διαφορές στην διακύμανσή τους, όπως συμβαίνει για τον κυματισμό της συνθήκης LC2.

Η διαφορά φάσης που διαμορφώνεται από το μήκος κύματος της συνθήκης LC2, έχει ως αποτέλεσμα η συνολική αδρανειακή φόρτιση να είναι μέγιστη όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στις κολόνες C1,C2 είναι αντίρροπες από τις δυνάμεις που ασκούνται στην κολόνα C3. Αυτός είναι και ο λόγος που, παρότι σε κάθε κολόνα ξεχωριστά οι δυνάμεις από την συνθήκη LC2 προκύπτουν μεγαλύτερες, η συνολική αδρανειακή φόρτιση είναι μικρότερη από την αυτή της συνθήκης LC1. Η μέγιστη συνολική αδρανειακή δύναμη, στην θετική της φορά, εμφανίζεται όταν οι θετικές δυνάμεις στις κολόνες C1,C2 είναι σχεδόν μέγιστες, ενώ παράλληλα είναι σχεδόν μέγιστη και η αρνητική αδρανειακή δύναμη που ασκείται στην κολόνα C3.

Συνοψίζοντας, από την σύγκριση των αδρανειακών δυνάμεων στις κολόνες, που αποτελούν την βασική συνιστώσα της συνολικής φόρτισης, προκύπτουν δύο ιδιαίτερος σημαντικά συμπεράσματα για την επιρροή των συνθηκών φόρτισης LC1,LC2 στην κατασκευή. Κατά πρώτον, ο κυματισμός της συνθήκης LC1 έχει ως αποτέλεσμα η κατασκευή στο σύνολο της να δέχεται πολύ μεγαλύτερα φορτία ως προς συγκεκριμένη φορά. Ως εκ τούτου, οι κυματικές φορτίσεις που προκύπτουν από την συνθήκη LC1, ενδεχομένως να είναι χρήσιμες για τον σχεδιασμό έναντι αστοχίας του συστήματος πρόσδεσης της πλωτής εξέδρας. Κατά δεύτερον, ο κυματισμός της συνθήκης LC2 έχει ως αποτέλεσμα, αφενός, σε κάθε μέλος της κατασκευής ξεχωριστά να ασκούνται μεγαλύτερα φορτία, αφετέρου, στις κολόνες C1,C2 και

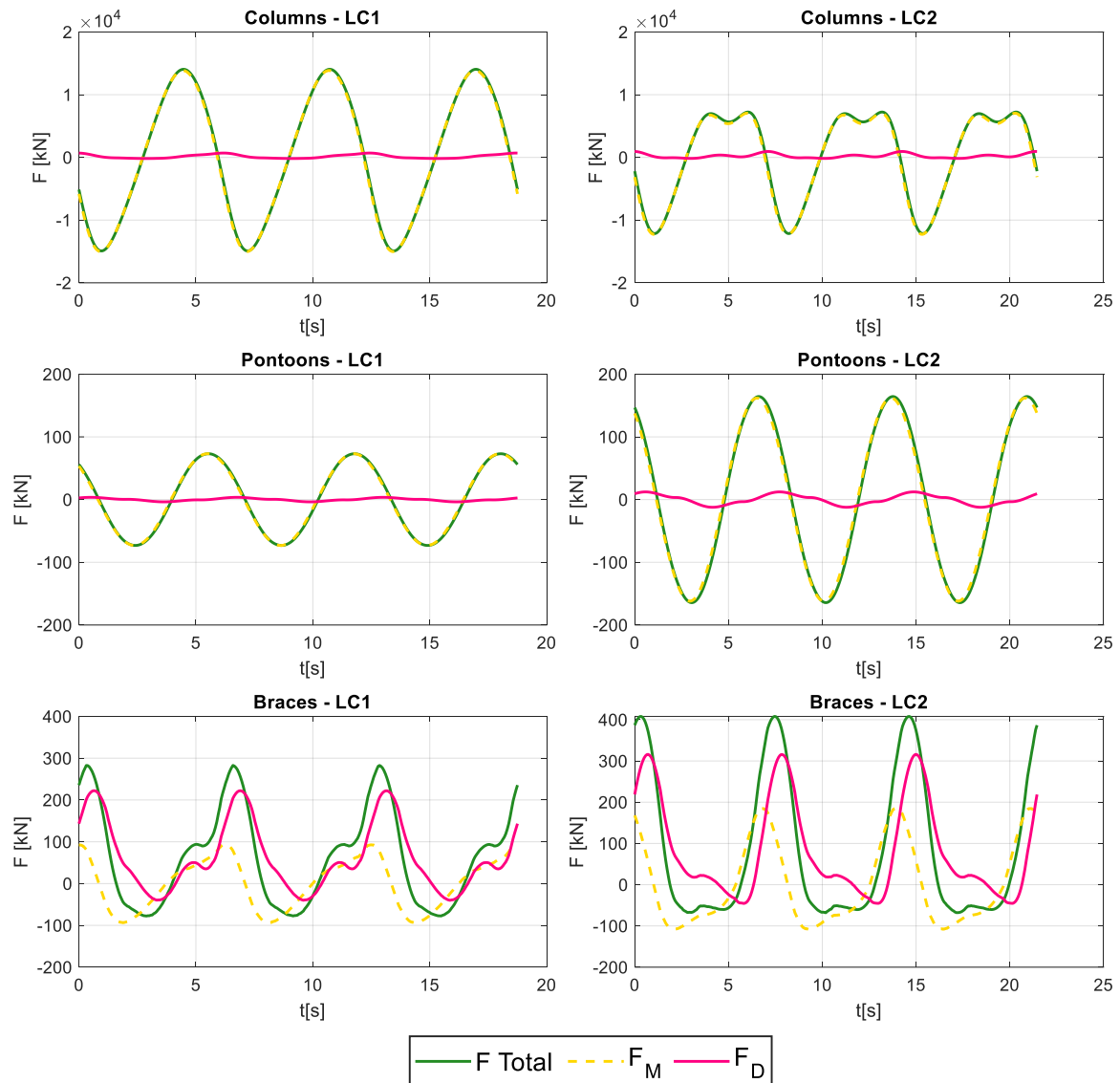
C3 να ασκούνται, ταυτοχρόνως, σχεδόν οι μέγιστες φορτίσεις και μάλιστα η φόρτιση της κολόνας C3 να είναι αντίρροπη των φορτίσεων στις κολόνες C1,C2.

Το γεγονός, ότι οι σχεδόν μέγιστες δυνάμεις ασκούνται ταυτόχρονα στις κολόνες είναι αποτέλεσμα της επιρροής του κυματισμού της συνθήκης LC2, οφείλεται στην περίοδο κορυφής που τον συνοδεύει, αφού είναι το κυματικό μέγεθος που σχετίζεται με το μήκος κύματος λ και κατ' επέκταση καθορίζει την διαφορά φάσης. Για τον ίδιο λόγο, η περίοδος κορυφής της συνθήκης LC1 ευθύνεται για τις αυξημένες ομόρροπες δυνάμεις που ασκούνται στο σύνολο της κατασκευής. Γενική διαπίστωση που απορρέει από όλα τα παραπάνω για τις ημιβυθισμένες πλωτές πλατφόρμες είναι ότι, οι ιδιαιτερότητες των φορτίσεων της κατασκευής διαμορφώνονται, κατά κύριο λόγο, εξαιτίας της συχνότητας του κυματισμού. Κατά συνέπεια, η επιλογή της συνθήκης φόρτισης που λαμβάνεται υπόψη αναλόγως τον τύπο της ανάλυσης και το είδος του σχεδιασμού, δεν αφορά αποκλειστικά ύψος κύματος με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς και την περίοδο κορυφής που το συνοδεύει, αλλά ενδεχομένως χρειάζεται να εξετάζονται ποικίλοι συνδυασμοί ύψους-συχνότητας κύματος ώστε να προσδιορισθούν οι κυματισμοί που προκαλούν τις δυσμενέστερες, κατά περίπτωση, φορτίσεις.

5.4.2 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ STOKES 2^{ΗΣ} ΤΑΞΗΣ

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου, τα διαγράμματα της εικόνας 5.9, στα οποία παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες συνολικής φόρτισης και οι συνιστώσες δυνάμεις της, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, έχουν ως σκοπό να καταδείξουν την κυρίαρχη συνιστώσα φόρτισης σε κάθε κατηγορία. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την επικρατούσα δύναμη σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, όπως φαίνεται, δεν διαφοροποιούνται από τα αντίστοιχα της προηγούμενης παραγράφου. Η αιτία για αυτό είναι η μικρή διαφορά στα αποτελέσματα της κινηματικής ανάμεσα στην θεωρία Airy και Stokes 2^{ης} τάξης, η οποία οδηγεί σε ελάχιστες αποκλίσεις στους αριθμούς KC και Re και κατ' επέκταση στις παραμέτρους C_D και C_M . Συνεπώς, βάσει της κινηματικής της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης, οι κολόνες και οι κύριες συνδετήριες δοκοί καταπονούνται ως επι το πλείστον από αδρανειακές δυνάμεις, ενώ στην φόρτιση των διαγώνιων δοκών συντελούν σημαντικά και οι δύο συνιστώσες, με τις συνολικές συρτικές δυνάμεις, ωστόσο, να παρουσιάζουν αυξημένες έναντι των αδρανειακών. Επιπλέον, στον πίνακα 5.5 παρατίθενται οι μέγιστες κατ' απόλυτω τιμές των συνολικών αδρανειακών και

συρτικών δυνάμεων και της συνολικής φόρτισης, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών.

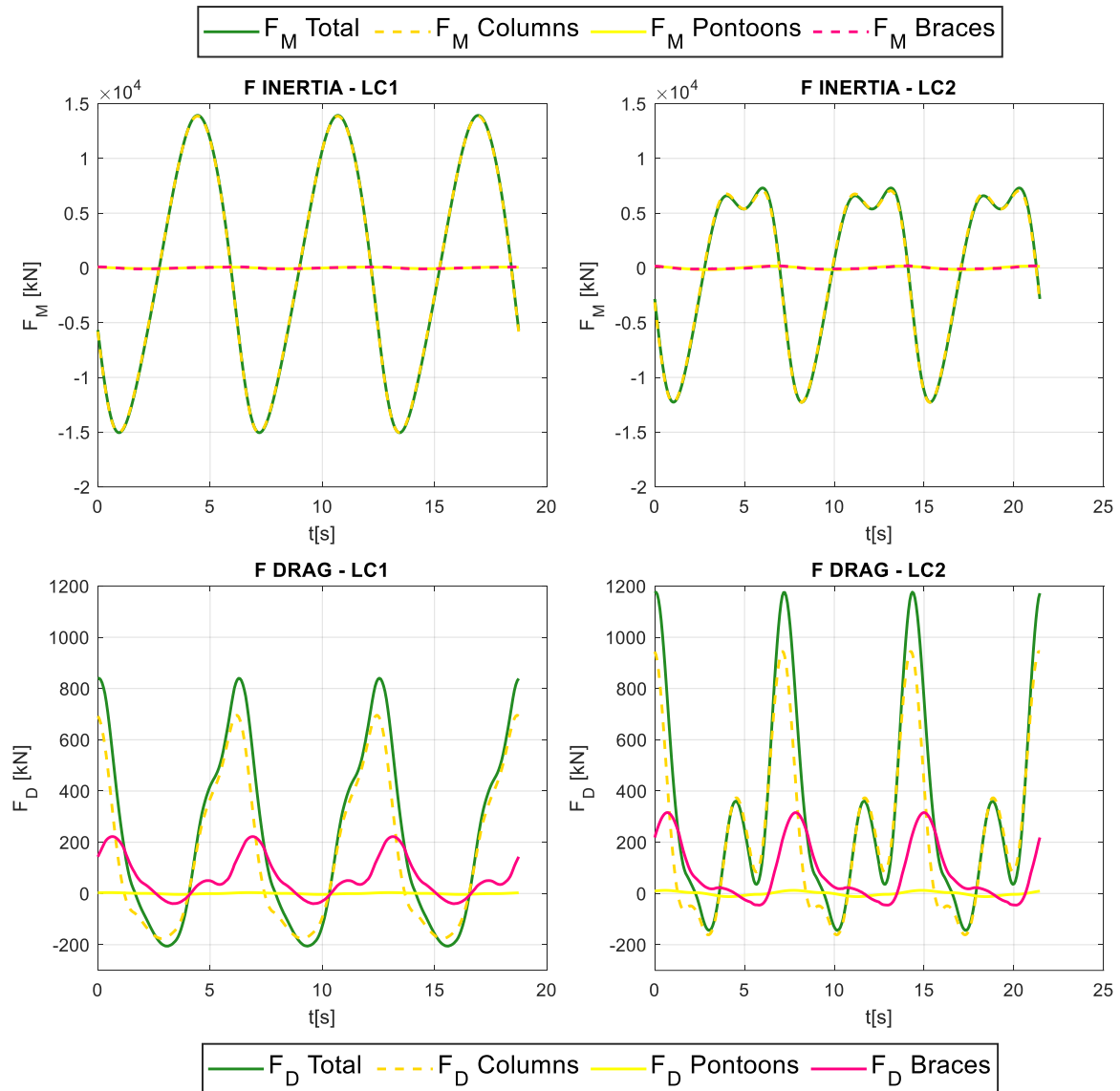


Εικόνα 5.9: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

Πίνακας 5.5: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης.

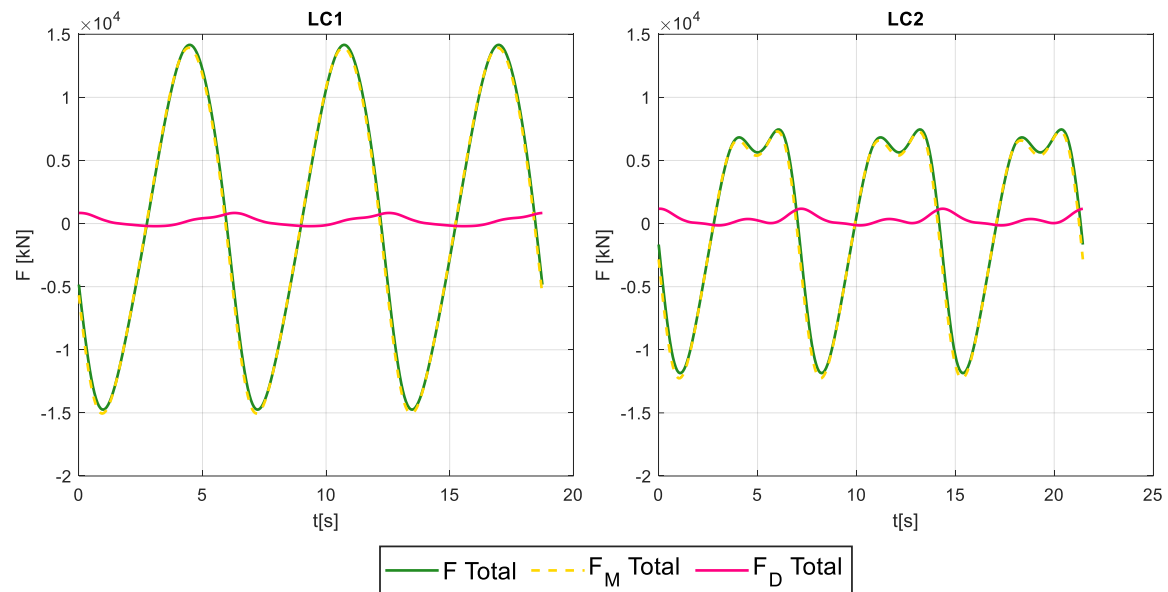
συνθήκη φόρτισης	Κατηγορία δομικών μελών	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	Κολόνες (columns)	15031	696	14922
	Κύριες δοκοί (pontoons)	73	3	73
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	94	222	282
LC2	Κολόνες (columns)	12280	945	12150
	Κύριες δοκοί (pontoons)	164	12	162
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	184	316	408

Στην συνέχεια, στα διαγράμματα της εικόνας 5.10 παρουσιάζονται οι αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, αλλά και σε κάθε κατηγορία μελών, ξεχωριστά. Κατά πρώτον, παρατηρείται ότι οι αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται στις κολόνες αποτελούν το συντριπτικό ποσοστό των συνολικών αδρανειακών δυνάμεων στην κατασκευή. Κατά δεύτερον, οι συρτικές δυνάμεις στις κολόνες και στις διαγώνιες δοκούς είναι αυτές που διαμορφώνουν την συνολική συρτική φόρτιση της κατασκευής. Οι διαπιστώσεις, που προαναφέρθηκαν για τα εν λόγω διαγράμματα, αλλά και τα αίτια που τις διαμορφώνουν, ταυτίζονται πλήρως με εκείνα που προέκυψαν από τα αντίστοιχα διαγράμματα βάσει της κινηματικής από την θεωρία Airy. Το γεγονός αυτό, όπως και προηγουμένως, οφείλεται στις μικρές διαφορές ανάμεσα στις τιμές των κινηματικών μεγεθών από τις δύο θεωρίες.



Εικόνα 5.10: Αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

Το γεγονός, ότι δε υπάρχει ποιοτική διαφοροποίηση ανάμεσα στα διαγράμματα που προκύπτουν από την θεωρία Airy και Stokes 2^{ης} τάξης, εξακολουθεί να ισχύει και για τα διαγράμματα της εικόνας 5.11, όπου αποτυπώνεται η συνολική φόρτιση της κατασκευής και οι συνιστώσες της. Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση, ότι η φόρτιση της κατασκευής διαμορφώνεται, κατά κύριο βαθμό, από τις αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά σε αυτή. Οι μέγιστες τιμές των συνιστωσών και της συνολικής φόρτισης παρατίθενται στον πίνακα 5.6.



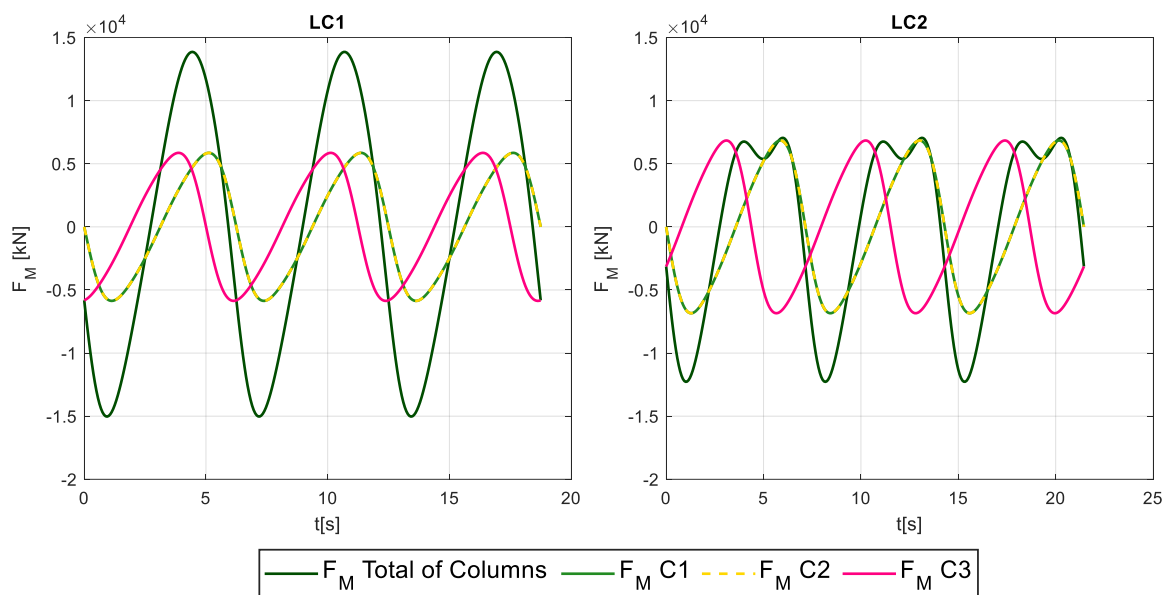
Εικόνα 5.11: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

Πίνακας 5.6: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	15055	840	14746
LC2	12265	1176	11854

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα της εικόνας 5.11, παρατηρείται ξανά ότι, η συνολική φόρτιση που προκύπτει από τον κυματισμό της συνθήκης LC1 είναι αρκετά μεγαλύτερη της φόρτισης από τον κυματισμό της συνθήκης LC2. Για την ερμηνεία του αποτελέσματος αυτού, εξετάζεται η διαμόρφωση των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται συνολικά στις κολόνες, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.12. Καταρχάς, διαπιστώνεται ότι, μέγιστες αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται μεμονωμένα, σε κάθε μέλος της κατηγορίας, προκύπτουν μεγαλύτερες από την συνθήκη φόρτισης LC2 ($F_{Mmax,C,LC2} = 6843 \text{ kN}$), συγκριτικά με τις μέγιστες αδρανειακές δυνάμεις από την συνθήκη LC1 ($F_{Mmax,C,LC1} = 5865 \text{ kN}$). Επιπλέον, οι μέγιστες συνολικές αδρανειακές δυνάμεις, από την συνθήκη LC1 προκύπτουν όταν οι δυνάμεις στις

κολόνες είναι ομόρροπες και περίπου ίσες μεταξύ τους, ενώ από την συνθήκη LC2 όταν είναι αντίρροπες και σχεδόν μέγιστες. Επομένως, οι διαφορές που προκύπτουν στις συνολικές φορτίσεις της κατασκευής από κάθε κυματική συνθήκη, των οποίων το εύρος τιμών καθορίζεται από την επαλληλία των αδρανειακών δυνάμεων στις κολόνες, είναι αποτέλεσμα της διαφοράς φάσης και κατ' επέκταση της συχνότητας του κυματισμού της εκάστοτε συνθήκης.



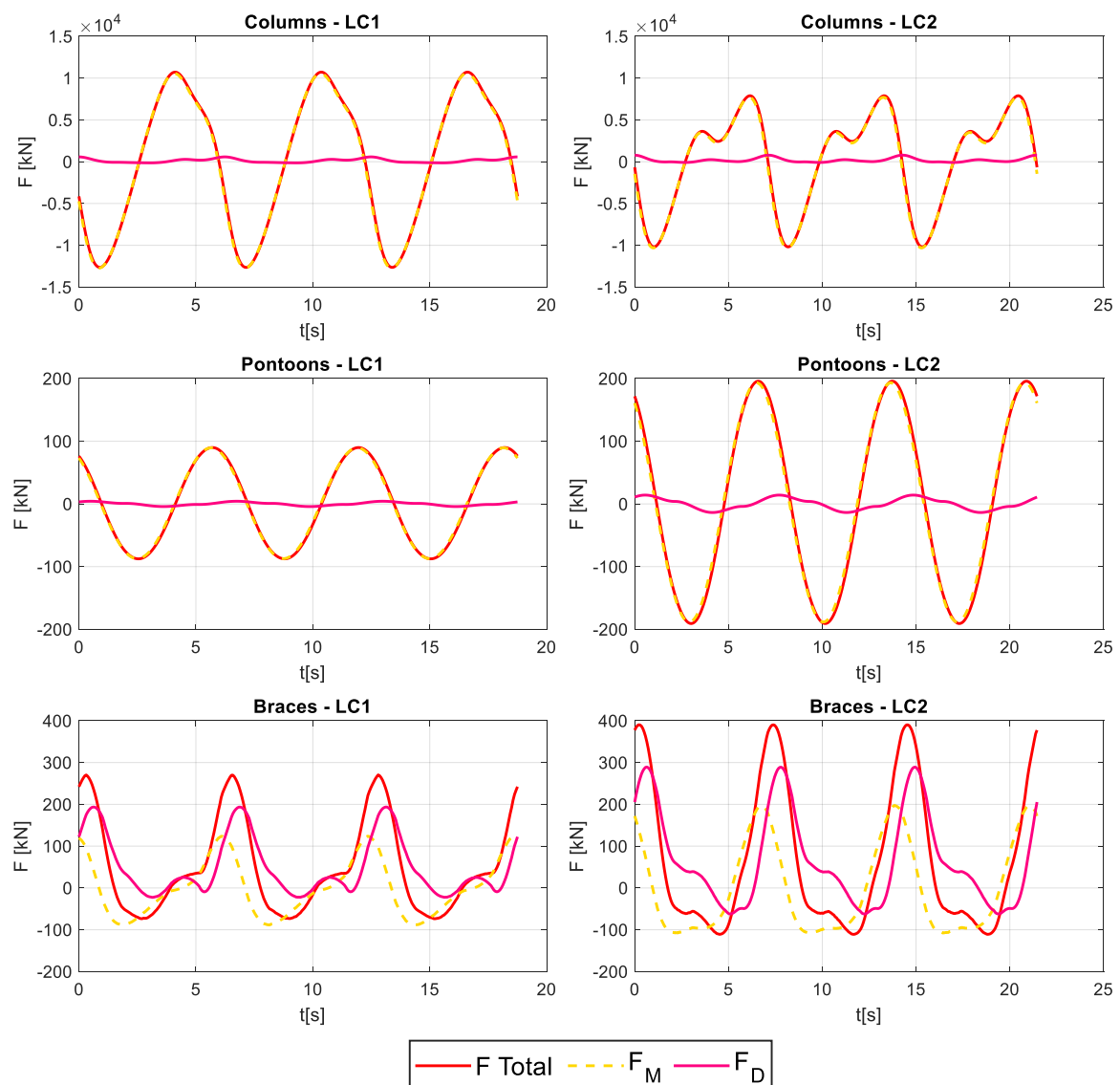
Εικόνα 5.12: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

5.4.3 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ STOKES 5^{ΗΣ} ΤΑΞΗΣ

Από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα οποία σχετίζονται με τις κυματικές φορτίσεις της κατασκευής με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης, καθίσταται σαφές ότι τα ποιοτικά αποτελέσματα, σχετικά με την κυρίαρχη συνιστώσα φόρτισης της εκάστοτε κατηγορίας δομικών μελών, την κατηγορία των δομικών μελών που παραλαμβάνει τις μεγαλύτερες δυνάμεις και τις κύριες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, δε διαφοροποιούνται από εκείνα που διαμορφώθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους, καθώς τα κινηματικά μεγέθη που υπολογίζονται από την θεωρία Stokes 5th δεν αλλάζουν σημαντικά τις παραμέτρους C_D και C_M , από τις οποίες καθορίζεται η φύση της κυματικής

φόρτισης. Ως εκ τούτου, οι αιτίες για τα αποτελέσματα που ακολουθούν, έχουν ήδη αναλυθεί στις προηγούμενες παραγράφους του υποκεφαλαίου.

Στα διαγράμματα της εικόνας 5.13 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες συνολικής φόρτισης των κολόνων, των κύριων και των διαγώνιων δοκών σε συνδυασμό με τις συνιστώσες της συρτικής και αδρανειακής δύναμης, ενώ στον πίνακα 5.7 οι μέγιστες τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών. Διαπιστώνεται ότι, οι αδρανειακές δυνάμεις κυριαρχούν στην φόρτιση των κολόνων και των κύριων συνδετήριων δοκών, ενώ στην φόρτιση των διαγώνιων δοκών μετέχουν σημαντικά και οι συρτικές δυνάμεις οι οποίες είναι αυξημένες σε σχέση με τις αδρανειακές.

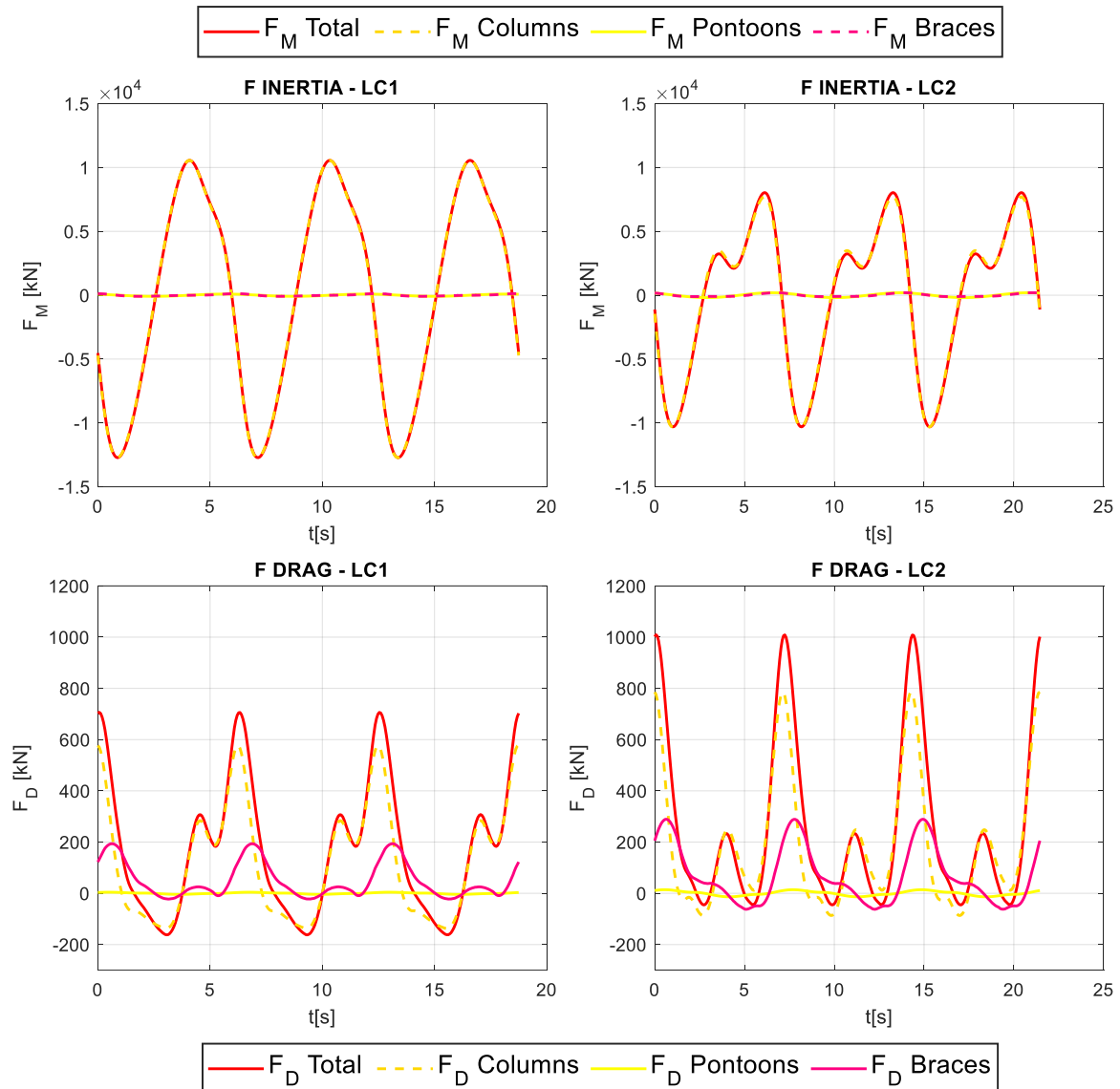


Εικόνα 5.13: Οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών, που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

Πίνακας 5.7: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε κατηγορία δομικών μελών, με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης	Κατηγορία δομικών μελών	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	Κολόνες (columns)	12724	577	12644
	Κύριες δοκοί (pontoons)	89	4	89
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	123	193	270
LC2	Κολόνες (columns)	10316	785	10190
	Κύριες δοκοί (pontoons)	193	14	195
	Διαγώνιες δοκοί (braces)	197	289	390

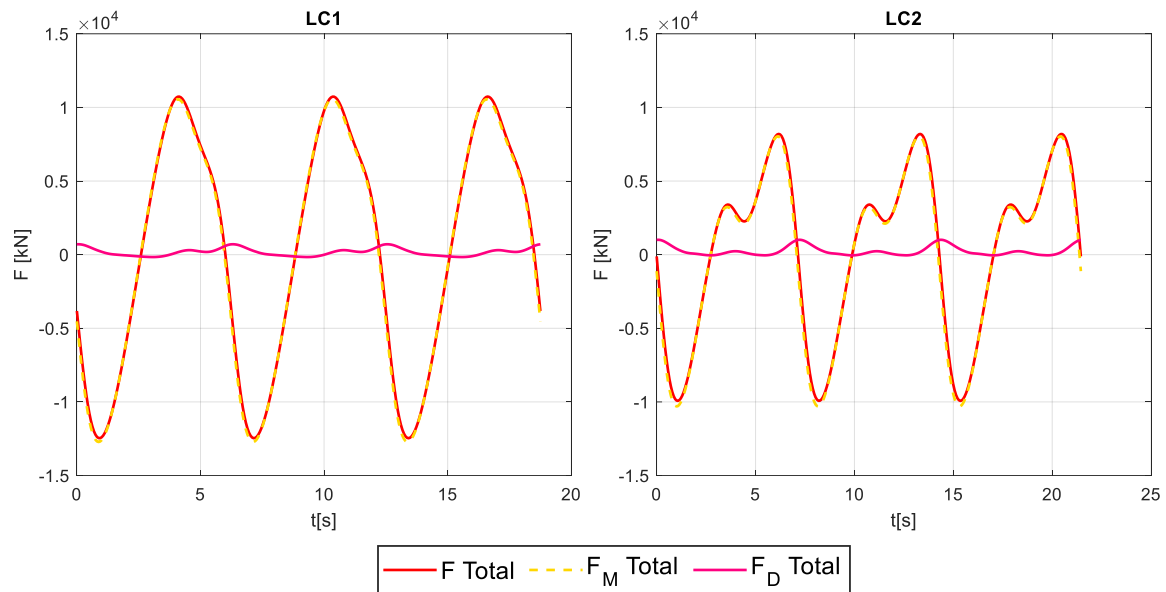
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (εικόνα 5.14), αποτυπώνονται οι αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται στο σύνολο κάθε κατηγορίας δομικών μελών, αλλά και συνολικά στην κατασκευή. Οι αδρανειακές δυνάμεις στις κολόνες είναι ασυγκρίτως μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στις υπόλοιπες δύο κατηγορίες μελών και κατά συνέπεια φαίνεται να καθορίζουν το εύρος τιμών της αδρανειακής συνιστώσας της συνολικής φόρτισης. Επίσης, οι συρτικές δυνάμεις που ασκούνται στις κολόνες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις συρτικές δυνάμεις στις διαγώνιες δοκούς, οι οποίες παρόλα αυτά συντελούν καθοριστικά στην διαμόρφωση της συρτικής συνιστώσας της συνολικής φόρτισης.



Εικόνα 5.14: Αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή αλλά και σε κάθε κατηγορία δομικών μελών ξεχωριστά, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

Εν τέλει, παρουσιάζεται η συνολική φόρτιση της κατασκευής και οι συνιστώσες δυνάμεις της, όπως προκύπτει για κάθε κυματισμό των συνθηκών LC1, LC2 (εικόνα 5.15) και οι μέγιστες τιμές τους παρατίθενται στον πίνακα 5.8. Παρατηρείται ότι, οι αδρανειακές δυνάμεις αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης της κατασκευής. Επίσης, η συνολική φόρτιση της κυματικής συνθήκης LC1 είναι σημαντικά αυξημένη σε σχέση με την συνολική φόρτιση της συνθήκης LC2, παρά το γεγονός ότι οι αδρανειακές δυνάμεις μεμονωμένα σε κάθε κολόνα,

προκύπτουν μεγαλύτερες από την δεύτερη συνθήκη φόρτισης ($F_{M_{max,C,LC2}} = 6509 \text{ kN}$), έναντι αυτών της πρώτης ($F_{M_{max,C,LC1}} = 5610 \text{ kN}$) (εικόνα 5.16).

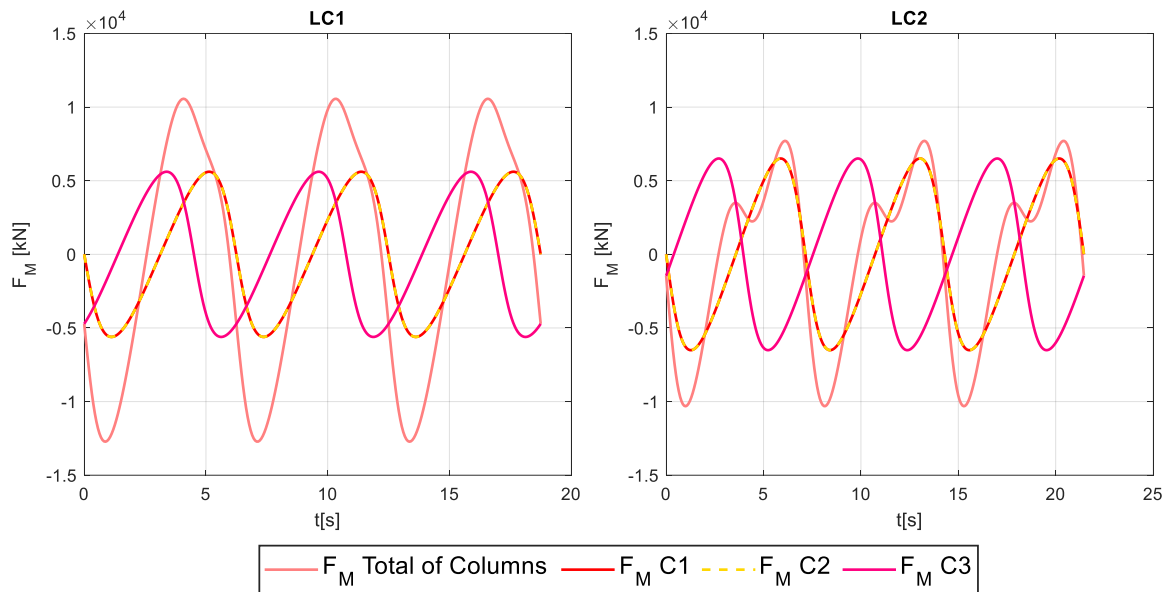


Εικόνα 5.15: Συνολική κυματική φόρτιση της πλατφόρμας WindFloat και συνιστώσες δυνάμεις, για κάθε συνθήκη φόρτισης από την περιοχή μελέτης, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

Πίνακας 5.8: Μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στην κατασκευή, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

συνθήκη φόρτισης	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	12721	706	12466
LC2	10307	1009	9930

Το παράδοξο της συγκριτικά μεγαλύτερης συνολικής φόρτισης από την συνθήκη LC1, εξηγείται εφόσον ληφθεί υπόψη η διαμόρφωση των συνολικών αδρανειακών δυνάμεων στις κολόνες (εικόνα 5.16), την οποία καθορίζει η διαφορά φάσης που παρουσιάζει ο κυματισμός, ανάλογα των θέσεων των κολόνων στον άξονα διεύθυνσής του. Επομένως όπως έχει ήδη αναφερθεί, η φορά και η ένταση των δυνάμεων που ασκούνται στην κατασκευή σχετίζεται άμεσα με τον λόγο B/λ και κατ' επέκταση με την συχνότητα του κυματισμού.



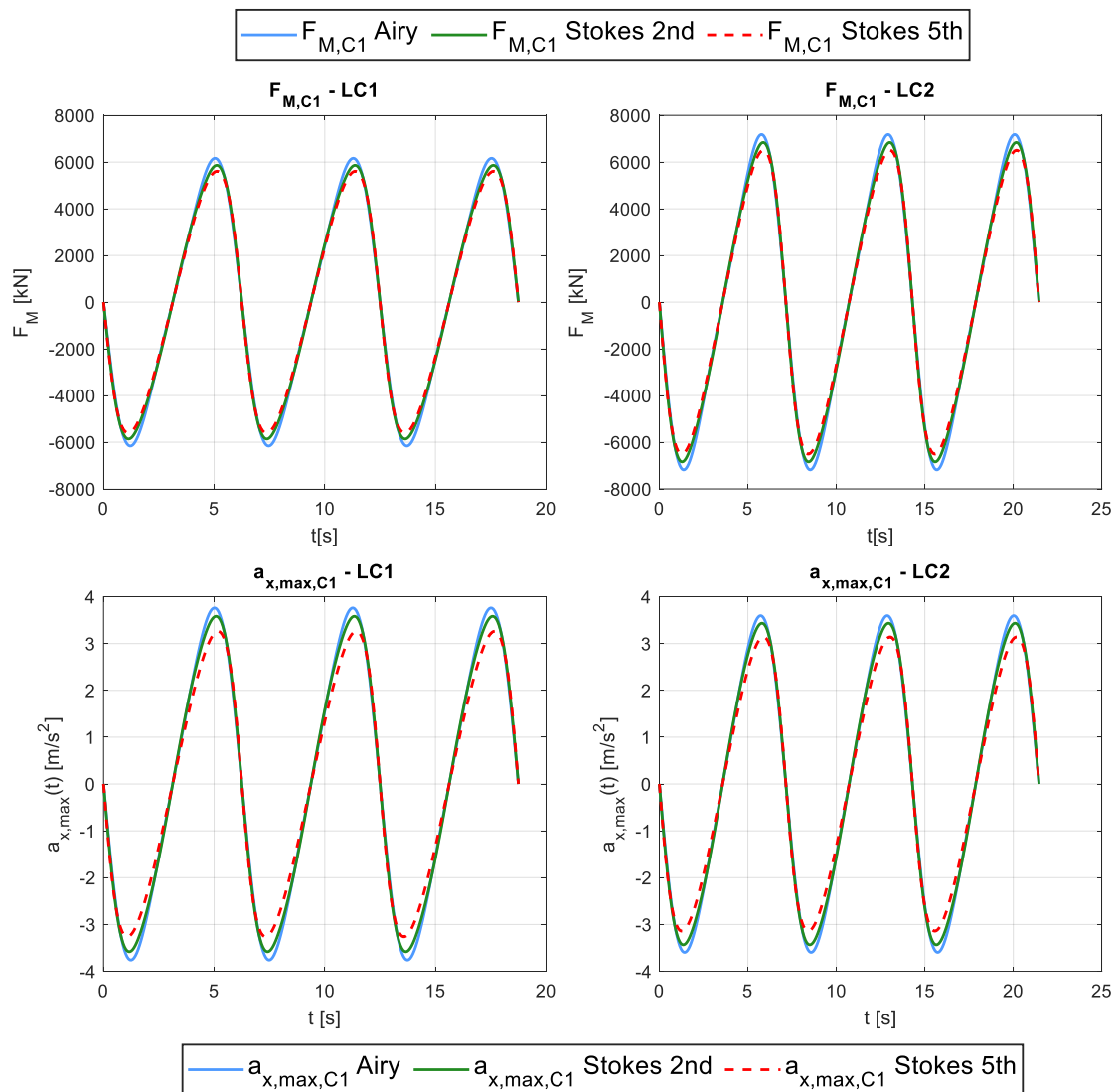
Εικόνα 5.16: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα, σε κάθε μία από αυτές, βάσει της κινηματικής από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

5.4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Για να κατανοηθούν οι διαφορές των φορτίσεων, που προκύπτουν από κάθε κυματική θεωρία, στο σύνολο της κατασκευής, κρίνεται σκόπιμο αρχικώς να εξεταστούν οι δυνάμεις που ασκούνται μεμονωμένα σε μια κολόνα, καθώς το σύνολο των ασκούμενων δυνάμεων στην κατηγορία αυτή είναι που διαμορφώνει, κατά κύριο βαθμό, την τελική συνολική φόρτιση. Συνεπώς, στα διαγράμματα της εικόνας 5.17 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες, της αδρανειακής δύναμης που ασκείται στην κολόνα C1 όπως προκύπτει από κάθε κυματική θεωρία και της οριζόντιας επιτάχυνσης στην ελεύθερη επιφάνεια και σε θέση $x=x_{C1}$. Επίσης, στην εικόνα 5.18 αποτυπώνονται οι χρονοϊστορίες της συρτικής δύναμης για κάθε κυματική θεωρία και της οριζόντιας ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια και σε θέση $x=x_{C1}$. Σημειώνεται ότι τα κινηματικά μεγέθη λαμβάνουν την μέγιστη, ως προς την κατακόρυφη θέση, τιμή τους στην ελεύθερη επιφάνεια. Επίσης, η οριζόντια ταχύτητα και επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια όπως παρουσιάζονται παρακάτω, αποτελούν την πρώτη τιμή στην κατανομή των αντίστοιχων μεγεθών σε κάθε χρονική στιγμή, κατά το βάθος, όπως παρουσιάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Για τον υπολογισμό της αδρανειακής και συρτικής δύναμης σε κάθε χρονική

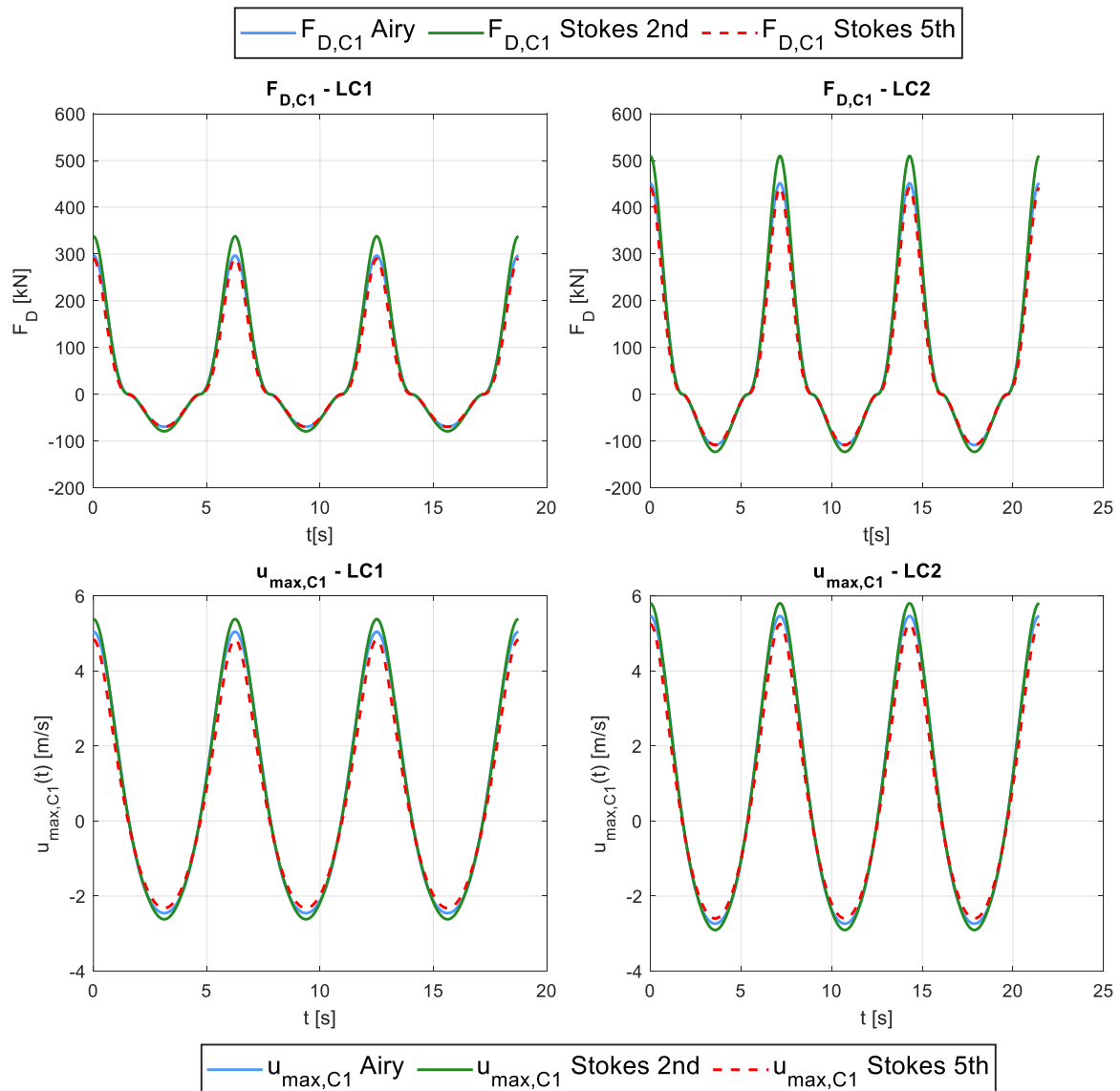
στιγμή, λαμβάνεται η ολοκλήρωση της κατανομής της επιτάχυνσης και της ταχύτητας, αντίστοιχα.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα της εικόνας 5.17, οι μεγαλύτερες αδρανειακές δυνάμεις προκύπτουν από την θεωρία Airy, με τις δυνάμεις από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης να ακολουθούν και τις προκύπτουσες από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης αδρανειακές δυνάμεις να λαμβάνουν τις μικρότερες τιμές. Τα προηγούμενα αποτελέσματα ταυτίζονται πλήρως με αυτά που προκύπτουν για την οριζόντια επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια. Οι μέγιστες τιμές της οριζόντιας επιτάχυνσης που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, αντιστοιχούν σε εκείνες που καταγράφηκαν στον πίνακα 4.10 .



Εικόνα 5.17: Χρονοϊστορίες αδρανειακών δυνάμεων και μέγιστης επιτάχυνσης, στην κολόνα C1 από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.

Το ίδιο ισχύει και για τα διαγράμματα της εικόνας 5.18, καθώς οι μικρότερες τιμές της συρτικής δύναμης φαίνονται να προκύπτουν και πάλι από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης ενώ οι μεγαλύτερες για την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, δηλαδή ότι ακριβώς ισχύει και για τις μέγιστες ταχύτητες στην ελεύθερη επιφάνεια. Οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας των ακόλουθων διαγραμμάτων αντιστοιχούν σε εκείνες που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.9.

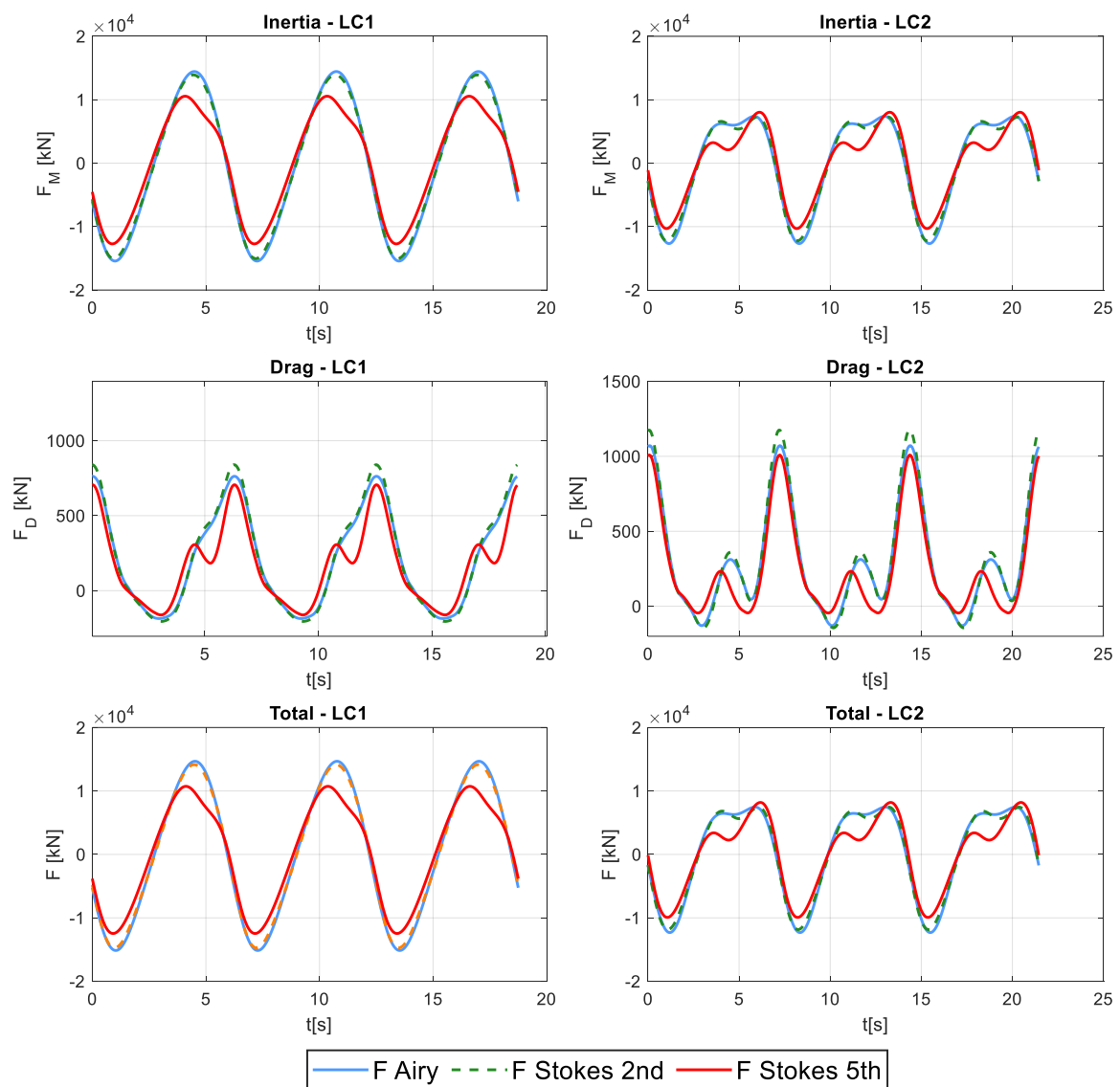


Εικόνα 5.18: Χρονοϊστορίες συρτικών δυνάμεων και μέγιστης ταχύτητας, στην κολόνα C1 από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.

Από τα παραπάνω γίνεται ξεκάθαρο, ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης από κάθε κυματική θεωρία, συνεπάγεται παρόμοια διαφορά ανάμεσα στις συρτικές ή αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται στο εκάστοτε μέλος. Ωστόσο, εξαιτίας της επαλληλίας των δυνάμεων αναμένεται οι συνολικές φορτίσεις και οι συνιστώσες αυτών να διαφοροποιούνται. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται από τα διαγράμματα της εικόνας 5.19, στα οποία παρουσιάζονται οι συνολικές αδρανειακές και συρτικές δυνάμεις που υπολογίζονται με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία όπως και η τελική φόρτιση στο σύνολο της κατασκευής.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις συνολικές συρτικές δυνάμεις, οι μέγιστες τιμές τους φαίνεται να ακολουθούν τις μέγιστες τιμές της ταχύτητας όπως υπολογίζεται από κάθε κυματική θεωρία, καθώς οι μεγαλύτερες μέγιστες συρτικές δυνάμεις προκύπτουν από την θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης ενώ οι μικρότερες από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι σε ορισμένα χρονικά διαστήματα η διακύμανση των συνολικών συρτικών δυνάμεων από την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης διαφέρει σημαντικά από την διακύμανση των συρτικών δυνάμεων που προκύπτουν από τις άλλες δύο θεωρίες, για τις οποίες μάλιστα οι τιμές των συρτικών δυνάμεων διαφοροποιούνται μεν, αλλά η μεταβολή αυτών ως προς τον χρόνο ταυτίζεται.

Η αντίστοιχη διαπίστωση με την τελευταία της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει και από τις χρονοϊστορίες των συνολικών αδρανειακών δυνάμεων, αφού οι δυνάμεις από τις θεωρίες Airy, Stokes 2^{ης} τάξης διακυμαίνονται κατά τον ίδιο τρόπο σε όλο το χρονικό διάστημα που παρουσιάζεται. Δεν ισχύει το ίδιο όμως και για τις συνολικές αδρανειακές δυνάμεις με βάση την κινηματική της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης, αφού σε ορισμένα χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία διαμορφώνονται οι μέγιστες θετικές αδρανειακές δυνάμεις, εντοπίζονται έντονες διαφορές στον τρόπο μεταβολής αυτών σε σχέση με την μεταβολή των αδρανειακών δυνάμεων από τις θεωρίες Airy και Stokes 2^{ης} τάξης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούν και το διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται η συνολική φόρτιση της κατασκευής, διότι αυτή διαμορφώνεται κυρίως από τις συνολικές αδρανειακές δυνάμεις. Επισημαίνεται στον πίνακα 5.9 καταγράφονται οι μέγιστες αδρανειακές συρτικές δυνάμεις και η μέγιστη φόρτιση, όπως προκύπτουν από την κινηματική από τις θεωρίες κανονικών κυματισμών που ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα εργασία.



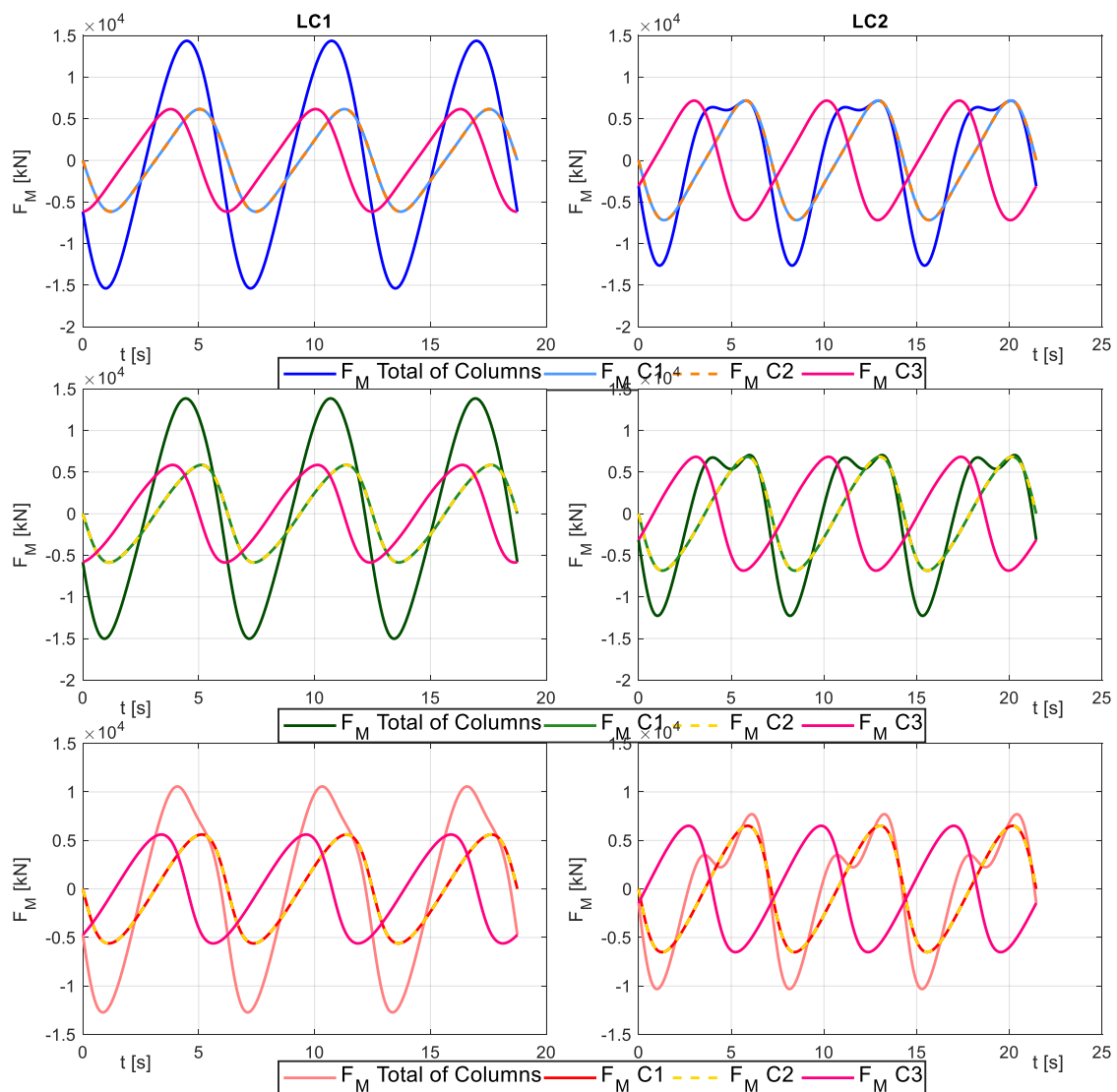
Εικόνα 5.19: Χρονοϊστορίες συνολικής κυματικής φόρτισης στην κατασκευή και συνιστωσών δυνάμεων, από κάθε κυματική θεωρία και συνθήκη φόρτισης.

Πίνακας 5.9: Μέγιστες συνολικές δυνάμεις και μέγιστη συνολική φόρτιση στην κατασκευή, όπως προκύπτουν με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία και για κάθε συνθήκη φόρτισης.

συνθήκη φόρτισης	κυματική θεωρία	max Inertia F_M [kN]	max Drag F_D [kN]	max Total F_{tot} [kN]
LC1	Airy	15427	763	15145
	Stokes 2ης	15055	840	14746
	Stokes 5ης	12721	706	12466
LC2	Airy	12675	1071	12325
	Stokes 2ης	12265	1176	11854
	Stokes 5ης	10307	1009	9930

Οι διαφοροποιήσεις οι οποίες επισημάνθηκαν προηγουμένως, ανάμεσα στις χρονοϊστορίες των συνιστωσών δυνάμεων και της συνολικής φόρτισης από κάθε κυματική θεωρία, οφείλονται στο μήκος κύματος που εκτιμάται από την εκάστοτε θεωρία. Για να γίνει κατανοητός ο παραπάνω ισχυρισμός, ενδεικτικά εξετάζεται η διαμόρφωση της συνολικής φόρτισης της κατασκευής που προκύπτει από κάθε κυματική θεωρία, και πάλι μέσω της εξέτασης των συνολικών αδρανειακών δυνάμεων στις κολόνες (εικόνα 5.20). Όπως επανειλημμένως έχει αναφερθεί, η διαφορά φάσης και κατ' επέκταση ο λόγος B/λ είναι τα χαρακτηριστικά που, εν τέλει, διαμορφώνουν τις συνολικές αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται ταυτόχρονα στις κολόνες και συνεπώς στις προηγούμενες παραγράφους, οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις χρονοϊστορίες της συνολικής φόρτισης, αποδόθηκαν στο μήκος κύματος λ που προκύπτει από την εκάστοτε συνθήκη φόρτισης. Εν προκειμένω, εφόσον δε συγκρίνονται οι συνολικές φορτίσεις που προκύπτουν από διαφορετικούς κυματισμούς, αλλά από διαφορετικές κυματικές θεωρίες, πρέπει να ληφθεί υπόψη το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε κάθε κυματική θεωρία. Επομένως, το γεγονός ότι, τόσο στην Airy θεωρία όσο και στην θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης ισχύει η γραμμική εξίσωση διασποράς (σχέση 4.1.1.6), συνεπάγεται ότι ο κυματαριθμός k και ως εκ τούτου το μήκος κύματος λ προκύπτουν ίσα από τις εν λόγω θεωρίες. Αντιθέτως, στην θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης ο κυματαριθμός k προκύπτει

από την μη γραμμική εξίσωση διασποράς (σχέση 4.1.3.2) και συνεπώς διαφέρει από το αντίστοιχο μέγεθος των προηγούμενων θεωριών, με συνέπεια να ισχύει το ίδιο και για το μήκος κύματος. Εξαιτίας όλων των παραπάνω, οι συνολικές αδρανειακές δυνάμεις και η συνολική φόρτιση της κατασκευής από τις θεωρίες Airy και Stokes 2^{ης} τάξης παρουσιάζουν όμοιες διακυμάνσεις καθ' όλο το χρονικό διάστημα, ενώ τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν βάσει της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης, μεταβάλλονται με διαφορετικό τρόπο.



εικόνα 5.20: Αδρανειακές δυνάμεις που ασκούνται συνολικά στις κολόνες και μεμονωμένα σε κάθε μία από αυτές, όπως προκύπτουν με βάση την κινηματική από κάθε κυματική θεωρία και για κάθε συνθήκη φόρτισης.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διερεύνηση των κυματικών φορτίσεων που δέχεται η πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα έδρασης ανεμογεννητριών WindFloat, δυνητικά εγκατεστημένη στο θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1, αναλύονται ακολούθως.

Κατά αρχάς, γίνεται σαφές ότι, για τον υπολογισμό των φορτίσεων της κατασκευής που διαμορφώνονται από τις συνήθεις κυματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μετασχηματισμοί των κυματισμών όπως η περίθλαση. Επίσης, η εξίσωση Morison για τον υπολογισμό των φορτίσεων στην κατασκευή μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως για ακραίες κυματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, όπως αυτές που ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα εργασία.

Αναφορικά με την συνολική φόρτιση της κατασκευής από κάθε κυματική θεωρία, οι μεγαλύτερες μέγιστες τιμές προέκυψαν με βάση την κινηματική της θεωρίας Airy και για τις δύο κυματικές συνθήκες φόρτισης (LC1, LC2), με τις τιμές από την μη γραμμική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης να κυμαίνονται σχετικά κοντά. Οι μικρότερες μέγιστες φορτίσεις στην κατασκευή υπολογίστηκαν με βάση την κινηματική της πλήρως μη γραμμικής κυματικής θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, αφενός, οι κυματισμοί των συνθηκών LC1, LC2 χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές καμπυλότητας ε και συνεπώς ιδιαίτερα απότομοι, αφετέρου ότι, από το διάγραμμα Le Mehaute προκύπτει πως η βέλτιστη περιγραφή του κυματικού πεδίου διαμορφώνεται από την θεωρία Stokes με τρεις ή και παραπάνω όρους, μπορεί να διατυπωθεί ο ισχυρισμός ότι, η περιγραφή του κυματικού πεδίου με τις θεωρίες Airy και Stokes 2^{ης} τάξης έχει ως αποτέλεσμα οι μέγιστες τιμές της συνολικής φόρτισης να υπερεκτιμούνται, ενώ πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα να προκύπτουν από την περιγραφή των κυματισμών με την θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης.

Από την σύγκριση ανάμεσα στις χρονοϊστορίες των συνολικών φορτίσεων που προκύπτουν από τις κυματικές συνθήκες LC1 και LC2, εξήχθησαν εξαιρετικώς ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, ο κυματισμός της συνθήκης LC1 οδηγεί σε μικρότερες αδρανειακές δυνάμεις στις κολόνες, ωστόσο η κατασκευή στο σύνολο της δέχεται μεγαλύτερα ομόρροπα φορτία. Αντίθετα, ο κυματισμός της συνθήκης LC2 έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αδρανειακές δυνάμεις ασκούμενες μεμονωμένα σε κάθε κολόνα, ενώ η τελική συνολική φόρτιση παρουσιάζεται μικρότερη, καθώς διαμορφώνεται όταν οι δυνάμεις στις κολόνες C1, C2 και στην κολόνα C3 λαμβάνουν υψηλές τιμές και είναι μεταξύ τους αντίρροπες. Κρίσιμη

διαπίστωση απετέλεσε, επίσης, το γεγονός ότι, η χρονοϊστορία της συνολικής φόρτισης της κατασκευής, η οποία διαμορφώνεται κυρίως από την επαλληλία των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στις κολόνες, εξαρτάται άμεσα από την γεωμετρία της κατασκευής και την συχνότητα των κυματισμών, αφού ο λόγος της απόστασης ανάμεσα στις κολόνες B [m] προς το μήκος κύματος λ [m] (B/λ), όπως παρουσιάστηκε στην σχέση 5.4.1.1, καθορίζει την διαφορά φάσης. Συνεπώς στον λόγο B/λ οφείλονται οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι χρονοϊστορίες της συνολικής φόρτισης από κάθε κυματική συνθήκη, όπως και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Το γενικότερο συμπέρασμα που μπορεί να διατυπωθεί για την ημιβυθισμένη πλατφόρμα είναι ότι, αναλόγως τον τύπο ανάλυσης και σχεδιασμού, η επιλογή της συνθήκης φόρτισης δεν αφορά αποκλειστικά ύψος κύματος με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς και την περίοδο κορυφής που το συνοδεύει, αλλά ενδεχομένως χρειάζεται να εξετάζονται ποικίλοι συνδυασμοί ύψους-συχνότητας κύματος ώστε να προσδιορισθούν οι κυματισμοί που προκαλούν τις δυσμενέστερες, κατά περίπτωση, φορτίσεις.

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την κατανόηση και την ποσοτικοποίηση των κυματικών φορτίσεων που ασκούνται σε πλωτή ανεμογεννήτρια, υπό ρεαλιστικές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το θαλάσσιο τεμάχιο Κρήτη 1. Ωστόσο, εξαιτίας της δυσχέρειας ως προς τον σαφή προσδιορισμό της επιρροής των περιβαλλοντικών συνθηκών στο σύστημα, σε συνδυασμό με τις υψηλές απαιτήσεις ως προς την απόδοση του έργου, για την υλοποίηση του εν λόγω εγχειρήματος απαιτείται περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση, τόσο σε επίπεδο επιστημονικής ανάλυσης όσο και πρακτικής εφαρμογής.

Κατά αρχάς, η χρήση θεωριών πραγματικών κυματισμών θα είχε ως αποτέλεσμα την πιο ρεαλιστική περιγραφή του κυματικού πεδίου, αφού συνεκτιμούν τα στοχαστικά χαρακτηριστικά των κυματισμών. Σε αντίθεση με τις αναλυτικές θεωρίες τύπου Airy ή Stokes που βασίζονται σε μονοχρωματικούς κυματισμούς, οι φασματικές θεωρίες λαμβάνουν υπόψη την συνύπαρξη πολλαπλών κυματικών συνιστωσών με διαφορετική συχνότητα και φάση, όπως συμβαίνει στο πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον. Τα φασματικά μοντέλα, όπως για παράδειγμα το πλήρως μη γραμμικό μοντέλο BST των Bateman, Swan & Taylor (2001), επιτρέπουν την προσομοίωση πολύπλοκων, μη γραμμικών κυματικών πεδίων λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα όπως η εστίαση και η ενέργεια μεταξύ κυματικών συνιστωσών. Η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων θα οδηγούσε στον υπολογισμό των κυματικών φορτίσεων της κατασκευής με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επιπλέον, η μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στην συνδυασμένη επίδραση των κυματικών, αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίσεων που δρουν ταυτόχρονα στις πλωτές ανεμογεννήτριες, καθώς η αλληλεπίδρασή τους καθορίζει την συνολική δυναμική απόκριση της κατασκευής. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων δυναμικών προσομοιώσεων, μέσω εξειδικευμένων λογισμικών, όπως το OrcaFlex και το OpenFAST, όπου λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις του ανέμου, των κυματισμών, των ρευμάτων και του συστήματος αγκύρωσης, είναι απαραίτητη για την αποτίμηση των οριακών και λειτουργικών καταστάσεων αστοχίας.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διερεύνηση της μακροπρόθεσμης εξέλιξης των κύριων κυματικών μεγεθών, όπως το σημαντικό ύψος κύματος H_s και η περίοδος κορυφής T_p , στην περιοχή μελέτης. Εφόσον το χρονικό διάστημα των δεδομένων για τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυματικού πεδίου της περιοχής μελέτης διευρυνθεί, δηλαδή να εκτείνεται από μια πιο μακρινή παρελθοντικά αφετηρία (πχ 1920) έως μελλοντικά έτη (πχ 2050, με χρήση σεναρίων κλιματικής αλλαγής), μπορεί να εξεταστεί η μεταβολή των κυματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης και να προσδιορισθεί η επίδραση της μεταβολής αυτής στον σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών, μελλοντικά χωροθετημένων εντός του θαλάσσιου τεμαχίου Κρήτη 1.

Βιβλιογραφία

- Ελληνική Διαχειριστική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων. (2023). *Εθνικό πρόγραμμα ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων [National development program for offshore wind farms]*.
- Airy, G. B. (1841). *Tides and waves*. In H. J. Rose et al. (Eds.), *Encyclopaedia Metropolitana*.
- Arvan, P. A., Raju, R. D., & Arockiasamy, M. (2023). Offshore wind turbine monopile foundation systems in multilayered soil strata under aerodynamic and hydrodynamic loads: State-of-the-art review. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. <https://doi.org/10.1061/PPSCFX.SCENG-1198>
- Barooni, M., Ahmadi, A., Khazaei, J., & Shafiei, M. (2022). Floating offshore wind turbines: Current status and future prospects. *Energies*, 16(1), Article 256. <https://doi.org/10.3390/en16010256>
- Bilgili, M., Yasar, A., & Simsek, E. (2011). Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 905–915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.006>
- Bitner-Gregersen, E. (1988). Appendix “Joint long term distribution of Hs, Tp.” In H. O. Madsen, P. Rooney, & E. Bitner-Gregersen, *Probabilistic calculation of design criteria for ultimate tether capacity of Snorre TLP (Det Norske Veritas Report No. 87-31)*. Høvik.
- Bitner-Gregersen, E. M. (2005). Joint probabilistic description for combined seas. In *Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2005) (OMAE2005-67382)*. Halkidiki, Greece. <https://doi.org/10.1115/OMAE2005-67382>
- Chakrabarti, S. (1987). *Hydrodynamics of offshore structures*. Computational Mechanics Publications.

- Chatziioannou, K., Katsardi, V., Koukouselis, A., & Mistakidis, E. (2017). The effect of nonlinear wave-structure and soil-structure interactions in the design of an offshore structure. *Marine Structures*, 52, 126–152. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.11.003>
- DNV. (2019). *DNV-RP-0286: Coupled analysis of floating wind turbines*. DNV. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-0286-coupled-analysis-of-floating-wind-turbines/>
- DNV. (2021). *DNV-ST-0119: Floating wind turbine structures*. DNV. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0119-floating-wind-turbine-structures/>
- DNV. (2024). *DNV-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines*. DNV. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0437-loads-and-site-conditions-for-wind-turbines/>
- DNV. (2025). *DNV-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads*. DNV. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c205-environmental-conditions-and-environmental-loads/>
- Ebenhoch, R., Muskulus, M., & Kolstad, M. (2015). Comparative levelized cost of energy analysis. *Energy Procedia*, 80, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.411>
- Edwards, E. C., Holcombe, A., Brown, S., Ransley, E., Hann, M., & Greaves, D. (2023). Evolution of floating offshore wind platforms: A review of at-sea devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113416>
- European Commission. (2025, March 17). *Focus – Wind energy: Powering the clean transition*. https://energy.ec.europa.eu/news/focus-wind-energy-powering-clean-transition-2025-03-17_en
- European Commission. (n.d.). *Offshore renewable energy – European Union*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en
- European Parliament and Council. (2023). *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. Official Journal of the European Union, L 2023/2413. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413>
- EurObserv'ER. (2025). *Wind energy barometer 2025*. EurObserv'ER.

- Fenton, J. D. (1985). A fifth-order Stokes' theory for steady waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(2), 216–234. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(216\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(216))
- Guidehouse. (2020). *Study on the offshore grid potential in the Mediterranean region (Final Report)*. European Commission, Directorate-General for Energy. <https://doi.org/10.2833/742284>
- Hevia-Koch, P., & Jacobsen, H. K. (2019). Comparing offshore and onshore wind development considering acceptance costs. *Energy Policy*, 125, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.015>
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.
- Kaldellis, J. K., & Apostolou, D. (2017). Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy: Comparison with onshore counterpart. *Renewable Energy*, 108, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.039>
- Khan Afridi, S., Zhang, X., Li, W., Ahmed, M., Iqbal, M., & Khan, S. (2024). Winds of progress: An in-depth exploration of offshore, floating, and onshore wind turbines as cornerstones for sustainable energy generation and environmental stewardship. *IEEE Access*, 12, 66147–66166. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405869>
- Le Méhauté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer Verlag.
- Loukogeorgaki, E., Vagiona, D. G., & Lioliou, A. (2022). Incorporating public participation in offshore wind farm siting in Greece. *Wind*, 2(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/wind2010001>
- Lopez, A., Green, R., Williams, T., Lantz, E., Buster, G., & Roberts, B. (2022). *Offshore wind energy technical potential for the contiguous United States*. National Renewable Energy Laboratory (NREL/PR-5000-83650). <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83650.pdf>
- McCoy, A., Musial, W., Hammond, R., Mulas Hernando, D., Duffy, P., Beiter, P., Pérez, P., Baranowski, R., Reber, G., & Spitsen, P. (2024). *Offshore wind market report: 2024 edition*. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/2434294>
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., & Schaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2, 149–154.
- Peiffer, A., Tom, N., Cermelli, C., & Roddier, D. (2013). Estimation of onsite wave parameters from the WindFloat platform. In *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013)* (OMAE2013-10002). Nantes, France. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10002>

- Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Pfeiffer, A. (2017). Summary and conclusions of the full life-cycle of the WindFloat FOWT prototype project. In *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2017)* (Paper No. OMAE2017-62561). ASME. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62561>
- Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Weinstein, A. (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2, 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3435339>
- Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 441–473.
- Tsiara, C., Katsardi, V., Spiliotopoulos, G., & Vasiliades, L. (2025). Optimal and sustainable siting of offshore wind farms in Greece: Environmental considerations, cost analysis, and comparative evaluation of state-proposed development areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 83, Article 104586. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104586>
- WindEurope. (2017). *Floating offshore wind: Vision statement*. WindEurope. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Floating-offshore-statement.pdf>